

ISBN: 978-9930-9769-0-6

XIV
CONGRESO
GEOLOGICO
DE AMÉRICA CENTRAL
&
VII **CONGRESO**
GEOLOGICO
NACIONAL

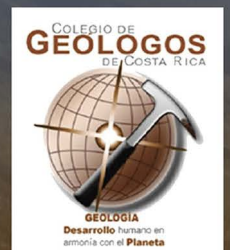


COSTA RICA
2022

Editor:
César Alberto Laurito

M E M O R I A

San José -28 de Junio al 1 de Julio 2022



COLEGIO DE
GEOLOGOS
DE COSTA RICA



GEOLOGÍA
Desarrollo humano en
armonía con el **Planeta**



DGM
DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA Y MINAS
C O S T A R I C A



O|KEITH
ORGANIZACIÓN DE EVENTOS

Radisson[®]
SAN JOSÉ
COSTA RICA

MEMORIA

**XIV Congreso Geológico de
América Central**

&

**VII Congreso Geológico
Nacional**

Editor

César Alberto Laurito

**COLEGIO DE GEÓLOGOS DE COSTA RICA
2022**

Descargo de responsabilidad

Las opiniones expresadas en la presente publicación son las de los autores. No pretenden reflejar las opiniones de la Dirección de Geología y Minas [MINAE], el Colegio de Geólogos de Costa Rica, la Asociación Centroamericana de Estudiantes de Geología o de sus Miembros, el Comité Organizador del Congreso, el Comité Científico, ni del editor de la memoria. Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad del o de los autor(es) de los resúmenes.

551

C749c Congreso Geológico de América Central & VII Congreso Geológico Nacional (14 : 2020 : Costa Rica)

Memoria : XIV Congreso Geológico de América Central & VII Congreso Geológico Nacional / editado por César Alberto Laurito Mora. -- San José : Costa Rica : Colegio de Geólogos de Costa Rica, 2022.

1 recurso en línea (312 páginas)

ISBN: 978-9930-9769-0-6

1. GEOLOGÍA 2. VULCANOLOGÍA 3. RECURSOS NATURALES 4. RECURSO HÍDRICO 5. CONFERENCIAS 6. COMUNICACIÓN 7. AMÉRICA CENTRAL

I. Título II. Laurito Mora, César Alberto, ed.

Publicación del Colegio de Geólogos de Costa Rica
Barrio San Cayetano, Ciudad de San José.

Webb: <https://www.geologos.or.cr>

Webb: <https://www.geologia.go.cr>

Email: colegio@geologos.or.cr

Email: geologia@minae.go.cr

Editor: César A. Laurito Mora

Revisores: Comité Científico

Responsable ISBN: Ana Isabel Chaves Carballo

Fotografía base de la portada : rocas sedimentarias Península de Santa Elena

Fotografía: Ana Sofía Huapaya

Comité Organizador del Congreso

Presidenta:	Ileana Boschini López
Vicepresidente:	Arnoldo Rudín Arias
Secretaria Ejecutiva:	Ana Sofía Huapaya Rodríguez Parra.*
Tesorero:	Giorgio Murillo Tsijili

Comité Científico Revisor

Presidente: César Alberto Laurito Mora

Miembros:

Guillermo Alvarado Induni
Esteban Bonilla Elizondo
Martha Espinoza Ruíz
Walter Hernández Guevara
Hernán Porras Espinoza
Marino Protti Quesada
Evelyn Rodríguez Coto
Ana Lucía Valerio Zamora
Ingrid Vargas Azofeifa

*Representante del Comité Organizador ante el Comité Científico.

Coordinaciones

Noticias

Allan López Saborío

Coordinación de Giras de Campo

Alberto Vásquez Rodríguez

Mario Gómez Venegas

Coordinación

Asociación Centroamericana de Estudiantes de Geología

Javier Francisco Chinchilla Porras

Older Romario Torres Blanco

Empresa organizadora

O/Keith Organización de eventos S.A.

Nury Camacho Vargas

Oscar Keith Rivera

Sede del evento

Hotel Radisson

Prefacio

Siguiendo con la tradición de los Congresos Geológicos de América Central que se iniciaron en el año 1965, Costa Rica tuvo el honor de reunir por quinta vez a la comunidad geocientífica regional e internacional, con el objetivo de promover el desarrollo de la geología como ciencia estratégica en la región, para garantizar una mejor calidad de vida a la sociedad a través del aprovechamiento sostenible de los recursos geológicos, asociado a una gestión del riesgo adecuada y un ambiente sano.

En el marco del XIII Congreso Geológico de América Central, realizado en la Ciudad de San Salvador en Junio del 2017, se eligió a Costa Rica como sede del XIV Congreso Geológico de América Central. Una vez más Costa Rica tiene el honor de reunir por quinta vez a la comunidad científica Internacional, Regional y Nacional.

Conscientes de la compleja situación a nivel mundial por causa de la pandemia de COVID 19, el XIV Congreso Geológico de América Central se tuvo que posponer en dos ocasiones desde el año 2020 hasta Junio del 2022. Ello planteó nuevos retos organizativos enmarcados según las nuevas políticas sanitarias y migratorias que se fueron planteando con el pasar de los días, lo que provocó mucha incertidumbre sobre la realización del congreso.

A pesar de ello, la respuesta fue inesperadamente buena por parte de los científicos de dentro y fuera de la región, salvando incluso el desaliento proclamado por una parte importante de la comunidad geológica nacional. Una muestra de que la comunidad geológica necesita de estos espacios donde exponer sus investigaciones e interactuar con otros científicos ávidos de nuevos conocimientos.

El fruto de todos estos datos, descubrimientos y propuestas solo serán adecuadamente sopesados en el futuro cercano y se verán reflejados en el mejoramiento de la calidad de vida de los centroamericanos y demás países vecinos.

El XIV Congreso Geológico de América Central ha ampliado notablemente su marco geográfico de influencia, contando con la participación de importantes organizaciones internacionales, así como de prestigiosos investigadores de fuera de nuestra región. Sin embargo, la más agradable sorpresa es la altísima aportación de pensamiento científico generado en los países de América Central, la mayoría por científicos jóvenes con nuevas visiones y nuevas herramientas.

Hoy, nuestro conocimiento de la geología de la región alcanza nuevas alturas e integra a muchas más comunidades y grupos que antes no habían sido tomados en cuenta, un ejemplo de ello las mujeres que hacen la minería posible. También integramos a los estudiantes a través de la Asociación Centroamericana de Estudiantes de Geología, quienes han mostrado un verdadero interés en ser participantes activos en la promoción y el desarrollo de la geología.

De igual manera el congreso se ha vuelto un centro de análisis de los recursos naturales, tanto desde una óptica meramente energética o desde la correcta gestión del recurso hídrico, así como desde su disfrute y uso por los turistas y los empresarios turísticos, valorando la importancia de los Geositios y Geoparques para establecer nuevas categorías de manejo y conservación..

También, cabe señalar la importancia de las propuestas planteadas en este congreso, enfocadas a la vulnerabilidad de las vidas humanas y de los bienes materiales, así como a la mitigación del riesgo ante eventuales catástrofes naturales y ambientales.

El congreso ha demostrado ser un excelente foro de aprendizaje y comunicación para los que decidieron reunirse y compartir, y sin duda lo será para aquellos que consulten la presente memoria.

Contenidos



I. Charlas Magistrales

II. Sesión Grupo Kuk Aphán

III. Sesión de Estratigrafía y Cartografía

IV. Sesión de Geotécnia

V. Sesión de Tectónica

VI. Sesión de Geotermia BGR

Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales

VII. Sesión de Minería

VIII. Sesión de Geofísica y Teledetección

IX. Sesión de Vulcanología y Riezgo Geológico

**X. Sesión de Hidrogeología, Geología Ambiental y
Geoquímica**

XI. Sesión de Geopatrimonio y Geoturismo

Apéndice I. *Patrocinios, Auspicios, Colaboradores y Filiaciones*

Apéndice II. *Como citar los documentos*

Apéndice III. *Pósteres*

Índice de Sesiones y Charlas

I. Charlas Magistrales



M1 **Marino Protti**

Treinta y tres años de observación de la deformación cortical de Costa Rica con GPS

M2 **Wilfried Strauch**

Los sistemas de alerta temprana de terremotos y tsunamis en Nicaragua y Centroamérica

M3 **Diego Córdoba, María Belén Benito**

Proyecto KUK_AHPAN: avances y retos para la mejora del conocimiento de la amenaza y riesgo sísmico en América Central

M4 **Eddy Sánchez Rivera**

Aprovechamiento comercial de los recursos geotérmicos más allá de una actividad de extracción

M5 **Ana G. Juárez**

Potencial minero en América Central y el Caribe y la importancia de la inclusión de la mujer

M6 **Guillermo E. Alvarado**

Evolución de los arcos volcánicos en América Central y su correlación con los yacimientos metálicos en el tiempo y espacio (Cretácico al presente)

M7 **Ricardo Hirata**

Groundwaters in Latin America: far from the eyes... far from the heart of society

Índice

Sesión KUK APHAN - Riesgo Sísmico



- R1** **María Belén Benito, Guillermo Alvarado, Mario Arroyo, Alvaro Climent, Rebeca Franco, Carlos García Lanchares, Orlando Hernández, Miguel Marchamalo, Walter Montero, Adriana Ornelas, Rosey Pietra, Ligia Quirós**
Escenarios deterministas de amenaza sísmica en el área metropolitana de San José (Costa Rica) en el marco del proyecto KUK AHPAN
- R2** **Luis Diego Dávila Migoya, José Manuel Cabrero, Omar Flores**
Aproximación a la estimación de riesgo sísmico en la Ciudad de Guatemala: Primer modelo de exposición sísmica
- R3** **Beatriz González Rodrigo, Laura Navas Sánchez, Maribel Jiménez Martínez, Orlando Hernández Rubio, Luis Diego Dávila Migoya, Belén Orta Rial, Diego Hidalgo Leiva**
Estado del arte de las curvas de fragilidad empleadas para evaluar la vulnerabilidad sísmica en Costa Rica
- R4** **Conrad Lindholm, María Belén Benito, Mario Arrollo, Carlos Gamboa, Orlando Hernández, Adriana Ornellas, John Rivera**
Investigating methods for combining seismological and geological information for PSHA calculation
- R5** **Eduardo Camacho Astigarrabia**
Atenuación de intensidades y ondas CODA en Panamá Central
- R6** **Carlos Gamboa-Canté, María Belén Benito, Omar Flores**
Caracterización de Escenarios Sísmicos Probables y Análisis de la Respuesta de Estructuras de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala
- R7** **Manuel Mudarra Hernández, Juan Carlos Mosquera Feijoo, María Belén Benito, Eugenio Sanz Pérez**
Un modelo hidromeccánico para caracterizar los efectos inducidos por el terremoto de Andalucía de 1884
- R8** **Sebastián Torres Olivares, Beatriz González Rodrigo, Erick I. Saavedra Flores, Juan Carlos Mosquera Feijoo**
Metodología para el estudio del comportamiento agregado de estructuras de mampostería reforzadas

- R9 Carlos García-Lanchares, Miguel Marchamalo, María Belén Benito, Candela Sancho, Alfredo Fernández-Landa, Adriana Ornelas, Rebeca Franco, Orlando Hernández, Carlos Gamboa**
Análisis de la dinámica de deformación en un Área Urbana en el Área Metropolitana de la Ciudad de Guatemala con metodología InSAR Sentinel-1
- R10 Nathalie Chavarría, Esteban J. Chaves, Cyril Müller, Evelyn Nuñez**
Migración e interacción sísmica a lo largo de la Zona de Fractura de Panamá durante la secuencia del terremoto de julio 2021
- R11 Conrad Lindholm**
History of the cooperation on seismology between Norway and Central America 1992 – 2010 and the furtherance through the KUK-AHPAN project



Sesión de Estratigrafía y Cartografía

- R12 Ana Sofia Huapaya, Evelyn Rodríguez**
Geología y estratigrafía de la Hoja 3346-IV Quesada
- R13 Walter Hernández, Brian Jicha, Luis Mixco, Carlos Pullinger**
Actualización y propuesta estratigráfica de las erupciones volcánicas del Plioceno al Holoceno en El Salvador
- R14 Dennis Lemus, Christopher J. Harpel, Ángela V. García, Demetrio Escobar, Alexander Hernández, Estefany Alvarenga**
Estratigrafía preliminar del flanco Este del volcán de Santa Ana
- R15 Martín Rojas-Barrantes, Ana Sofia Huapaya, Luigi A. Solari, Vladimír Žáček**
Geocronología U–Pb en zircones detríticos de la cuenca de San Carlos, Costa Rica: Evidencia del vulcanismo de arco del Mioceno e implicaciones en la historia Paleozoica y Precámbrica del istmo Centroamericano
- R16 Luis David Jara Díaz, Patrick Durán Leiva, Ana Sofia Huapaya, Martin Rojas-Barrantes**
Cartografía geológica y estratigrafía de la Hoja Tilarán, escala 1:50.000
- R17 Petr Mixa, Vladimír Žáček**
Métodos de muestreo geológico para análisis geocronológicos, isotópicos y radiológicos
- R18 Vladimír Žáček, Petr Mixa**
Cincuenta años de cooperación del Servicio Geológico Checo con países de América Latina
- R19 Martín Rojas-Barrantes, Lourdes Muñoz-Heredia**
Batimetría de alta resolución del flanco sureste de la cordillera del Coco y sus recursos minerales potenciales de fondo oceánico
- R20 Martín Rojas-Barrantes, Ana Sofia Huapaya, Evelyn Rodríguez Coto, Luis David Jara Díaz, German González Marín**
Revisión estratigráfica de las formaciones Río Banano y Uscari, Cuenca Limón Sur, Costa Rica

IV. Sesión de Geotécnia

- R21 Julio C. Duarte Fernández, Karen Calderón Zayas, Luis A. Vargas Herrera, Mauricio Coto Loría**
Losas piloteadas (Piled Raft) y su reciente aplicación en Costa Rica como una solución más óptima para la cimentación de edificios altos
- R22 Julio C. Duarte Fernández**
Implementación del Dilatómetro Marchetti (DMT) en la caracterización y solución de deslizamientos en proyectos constructivos
- R23 Rolando Mora Chinchilla**
Estudio de suelos para la construcción del Museo de La Casa del Boyero, Venecia, San Carlos, Alajuela, Costa Rica: dificultades al explorar suelos compuestos de bloques en matriz fina
- R24 José Alexander Chávez, Mauricio Vásquez, Efraín Alas**
Monitoreo de humedad en sectores críticos del Área Metropolitana de San Salvador para mejora de comportamiento y diseño de taludes
- R25 Erwin Romeo Quiroa Cugua**
La geología en la evaluación de zonas susceptibles a movimientos en masa

V. Sesión de Tectónica

- R26** **Bridget Garnier, Basil Tikoff, Omar Flores, Brian Jicha, Charles DeMets, Beatriz Cosenza-Murales, Walter Hernández, David Greene**
La deformación en el oeste de Guatemala asociada con la triple unión de NAFCa (Norte América - Antearco de Centroamérica-Caribe): La localización del esfuerzo neotectónico en el graben de la Ciudad de Guatemala
- R27** **Allan López**
Estado de esfuerzos tectónicos en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica: Implicaciones para la reactivación de fallas y amenaza sísmica
- R28** **Allan López**
Morfometría tectónica del Valle Central de Costa Rica
- R29** **Ronnie Quintero, Guillermo E. Alvarado, Jiri Zahradník, Daniela Campos-Durán, Federico Güendel, Jaime Toral Boutet**
Estudio de la sismicidad reciente en la frontera sur entre Costa Rica y Panamá
- R30** **Hernán Porras, Víctor Huérfano**
Dominios estructurales asociados a la subducción oblicua, en la región nororiental de la placa del Caribe, Puerto Rico.

VI. Sesión de Geotermia

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales

- R31 José David Cáceres, Javier García Reynaud, Elisabeth Espinoza Canales**
Adaptación de un Modelo de Aprendizaje Automático aplicado a la Exploración Geotérmica
- R32 Kelym Martínez, Lisbeth Herrera, Ruddy Romero, Fanor Narváez, Mayela Sánchez, Marcos Delgado, Hermas Dávila, Lucrecia Cruz Gámez**
Investigaciones geotérmicas de media-baja entalpía para usos directos en el municipio de Tipitapa, Managua, Nicaragua- Resultados geológicos y geoquímicos preliminares
- R33 Elizabeth T. Henríquez, Jennifer Aguilar, Adrián Mayén**
Petrografía de las muestras de Aramuaca y San Miguel, El Salvador y su implicación en geotermia
- R34 Anyela Murillo Arroyo**
Conclusiones del uso de vehículos aéreos no tripulados en la exploración geotérmica en Costa Rica
- R35 Adrián Mayén, Douglas Martí, Diego López, Alondra García**
Método de Potencial Espontáneo (SP) como alternativa de bajo costo en la exploración geotérmica de mediana y baja temperatura: experiencia de capacitación regional
- R36 Carlos Guifarro, Miguel García, Florián Brueckner**
Geoquímica de exploración en Namasiyüe y El Triunfo, Choluteca, muestreo de época seca
- R37 Maynor Ruíz Álvarez, Alina Ermertz**
Aplicación de sensores remotos para el mapeo de lineamientos en la identificación de áreas de interés geotérmico en Nacaome, Departamento de Valle, Honduras



VII. Sesión de Minería

- R38 Mari Carmen Hidalgo, Diego Rojas, Javier Rey, Julián Martínez, Rosendo Mendoza**
Movilidad de metal(oid)es en presas de lodos mineros: estudio de la velocidad de oxidación de los residuos y del aporte de As y Pb al medio hídrico
- R39 Javier Rey, Julián Martínez, Margarita Casado, Mari Carmen Hidalgo, Rosendo Mendoza**
Caracterización de fracturas mediante el uso de técnicas eléctricas y electromagnéticas en el distrito minero de Linares, España
- R40 Jorge Obando, Maikol Rojas**
El yacimiento epitermal aurífero de baja sulfidación de Crucitas, Costa Rica
- R41 Maikol Rojas**
Monitoreo de la Actividad Minera Informal en Crucitas, Costa Rica, Evolución de la Actividad Minera Informal para el Periodo 2017-2022
- R42 Alejandra Fernández-Sánchez, María del Mar Solano-Trejos, José Alberto Rodríguez-Ledezma, Nuria Chavarría-Campos, Claudio González-Solís, Gabriela Calvo-Vargas, Wagner Valverde-Mora, Eduardo Rojas-Solano, Virginia Reyes Gatjens, Jorge Cabrera, Jazmín Granados-Torres, Horacio Chamizo-García, Mónica Jiménez-Seas**
Plan Nacional de Acción para la Minería Artesanal y en Pequeña Escala en Costa Rica 2022-2030
- R43 Esteban Bonilla Elizondo, German E. González Marín**
Métodos de control de los niveles aluviales en la extracción minera de agregados en los cauces de dominio público

VIII. Sesión de Geofísica y Teledetección

- R44 Carlos Pocasangre, Luis Castillo, Carlos Martínez, Andrés García, Douglas Rivas, Rubén Henríquez**
Mapa De Flujo de Calor Radiante de El Salvador Utilizando Teledetección Satelital
- R45 Adonnis Rodríguez, Kelly Quintanilla, Carlos Pocasangre, Isaac Kanda, Jutsus Maithya**
Inversión 1D y 2D de datos magnetotélúricos del prospecto geotérmico del Volcán de Paka en la zona central del rift de Kenia
- R46 José Brenes-André, Santiago Núñez-Corrales**
Cálculo automático diario de la evapotranspiración en Costa Rica según FAO-56
- R47 José Alexander Chávez, Tomáš Hroch, Jan Valenta, Jiří Šebesta, Mauricio Vásquez**
Ingeniería Geológica en el Área Metropolitana de San Salvador
- R48 Omar Aguilar, Carlos Arriaza, Diego Hernández, Luis Herrera, Lizardo Arias, Benancio Henríquez Miranda, Carlos Pocasangre**
Diseño e implementación de una comunicación inalámbrica entre un móvil celular y el Sensor LI-830 para transmitir datos de CO₂ vía Bluetooth
- R49 David J. Zamudio Ángeles, René Chávez Segura, Gerardo Cifuentes Nava, Esteban Hernández Quintero, Andrés Tejero Andrade, Alejandro García Serrano**
Análisis del fracturamiento y hundimiento superficial y su correlación con estudios de Tomografía Eléctrica 2D, al noreste de la Ciudad de México
- R50 Wilfried Strauch, Jacqueline Sánchez, Emilio Talavera, Guillermo Valdivia, Sheyla Gadea, Lisbette Larios, César Cruz, Mariano Flores, Bismarck Salinas, Alberto Funes, Yasuji Sakaguchi, Takuya Iritani, Frank Coloma, John Clinton, Frederick Massin, Billy Burgoa**
Sistema experimental para la disseminación de la Alerta Temprana de Terremotos (ATT) por medio de la TV digital en Managua, Nicaragua
- R51 Francisco Javier San Martin Vergara**
Magnetometría con RPAs

IX. Sesión de Vulcanología y Riesgo Geológico

- R52 Roberto Mérida Boogher, Gustavo Chigna, Kevin Chun, Julio Cornejo, Álvaro Rojas, Peter Argueta, Wendell Paxtor, Amilcar Roca, Adriana Oliva**
Evolución del flujo de lava activo en el flanco suroeste del domo Caliente, Complejo Volcánico Santa María-Santiaguito
- R53 Magdalena Pérez**
Efecto de la erupción volcánica en el 2015 en la Central Geotérmica de Momotombo
- R54 Ángela V. García, Christopher J. Harpel, Walter Hernández, Demetrio Escobar, Luis E. Mixco, Charles Lewis, Linda Scott Cummings**
Nuevos datos: avalancha de escombros de Acajutla, volcán Santa Ana
- R55 Fernando García, Wilfried Strauch, Miguel Flores, Emilio Talavera, Martha Herrera, Domingo Ñamendi, Ulbert Grillo, Allan Morales, José Acosta**
Preparación de la red sísmica del INETER en Nicaragua para los requerimientos de la alerta temprana de terremotos
- R56 Esteban J. Chaves, Javier F. Pacheco, Cyril Müller, Nathalie Chavarría, Carlos Sánchez Víquez**
Evolución geodinámica del deslizamiento en el flanco Suroeste del Volcán Irazú y su relación con los procesos de subducción en Costa Rica
- R57 Cyril Müller, Mathilde Cluzan, Mario Angarita, Guillermo E. Alvarado, Geoffroy Avard**
Mega-deslizamiento del 2022 en el volcán Irazú (Costa Rica): un caso de alerta temprana acertada basada en mediciones geodésicas
- R58 Jiří Šebesta, José Alex Chávez Hernández**
Geomorfología y geología aplicada para evaluar los riesgos naturales de la capital San Salvador en El Salvador
- R59 Silvia Chacón Barrantes, Fabio Rivera Cerdas, Anthony Murillo Gutiérrez**
Tsunami causado por la erupción del volcán Hunga Tonga - Hunga Ha'apai: registros en Costa Rica y lecciones aprendidas

- R60 Mathilde Cluzan, Cyril Müller, Mario Angarita**
Deslizamiento de Santiago de Puriscal: evolución de 2017 a 2021a partir del procesamiento de imágenes InSAR
- R61 Yemerith Alpizar, Guillermo E. Alvarado, Paulo Hidalgo, Deina Arroyo**
Historia eruptiva del volcán Barva en los últimos 11 000 años
- R62 José Brenes-André**
Aplicación del modelo fractal a una erupción freática
- R63 José Brenes-André, Santiago Núñez-Corrales**
BALISTICA: una serie de programas para analizar balísticos volcánicos
- R64 José Brenes-André**
Aplicación del modelo fractal a la subpliniana (3800 a.P.) del volcán Rincón de la Vieja
- R65 José Brenes-André**
Modelación de los balísticos volcánicos en un régimen de Stokes
- R66 Luis Iván Girón Melgar, José Girón, Francisco Juárez**
Sistema de alerta temprana ante erupciones volcánicas en Guatemala y Centroamérica
- R67 Stheysing Virginia Reyes Muñoz**
Evaluación de la amenaza volcánica por flujos de lava en el volcán Cerro Negro, complejo volcánico Las Pilas-El Hoyo
- R90 Jacqueline Yamileth Rivera Ayala**
Comunicación basada en el impacto, en el campo de los peligros geológicos y la gestión del riesgo

X. Sesión de Hidrogeología, Geología Ambiental y Geoquímica

- R68** **Alonso Alfaro Martínez**
Modelo numérico de los acuíferos Herradura y Jacó, cantón de Garabito, Provincia de Puntarenas, Costa Rica
- R69** **José Alexander Chávez, Laura Gil, Ricardo Mata, Jorge García, Marcia Barrera-de-Calderón, Ingrid Alfaro, Efraín Alas, Sara Cornejo**
Cartografía Hidrogeológica de Vulnerabilidad y Peligrosidad a la Contaminación en el Área Metropolitana de San Salvador
- R70** **José Alexander Chávez, Ingrid Alfaro, Marcia Barrera-de-Calderón, César Alvarado, Efraín Alas, Sara Cornejo, Mauricio Vásquez**
Balance hídrico del Área Metropolitana de San Salvador con escenarios de cambio climático
- R71** **Tomás Antonio Padilla Cámbara, Pedro Alejandro Soto Reyes, Jorge Luis Azzari Domínguez**
Estudio hidrogeológico de la sub-cuenca del Río Teocinte para determinar las áreas principales de recarga hídrica
- R72** **Ingrid Vargas-Azofeifa, Melvin Alpízar Marín, Nancy Mollinedo García, Marco Araya Oviedo, Viviana Ramos Sánchez, Darner Mora Alvarado, Azucena Urbina Campos**
Arsénico en aguas subterráneas en cuatro sitios seleccionados de Costa Rica
- R73** **José Alexander Chávez, Ingrid Alfaro, Marcia Barrera-de-Calderón**
Gestión de zonas prioritarias de protección del recurso hídrico
- R74** **Luis Ivan Girón Melgar, Miguel Ángel Hernández, Laura Núñez Álvarez, Ricardo Gutiérrez López, José Ismael Ordoñez, Berta Morales, Josefina Muñoz**
Estudio hidrogeológico y de recarga en la cuenca del lago de Atitlán (Guatemala)
- R75** **Alonso Alfaro Martínez, Marita Alvarado, Michelle Arias, Katherine Briones, Jonathan Chinchilla, Magdalena Monge**
Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos utilizando los sistemas de información geográfica, Pacífico Central de Costa Rica, provincias de Puntarenas y San José

- R76 José David Morales Alpízar, José Pablo Sibaja Brenes, José Carlos Mora Barrantes, Rosa Alfaro Solís, María Martínez Cruz**
Riesgo químico debido a la exposición a compuestos azufrados en el Parque Nacional Volcán Poás
- R77 Paola Alvarado Piedra, Ingrid Vargas Azofeifa**
Distribución espacial de la transmisividad del Acuífero Bagaces-Sector Liberia, Guanacaste, Costa Rica
- R78 Martín Rojas-Barrantes**
Geoquímica de las rocas volcánicas de la estribación central noreste del arco volcánico de Tilarán
- R79 Lesly Mendoza, Erick Moran, Lucía Cortéz, Roberto Cruz**
Identificación de los tipos de minerales de cuarzo y feldespato para la determinación de la factibilidad de aplicación de la técnica de Termoluminiscencia en la evaluación del potencial geotérmico en el oriente de El Salvador
- R80 Andrés Ulloa Carmiol**
Exploraciones espeleológicas en Costa Rica en la última década

XI. Sesión de Geopatrimonio y Geoturismo

- R81 Benjamin van Wyk de Vries**
Actividades de la Comisión de Geopatrimonio de la Unión Internacional de Geociencias:
Asesoría de los Geoparques Mundiales de la UNESCO, Geositios Mundiales y proyectos del
Programa Geocientífico de la UNESCO
- R82 Mónica Bueno de Frutos**
Pasos en la construcción del Geoparque Río Coco, el Primer Geoparque Mundial de la UNESCO en
América Central
- R83 Danitza Churata, Bilberto Zavala**
Colca y volcanes de Andagua Primer Geoparque Mundial UNESCO reconocido en Perú, con asistencia
técnica del INGEMMET
- R84 Carla Arias, Nélide Manrique, Benjamin Van Wyk de Vries, Jersy Mariño,
Rigoberto Aguilar, Kevin Cueva, Andy Ancalle**
Valoración de Geositios en Áreas Volcánicas para la Resiliencia ante Peligros Volcánicos y Geoconservación
- R85 Geraldine V. Vásquez-Alarcón, Gerardo J. Aguirre-Díaz**
El Triángulo Sagrado de Querétaro: Patrimonio Geológico del Proyecto Geoparque Mundial UNESCO
- R86 Ana Sofia Huapaya**
Inventario y Valorización de lugares de interés geológico para la promoción del Patrimonio Geológico
en Costa Rica
- R87 Eveling Espinoza, David Chavarría, Benjamín van Wyk de Vries**
Unos pasos en el desarrollo de un Geoparque en la isla de Ometepe, Co-construcción con los isleños y
Mapeo de Geositios
- R88 Guillermo E. Alvarado, Ramón Araya, Lidier Esquivel, Blas Sánchez, Yemerith Alpizar**
La rotulación en los parques volcánicos de Costa Rica y áreas vecinas como complemento para una
gestión del riesgo: Un ejemplo de geoalfabetización a seguir en otros sitios de interés geológico
- R89 Adolfo Quesada-Román**
Geodiversidad y geoturismo en América Central

Apéndice III. Pósteres

- P1 Stheysing Virginia Reyes Muñoz**
Evaluación de la amenaza volcánica por flujos de lava en el volcán Cerro Negro, complejo volcánico Las Pilas-El Hoyo
- P2 César Alvarado, Ingrid Alfaro, José Alexander Chávez, Marcia Barrera, Efraín Alas, Sara Conejo, Mauricio Vásquez, Fernando Mejívar, David Flores**
Construcción de insúmos sobre recarga acuífera para estrategia de ciclo hídrico en el Área Metropolitana de San Salvador
- P3 Manuel Mudarra Hernández, Juan Carlos Mosquera Feijoo, María Belén Benito Oterino, Eugenio Sanz Pérez**
Un modelo hidrogeomecánico para caracterizar los efectos inducidos por el terremoto de Andalucía de 1884
- P4 Brenda Itzel Antúnez Williams, María Belén Benito Oterino**
“Propuesta de caracterización de Barrio con enfoque en reducción de riesgos a desastres: un aporte a la reconfiguración de barrios informales en Honduras
- P5 Older Torres, Guillermo E. Alvarado**
Cambios geomorfológicos por procesos erosivos y sedimentarios en el volcán Arenal, período post eruptivo 2010 - 2022
- P6 Sebastián Corrales M.**
Inventario de deslizamientos en los Distritos Piedras Negras y Guayabo del Cantón de Mora
- P7 Fabián Cubillos, Meilyn Mora**
Aplicación de métodos geofísicos para la creación de un mapa de concentraciones de ^{40}K de un yacimiento epitermal, localidad de Montezuma, Costa Rica
- P8 Carlos Gamboa-Canté, María Arroyo-Solorzano, María Belén Benito**
Actualización del Catálogo Sísmico Regional de Centroamérica
- P9 Iván Villagra**
Mapas de susceptibilidad a deslizamientos, Cuenca del Río Abangares, Guanacaste, utilizando la metodología Mora-Varhson y modificaciones
- P10 Javier Rodríguez-Saiz, Miguel Marchamalo, Luis Esquivel, Juan Gregorio Rejas-Ayuga, Carlos García-Lanchares, Beatriz González-Rodrigo, María Belén Benito Oterino**
Exposición sísmica de los edificios por métodos geoespaciales
- P11 Lizbeth Herrera, Lucrecia Cruz Gámez, Kelym Martínez, Freddy Durán Durán, Australia Ramírez, Yenny Rodríguez, Jesús Rodríguez, Francisco Mendoza, Adrián Mayén, Keren Ventura, Alina Ermertz, Sulamith Kastl**
La aplicabilidad del mapeo de lineamientos para estudios de reconocimiento geotérmico
Una comparación de tres estudios de caso



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Treinta y tres años de observación de la deformación cortical de Costa Rica con GPS

Marino Protti^{a*}

^aObservatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

En esta conferencia se dará un repaso histórico sobre el uso del GPS y luego del GNSS en Costa Rica, desde las primeras observaciones por medio de campañas, en 1988, hasta las densas redes de monitoreo geodinámico, tanto para el registro de movimientos de placas, bloques tectónicos y fallas, como en la vigilancia volcánica. Se dará énfasis en las limitaciones de la metodología en cada contexto histórico, así como en los resultados y aportes que ha dado esta herramienta en el entendimiento de la dinámica tectónica de Costa Rica.

Finales de los ochenta y principios de los noventa, del siglo pasado, representaron el surgimiento y aplicación del GPS como un instrumento capaz de medir la velocidad de las placas tectónicas. En Costa Rica, estas campañas permitieron no solo medir directamente el movimiento de la placa del Coco con respecto a la placa del Caribe, sino también documentar altos niveles de acoplamiento bajo la península de Nicoya y registrar el desplazamiento cosísmico, asociado al terremoto del Valle de La Estrella, en el Caribe Sur de Costa Rica. Haber documentado esas deformaciones apoyaron la densificación de las redes de monumentos para ocupación en campañas de 3 a 5 días cada 2 a 3 años en casi todo Costa Rica. Las observaciones discretas dieron paso a la observación continua, primero en el volcán Arenal, luego en la península de Nicoya y sus alrededores y actualmente en todo el país.

Se presentarán resultados que muestran el movimiento continuo de las placas, zonas con diferentes niveles de acoplamiento, sismos lentos, anticipación de zonas de ruptura y captura de deslizamiento cosísmico en el campo cercano, entre otros. Se mencionará también el aporte de esta herramienta a nivel centroamericano.

*Autor para contacto: marino.protti.quesada@una.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Los sistemas de alerta temprana de terremotos y tsunamis en Nicaragua y Centroamérica

Wilfried Strauch^{a*}

^a Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Managua, Nicaragua

En 2012, se avanzó enormemente en el monitoreo sísmico de Centroamérica y en la rápida información sobre sismos y tsunamis a autoridades y población. En la mayoría de las centrales sísmicas de los países de la región se instaló el paquete de software sísmológico SeisComP (GFZ, Potsdam, Alemania) para automatizar el procesamiento de sismos en tiempo real. Este trabajo en las instituciones INSIVUMEH (Guatemala), MARN (El Salvador), COPECO (Honduras), INETER (Nicaragua), UCR (Costa Rica), UPA y ACP (Panamá) fue realizado o apoyado por el Observatorio Sísmico del Occidente de Panamá, una pequeña empresa privada. El SeisComP facilitó el intercambio de datos sísmicos entre los diferentes centros y su cooperación.

El procesamiento automático hizo posible el aumento drástico del número de estaciones que se pueden procesar fácilmente. En 2017, se comenzó a desarrollar en el INETER/Nicaragua el Centro de Asesoramiento de Tsunami para América Central que en 2022 entra en funcionamiento rutinario. El CATAC es posiblemente el mayor centro sísmológico de América Latina en cuanto a: 1) el número alto de más de 500 estaciones en Nicaragua, toda Centroamérica, el Caribe, Norteamérica y el Norte de Suramérica que se procesan continuamente, y 2) el tamaño de la zona vigilada sísmológicamente que consiste de la zona del Océano Pacífico de América Central desde el Sur de México a Ecuador, y en el Mar Caribe desde Yucatán a Colombia, es decir, aquella área donde los terremotos pueden generar tsunamis que afectarían Centroamérica dentro de una hora.

La rapidez del procesamiento con SeisComP combinado con el surgimiento de los nuevos sistemas de comunicación por INTERNET, fibra óptica, telefonía celular provocó pensar en la posibilidad de establecer la alerta temprana de terremotos (ATT) en Centroamérica. En 2016, comenzó un programa de cooperación entre el INETER/Nicaragua y el Servicio Sísmológico de Suiza (SED/ETHZ) sobre esta temática en que se integraron después otros centros sísmológicos de la región. Se mejoraron las redes sísmicas y a finales de 2021 comenzó en Nicaragua un proyecto piloto para la alerta temprana de terremotos en una cantidad de instituciones estatales en Managua. Una encuesta que se realizó, en mayo de 2022, en Nicaragua arrojó el gran interés que tienen la población en la ATT: 84% la consideran “extremadamente útil”, 10% “muy útil”, 5% “moderadamente útil” y solo 1% “poco útil”. Esto podría darles legitimación a redes sísmicas de transformarse de centros que generan datos para estudios académicos de la amenaza a servicios que generan múltiples productos científicos de alto interés en la población, las empresas privadas y el estado.

*Autor para contacto: wilfried.strauch@yahoo.com



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Proyecto KUK_AHPAN: avances y retos para la mejora del conocimiento de la amenaza y riesgo sísmico en América Central

Diego Córdoba^a, M^a Belén Benito^{b*}

^aUniversidad Complutense de Madrid, España

^bUniversidad Politécnica de Madrid, España.

Abstract: The KUK_AHPAN is a project of the Spanish State Research Plan, approved in 2019 and financed by the Ministry of Science and Innovation of the Spanish government. Its full title is “KUK AHPÁN: integrated regional study of the structure and 4D evolution of the lithosphere in Central America. Implications in the calculation of the seismic hazard and risk”. The project involves researchers from several institutions in Central America and European institutions (from Spain and Norway) with the will to establish a scientific-technological framework to address two central objectives: 1) improvement of the integrated knowledge of structure and evolution of the lithosphere in a region of high seismic and tsunamigenic potential, such as Central America and 2) improvement of the knowledge of the seismic hazard in the region and seismic risk in Central American populations. In this talk, the objectives of the project, the challenges to be addressed, the planning of activities, and some progress made will be presented.

Palabras clave: Geofísica, Sismología, Amenaza sísmica, Riesgo sísmico, Centroamérica.

Key words: Geophysics, Seismology, Seismic hazard, Seismic risk, Central America.

Estructura y objetivos del proyecto

El Proyecto KUK_AHPÁN se compone de dos subproyectos coordinados (figura 1). El primero (KUK_AHPÁN-Geofísica) liderado por la Universidad Complutense de Madrid (UCM), cuyo investigador principal es el Dr. Diego Córdoba, tiene por objetivo llevar a cabo estudios específicos de sismicidad y geofísica marina y terrestre en el área de contacto entre las placas Caribe, Norteamérica y el bloque de Chortís (figura 2), para revelar la estructura de la litósfera, desde el fondo del mar hasta el manto, cruzando la corteza oceánica y determinar las fuentes de terremotos y tsunamis. Ello aportará un mejor conocimiento de la corteza y tectónica activa en una zona (Guatemala-Honduras-Golfo de Honduras) hasta ahora, poco estudiada y con claro déficit de información, y donde hay escasez de datos que dificultaron el establecimiento de zonificaciones sísmicas en estudios previos desarrollados por el grupo de trabajo en Centroamérica. El segundo subproyecto (KUK_AHPÁN-Amenaza y Riesgo Sísmico) liderado por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) incluye desarrollos metodológicos y aplicaciones para la mejora del conocimiento de la amenaza y riesgo sísmico en general y, en Centroamérica y Sureste de España, en particular. La investigadora principal de este subproyecto es la Dra. M^a Belén Benito.

El grupo de trabajo de este proyecto está abierto actualmente a todos aquellos investigadores afiliados a las instituciones de los países participantes que muestren su interés por el desarrollo del proyecto, tanto en el alcance de los objetivos previstos como en el planteamiento de nuevos objetivos, dentro el marco general de investigación del proyecto.

*Autor para contacto: mariabelen.benito@upm.es

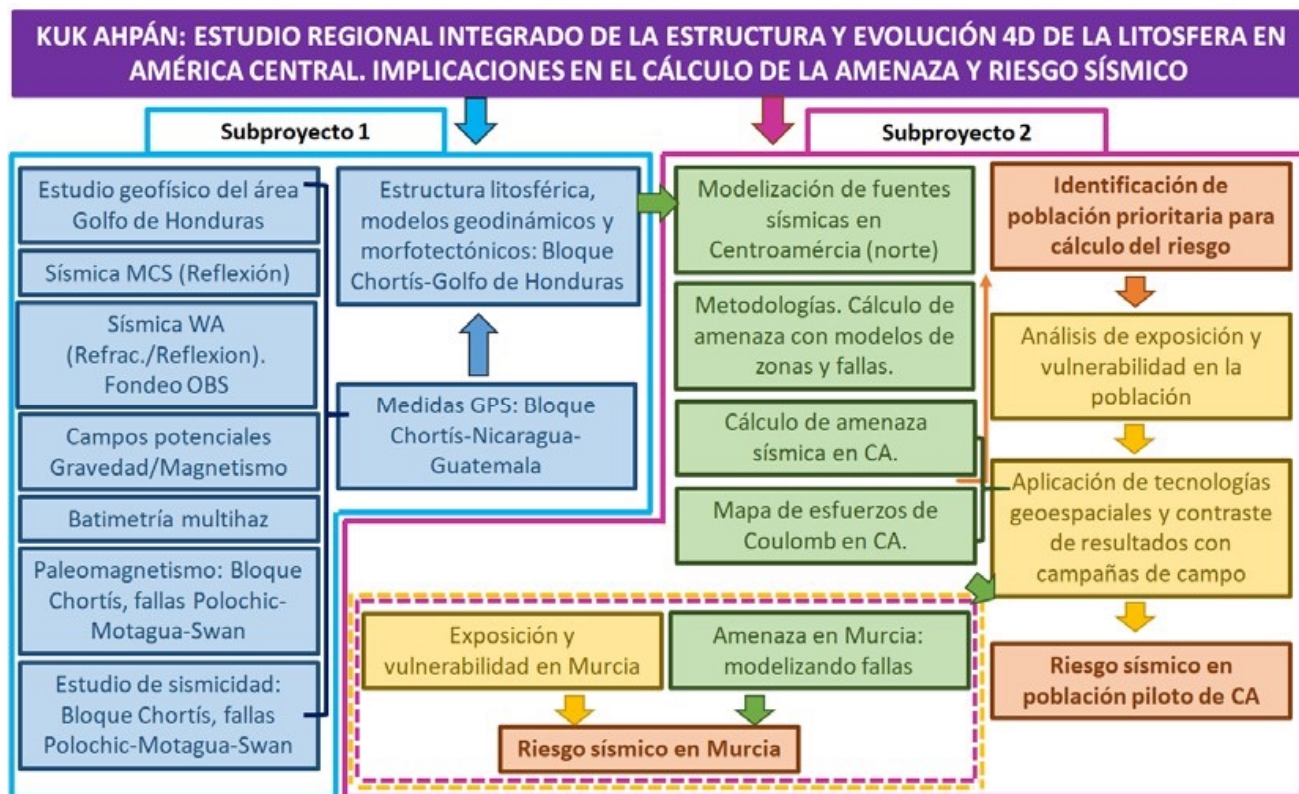


Figura 1. Diagrama de bloques con las técnicas de investigación que serán aplicadas en el Proyecto KUK AHPÁN.

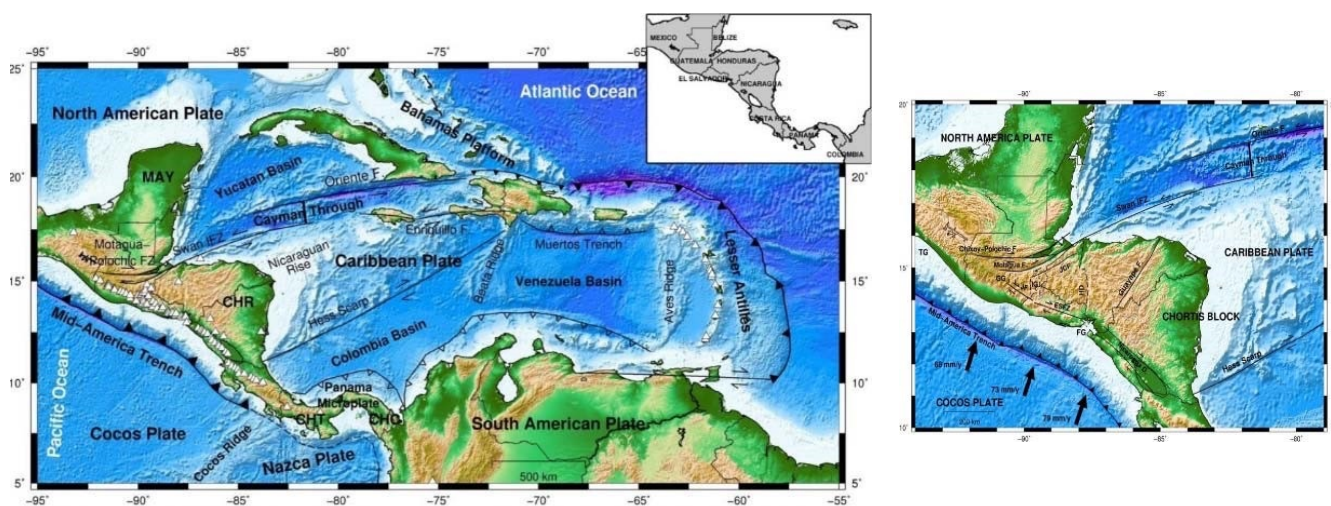


Figura 2. Izda. Mapa topográfico y batimétrico (GEBCO) de la región del Caribe con los principales elementos tectónicos, placas relacionadas y elementos estructurales. Los triángulos blancos se corresponden con la situación de volcanes del Holoceno tomados de la base de datos de Smith Smithsonian Global Volcanism. MY –bloque Maya, CHR – Bloque de Chortís, CHT – Bloque de Chorotega, CHC – Bloque de Choco. El recuadro muestra las fronteras entre países. Drcha. Ídem del norte de Centro América. Vectores negros indican la tasa de movimiento y acimut relativo entre las placas del Coco y Caribe (DeMets et al., 2010). JFC – Falla de Jocotán-Chamelocón, GG – Graben de Guatemala, IG – Graben de Ipala, JF – Falla de Jalpatagua, ESFZ – Zona de Falla de El Salvador, HD – Depresión de Honduras, FG – Gofu de Fonseca, TG – Golfo de Tehuantepec.

Subproyecto 1: KUK AHPÁN-GEOFÍSICA

Este subproyecto tiene por objetivo llevar a cabo estudios específicos de sismicidad, geofísica marina y terrestre, así como medidas de GPS y paleomagnetismo, en el área de contacto entre las placas Caribe, Norteamérica y el bloque de Chortís. La finalidad de estos trabajos es revelar la estructura de la litosfera desde el fondo del mar hasta el manto, cruzando la corteza oceánica, y determinar las fuentes de terremotos y tsunamis. Ello aportará un mejor conocimiento de la estructura de la litosfera y de la tectónica activa en una zona (Guatemala-Honduras-Golfo de Honduras) poco estudiada hasta ahora y con claro déficit de información.

Para llevar a cabo las investigaciones previstas en este subproyecto, se realizará una campaña oceanográfica en el Golfo de Honduras, a bordo del buque oceanográfico Sarmiento de Gamboa (figura 3) donde se tomarán datos de sísmica de reflexión multicanal, batimetría multihaz gravedad y magnetismo. Así mismo, de realizarán perfiles sísmicos de refracción/reflexión de gran ángulo, con registros simultáneos en mar (OBS) y en tierra utilizando una red de 100 estaciones sísmicas (figura 4). Además de esa campaña marina, se desplegará una red de 20 estaciones sísmicas de 3 componentes en Honduras y Guatemala (figura 4) durante el período de ejecución del proyecto.



Figura 3: Izda. Buque oceanográfico Sarmiento de Gamboa que desarrollará la campaña marina en el área del Golfo de Honduras. Drcha. Sismómetro de Fondo Oceánico (OBS) que se fondeará en el área de estudio.

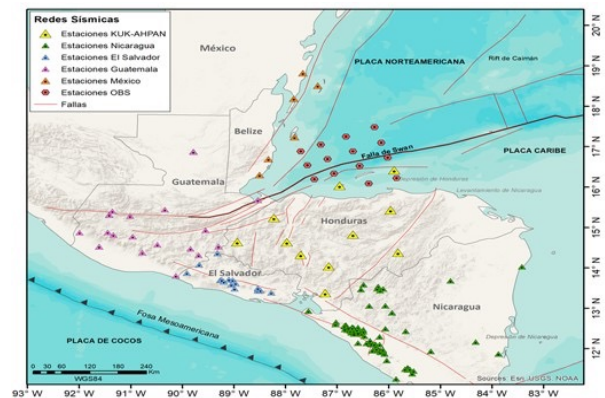
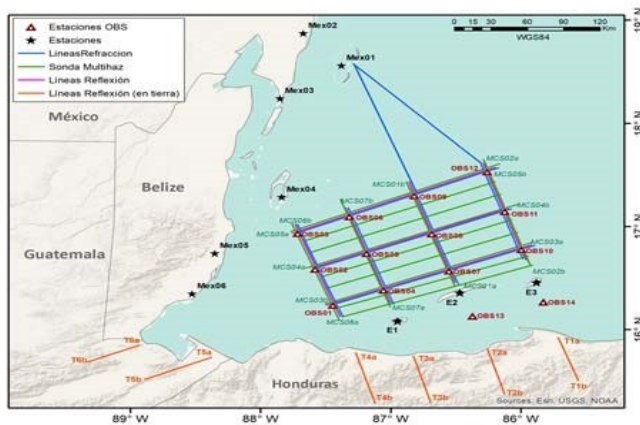


Figura 4: Izda. Campaña geofísica prevista en el Proyecto KUK AHPÁN-Geofísica, en la que participará el Buque Oceanográfico Sarmiento de Gamboa durante un periodo de 25 días. Se indican las líneas de investigación en mar y las líneas terrestres donde se instalará una red de 100 estaciones sísmicas, T1-T6. Drcha. Red de estaciones sísmicas de 3 componentes que se instalarán en tierra durante el tiempo de ejecución del proyecto y red de OBS que se fondearán durante la campaña oceanográfica en el Golfo de Honduras.

Subproyecto 2: KUK AHPÁN AMENAZA Y RIESGO SISMICO

Este subproyecto tiene como finalidad última avanzar en la evaluación de la peligrosidad sísmica, integrando los resultados más recientes referentes al conocimiento de la tectónica activa, reología, estudios de paleosismicidad, modelización de deformaciones corticales con GPS e Interferometría Radar y transferencia de esfuerzos estáticos de Coulomb, así como en la evaluación del riesgo sísmico integrando modernas tecnologías geoespaciales. El proyecto se plantea con dos grandes escenarios de aplicación:

1. Centroamérica y Caribe (figura 5), región que por la alta velocidad de convergencia entre las placas de Cocos, Norte América y Caribe presenta elevada sismicidad, que constituye un laboratorio natural para la experimentación, y donde el grupo de trabajo del proyecto tiene acreditada experiencia en proyectos previos de cooperación e investigación en la temática propuesta, configurando un grupo sólido y reconocido internacionalmente.

Retos del Proyecto

Los principales retos que se pretenden abordar en el proyecto son los siguientes:

- Caracterización de la estructura de la litosfera en la zona de contacto entre las placas de Cocos, Norteamérica y Caribe y su interacción con los bloques Maya y Chortís.

- Análisis de las variaciones laterales de la estructura de la litosfera en la zona del Golfo de Honduras y desarrollo de un modelo geodinámico.

- Estudio de los sistemas de fallas Polochic-Motagua, su prolongación en mar a través del sistema de fracturas de Swan y su relación con los sistemas de fallas Caimán y la Cresta de Beata.

- Estudio de las principales estructuras activas del interior de Honduras a partir de la instalación de una red sísmica portátil durante el proyecto que operará en cooperación con las redes sísmicas regionales.

- Estudio de las deformaciones corticales y movimientos relativos entre los bloques Maya y Chortís en relación con las placas de Cocos, Norteamérica y Caribe a partir de la instalación de una red de GPS en Honduras que operará en cooperación con las redes de GPS regionales. así como su

evolución temporal durante épocas geológicas a partir de estudios paleomagnéticos.

- Análisis de las fuentes tsunamigénicas al norte de las islas Utila, Roatán y Guanaja y modelización de la propagación de un posible tsunami que afecte a toda la región del Mar Caribe. Integración de los resultados de este estudio en un modelo digital del terreno para delimitar las zonas de inundación y plantear medidas preventivas.

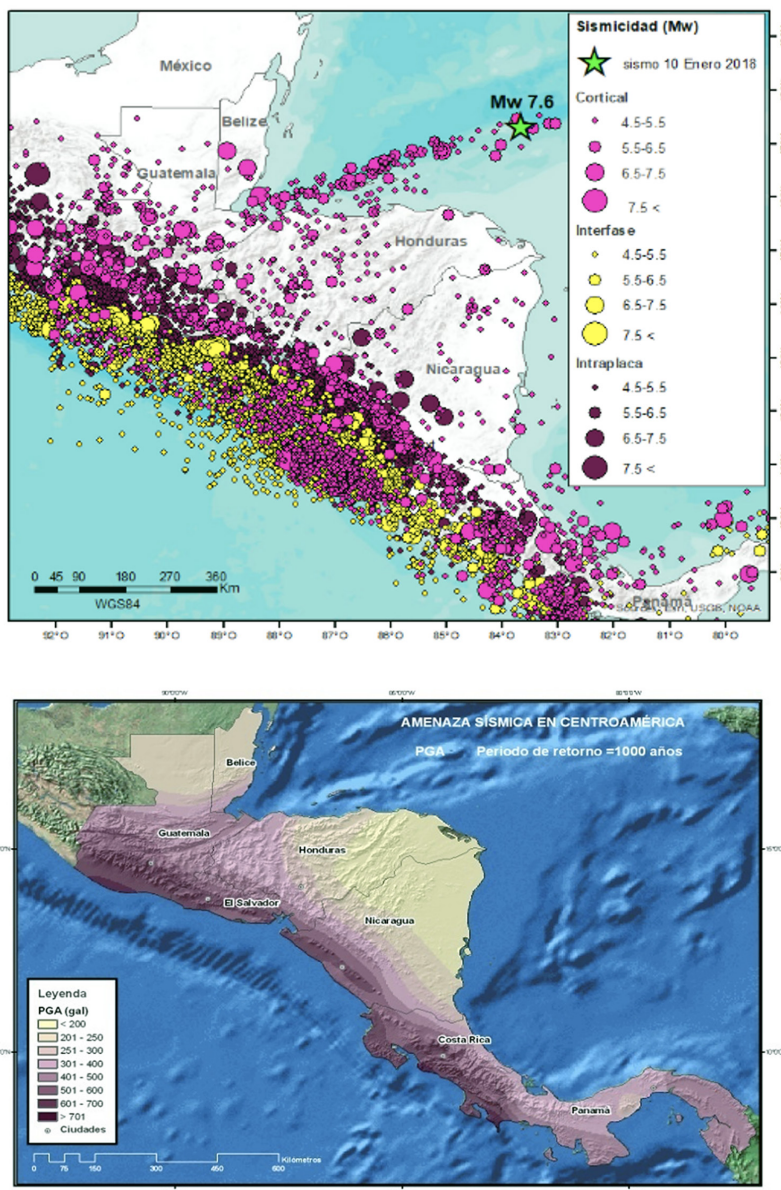


Figura 5: Mapa Superior Catálogo sísmico de América Central. Mapa Inferior Mapa de peligrosidad sísmica de América Central, obtenido en el proyecto RESIS 2.

- Desarrollo una metodología para el cálculo de la amenaza sísmica incluyendo modelos híbridos de zonas y fallas.
- Aplicación de tecnologías geoespaciales para la caracterización de la exposición y vulnerabilidad a escala municipal. Contraste de resultados con muestreos de campo.
- Desarrollo una metodología integral de cálculo del riesgo sísmico incorporando los avances metodológicos en la caracterización de la amenaza, exposición y vulnerabilidad.
- Aplicación las metodologías desarrolladas en escenarios de Centroamérica y España .

Algunos avances

Aunque el proyecto comenzó oficialmente en noviembre de 2019, los años 2020 y 2021 han sido prácticamente inactivos por causa de la pandemia del COVID-19. En el año 2022 se ha reactivado el proyecto, y se va a solicitar una prórroga de dos años, por lo que previsiblemente estará activo hasta finales de 2024. Algunos de los avances desarrollados hasta el momento se exponen a continuación.

i) Avances en el Subproyecto 1: Ha comenzado la instalación de estaciones sísmicas en Guatemala y Honduras. Se han hecho contactos en los diferentes países para realizar la campaña de sísmica marina (fecha aún por determinar), así como las campañas geofísicas contempladas.

ii) Avances en el Subproyecto 2: Se han creado comisiones de trabajo en temas de amenaza, exposición y vulnerabilidad en todos los países de Centroamérica y en España. Estas comisiones han mantenido reuniones telemáticas durante el último año, y han avanzado en las siguientes actividades:

- Generación de un Sistema de información Geográfica con datos de sismicidad, tectónica, fallas activas, etc., que servirá de base para los nuevos cálculos de amenaza.
- Generación de una base de datos documental y un repositorio para compartir información entre los participantes del proyecto.
- Caracterización de escenarios de peligrosidad críticos en San José de Costa Rica y en Ciudad de Guatemala, como estudios piloto a replicar en las demás capitales.
- Identificación de las principales tipologías y clases de vulnerabilidad en Costa Rica, así como de las curvas idóneas de capacidad y fragilidad.
- Configuración de un catálogo sísmico regional de Centroamérica, actualizado a 2020.
- Aplicación de tecnologías geoespaciales para la caracterización de la exposición y vulnerabilidad.

Por último, se están desarrollando en el marco de este proyecto cuatro tesis doctorales y diez trabajos fin de máster que contribuyen a la capacitación y especialización de alumnos de Centroamérica y España en las temáticas abarcadas por el proyecto.

Algunos de los trabajos avanzados se presentan en la Sesión especial del Proyecto KUK_AHPAN que se celebra dentro del XIV Congreso Geológico de América Central y VII Congreso Geológico Nacional Costa Rica.

Fuentes de información y páginas webs de interés relacionadas con el proyecto

- Web del Proyecto KUK_AHPÁN: <https://blogs.upm.es/proyektokukahpan/>
- Web del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica (GIIS): <http://grupos.topografia.upm.es/sismo/?lang=es>
- Web del Grupo de Estructura y dinámica de la tierra, técnicas de GPS y estudios Ionosféricos de la Universidad Complutense de Madrid (UCM): <https://fisicas.ucm.es/grupos/grupo/524>
- Web del Máster en Análisis del Riesgo Sísmico mediante Tecnologías Geoespaciales (ARSTG) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM):

<https://www.topografia.upm.es/Docencia/Master/MasterARSTG#:~:text=El%20M%C3%A1ster%20en%20An%C3%A1lisis%20del,geolog%C3%ADa%2C%20sismolog%C3%ADa%2C%20peligrosidad%20s%C3%ADsmica%2C>

Agradecimientos

El proyecto KUK_AHPAN forma parte del Programa Estatal de I+D+i orientada a los Retos de la Sociedad (Convocatoria 2018) y es financiado por el Gobierno de España (MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/) y por FEDER Una manera de hacer Europa.
(REFERENCIA: RTI2018-094827-B-C21 y C22)





MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Aprovechamiento comercial de los recursos geotérmicos más allá de una actividad de extracción

Eddy Sánchez Rivera^{a*}

^aInstituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Los recursos geotérmicos están asociados a la presencia de un yacimiento geotérmico, los cuales existen en medio geológico profundo.

La ley No. 5961 “Facultad del Instituto Costarricense de Electricidad para la Investigación, Exploración y Explotación de los Recursos Geotérmicos del País”, promulgada el 6 de diciembre de 1976, dentro de sus alcances indica:

“Se declara de interés público la investigación, exploración y explotación de los recursos geotérmicos del país, y las actividades concernientes estarán a cargo del Instituto Costarricense de Electricidad...”

Planteando el anterior alcance que el país llegue a contar con las capacidades para explotar sistemáticamente y a largo plazo un recurso energético presente en un ambiente geológico, lo anterior bajo los conceptos de manejo de un yacimiento geotérmico, que a diferencia de los conceptos de manejo de los yacimientos petroleros y gasíferos, no se basan en una estrategia de extracción y agotamiento, sino que se basa en una estrategia de extracción y reinyección, bajo un enfoque de sostenibilidad a largo plazo.

Los aprovechamientos geotérmicos tienen su riesgo inherente al negocio, comprendiendo que estos cuentan tanto con un componente industrial, como con un componente geológico (yacimiento), y es en este último donde prácticamente concentramos todos los riesgos; que de forma macro estarían contenidos en los siguientes alcances:

- Determinar la existencia de un yacimiento geotérmico (etapa de exploración).
- Definir la capacidad del yacimiento (etapa de exploración).
- Definir el régimen de explotación sostenible al que puede ser expuesto el yacimiento (etapa de exploración).
- Definir la estrategia financiera/económica (etapa de preinversión).
- Definir la política de desarrollo de yacimiento (estrategia de perforación del sistema explotación-reinyección) en miras a la visión de sostenibilidad planteada (etapa de desarrollo).
- “Compatibilizar” los diseños de la infraestructura superficial con las condiciones de (complejidad) del yacimiento actual y su posible evolución durante la vida útil del negocio (etapa de desarrollo).
- Seguimiento, adecuación y ajustes, durante la etapa constructiva de la infraestructura superficial (etapa de desarrollo).
- Integrar la variable socio-ambientales desde las etapas de conceptualización (todas las etapas).
- Definir las estrategias y políticas de explotación del yacimiento bajo un régimen de sostenibilidad (etapas de desarrollo y explotación).
- Definir las políticas y programas de monitoreo que permitan garantizar la condición de estabilidad del yacimiento y las medidas de ajuste cuando se requiera (etapa de explotación).
- Definir las políticas y programas de control y mantenimiento que permitan garantizar la condición de estabilidad de los sistemas y equipos superficiales (etapa de explotación).

¹ “Cuando en un área geográfica concreta se cumplen las condiciones geológicas y económicas necesarias para que se puedan explotar los recursos geotérmicos del subsuelo, se dice que en ese punto existe un yacimiento geotérmico.”

<http://www.igme.es/Geotermia/Los%20yacimientos%20geot%20E9rmicos.htm>

*Autor para contacto: esanchezr@ice.go.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Potencial minero en América Central y el Caribe, y la importancia de la inclusión de la mujer

Ana Gabriela Juárez^{a*}

^aWomen in Mining Central America, Consultoría y Tecnología Ambiental.

El mundo quiere avanzar hacia una economía basada en energías renovables y movilidad eléctrica. Esto requiere el suministro de metales para los equipos que toman energía del sol o del viento, así como los metales que se requieren para la movilidad eléctrica; por tanto, el mundo quiere de metales ... cobre, níquel, cobalto, litio y acero, principalmente. ¿De dónde provendrán estos metales sino de minas que puedan operar en un entorno regulatorio y socialmente favorable, y que además brinde certeza jurídica a los inversionistas sobre las reglas que se aplicarán al negocio?

Canadá, está orientado a la minería y quiere posicionar su industria minera para generar los metales que abastecerán al mundo. Canadá ve esta oportunidad para que su industria tome la delantera sabiendo que traerá beneficios al país, empleos, tecnología, un mejor nivel de vida y, por supuesto, se recaudarán más impuestos.

Centro América y el Caribe es una región muy rica en recursos minerales, desde oro y níquel, hasta cobre, y zinc. Actualmente contamos con importantes proyectos mineros en nuestra región que generan inversiones billonarias, como es el caso de la Mina de Pueblo Viejo de Barrick Gold en República Dominicana, con una inversión de aproximadamente 6.7 billones de dólares americanos, o en Panamá con Cobre Panamá, 6.4 billones de dólares americanos. Los gobiernos de Centro América y el Caribe deben de estar bien informados y comprender cómo funciona el mercado y que deben de hacer para atraer esta inversión. Esto requiere dejar funcionar el mercado y dirigir su intervención a generar estabilidad, reglas claras y mejorar la seguridad. El futuro sería más favorable para nuestra región, porque la minería es la industria que puede generar empleo bien remunerado en las zonas rurales, además de proveer apoyo y trabajo a grupos vulnerables o poco representados, como es el caso de indígenas o mujeres.

Lo que algunos perciben como una amenaza puede ser una gran oportunidad para todos

*Autor para contacto: anajuarez@cta-consultoria.com



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Evolución de los arcos volcánicos en América Central y su correlación con los yacimientos metálicos en el tiempo y espacio (Cretácico al presente)

Guillermo E. Alvarado^{a*}

^aÁrea de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

^bComisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), San José, Costa Rica.

Hoy día existen un buen número de estudios geológicos (petrológicos, geocronológicos, metalogénicos, entre otros) que permiten esbozar un marco general y más preciso de la evolución magmática en América Central y sus mineralizaciones metálicas. Sin embargo, falta aún más control geocronológico y mapeo estratigráfico. Las comparaciones que acá se realizan, son relativamente generales, aunque la ubicación de las dataciones radiométricas y su asociación geológica a lo largo de América Central permite proporcionar un marco, no solo sobre la estratigrafía ígnea, sino una serie de inferencias acerca de la edad de los eventos metalogénicos.

Las rocas ígneas del Jurásico Superior temprano al Eoceno Medio (~160 a ~41 Ma), corresponden principalmente con acreciones ofiolíticas s. l., que se interpretan como una amalgama de plateaus oceánicos, islas oceánicas, trazas de puntos calientes y de arcos de islas primitivos.

Durante el Campaniano (~71 Ma) comienza a establecerse la actual zona de subducción, conformada por rocas volcano-sedimentarias, con una composición desde básica a félsica. El arco primitivo in situ logra dibujarse de modo desmembrado por tectonismo y plegado para rocas con edades entre 60 y 50 millones de años.

Las rocas ígneas asociadas a un arco con edades entre los 29 (Oligoceno Superior Tardío) y 13 Ma (Mioceno Medio), se extienden desde el Canal de Panamá hasta ciudad Guatemala. La ubicación y la edad de las rocas ígneas indican que el arco dio un giro de 20° al NW entre 12 y 7 Ma (Mioceno Medio Tardío a Mioceno Superior), con un polo de rotación que se centró en el sur de Costa Rica. Este nuevo arco se extendió desde el Canal de Panamá hasta ciudad Guatemala, pero ubicado al frente del arco del Mioceno Medio y con una posición más paralela a la fosa tectónica actual.

La formación de los yacimientos metálicos, aunque poseen pocas dataciones directas, se observan que tienen una asociación directa con los arcos primitivos, por lo que se puede inferir: Depósitos Epitermales (Au + Ag ± Pb ± Cu ± Zn) vetas, stockworks y cobre porfídico (Cu ± Pb ± Zn) relacionados con la actividad volcánica subaérea e intrusiones félsicas a los ~55 a 50 Ma, ~22.9 a 22.2 Ma, ~16.4 a 15.3 Ma y ~5.6 a 3.3 Ma. El oro placer sería del Plioceno Superior al Holoceno (~3.6 - 0 Ma), mientras que los de magnetita serían del Holoceno. Se discute sobre el posible origen del oro de placer del sur de Costa Rica (¿pepitas alóctonas o para-autóctonas?), de si está asociado con un arco (oro orogénico) o con las ofiolitas s.l. allí aflorantes. Basado en relaciones isotópicas (¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os versus ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os) y evidencias de campo, los datos preliminares (investigación en proceso; Walker et al.) sugieren una deposición desde fluidos provenientes del manto superior durante el Eoceno Medio, aunque se requiere de más análisis.

*Autor para contacto: GAlvaradoI@ice.go.cr



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



**Groundwaters in Latin America:
 far from the eyes... far from the heart of society**

**Aguas subterráneas en América Latina:
 lejos de los ojos.... lejos del corazón de la sociedad**

Ricardo Hirata^{a*}

^aGroundwater Research Center (CEPAS|USP), University of São Paulo, São Paulo, Brazil

Abstract: The invisibility of groundwater is not just ‘geological’. Governments in Latin American countries are unaware of their role in society, the economy, and the environment and therefore do not prioritize this resource in management and public policies. In Latin America, 84,000 Mm³/a are extracted, of which 25–40% are for public supply, especially in Costa Rica (80%), El Salvador (87%), and Paraguay (75%). The importance is unquestionable. There is an urgent need to change this vision with actions covering the restructuring of water resources management bodies, creating social communication programs and university technical training courses, and implementing environmental education.

Palabras clave: comunicación social; valoración económica de las aguas subterráneas; recursos hídricos subterráneos.
Key words: Social Communication; economic valuation of groundwater; groundwater resources.

An Invisible Giant

Groundwater is invisible to society. This phenomenon is not unique to Latin America, but it is worldwide, to the point that the United Nations declared 2022 as the ‘Year of Groundwater’ with the motto ‘making the invisible visible’ [1].

The invisibility of groundwater goes beyond its location underground. Governments in Latin America are unaware of the role of this resource for society, the economy, and the environment and therefore do not prioritize the groundwater resource in management and public policies. This lack of awareness imposes risks to human health, damage to nature, economic losses, and loss of opportunities, especially in an environment of uncertainty associated with global climate change.

Groundwater is responsible for supplying more than 2 billion people worldwide. In Latin America, 84,000 Mm³/a are extracted, of which 25-40% are for public supply, especially in Costa Rica (80%), El Salvador (87%),

*Autor para contacto: rhirata@usp.br <https://cepas.igc.usp.br/>

and Paraguay (75%). Other than in these countries, supplies are preferentially private and complementary to public systems. However, no studies economically price the water derived from aquifers. In Brazil, simple estimates show that the resource would have a value of more than USD 15 billion/a (exclusive water value), with extractions exceeding 557 Mm³/a, through 2.5 million tubular wells [2][3].

The primary causes for this invisibility are poorly understood. However, it is accepted that a) the population does not have an ‘education of groundwater’; that is, the topic is not discussed in schools, and many are unaware of the existence of this part of the hydrological cycle and the dependence of the humanity and the environments on these waters; (b) the topic is not part of the curricula of higher education courses (e.g., engineering, geography, agronomy, biology, and ecology), even in specialties where groundwater is intensively used; (c) studies that conclusively demonstrate the role of groundwater in the economy are virtually non-existent, as are those that calculate (and price) the social and ecological benefits. Instead, most studies are qualitative or speculative; (d) there are no social communication programs that bring this topic up for discussion by society. In this case, the government itself (because its technicians are not prepared) does not create an agenda where the role of groundwater is communicated to the population and even to other government sectors; and (e) the form of exploitation of the resource, which can be done by wells and springs operated individually and privately spread over large areas (as opposed to centralized systems for capturing surface water), preventing decision-makers from understanding (or being sensitive to) the extent of use and give due importance to the groundwater resource.

In Latin America, where water supply infrastructure is deficient, the population resorts to individual solutions to overcome the problem, including groundwater. In almost all countries, legislation obliges the registration of abstractions; however, there is secrecy surrounding 70–80% of the wells; the importance of groundwater is hidden behind official statistics. A good example occurs in the Metropolitan Region of São Paulo, where groundwater ‘officially’ supplies 1% of the population. However, 12 thousand private collections (70% illegal), extracting 11 m³/s, allow this resource to meet the needs of 15–18% of the population [2][3][4][5].

Another common invisibility problem is the lack of awareness of conflicts between groundwater users and between the contaminated abstraction and the cause of resource degradation. This problem is caused by the difficulty of relating cause and effect or even the delay in detecting the problem. In other words, there are often conflicts, but these are not apparent or perceived by society. Because they do not understand the causes, many groundwater users simply abandon their wells without notifying the responsible public bodies. The lack of pressure from society causes those accountable for management to feel no pressure to act, creating a vicious cycle [2].

Making the Invisible Visible: Actions for Groundwater Governance

Groundwater is more important than society’s perception of it, and attention paid by management agencies falls short of the need for its preservation. Given the current importance and the significant potential of aquifers in the water supply (still underused by countries), measures must be implemented, including:

a) creating a national or provincial program based on i) mapping areas where groundwater makes a difference due to its intense use and dependence on the population or no lower-cost source alternatives. These mappings must extend beyond the use for public supply and the simple wells inventory; ii) regional assessment of the aquifer potential and how this resource can respond to the needs facing economic growth and environmental dependence (ecological and economic zoning); iii) identification of critical areas, where there is the intense use of groundwater (overexploitation) or risk of aquifer contamination (both by anthropic and natural sources - geochemical anomalies), resulting in damage, and where management attention should focus—optimizing efforts and money; iv) studies of economic valuation of groundwater resources; and v) restructuring of the institutions responsible for the management of groundwater resources, centralizing attributions generally dispersed in various public institutions, training their technical staff and creating material conditions for the inspectorate and support to the user;

b) establishing a program to create actions to protect their springs and wells, with delineation of source or wellhead protection areas by the water source companies, in coordination with health surveillance agencies, with centralization of well/spring information, territorial occupation, and chemical analysis of the waters;

c) instituting a systematic social communication program that makes the user – public and private—aware of the best practices in using groundwater resources, inducing them to legalize their wells. In addition, this program should provide information on contracting drilling and well-maintenance works. The State must assume a posture of a ‘partner of groundwater user’ (overcoming the restricted position of the punisher, common to legislations based on ‘command and control’) and should seek to provide appropriate information and service channels to induce the self-monitoring of groundwater, the communication of problems to Health Surveillance and Environment institutions, and the systematic supply of well operation information. For society, this program should demonstrate the importance of groundwater for public and private supply and the environment and social well-being, ensuring that this resource is treated correctly in government economic or watersheds plans;

d) implement a training program for professional staff with the following activities: i) expansion of regular courses in hydrogeology (and related disciplines) in schools of engineering, geography, agronomy, biology, ecology among others; ii) training of primary and secondary school teachers in subjects related to groundwater. This initiative would be accompanied by specific educational material and public events such as the Children’s Groundwater Festival of the Province of Ontario, Canada [<http://www.wwcgf.com/>] and exhibitions in science museums;

e) identifying professionals who are local/regional hydrogeological leaders (champions) and forming a support network and discussion of groundwater issues. Such networks could be supported by universities, UNESCO, scientific associations, and colleges of geologists and engineers;

f) identify areas where water poverty persists, developing programs where groundwater can make a difference through low-cost well construction programs (but which may have high technology onboard).

Acknowledgments

The author would like to thank FAPESP (Proc. 2021/15434-0) for the financial support through the Thematic Project SACRE (Water solutions for resilient cities).

References

1. UNESCO. (2020). Groundwater: making the invisible, visible in 2022 and beyond. <https://www.unesco.org/en/articles/groundwater-making-invisible-visible-2022-and-beyond#:~:text=Summary&text=UNESCO%2C%20together%20with%20its%20centre,remain%20active%20throughout%20the%20year>.
2. Hirata, R; Suhogusoff, A; Marcellini, S; Villar, P; Marcellini, L. (2019). As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. Instituto de Geociências (USP), CEPAS | USP, Trata Brasil. São Paulo. 63 pp.
3. Hirata, R; Foster, S; Oliveira, F. (2016). Águas subterrâneas urbanas no Brasil. Instituto de Geociências, FAPESP. São Paulo. 111pp.
4. Foster, S; Hirata, R; Custodio, E. (2021). Waterwells - How can we make legality more attractive? *Hydrogeology Journal*, 29: 10-17.
5. Foster, S; Hirata, R; Eichholz, M; Alam, M. (2022). Urban self-supply from groundwater? An analysis of management aspects and policy needs. *Water*, 14: 575-588.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Escenarios deterministas de amenaza sísmica en el área metropolitana de San José (Costa Rica) en el marco del proyecto KUK ÀHPÁN

María Belén Benito^{a*}, Guillermo Alvarado^b, Mario Arroyo^a, Alvaro Climent^c,
Rebeca Franco^a, Carlos García Lancharés^{a, c}, Orlando Hernández^a, Miguel Marchamalo^a,
Walter Montero^c, Adriana Ornelas^a, Rosey Pietra^d, Ligia Quirós^a

^a Universidad Politécnica de Madrid, España.

^b Comisión Nacional de Emergencias, Costa Rica

^c Consultor independiente

Abstract: During the last years, several crustal seismic sources have been proposed in Costa Rica, some of them presenting high influence in the seismic hazard in the capital, San José. Here we present several seismic scenarios related with the main crustal faults in the nearby of the city. We have characterized the corresponding hazard scenarios in a deterministic way, estimating the peak ground accelerations (PGA) including local site effects. The critical rupture scenarios have been identified with earthquakes in faults Bello horizonte, Cipreses and Río Azul, with magnitudes M_w of 6.2, 6.3 and 6.6. Ground motions generated by the three deterministic scenarios have been simulated, firstly on rock conditions. Then, we have compiled information about soils condition in the Metropolitan area of Saan José and we elaborated a micro zonation map of the city. In a last step we estimated the ground motion including local. The results are ground motion maps for the three scenarios, in terms of peak ground acceleration (PGA).

Palabras clave: escenarios sísmicos deterministas, peligrosidad en San José (Costa Rica) Microzonación.

Key words: Deterministic seismic scenarios, Seismic Hazard in San José (Costa Rica), Microzonation.

Introducción

Costa Rica se caracteriza por tener una alta sismicidad de magnitud intermedia $M_w < 7.7$, con sismos generados tanto en la zona de subducción de la placa del CoCo frente a Caribe, como en fallas de cadena volcánica. La capital del país, San José, se encuentra ubicada en el complejo sistema de fallas del Valle Central, y ha sido afectada por numerosos sismos destructores a lo largo de su historia. Teniendo en cuenta el alto potencial simogenético de las fallas del Valle central, además de la alta exposición y vulnerabilidad, podemos afirmar que la capital del país se encuentra expuesta a un riesgo sísmico elevado.

En los últimos 200 años, 4 terremotos destructores han ocurrido en el Valle Central y han afectado seriamente a San José, todos ellos con M_w superior a 6.0. Dichos sismos ocurrieron en Cartago (1841 M_w 6.4), Fraijanes (1988, M_w 6.0), Cartago (1910 M_w 6.4) y Falla de Tárcoles (1924, M_w 7.0).

*Autor para contacto: mariabelen.benito@upm.es

Desde este último evento un aparente gap sísmico se percibe en el Valle Central de Costa Rica. Esto hace suponer que la zona se encuentra tensionada y podría esperarse un terremoto como los ocurridos entre 1841 y 1924.

En este trabajo, analizamos y caracterizamos los escenarios críticos que podrían generarse en San José, identificando las fallas locales y sus magnitudes máximas y simulando los correspondientes movimientos esperados con carácter determinista. Los escenarios identificados corresponden a rupturas en las fallas de Belo horizonte, Cipreses y Río Azul, donde se identifican posibles sismos de Mw 6.2, 6.3 y 6.6, respectivamente. Se simulan así las aceleraciones primeramente en emplazamientos genéricos en roca, aplicando varias ecuaciones de predicción del movimiento (GMPEs) que se consideran idóneas para la región. Paralelamente, se han recopilado los datos existentes para elaborar un mapa de microzonación de la ciudad; datos de diversa índole y procedencia: Vs 30, periodos naturales de suelo, sondeos, etc. A los suelos identificados se aplican entonces los factores de amplificación propuestos en NEHRP (2020) y combinando éstos con los mapas en roca se caracterizan los movimientos para los tres escenarios propuestos incluyendo el efecto local.

Los resultados servirán para chequear los espectros de la norma de construcción en la capital del país, así como para el posterior cálculo de riesgo sísmico que permita sustentar planes de emergencia y medidas de mitigación.

Materiales y Metodología

En primer lugar, se han identificado tres escenarios críticos que resultan dominantes en la peligrosidad de San José. Estos escenarios corresponden a rupturas en las fallas Belo Horizonte-Patalillo, Río Azul y Cipreses. Asimismo, se definen las longitudes de ruptura, áreas de ruptura y ángulos de inclinación de los tres escenarios sísmicos, con el objetivo de caracterizar de forma determinista los movimientos que previsiblemente generarán dichas rupturas asociadas con las fallas corticales más cercanas a San José. La figura 1 muestra el mapa de situación de estas fallas, cuyos parámetros de geometría y orientación se incluyen en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros característicos de la geometría y orientación de las fallas donde se considera la ruptura correspondiente a los escenarios críticos en San José.

Fault	Geo Coord (CRTM05)		Azimuth (°)	Dip (°)	Rake (°)	Fault Mechanism	Magnitude (Mw)	Length (km)	Width (km)	Rupture depth (km)
	X	Y								
Belo Horizonte	485043.339	1090361.4	135	30 S45W	45	Reverse	6.2	12.6	7.0	3
Río Azul	498026.029	1093578.7	85	90	45	Strike-slip	6.6	15.4	15.0	5
Cipreses	504085.242	1101813.4	330	25	45	Reverse	6.3	14.0	9.2	3.8

Para cada uno de los escenarios se ha calculado el movimiento fuerte, en términos de aceleración pico (PGA) en roca, aplicando varias ecuaciones de predicción del movimiento (GMPE). Estas se han elegido considerando los resultados de un estudio de contraste de modelos con datos acelerométricos locales, que ha permitido identificar aquellos modelos que se ajustan mejor a los datos registrados. Estos modelos son los propuestos por: Cauzzi et al. (2015) [1], Kanno et al (2006) [2] y Boore et al (2014) [3]. Con estos modelos se ha construido un arbol lógico con un nodo representando la atenuación, y se ha asignado a cada modelo un peso en función de la bondad del ajuste. Los pesos asignados son 0.4 para [1]; 0.4 para [2] y 0.2 para [3].

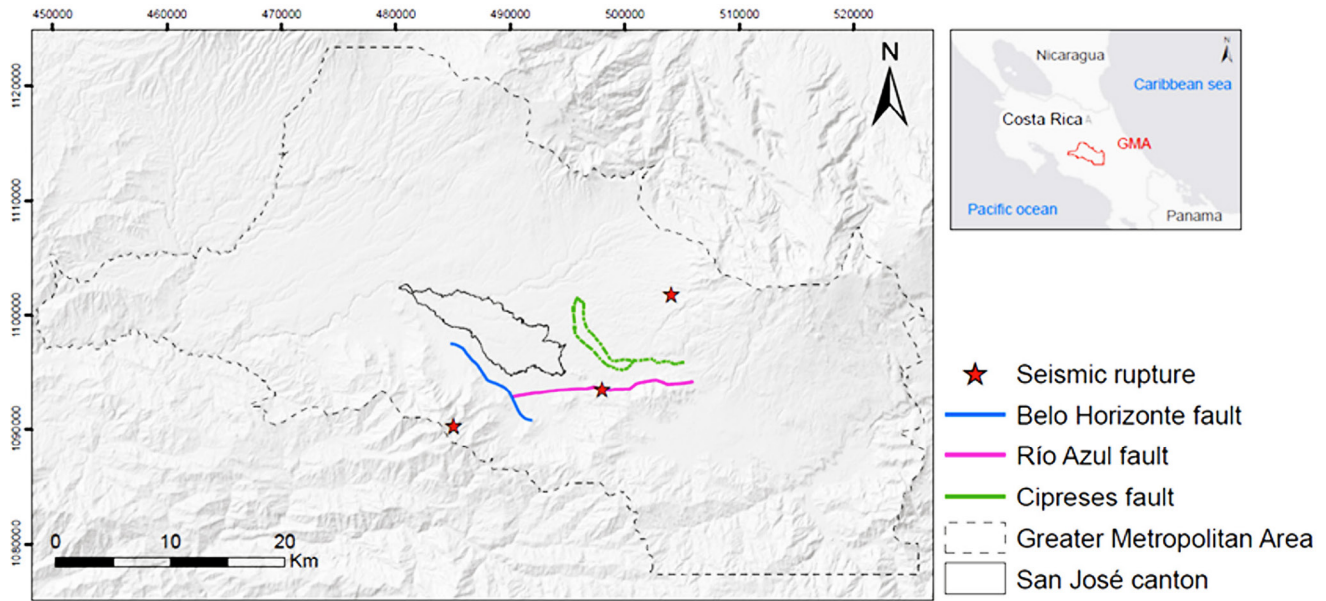


Figura 1. Situación de las fallas de Belo Horizonte, Río Azul y Cipreses que constituyen los escenarios críticos en la peligrosidad de San Jose, relacionados con las fuentes sísmicas corticales más próximas a esta zona urbana. Los epicentros propuestos para la ruptura en cada falla se representan mediante las estrellas rojas.

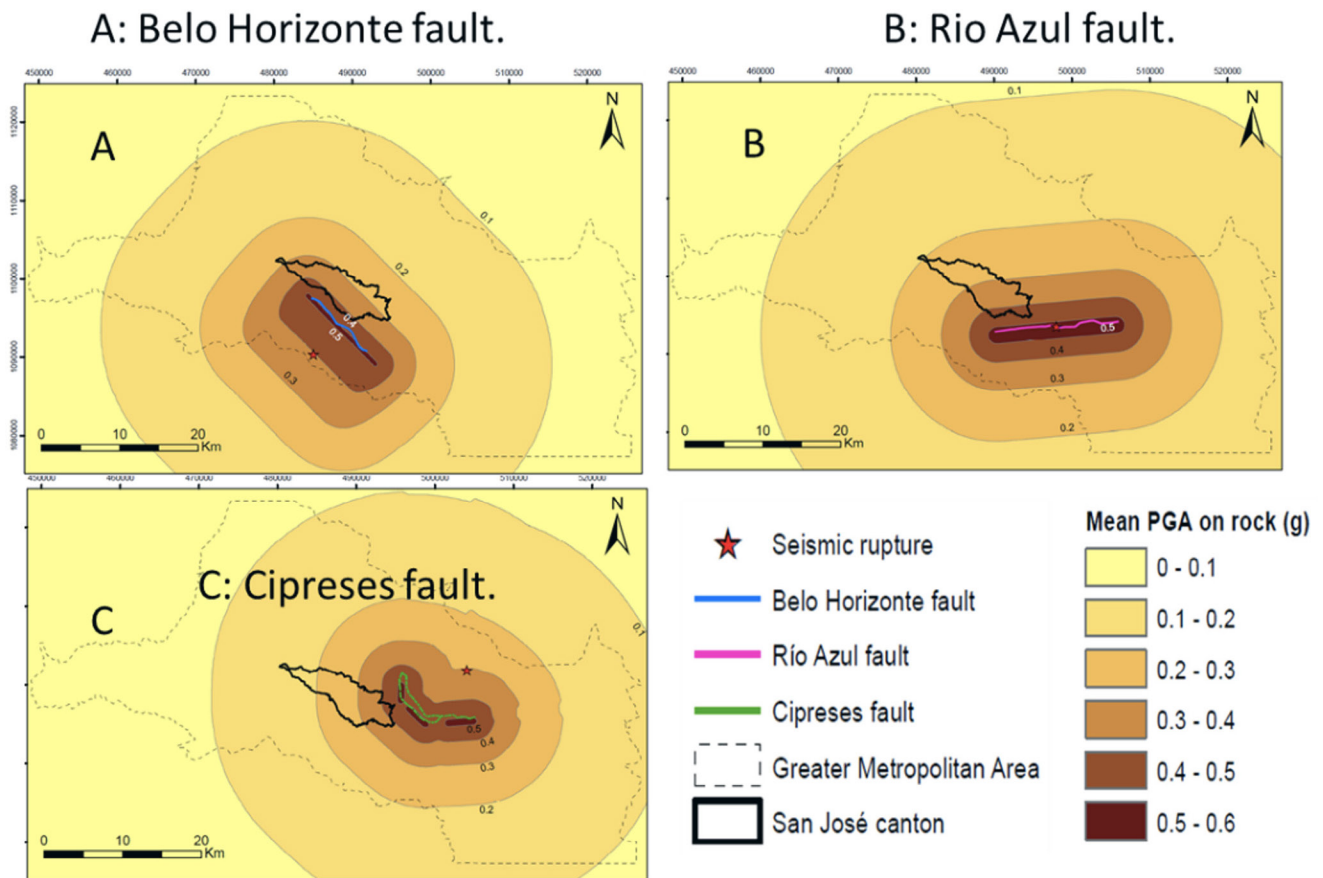


Figura 3. Mapas del movimiento esperado en términos de aceleración pico (PGA) en roca, por cada uno de los escenarios sísmicos definidos. A) Falla de Belo Horizonte, Mw 6.2, B) Falla de Río Azul, Mw 6.6; C) Falla de Cipreses, Mw 6.3.

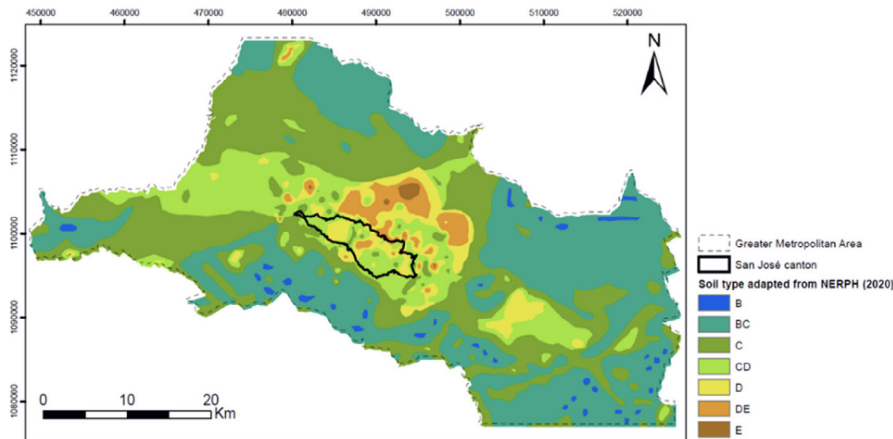


Figura 4. Mapa de microzonación en San José siguiendo la clasificación de suelos propuesta por NEHRP (2020)

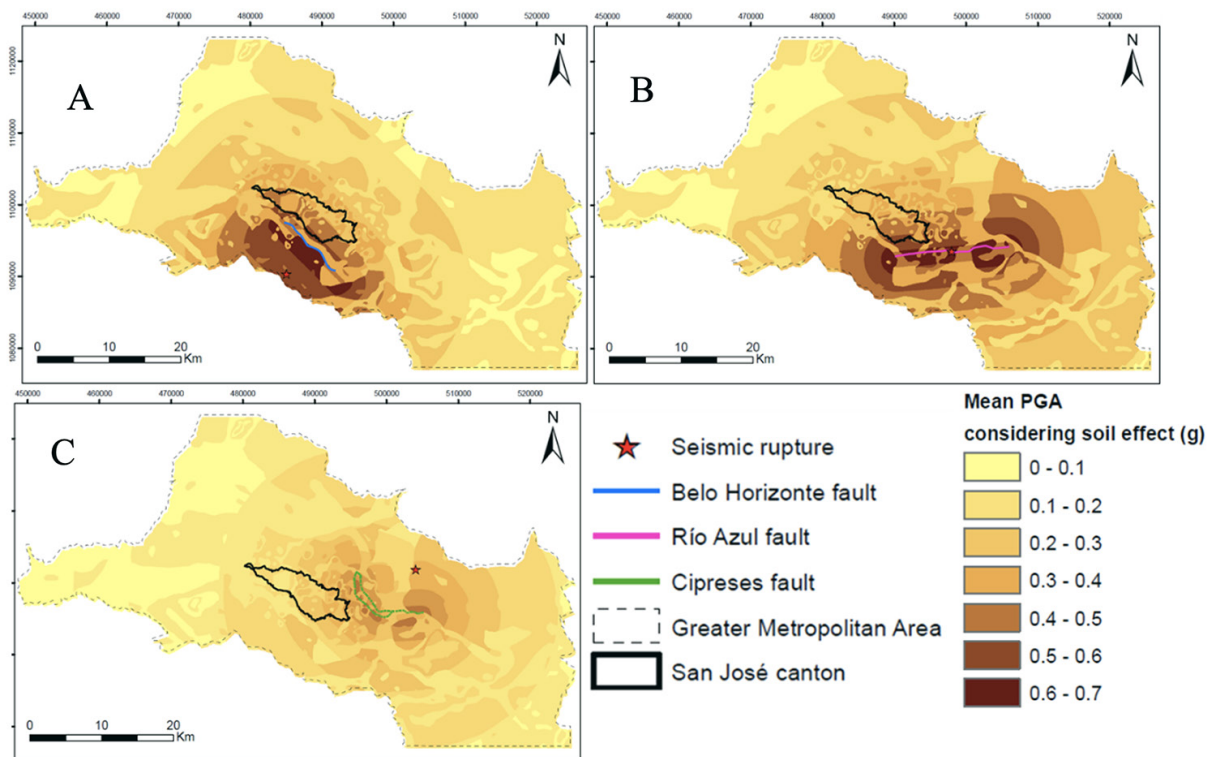


Figura 5. Mapas del movimiento esperado en términos de aceleración pico (PGA) incluyendo el efecto local, para cada uno de los escenarios sísmicos definidos. A) Falla de Belo Horizonte, Mw 6.2, B) Falla de Río Azul, Mw 6.6; C) Falla de Cipreses, Mw 6.3.

Resultados y Análisis

Las aceleraciones pico (PGA) resultantes para cada uno de los escenarios definidos en el área metropolitana de San José (en roca), aplicando los modelos y pesos indicados anteriormente, se muestran en la figura 3. Se representan los valores de PGA medios con la ponderación de pesos del árbol lógico planteado.

Seguidamente se ha elaborado un mapa de microzonación, haciendo uso de información geológica, geotécnica y geofísica, y de mediciones de velocidades de onda de cizalla (V_{s30}) en 42 sitios en la GAM. Los suelos se han clasificado siguiendo los criterios del NEHRP (2021) [4] y las clases resultantes se muestran en la figura 4. Esta clasificación también

se corroboró con valores de periodo fundamental del suelo, medidos a partir de la técnica de Nakamura, para 185 puntos dentro del cantón de San José (Schmidt, 2021) [5].

Superponiendo los valores de aceleración en roca para los tres escenarios definidos (figura 3) con el mapa de clasificación de suelos (figura 4) y aplicando los factores de amplificación espectrales determinados por Mixco (2020), se obtuvieron los mapas de aceleración pico (PGA) incluyendo el efecto local en el cantón de San José. Dichos mapas son mostrados en la figura 5.

Conclusiones

De los tres escenarios de ruptura propuestos el que resulta más crítico en el área metropolitana de San José es el de un eventual sismo de Mw 6.2 en la Falla de Belo Horizonte, que podría llegar a generar aceleraciones de 0.5 g, incluyendo el efecto local, en algunas zonas de la ciudad. El escenario de la falla de Rio Azul, con un sismo de Mw 6.6 generaría también aceleraciones del mismo orden al sur de la ciudad, mientras que un sismo de magnitud Mw 6.3 en la falla de Cipreses resulta ser el escenario menos crítico, con aceleraciones por debajo de 0.3.

Referencias bibliográficas

1. Cauzzi, C; Faccioli, E. ; Vanini, M and Bianchini, A. (2015). Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration, *Bull Earthquake Eng* (2015) 13:1587–1612.
2. Kanno T. (2006) A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bull. Seismol Soc Am* 96:879–897. doi:10.1785/0120050138
3. Boore DM, Stewart JP, Seyhan E, Atkinson GM (2014) NGA-West 2 equations for predicting PGA, PGV, and 5 %-Damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthq Spectra* 131108093828003. doi:1
4. BSSC (2020), NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part1: Provisions, FEMA 368, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
5. Schmidt (2021). Comunicación personal.
6. Mixco, L. (2020). Estimación de efectos de sitio a través de modelos empíricos. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador.





MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Universidad
de Navarra

Aproximación a la estimación de riesgo sísmico en la Ciudad de Guatemala: Primer modelo de exposición sísmica

Luis Diego Dávila Migoya^{a*}, José Manuel Cabrero^a, Omar Flores^b

^aEscuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Navarra, Pamplona, España.

^bCentro de Estudios Superiores de Energía y Minas, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Abstract: In recent years, advances in regional seismic hazard research have highlighted the need to study the vulnerability of buildings in Central America. In addition, moderate magnitude earthquakes have occurred in Guatemala in recent years, causing damage. An accurate exposure model and updated hazard scenarios are essential for a detailed vulnerability study. This exposure study reveals the presence of structural typologies highly vulnerable to earthquakes: adobe. The country's limited exposure studies have impeded the implementation of policies to reduce the vulnerability to a disaster such as the 1976 earthquake.

Palabras clave: Vulnerabilidad sísmica, exposición sísmica, planeamiento urbano, Ciudad de Guatemala.

Key words: Seismic Vulnerability, seismic exposure, urban planning, Guatemala City.

Introducción

Los factores que están involucrados para el cálculo del riesgo sísmico de una ciudad son: la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad. Por lo general, los edificios son agrupados en distintas clases de vulnerabilidad. La escala macro sísmica europea [1] considera 12 grados de intensidad definida en términos de estimación del daño en edificios de diferente tipología. La EMS 98 define cinco grados de daño, principalmente escritos por el daño a elementos estructuras y no estructurales de mampostería y hormigón armado.

En los últimos años el estudio del índice de vulnerabilidad ha sido estudiado por [2]. Del mismo modo proyectos como el Risk UE [3], y del mismo modo los proyectos de PAGER y el Global Earthquake Model [4], [6]. Agrupar edificios por distintas tipologías repercute en estudios de riesgo sísmico más eficientes, y de la misma manera, ahorra tiempo y dinero. La clasificación ayuda a definir una taxonomía que depende de cada región del mundo respondiendo a sus peculiaridades constructivas y materiales.

Centro América es una de las regiones con mayor actividad sísmica en el planeta. Está ubicada en un área de contacto entre límites de la Placa Caribe, Norteamérica, del Coco y Nazca [7]. Sin embargo, uno de los componentes del riesgo con menor grado de estudio es la exposición. El desconocimiento del posible escenario catastrófico dificulta la

*Autor para contacto: ldavila@unav.es

sostenibilidad y la integración de la población en la urbe. En la medida que el modelo de exposición abarque la condición social de la población, las tipologías estructurales, su distribución y el valor económico; los resultados de vulnerabilidad son más precisos, facilitan la elaboración de planes de gestión de riesgo y la administración de las vulnerabilidades por parte de las autoridades.

En este estudio, se presenta una metodología para hacer un estudio de exposición. El caso de estudio para la aplicación de esta metodología es la Ciudad de Guatemala. (figura 1) Para la metodología se compuso una base de datos con información relevante para el estudio de riesgo sísmico: información de la edificación, estructural, urbana y de conservación. Esta base de datos se vinculó a un Geographical Information System (GIS) para poder analizar en su conjunto y determinar las áreas más vulnerables.

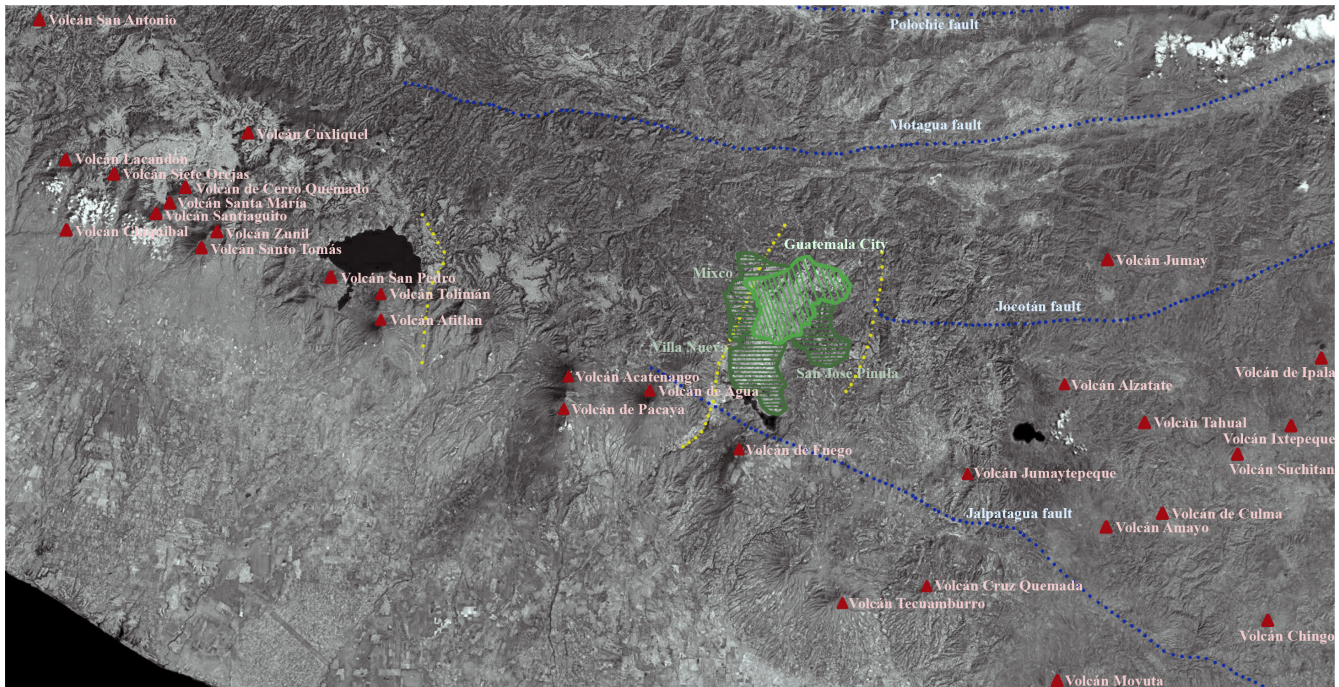


Figura 1. Foto satelital del sur de Guatemala. En rojo los volcanes, en azul las principales fallas sísmicas, en amarillo las fallas secundarias cercanas a la Ciudad de Guatemala, en verde oscuro los municipios alrededor de la ciudad y en verde claro la Ciudad de Guatemala. Elaboración propia.

Antecedentes

En cuanto al estudio de vulnerabilidad en la región de Centro América se han de destacar cuatro proyectos. El proyecto GEM (Global Earthquake Maps) con una visión regional [5], [8], [9]. El proyecto PREPARE impulsado por USAID Miyamoto International Inc. para el estudio de vulnerabilidades en algunas de las ciudades capitales de Centro América (San Salvador, Salvador; San José, Costa Rica; Ciudad de Guatemala, Guatemala). El proyecto CAPRA (Central America Probabilistic Risk Assessment) impulsado por el CEPREDENAC (Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres en América Central y República Dominicana) en el año 2008. Y otros proyectos similares. [10], [12].

Materiales y Metodología

El área de estudio para la elaboración de un mapa de exposición sísmica para la Ciudad de Guatemala es la zona 10 (figura 2). Esta área de la ciudad ha evolucionado drásticamente en los últimos años. Siendo uno de los puntos clave para el estudio de exposición en una ciudad, la zona 10 fue elegida teniendo en cuenta las siguientes cuestiones: según la Municipalidad de Guatemala en los últimos 10 años se han construido alrededor de los 1.58 millones de m² en la Ciudad de Guatemala, de estos el 13% de m² en la zona 10. La zona 10 se compone

por 18 barrios administrativos. Uno de ellos es considerado la “Zona Viva” de la ciudad donde se concentra el ocio y la zona hotelera y comercial más importante de la ciudad capital. Dos de los barrios tienen un interés histórico singular: el barrio “Ciudad Vieja” y el barrio “La Villa de Guadalupe” (figura 3). La localización geográfica paralela de la zona 10 con respecto al aeropuerto La Aurora (zona 13) contribuye a la construcción de edificios en altura. Y finalmente una alta importancia económica, un alto valor turístico y el centro de servicios hospitalarios más importante del país.

La metodología consiste en los siguientes pasos:

- Recopilación de fotografías aéreas y satelitales de la zona.
- El dibujo de los predios y las edificaciones en GIS.
- Visita de campo. La observación se basa en 4 apartados: información de la edificación, de la estructura, de conservación y urbana.
- Consulta de fotografías aéreas históricas obtenidas en el IGN.

Finalmente asignar a cada edificación la tipología, estructura, uso y estado de conservación.

Conclusiones

Esta metodología nos ha demostrado las siguientes cuestiones: la Municipalidad de Guatemala no tiene un catastro actualizado lo que dificulta la elaboración de planes para la mitigación del riesgo. Se puede observar dos núcleos donde albergan los principales usos hospitalarios y hoteleros en la zona 10, también se observa el uso comercial

que se extiende a lo largo de las vías principales y la “zona viva” de la zona 10 (figura 4). La presencia del adobe como tipología es preocupante (Fig. 5). Por la observación en campo se descubrieron vicios estructurales: planta diáfana, falta de diafragmas horizontales, abuso de tipología estructural. Es importante avanzar en el estudio de la clasificación de las distintas tipologías de mampostería utilizando como base la edad del edificio.

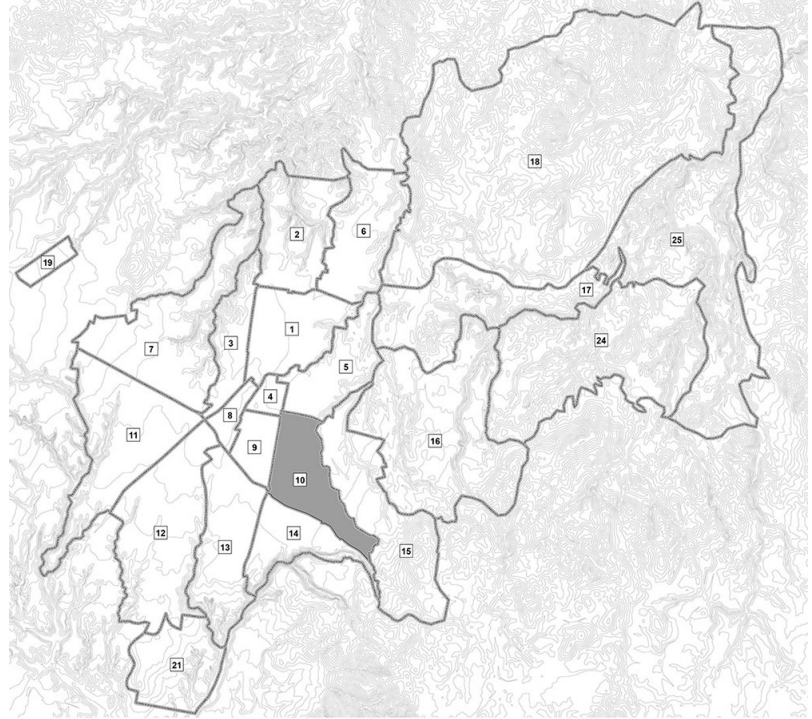


Figura 2. Mapa administrativo de la Ciudad de Guatemala, la zona 10 sombreada. Elaboración propia.

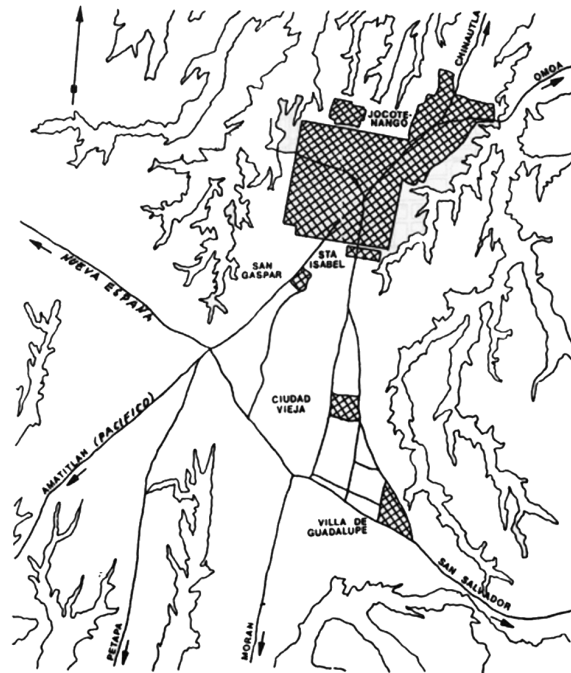


Figura 3. Mapa esquemático de la Ciudad de Guatemala entorno a 1850. [13]

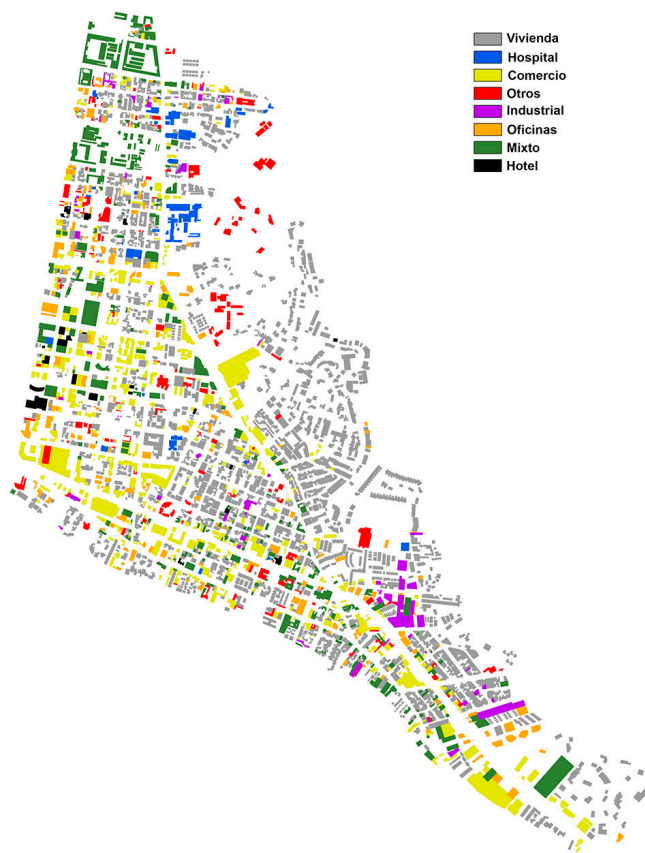


Figura 4: Mapa de zona 10 indicando el uso principal. Elaboración propia.

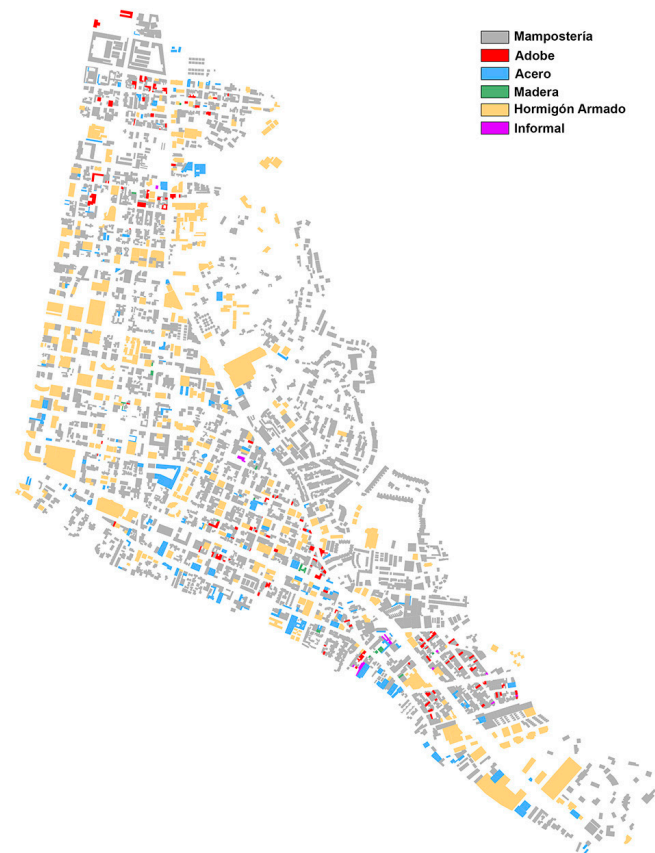


Figura 5: Mapa de zona 10 indicando el material principal de la estructura. Elaboración propia.

Referencias bibliográficas

1. Grünthal, G. (1988). European Macroseismic Scale 1998, Ed., G. Gr. Luxembourg: Conseil de l'Europe - *Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie*.
2. Benedetti, D., Petrini, V. (1984). "On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure," *Industry of Construction*, 18(2): 66–78.
3. Milutinovic, Z. V., Trendafiloski, G. S. (2003). "RISK-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns WP4: Vulnerability of current buildings"
4. Jaiswal, K., Wald, D. J. (2008). "Creating a global building inventory for earthquake loss assessment and risk management: *U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1160*, 103pp.
5. Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A.W., Jaiswal, K. (2012). "Interim Overview of GEM Building Taxonomy V2.0 Report produced in the context of the GEM Building Taxonomy Global Component Version 1.0," 2012.
6. Martins, L., Silva, V. "Development of a fragility and vulnerability model for global seismic risk analyses," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9 (15): 6719–6745, Dec. 2019, doi: 10.1007/S10518-020-00885-1.
7. Benito Oterino, M.B., Fernández, Y. T. (2009). *Amenaza Sísmica en América Central*, Entimema. Madrid

8. Calderón et al. (2017). “*Toward a uniform earthquake loss model across Central America*” SAGE Publ., 38 (1): 178–199, , doi: 10.1177/87552930211043894.
9. Calderón, A., Silva, V. (2021). “*Exposure forecasting for seismic risk estimation: Application to Costa Rica*” SAGE Publ., 37 (3): 1806–1826, Feb. 2021, doi: 10.1177/8755293021989333.
10. Stone, H. (2017). “*Exposure and vulnerability for seismic risk evaluations*”.
11. Lemus Carcamo, B.M. (2014). “Estudio de vulnerabilidad sísmica en la zona central y paracentral de El Salvador;” Universidad Autónoma Metropolitana de México, México.
12. Hernandez Rubio, O., Izaguirre, A., Acosta, N., Strauch, W. (2016). “Modelación probabilista de escenarios de riesgo sísmico en Managua, Capital de Nicaragua. Conference: IASPEI Regional Assembly Latin - American and Caribbean Seismological Commission | Request PDF;” 2016.
13. Langenberg, I. (1981). Urbanisation und Bevölkerungsstruktur der Stadt Guatemala in der ausgehenden Kolonialzeit, Köln, Wien.





MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Estado del arte de las curvas de fragilidad empleadas para evaluar la vulnerabilidad sísmica en Costa Rica

Beatriz González Rodrigo^{a*}, Laura Navas Sánchez^{a,b}, Maribel Jiménez Martínez^{a,c}, Orlando Hernández Rubio^c, Luis Diego Dávila Migoya^d, Belén Orta Rial^a, Diego Hidalgo Leiva^e

^aUniversidad Politécnica de Madrid, España.

^bUniversidad de Bolonia

^cGeolyder S.L.

^dUniversidad de Navarra

^eUniversidad de Costa Rica

Abstract: Different seismic risk studies have been carried out in the Central American region to quantify the human and economic losses caused by these events. The appropriate use of fragility curves allows a better approximation of the level of performance of a structural system in the face of seismic hazard. The purpose of this research is to explore the different vulnerability projects carried out in Costa Rica and analyze the fragility curves used in them. To this end, a bibliographic search and meetings with Central American experts have been carried out. As a result, it is concluded that in the different vulnerability projects, fragility curves with very different probability of damage are being used for buildings with the same attributes.

Palabras clave: Vulnerabilidad sísmica, Curvas de fragilidad, Desempeño estructural, Tipologías, Riesgo sísmico.

Key words: Seismic vulnerability, Fragility curves, Structural performance, typologies, seismic risk.

Introducción

Centroamérica es una de las zonas con mayor peligro sísmico del mundo. Además, es una región caracterizada por una alta vulnerabilidad física y social. La combinación de estos dos factores han sido los causantes del elevado número de muertes y pérdidas económicas producidas por eventos sísmicos. Por ello, en las últimas décadas, se han realizado varios estudios con el objetivo de caracterizar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones existentes y los potenciales costos económicos que un sismo fuerte podría ocasionar en la región [1-3]. La representación de la probabilidad de excedencia de un estado límite de daño para una tipología estructural dada expuesta a diferentes niveles de severidad del movimiento sísmico se realiza a través de curvas de fragilidad (CF). Estas curvas se han convertido en una herramienta esencial para los estudios de riesgo sísmico y análisis de vulnerabilidad al permitir establecer una relación entre la amenaza sísmica en un sitio en particular y los efectos de dicho movimiento del suelo en una infraestructura construida [4]. Una CF inadecuada puede significar una estimación de daños y pérdidas notablemente poco confiable. El objeto de esta investigación es desarrollar una revisión exhaustiva de los diferentes proyectos y estudios de vulnerabilidad sísmica realizados en Costa Rica y, en particular, analizar las curvas de fragilidad empleadas y la procedencia de estas. Con este fin, se recopilaron y examinaron los parámetros de más de ciento cincuenta curvas de fragilidad disponibles para diferentes tipologías constructivas identificadas en Costa Rica.

*Autor para contacto: beatriz.gonzalez.rodrido@upm.es

Breve descripción del estado del arte

En Centroamérica se han realizado varios proyectos regionales o locales para analizar la exposición, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico. Entre los más destacados se encuentran RESIS II (2007-2010), CAPRA (2009-2015) y, más recientemente, el proyecto PREPARE II (2020-2022). Como parte de la iniciativa Global Earthquake Model (GEM), se desarrollaron cientos de funciones empíricas y analíticas de fragilidad y vulnerabilidad, recopiladas y puestas a disposición del público a través de la plataforma OpenQuake [5]. En el caso de Sudamérica, los principales proyectos realizados para la evaluación del riesgo sísmico en la región son los proyectos SARA (2013-2015) y CCARA (2018).

A nivel costarricense, a los proyectos regionales hay que sumar estudios de exposición y vulnerabilidad específicos (Tabla 1). El primer estudio relevante desde el punto de vista del análisis de la vulnerabilidad sísmica a escala nacional fue solicitado por el Instituto Nacional de Seguros (INS) de Costa Rica y desarrollado por Sauter y Shah [6]. Más adelante, en 2003, se realizó un análisis del riesgo sísmico en el Área Metropolitana de San José evaluando el potencial de pérdidas humanas en edificaciones residenciales [7].

Posteriormente, en el marco del proyecto CAPRA se desarrolló una evaluación del riesgo sísmico potencial de la ciudad de San José en términos de pérdidas económicas. Este análisis se efectuó tanto en términos probabilistas como en función de escenarios deterministas y utilizando la metodología propuesta por la iniciativa CAPRA. En este estudio, para el inventario de los elementos expuestos se utilizó la herramienta web de zonificación urbana de CAPRA basada en zonas de exposición homogéneas obtenidas a partir de imágenes satelitales [3] y las tipologías identificadas se caracterizaron mediante funciones de vulnerabilidad de pérdida física y humana.

En el 2009 el proyecto Resis II identificó las principales tipologías constructivas de San José a partir de la base de información provista en PAGER, base de datos mundial que contempla la distribución porcentual de tipologías constructivas tomando como unidad de referencia la totalidad del territorio de cada nación. El proyecto empleó curvas de fragilidad ya existentes proveniente de diferentes fuentes como, por ejemplo, FEMA HAZUS [8], para tipologías de marcos de acero, Cattari et al. [9], para tipologías de mampostería de bloques de concreto, de adobe y tapial, Kappos y Panagopoulos [10], para tipologías de marco de concreto reforzado, entre otras. El estudio de Calderón y Silva [11] es una de las investigaciones más recientes sobre vulnerabilidad y riesgo sísmico realizadas para Costa Rica.

En este estudio, para el modelo de exposición se siguió la metodología propuesta por Yepes-Estrada et al. [12] para Sudamérica y se utilizaron los datos del Censo nacional de 2011 [13] así como estadísticas públicas de construcción y conocimientos del sistema constructivo local. El análisis de vulnerabilidad, por su parte, se desarrolló usando las curvas de fragilidad de Villar-Vega et al. [14] también para Sudamérica para las diferentes tipologías constructivas identificadas, con excepción de las estructuras de mampostería confinada dúctil y concreto reforzado prefabricado para las se proponen nuevas curvas de fragilidad y funciones de vulnerabilidad porque presentan características muy diferentes en Costa Rica.

En otra investigación reciente [15] se realizó, con la colaboración del Centro Alemán de Investigaciones en Geociencias (GFZ) y el método de Mapeo Ambiental Rápido (REM) del GFZ, un inventario de las edificaciones del cantón de San José. A partir de los datos de exposición obtenidos, se identificaron veinte tipologías estructurales y se determinó el porcentaje de cada una de ellas en los once distritos del Cantón de San José. Para la definición de estas tipologías se consideraron siete atributos como el tipo de material, el sistema resistente a cargas laterales (LLRS), el número de pisos, entre otros, y como novedad se incluyó también la regularidad de la vivienda entre los atributos analizados. Otro aspecto que destacar de esta última investigación es la utilización de curvas de fragilidad desarrolladas específicamente para el país, con la consiguiente ventaja que esto implica en términos de la reducción de incertidumbres y errores en las estimaciones de las probabilidades de daños.

Tabla 1. Proyectos de vulnerabilidad y riesgo sísmico realizados en Costa Rica y procedencia de las curvas de fragilidad empleadas en las mismas.

Autor(es)	Año del estudio	Tipo de proyecto	Tipo de estudio	Ámbito geográfico	Instituciones involucradas	Variables analizadas	¿Usa las curvas de fragilidad (CF) para evaluar la vulnerabilidad? Fuente
Sauter and Shah	1978	Nacional	Project: Earthquake Insurance Study	Costa Rica	Instituto Nacional de Seguros (INS), Comisión Nacional de Emergencias (CNE)	Material, sistema estructural, año de construcción	Sí, CF dado en valores MMI.
Montoya	2002	Nacional	Tesis Doctoral	Cartago	Geo-Information Science And Earth Observation (ITC)	Material, sistema estructural, altura, número de plantas, tipo de cimentación	Sí. Obtiene CF de Suater y Shah (1978)
Climent, A., Salgado, D., Slob, S. and van Westen, C. J.	2003	Regional	Fortalecimiento de Capacidades para la Reducción de Desastres Naturales en Centroamérica	Cañas (Province of Guanacaste)	Centro de Prevención de Desastres de América Central (CEPRENAC), UNESCO, International Institute for Feoinformation Science and Earth Observation (ITC)	Material, sistema estructural, calidad de diseño y construcción, año de construcción, estado físico aparente.	No. Se realiza un análisis cualitativo y preliminar de la vulnerabilidad de las edificaciones.
Lang, D. H., Molina, S., Crempien, J. and Erduran, E.	2008	Regional	Proyecto: RESIS II	Costa Rica	Norwegian Seismic Array (NORSAR), Universidad Politécnica de Madrid, Universidad de Costa Rica, Centro de Prevención de Desastres de América Central (CEPRENAC)	Material, sistema estructural, altura, nivel de cumplimiento normativo.	Sí. Se obtienen CF de diferentes fuentes.
CAPRA (ERN)	2009	Regional	Proyecto: CAPRA (Evaluación probabilística de riesgos)	San José	Evaluación de riesgos Naturales de América Latina (ERN), Ingeniería Técnica y científica Ltda. (ITEC), Centro Internac. de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), World Bank, Interamerican Development Bank	Sistema estructural y número de plantas	No. La vulnerabilidad se analiza utilizando las funciones de vulnerabilidad de pérdidas físicas y humanas.
Miyamoto International Inc.	2016	Regional	Proyecto: PREPARE	San José	USAID Miyamoto International Inc.	material, sistema estructural, altura, nivel de cumplimiento normativo.	Sí. Adapta las CF propuestas por FEMA-HAZUS (2001).
Hidalgo, D.	2017	Nacional	Tesis Doctoral	Costa Rica	Universidad Politécnica de Cataluña	Material, sistema estructural	Sí. CF propia para las 2 tipologías analizadas.
Calderón, A.	2017	Nacional	Proyecto Fin de Máster	Costa Rica	Universidad de Costa Rica	material, sistema estructural, altura, año de construcción y estado	Sí. CF propias para estructuras de mampostería confinada dúctil y hormigón armado prefabricado de dos pisos y las de otras tipologías son de Villar-Vega et al. (2017).
Calderón, E.	2018	Nacional	Trabajo Fin de Grado	Costa Rica	Universidad de Costa Rica		Sí. FC surgen de promediar las curvas de diferentes tesis defendidas en la Universidad Nacional de Costa Rica.
Calderon, A. and Silva, V.	2019	Nacional	Proyecto: Modelo de Terremoto Global (Globalquake model)	Costa Rica	Instituto Geográfico Nacional (IGN), Banco Central de Costa Rica (BCCR), Cámara de la Construcción (C.C.C), Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA), Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), Universidad de Costa Rica (UCR)	Material, Sistema estructural, ductilidad, altura, año de construcción	Sí. CF propias para mampostería confinada dúctil y estructuras prefabricadas de hormigón armado y las de otras tipologías son de Villar-Vega et al. (2017).
Esquivel-Salas, 2020	2019	Nacional	Proyecto Fin de Máster	Área metropolitana de San José	Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) de la UCR y German Research Centre for Geosciences (GFZ-GeoForschungsZentrum)	Material, sistema estructural, número de pisos, regularidad estructural	Sí. CF de Calderón (2018), Calderón (2017), Villar-Veta et al. (2017)
Calderón, E.	2021	Regional	Artículo de investigación	Costa Rica	Global Earthquake Model Foundation, University Fernando Pessoa, Universidad de Nicaragua, Universidad de Panamá, Universidad de Costa Rica, Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, Universidad de El Salvador	Material, sistema estructural resistente a acciones laterales, ductilidad, pisos, capacidad	Sí. CF de Martins y Silva (2020)

Cada uno de los proyectos y estudios mencionados previamente emplean CF de distinta procedencia. En la Tabla 2 se presentan los parámetros de las CF (valores medios y desviación estándar) para cuatro estados de daño correspondientes a la tipología estructural de mampostería reforzada confinada de dos pisos, utilizadas en diferentes estudios disponibles para Costa Rica. Se selecciona esta tipología por ser la que presenta una mayor participación en términos relativos en el inventario de edificaciones residenciales de la gran área metropolitana de San José [15]. Asimismo, en la Figura 1 se puede visualizar con mayor claridad las diferencias existentes entre algunas de estas CF a pesar de referirse a una tipología con atributos relativamente similares.

Tabla 2. Parámetros que definen la curva de fragilidad empleadas para caracterizar la mampostería reforzada confinada de 2 alturas en diferentes proyectos de vulnerabilidad y riesgo sísmico llevados a cabo en Costa Rica.

Fuente de la CF	Taxonomía según GEM	Leve		Moderado		Severo		Completo	
		Media (g)	Desvío estándar (g)	Media (g)	Desvío estándar (g)	Media (g)	Desvío estándar (g)	Media (g)	Desvío estándar (g)
Hidalgo [16]	MCR+CBH/LWAL/HEX:2	0,338	0,320	0,4786	0,320	0,668	0,360	1,0428	0,420
Calderón [17]	MR/DUC/HEX:2; MCF/DUC/HEX:2	0,423	0,210	0,756	0,240	0,905	0,240	1,083	0,320
Villar-Vega et al. [14]	MCF/LWAL+DUC/HEX:2	0,450	0,150	0,780	0,190	0,930	0,210	1,110	0,270
Villar-Vega et al. [14]	MCF/LWAL+DUC/HEX:1	0,800	0,190	1,280	0,280	1,550	0,310	1,710	0,380
USAID-Miyamoto [1]	MR/LWAL/HBET:1,3	0,337	0,687	0,459	0,687	0,765	0,687	1,301	0,687
Cattari et al. [9]	MR/LWAL/HBET:1,3	0,1241	0,318	0,1738	0,353	0,262	0,475	0,5183	0,607
Cattari et al. [9]	MCF/LWAL/HBET:1,3	0,1241	0,318	0,1738	0,353	0,262	0,475	0,5183	0,607

Nota: Los parámetros de las curvas de fragilidad de Villar-Vega et al. [14] y Cattari et al. [9] que se encontraban originalmente en otra medida de intensidad - $S_a(0,4)$ y S_d , respectivamente - fueron transformadas a PGA para facilitar su comparación con las restantes.

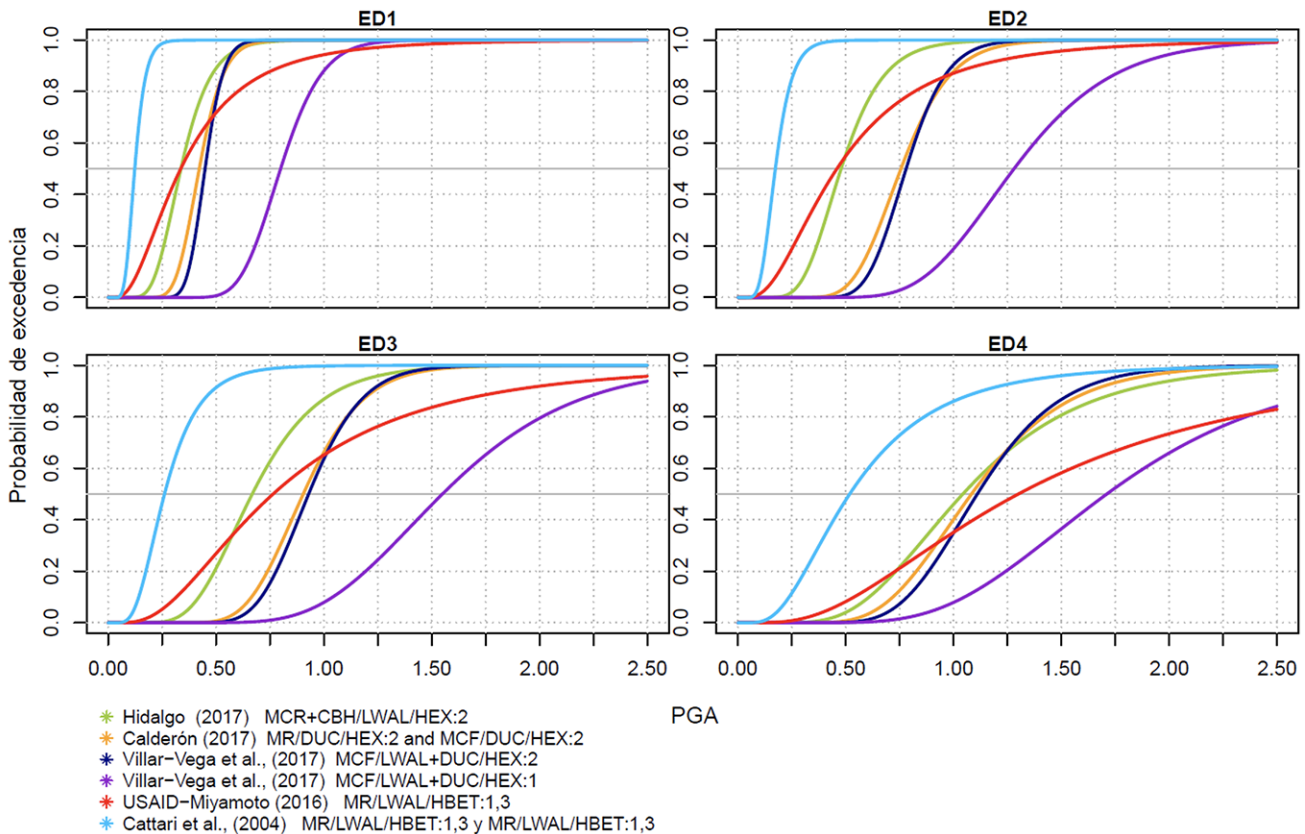


Figura 1. Curvas de fragilidad empleadas para determinar el nivel de desempeño sísmico de la mampostería reforzada confinada de 2 plantas en diferentes proyectos de vulnerabilidad y riesgo sísmico en Costa Rica. ED=Estado de daño.

Conclusiones

En los distintos proyectos de vulnerabilidad regional se están empleando curvas de fragilidad con probabilidades de daño muy distintas para edificaciones con iguales o similares atributos. Este hecho incrementa la incertidumbre de los resultados obtenidos en los estudios de riesgo sísmico, especialmente en la estimación de daños y pérdidas. El motivo de la variabilidad se debe a que la mayoría de los CF generalmente utilizadas en este tipo de estudios han sido desarrolladas para regiones del mundo con técnicas y calidad de materiales de construcción muy diferentes a las de Costa Rica, como América del Norte, Italia u otros países con mayor PIB y más inversión en investigación.

Se considera que, para disminuir la incertidumbre de los estudios de riesgo, es imprescindible un análisis de la procedencia y metodología empleada en cada una de las CF propuestas. En particular, se ha observado que, aún para CF desarrolladas considerando el mismo material constructivo y rango de alturas de la tipología bajo análisis, las diferencias en el sistema resistente a cargas laterales (LLRS) o en el número específico de pisos o en el nivel de ductilidad generan significativas discrepancias en las probabilidades de excedencia de los distintos estados de daño. Estos resultados dan cuenta de la importancia de la selección de la CF más adecuada para la tipología examinada, así como de la necesidad de continuar desarrollando CF y ensayos de laboratorio para tipologías aún poco estudiadas, especialmente en Centroamérica a fin de determinar con mayor precisión su respuesta estructural y vulnerabilidad sísmica.

Referencias bibliográficas

1. Miyamoto International (2016). Informe final. Fase I: evaluación de los riesgos de terremotos. San José Costa Rica.
2. Lang, D. H., Sergio, M., Crempien, J., Erduran, E. (2009). Reducción de Riesgo Sísmico en Guatemala, El Salvador y Nicaragua con Cooperación Regional a Honduras, Costa Rica y Panamá. Kjeller (Noruega).
3. Evaluación de Riesgos Naturales América Latina (ERN). (2009). Tomo II Análisis probabilista de amenazas y riesgos naturales: Riesgo sísmico de San José. *Informe Técnico ERN-CAPRA T2-7*.
4. Rossetto, T., D'Ayala, D., Ioannou, I., & Meslem, A. (2014). Evaluation of existing fragility curves. In SYNER-G: Typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk (pp. 47-93). Springer, Dordrecht.
5. Martins, L., & Silva, V. (2020). Development of a fragility and vulnerability model for global seismic risk analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00885-1>
6. Sauter, F., & Shah, H. (1978). Study of insurance for earthquakes. National Insurance Institute, San José.
7. Salas Alvarado, L. A. (2003). Evaluación del Riesgo sísmico en edificaciones residenciales del Área metropolitana de San José en función de pérdidas de vidas humanas. Universidad de Costa Rica.
8. FEMA. (2001). Hazus -MH 2.1. Technical Manual. Washington, DC : (s.n.).
9. Cattari, S., Curti, E., Giovinazzi, S., Parodi, S., Lagomarsino, S., & Penna, A. (2004). Un modello meccanico per l'analisi di vulnerabilità del costruito in muratura a scala urbana. Dans XI Congresso Nazionale « L'Ingegneria Sismica in Italia » - ANIDIS.
10. Kappos, A. J., Panagopoulos, G. K., & Antoniadis, P. (2012). A Comparative Study Of Seismic Capacity And Fragility Curves For R/C Building Typologies From Different Countries. International Jubilee Conference UACEG2012, (March).
11. Calderón, A., & Silva, V. (2019). Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of the residential building stock in Costa Rica. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(3), 1257-1284. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0499-1>
12. Yepes-Estrada, C., Silva, V., Valcárcel, J., Acevedo, A. B., Tarque, N., Hube, M. A., María, H. S. (2017). Modeling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment. *Earthquake Spectra*, 33(1), 299-322. <https://doi.org/10.1193/101915EQS155DP>
13. Instituto Nacional de Estadística y Censos (2011). Censo de Población y Vivienda , San José, Costa Rica.
14. Villar-Vega, M., Silva, V., Crowley, H., Yepes, C., Tarque, N., Acevedo, A. B., ... María, H. S. (2017). Development of a fragility model for the residential building stock in South America. *Earthquake Spectra*, 33(2), 581-604. <https://doi.org/10.1193/010716EQS005M>
15. Esquivel-Salas, L. C. (2020). Inventario de edificaciones del Cantón de San José para el caso específico de amenaza sísmica utilizando el método de mapeo ambiental rápido. Universidad de Costa Rica.
16. Hidalgo-Leiva, D. A. (2017). Análisis estructural probabilista orientado a evaluación del daño sísmico con aplicaciones a tipologías constructivas empleadas en Costa Rica [Universidad Politécnica de Cataluña]. In TDX (Tesis Doctorales en Xarxa). <http://tdx.cat/handle/10803/405589>
17. Calderón, Alejandro. (2017). Análisis de riesgo para el sector residencial costarricense por zona sísmica. Individual Study, Universidad del Costa Rica



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Investigating methods for combining seismological and geological information for PSHA calculation

Conrad Lindholm^{a*}, María Belen Benito^b, Mario Arrollo^b, Carlos Gamboa^b,
Orlando Hernández^b, Adriana Ornelas^b, John Rivera^b

^aSeismoConsult, Oslo, Norway.

^bUniversidad Politécnica de Madrid, España.

Abstract: Since timing and analysis of surface traces of major faults has become more detailed it is increasingly important to present methods that can combine classical PSHA calculations (e.g. [1]) with fault slip information. This is even more important when faults may indicate significantly larger earthquakes in the geological past than indicated in the last few hundred years of earthquake monitoring. We investigate four methods on how fault information and catalogue information can be combined in a Gutenberg-Richter recurrence protocol and used in a consistent PSHA methodology. The methods are tested in two tectonic environments: very active and more stable continental.

Key words: Earthquake catalogues; Fault slip; Max magnitude; PSHA methods.

Palabras clave: Catálogos sísmicos, Fallas, magnitud Max, metodos PSHA.

Introduction

With the advent of precise timing of geological strata, GPS techniques, and more recently remote sensing techniques a much more detailed quantification of mapped faults has been made possible. All of these techniques provide hitherto unknown details about fault length, slip and rupture over time which can be used to establish hazard models (e.g. [2]; [3] and others). Fault information is potentially valuable for estimating recurrence time of the larger or largest earthquakes/movements that have occurred, and this is also information that may be projected into the future. A projection into the future of such information immediately translates into the seismic potential and the seismic hazard for a region around the fault. See figure 1 for a sketch of the challenge.

We have in the present investigation compared four methods on how to quantify the geological information and translate it to recurrence models, and we have tested these methods in two tectonic environments, in the active environment of Central America and in the more tectonically stable southern Spain. The four methods are:

- A method developed by [4] in which a part of the seismicity observed in a fault encompassing zone is transferred to the fault zone. In this method the observed seismic moment (M_0) conservation is applied, however with uncertainty and inclusion related to large historical earthquakes that could be quantified.

*Autor para contacto: conrad.lindholm@outlook.com

- The *Fault and Area zoneMoment Shearing (FAMS)* method. A simplified moment distribution method that may also add new seismic moment from fault slip-rate information. The seismic moment (M_0) is hence not necessarily conserved.

- A *moment-rate* based method proposed by [5]. In this method the observed seismic moment (M_0) conservation is used such that seismic moment from the area surrounding the mapped fault is shifted geographically to the rupture zone.

- A *slip-rate* based method proposed by[5] in which the observed seismic slip on a fault or fault system is added to the fault zone. The seismic moment (M_0) derived from an earthquake catalogue is hence not conserved.

For two of the models in which seismic moment (M_0) was migrated from a surrounding zone to the fault zone the observed seismic moment release is maintained. For two models the total seismic moment release may increase (or decrease) due to direct inclusion of fault slip information.

$$\dot{M}_{OF}^T = \mu * S * A * \eta$$

Where \dot{M}_{OF}^T is the total moment rate for the fault, μ is shear stress, S is slip rate, A is fault area and η is the coupling coefficient (e.g. [6] and [7]). Obviously, for methods 2 and 4 where geological information is directly converted into seismic moment a slip coupling ratio can be introduced. However, in the tests a coupling ratio of $\eta = 1.0$ is used for demonstration purposes (i.e. full conversion of the slip energy into seismic energy). Note that we in the below relations exclusively discuss annual moment release (not the total over a long living fault).

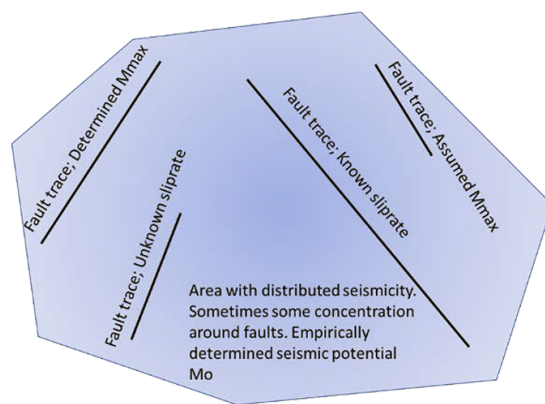


Figure 1: Descriptive sketch of the data situation commonly met when calculating seismic hazard; Faults with unknown or partly known capacities embedded in in a zone with distributed seismicity.

Method 1. The Hybrid Method proposed by Rivas-Medina A., B. Benito, and J.M. Gaspar-Escribano (2018)

This method was published by Rivas-Medina in 2018 and applied for a group of faults in southern Spain. The complexity of the method prevents a detailed explanation in the current format and is visualized in figure 2. The virtue of the method is that it includes the use of historical seismicity and it adapts for the use of a data-dependent b-value. It does not necessarily maintain the seismic moment deduced from the earthquake catalogue, but may rather add seismic moment with basis in deduced slip rates.

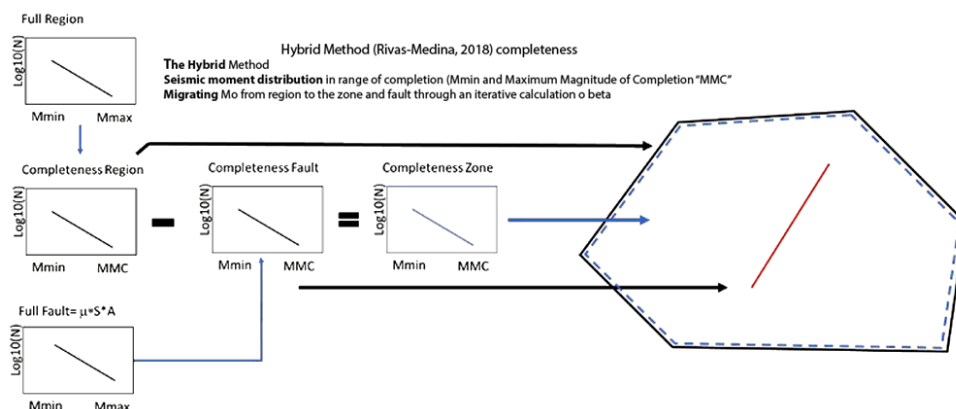


Figure 2. Visualization of the Hybrid Method (Method 1).

Method 2. Fault and Area zone Moment Shearing (FAMS)

We consider a hybrid model which is composed of fault-type sources and zone-type sources. In addition, the term “region” is defined as the geometric container for both source types. Thus, the region presents the same geometry as the zone and its seismic potential (seismicity rate and seismic moment rate) is the sum of the potentials of the two types of sources (faults and zone). The zone is used to represent the seismic potential of events that cannot be associated with specific faults. Although there is a geometrical equivalence between region and zone, their seismic potential is different, as the seismic potential of the region equals the seismic potential of the zone plus the seismic potential of the faults contained within the region.

The basis for this method is the hypothesis that seismic moment from magnitudes higher than a given magnitude (MMZ) is attributed only to the fault, whereas the lower magnitudes may be distributed both along the fault and in the zone. MMZ is the maximum magnitude for the zone, but is not the minimum magnitude for the fault.

The total seismic moment of the fault is derived from geological information ($M_o^f = \mu SA$) and it is distributed in two intervals: MoF (Mmin-MMZ) and MoF (MMZ-Mmax). See figure 3.

FAMS method may change the overall seismic moment M_o .

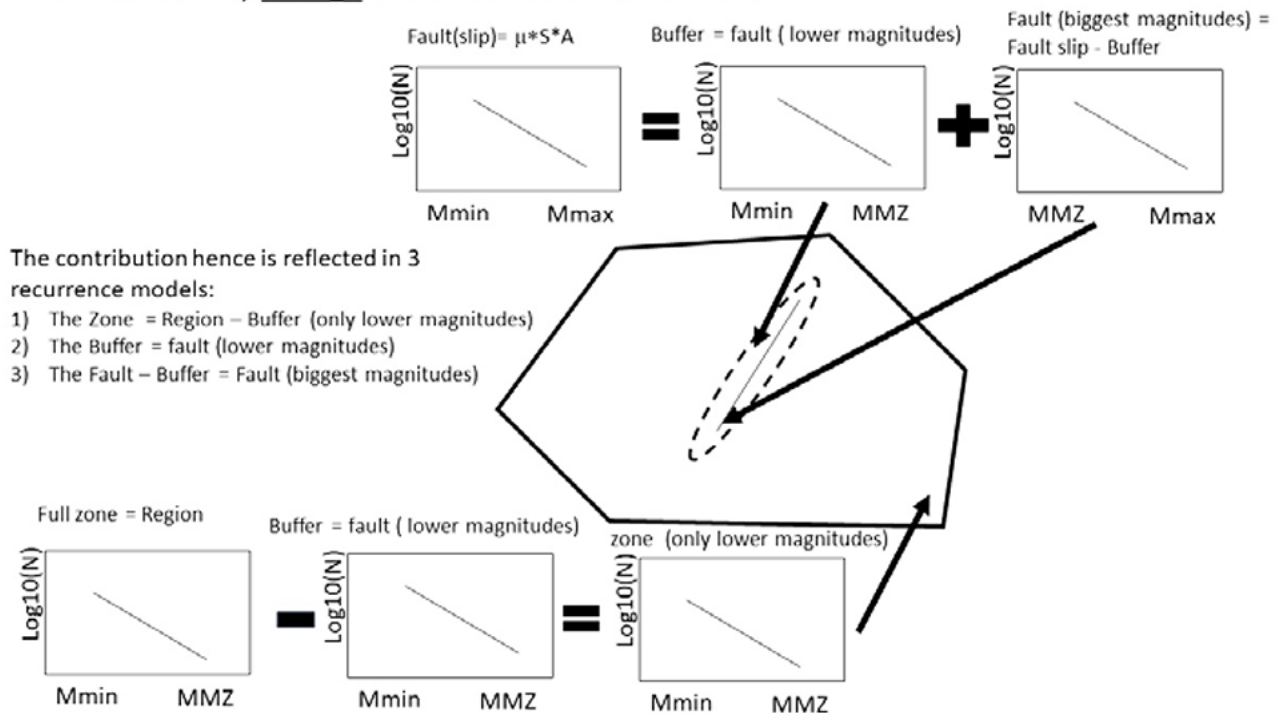


Figure 3. Visualization of Method 2.

Method 3. The Moment rate method (MOMENT_RATE)

This method can be applied when e.g. a range of mapped faults are potentially active, but with unknown or poorly known slip rates and potentials (e.g. blind faults). The MOMENT_RATE method provides assistance to migrate a certain seismic potential from a surrounding area to a mapped fault zone. Since the overall seismic potential is maintained (M_o) it is an iterative process to shift some of the area moment to the fault. It may be argued that the b-value for a fault zone is different from a larger zone so a distinct fault zone b-value is assigned. The user definitions for MOMENT_RATE include: A) the percentage of M_o that shall be shifted. B) the b-value for the fault. C) Importantly, the Mmin for the fault recurrence relation may be different from the surrounding area (see

example in figure 3). D) M_{max} for the fault may also be different from the surrounding area. E) The fault length and the relation between M_{max} and rupture area are also user defined. The method principles are depicted in figure 4

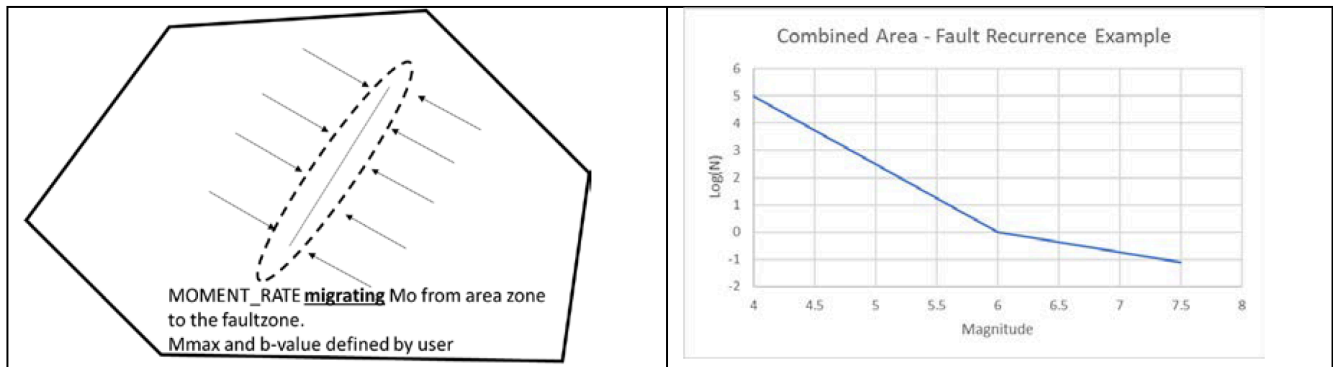


Figure 4. Visualization of method 3.

Method 4. The slip-rate moment enhancing method (MOMENT_SLIP).

This method can be applied when a (major) fault structure is mapped with known slip-rate. The method designed by Bungum (2007) is based on first calculating the moment rate release indicated by the slip rate and then convert the moment rate to a Gutenberg Richter recurrence relation (Gutenberg and Richter, 1956) that can be directly implemented in a PSHA model. The program (MOMENT_SLIP) is one in which seismic potential of the fault structure is derived from the rate of slip based on published models for transforming slip rates to recurrence models (Gutenberg-Richter type). The size of the fault is essential here, constraining the maximum magnitude.

In this tool the seismic moment rate is determined directly from the fault and slip conditions as detailed above, and the moment rate is translated into a G-R recurrence relation following models described by Bungum (2007). See figure 5 sketching the model.

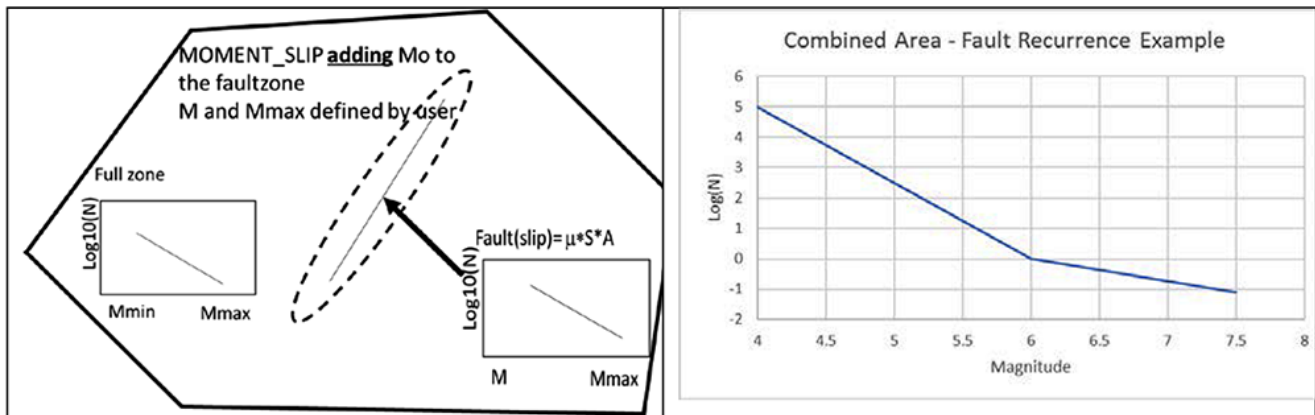


Figure 5. Visualization of method 4.

References

1. Cornell, C. A: (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 58, 1583-1606.
2. Camelbeeck T., P. Alexandre, K. Vanneste, M. Meghraoui (2000). Long-term seismicity in regions of present day low seismic activity: the example of western Europe. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 20 (2000) 405±414. PII: S0267-7261(00)00080-4.7. Aki, K., Richards, P.G., (2002). *Quantitative Seismology*. University Science Books.
3. Halchuk S., T. Allen, J. Adams and T. Onur (2019). Contribution of the Leech River Valley - Devil's Mountain Fault System to Seismic Hazard in Victoria, B.C. *12'th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, June 2019.
4. Rivas-Medina A., B. Benito, and J.M. Gaspar-Escribano (2018). Approach for combining fault and area sources in seismic hazard assessment: application in south-eastern Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2809–2823. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2809-2018>
5. Bungum H. (2007). Numerical modelling of fault activities. *Computers & Geosciences* 33 (2007) 808–820.
6. Brune, J.N., (1968). Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research* 73, 777–784.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Atenuación de intensidades y ondas CODA en Panamá Central

Eduardo Camacho Astigarrabia^{a*}

^a Departamento de Física, Universidad de Panamá, Panamá, Panamá

Panamá Central, esta surcada por varias fallas transcurrentes activas, que representan una amenaza sísmica para las ciudades de Panamá, Colón, La Chorrera y Arraiján, en las cuales se concentra más del 80% de la población del país. De hecho, el primer sismo destructivo reportado en la ciudad de Panamá ocurrió el 2 de mayo de 1621 y se originó en la falla Pedro Miguel, que es una falla de destral de rumbo N-S, que se extiende cuasi paralela al Canal de Panamá [1].

Para calcular la magnitud del terremoto de 1621, se aplicó doble regresión a valores de magnitud M , distancia epicentral R e intensidad estimada I de 26 sismos percibidos en la estación sismológica de Balboa Heights (BHP), que opero en la Ciudad de Panamá desde 1904 hasta 1979, obteniéndose la ecuación siguiente: $M_s = -0.5054(I) + 1.089 (\ln R) - 1.39$. Al calcular la magnitud del sismo de 1621 se obtuvo el valor $M_s = (6.3 \pm 0.4)$, que es algo menor que lo estimado usando estudios paleosismológicos y las fórmulas de magnitud-longitud de falla, que dan valores entre 7.0 y 7.1.

Utilizando el SEISAN versión 11 [2] se relevaron las fases de 110 sismos con $M_w > 3.0$, registrados por 10 estaciones de las redes sismológicas de la Autoridad del Canal (ACP) y la Universidad de Panamá en el cuadrante 8° a 10° N y de 80.5° a 78.5° W, desde 2001 a 2016. Finalmente, para obtener los factores de calidad de las ondas coda (Q_c), se usaron los parámetros recomendados por [3], observándose que la atenuación aumenta hacia el Este de la ciudad de Panamá. Los valores resultantes son: $Q_0 = (77.0 \pm 11)$ y $\eta = (0.87 \pm 0.12)$, similares a los del centro de California y Noroeste de Estados Unidos. Este dato de atenuación es importante ya que permite, dada la falta de leyes de atenuación propias, emplear las desarrolladas para estas dos regiones.

Referencias

1. Rockwell, T., E. Gath, T. González, C. Madden, D. Verdugo, C. Lippin-cott, T. Dawson, L. A. Owen, M. Fuchs, A. Cadena, P. Williams, E. Weldon, and P. Franceschi (2010). Neotectonics and paleoseismology of the Limón and Pedro Miguel faults in Panamá. Earthquake hazard to the Panamá Canal, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 100, (6): 3097–3129, doi: 10.1785/0120090342
2. Havskov J, P Voss, L, Ottemöller (2020). Seismological observatory software: 30 yr of SEISAN. *Seismological Research Letters*. 91 (3): 1846–1852. <https://doi.org/10.1785/0220190313>
3. Havskov J, Sørensen MB, Vales D, Özyazıcıoğlu M, Sánchez G et al. (2016). Coda Q in different tectonic areas, influence of processing parameters. *Bull. Bulletin of the Seismological Society of America*. 106 (3): 956–970. <https://doi.org/10.1785/0120150359>

*Autor para contacto: eduardo.camachoa@up.ac.pa



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Caracterización de Escenarios Sísmicos Probables y Análisis de la Respuesta de Estructuras de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Carlos Gamboa-Canté^{a*}, María Belén Benito, Omar Flores

^aEscuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, España.

^bCentro de Estudios Superiores de Energía y Minas, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Abstract: From a probabilistic study of seismic hazard (PSHA), the control earthquakes that would most likely exceed the movement in the study area were determined. Afterwards, a seismic microzonation study was carried out to determine the local effects and characterize the soil. Then, the vibration frequency of three buildings was estimated to be compared with the ground frequencies and to know if there were resonance effects through a soil-structure interaction analysis. Finally, soil response spectra derived from the calculated control earthquakes were generated and the design spectra of the sampled buildings were constructed in order to verify the AGIES 2018 construction regulations.

Palabras clave: Peligrosidad Sísmica, Microzonación Sísmica, Resonancia, Espectros de Respuesta, Espectros de Diseño.

Key words: Seismic Hazard, Seismic Microzonation, Resonance, Response Spectra, Design Spectra.

Introducción

Guatemala es un país altamente sísmico, donde la convergencia de tres placas tectónicas (Cocos, Caribe y Norteamérica) genera una intensa actividad con frecuentes movimientos vibratorios del terreno [1]. La capital, Ciudad de Guatemala, es una de las poblaciones del país expuesta a mayor riesgo sísmico, debido a su elevada amenaza, exposición y vulnerabilidad. Por otro lado, la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) es la única universidad pública del país. Es por ello que el crecimiento de la población estudiantil aumenta año tras año, lo que exige brindar nuevas edificaciones para cubrir la demanda estudiantil y mejorar los servicios de infraestructura para los futuros profesionales. Ante esta situación, la USAC no contaba con un estudio de caracterización sísmica de sitio y dinámica de estructuras, que sirviera como base fundamental para la adecuada planificación de obras de infraestructura en el campus universitario de la Ciudad de Guatemala.

Para caracterizar la acción sísmica y la respuesta de estructuras se desarrolla una completa metodología de análisis que integra los tres aspectos determinantes del problema: (1) cálculo de la peligrosidad sísmica y caracterización de escenarios, (2) análisis del efecto local en el emplazamiento de las edificaciones por medio de un estudio de microzonación sísmica y (3) caracterización de los modos de vibración de las edificaciones para la identificación de posibles efectos de

*Autor para contacto: carlogamboa312@gmail.com

resonancia. Finalmente, se evalúa la idoneidad del diseño sismorresistente de las edificaciones comparando los espectros de diseño según la normativa nacional vigente AGIES NSE 2018 con los espectros resultantes de este análisis, a fin de evaluar si los espectros de la norma resultan o no conservadores.

Materiales y Metodología

Cálculo de peligrosidad sísmica en roca

En este trabajo se desarrolla un Análisis Probabilista de la Peligrosidad Sísmica (PSHA)[2,3]. Para cuantificar el efecto de la fuente, se identifica primero un modelo de zonas sismogénicas, se confecciona un catálogo sísmico que recoja la sismicidad pasada en el área circundante al emplazamiento (300 km de radio) y se caracteriza el potencial sísmico de cada zona por medio de leyes de recurrencia. Por su parte, el efecto de la propagación se contempla por medio de leyes de atenuación o modelos de predicción del movimiento (GMPE's).

Dado que el estudio se dirige a evaluar la respuesta de edificaciones concretas, con cierto periodo estructural, se considera preferible deducir espectros específicos asociados a los sismos de control que resulten dominantes en el movimiento objeto derivado del análisis de peligrosidad. Como movimientos objeto se eligen los valores de PGA y Sa[0.5s], para periodo de retorno de 475 años. Entonces se realizó un análisis de desagregación sísmica para encontrar las ternas (m,r,ε) que más contribuyan a esos movimientos objeto y que son característicos de los sismos de control.

Microzonación Sísmica

Se han empleado dos métodos de cálculo que han proporcionado datos complementarios: el método pasivo usando la técnica de Nakamura o cociente espectral (H/V) y el método activo del análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)[4]. Se han establecido 20 estaciones para la captura de datos con el método de Nakamura, realizando en cada una de ellas mediciones de 16 minutos del ruido ambiental (microtremors) debido a la actividad humana, carga vehicular, viento, etc. Para la aplicación del método MASW se establecieron 3 estaciones, donde se capturó la velocidad de onda de corte (V_s) en los suelos de sus emplazamientos, empleando para ello una almágana de 12 lb y una placa de aluminio de 1ft x 1 ft x 1/2 in.

Dinámica de estructuras

En la zona de estudio se seleccionaron 3 edificaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, usando como criterio de selección las de más alto nivel de ocupación, esencialmente por estudiantes universitarios, docentes y personal administrativo. Estos son: edificio T1, edificio T3 y edificio T7 (figura 1).

Los periodos de vibración se determinan realizando mediciones con dos acelerógrafos en distintos puntos de cada edificación. El primero se coloca en la base de la edificación y el segundo se va desplazando en cada uno de los niveles superiores, siguiendo una alineación vertical respecto al que se encuentra en la base. Se realizan registros del ruido ambiental de la edificación durante 10 minutos, siguiendo uno de los ejes del baricentro de la edificación, con el propósito de desprestigiar los efectos de torsión en las mediciones y obtener la flexión pura de la edificación muestreada.

Comparación de espectros de respuesta y de diseño

Primeramente, se procedió a extraer acelerogramas que verificaran las condiciones de los sismos de control. Se construyeron entonces los espectros de respuesta correspondientes a estos acelerogramas, que fueron considerados como inputs sísmicos (en roca), y se calculó la respuesta del suelo en cada una de las estaciones utilizadas en el estudio de microzonación sísmica. Para la construcción de los espectros de diseño de las edificaciones muestreadas se utilizó la normativa nacional vigente de Guatemala: AGIES 2018 NSE 2[5] y AGIES 2018 NSE 3[6].

Resultados y Análisis

Peligrosidad sísmica en roca

Las ternas dominantes [m , r , ε] en Ciudad de Guatemala son:

$$(M_1, R_1, \varepsilon_1) = (6.5-7.0 Mw, 20-40 \text{ km}, 2)$$

$$(M_2, R_2, \varepsilon_2) = (6.5-7.0 Mw, 120-140 \text{ km}, 2)$$

Se identificaron los escenarios capaces de generar los sismos de control estimados, que fueran compatibles con las condiciones de magnitud y distancia encontradas. El primero de estos sismos se asoció al Sistema de Fallas del Motagua y el segundo a la zona de subducción al sur del país.

Microzonación sísmica

En la figura 1a, se observan las frecuencias más altas sobre los carriles vehiculares en la periferia, debido a que el suelo de dicha zona es un relleno compacto (capa base) que se ha alterado para poder construir la carretera. Sin embargo, las frecuencias disminuyen a medida que se alejan de la carretera y se adentran hacia la Facultad de Ingeniería. Esto quiere decir que las frecuencias bajas dominan en el lado este de la zona de estudio, donde se concentra la mayor cantidad de edificaciones. Cabe mencionar, que los suelos que componen la Universidad de San Carlos de Guatemala son en su mayoría sedimentos fluvio lacustres (arenas y arcillas), que tienden a ser habitualmente de frecuencias naturales bajas. Por otra parte, en la figura 1b se observa que la mayor parte de la zona de estudio pertenece a suelo tipo C (Suelo denso y roca suave), si bien la parte norte se encuentra en suelo D (Rígido), según las clases asignadas por la normativa nacional vigente AGIES 2018 NSE 2.1 [7].

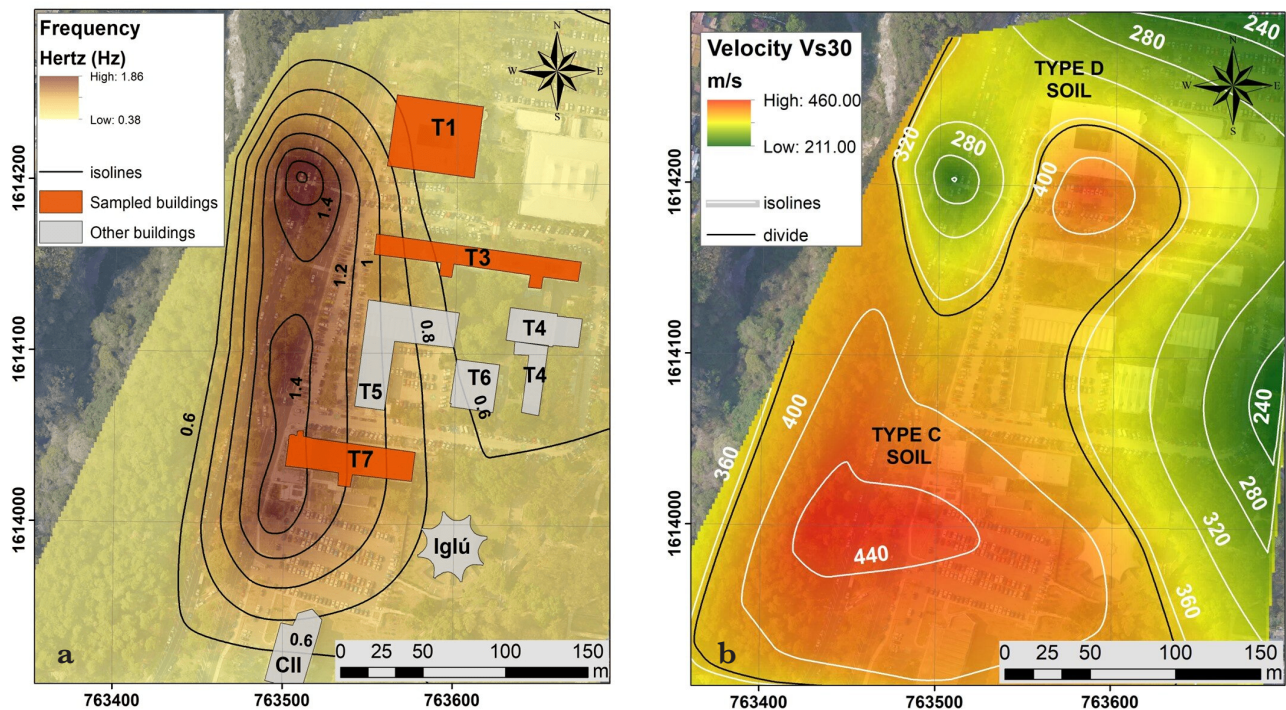


Figura 1. Mapas de microzonación sísmica obtenidos para la zona de estudio: (a) frecuencias naturales del suelo, junto con las edificaciones existentes, destacando en color naranja las tres que fueron utilizadas para el estudio y (b) valores de Vs30 con la clasificación del suelo según la norma nacional AGIES 2018 NSE 2.1.

Modos de vibración de los edificios y frecuencias predominantes

Como resultado del análisis realizado, todas las edificaciones poseen frecuencias altas entre 2.40 Hz – 4.70 Hz, lo que es de esperarse para edificaciones de baja altura (cuadro 1). Por lo tanto, si se observa la figura 1a nuevamente, las frecuencias dominantes del suelo que se encuentran bajo las estructuras muestreadas son muy bajas (menores a 1.50 Hz) y las frecuencias naturales que dominan el movimiento de las estructuras son altas (mayores a 2.40 Hz). Entonces, teniendo en cuenta lo dicho sobre los efectos de resonancia en edificaciones, en primera instancia éstas no deberían sufrir dichos efectos cuando se produzca un evento sísmico.

Cuadro 1: resultado de las edificaciones muestreadas

Edificio	Componente Norte-Sur (NS)		Componente Este-Oeste (EW)	
	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
T1	3.04	0.33	3.35	0.30
T3	2.41	0.41	3.00	0.33
T7	4.10	0.24	4.64	0.22

Comparación de espectros de respuesta y de diseño

Se puede observar que para el sismo de control 1 (figura 2a y 2b), identificado con un sismo en la falla de Motagua, el espectro de diseño cubre bien a los espectros de respuesta resultantes en suelo D, y es excedido únicamente para algún periodo en alguna estación localizada en el suelo C, si bien esta excedencia no es mayor al 20% como recomienda la norma nacional vigente, por lo que es aceptable. En el caso del sismo de control 2 (figura 2c y 2d), identificado con un sismo de subducción, el espectro de diseño resulta muy conservador, cubriendo ampliamente todos los espectros de respuesta encontrados, tanto en suelo C como en suelo D.

Esto permite concluir, que para futuros eventos sísmicos que cumplan las condiciones de los sismos de control analizados, la respuesta de las edificaciones reguladas por la norma vigente de Guatemala sería satisfactoria.

Conclusiones

1. Los sismos de control que dominan en la peligrosidad sísmica de Ciudad de Guatemala, para un periodo de retorno de 475 años, se identifican con las ternas $(M_1, R_1, \epsilon_1) = (6.5-7.0 Mw, 20-40 km, 2)$ y $(M_2, R_2, \epsilon_2) = (6.5-7.0 Mw, 120-140 km, 2)$, asociadas respectivamente a un sismo del sistema de fallas de Motagua y otro en la zona de subducción al sur del país.
2. Los resultados del estudio de microzonación permiten concluir que los suelos presentes en la zona son de tipo C y D, según la clasificación de AGIES NSE 2.1 (2018), con los valores medidos de Vs30 comprendidos en los rangos (300-500 m/s) y (200-250 m/s), respectivamente. Se ha elaborado un mapa de frecuencias de vibración del suelo con valores en general bajos (0.40 Hz -1.00 Hz) dominando en casi toda el área de estudio.
3. Se deduce que los tres edificios analizados tienen altas frecuencias de vibración, entre 2.40 Hz y 4.70 Hz, como corresponde a edificios rígidos de baja altura. Comparando entonces las frecuencias propias de los edificios con las de vibración del suelo obtenidas en el estudio anterior, se concluye que no habrá previsiblemente efectos de resonancia suelo-estructura, al ser muy diferentes ambos rangos de frecuencias.
4. A la luz de los resultados de este estudio, los espectros de diseño de la norma de Guatemala AGIES NSE (2018) resultan conservadores. Por lo que son factibles para ser utilizados en el diseño de futuras edificaciones dentro de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) utilizando los mismos sistemas constructivos de las edificaciones analizadas.

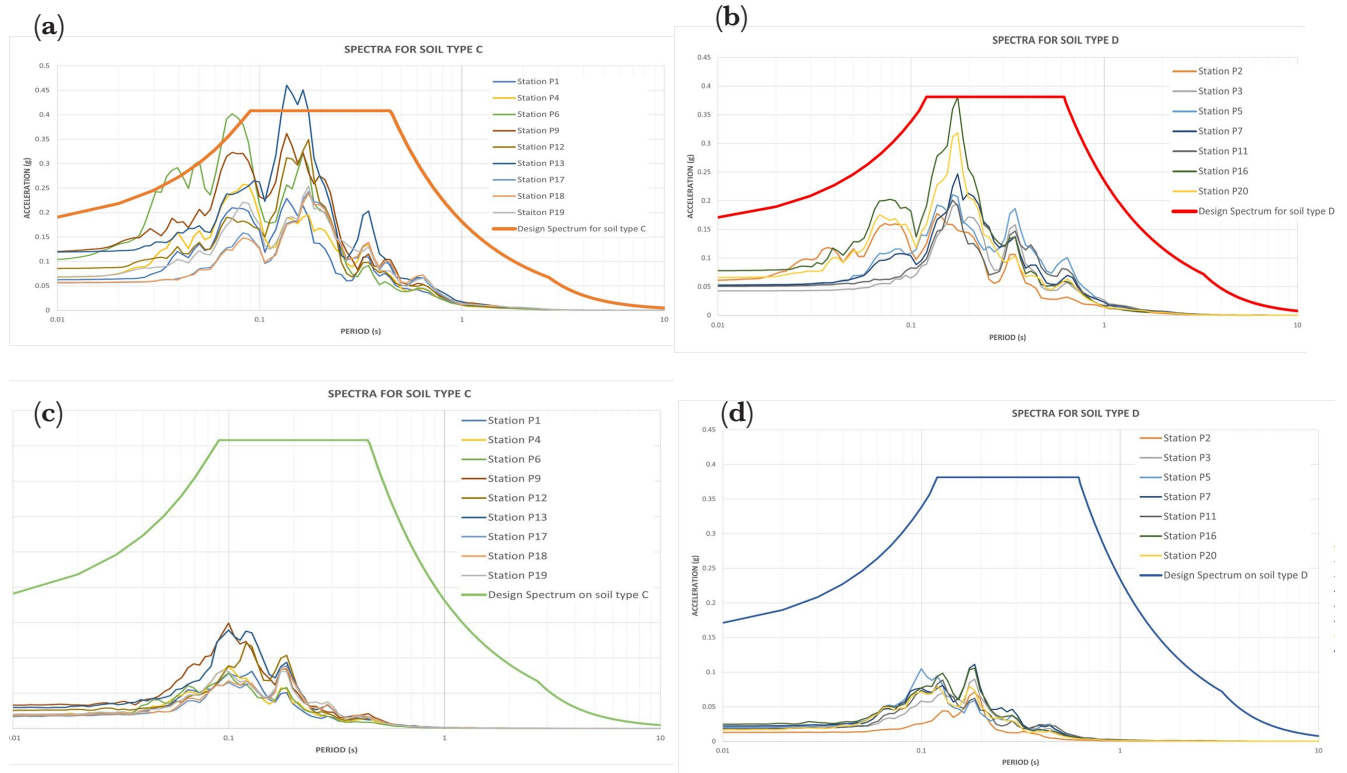


Figura 2. Comparación de los espectros de respuesta (a) del suelo tipo C y (b) suelo tipo B, para el sismo generado en el sistema de fallas del Motagua. Comparación de los espectros de respuesta (c) del suelo tipo C y (d) suelo tipo B, para el sismo generado en la zona de subducción.

Referencias bibliográficas

1. Alvarado, A. (2016). Estudio de La Zona de Subducción En El Pacífico de Guatemala En Base a Las Características de Su Sismicidad. Tesis Licenciatura. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
2. Cornell, A. (1967). Engineering Seismic Risk Analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, 58(5),1583-1606.
3. Esteva, L. (1968). Bases Para La Formulación de Decisiones de Diseño Sísmico. Tesis Doctoral. Ciudad de México, México: Universidad Nacional de México.
4. Castellaro, S. (2016). The complementarity of H/V and dispersion curves. Geophysics, 81(6), T323-T338. doi:10.1190/GEO2015-0399.1
5. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018). Normas de Seguridad Estructural Para Guatemala NSE 2 - Demandas Estructurales y Condiciones de Sitio. Ciudad de Guatemala, Guatemala: AGIES.
6. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018). Normas de Seguridad Estructural Para Guatemala NSE 3 - Diseño Estructural de Edificaciones. Ciudad de Guatemala, Guatemala: AGIES.
7. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018). Normas de Seguridad Estructural Para Guatemala NSE 2.1 - Estudios Geotécnicos. Ciudad de Guatemala, Guatemala: AGIES.





MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Un modelo hidrogeomecánico para caracterizar los efectos inducidos por el terremoto de Andalucía de 1884

Manuel Mudarra Hernández^a, Juan Carlos Mosquera Feijoo^{b*},
María Belén Benito Oterino^c, Eugenio Sanz Pérez^a

^aDep. Ing. y Morfología del terreno, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.

^bDep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de estructuras, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.

^cDep. Ing. Topográfica y Cartografía, ETSI Topografía, Geodesia, Cartografía, Madrid, España.

Abstract: Earthquake hydrology may provide a proper understanding of earthquake features and foreshocks and the interplay between crust mechanical deformation and the hydrogeological processes. This study aims at understanding the hydro-geomechanical circumstances that caused the Andalusia 1884 earthquake. The around-20-second long event, with its epicenter lying at Arenas del Rey and a Richter Magnitude between 6.2 and 6.5, occurred on 25 December and caused nearly 1200 casualties. The focus was between 10 and 20 km in depth. This investigation involves diverse numerical simulations with distinct configurations to achieve a calibrated 2D model representing the geological framework of the Zafarraya Fault that explains its sliding. This methodology helps elucidate the key features and effects undergone by the mentioned earthquake.

Palabras clave: efectos hidrogeológicos, modelos hidrogeomecánicos, Terremoto de Andalucía de 1884, presión de poro, poroelasticidad.

Key words: hydrogeological effects, hydro-geomechanical modelling, Andalusia 1884 Earthquake, pore pressure, poroelasticity.

Introducción

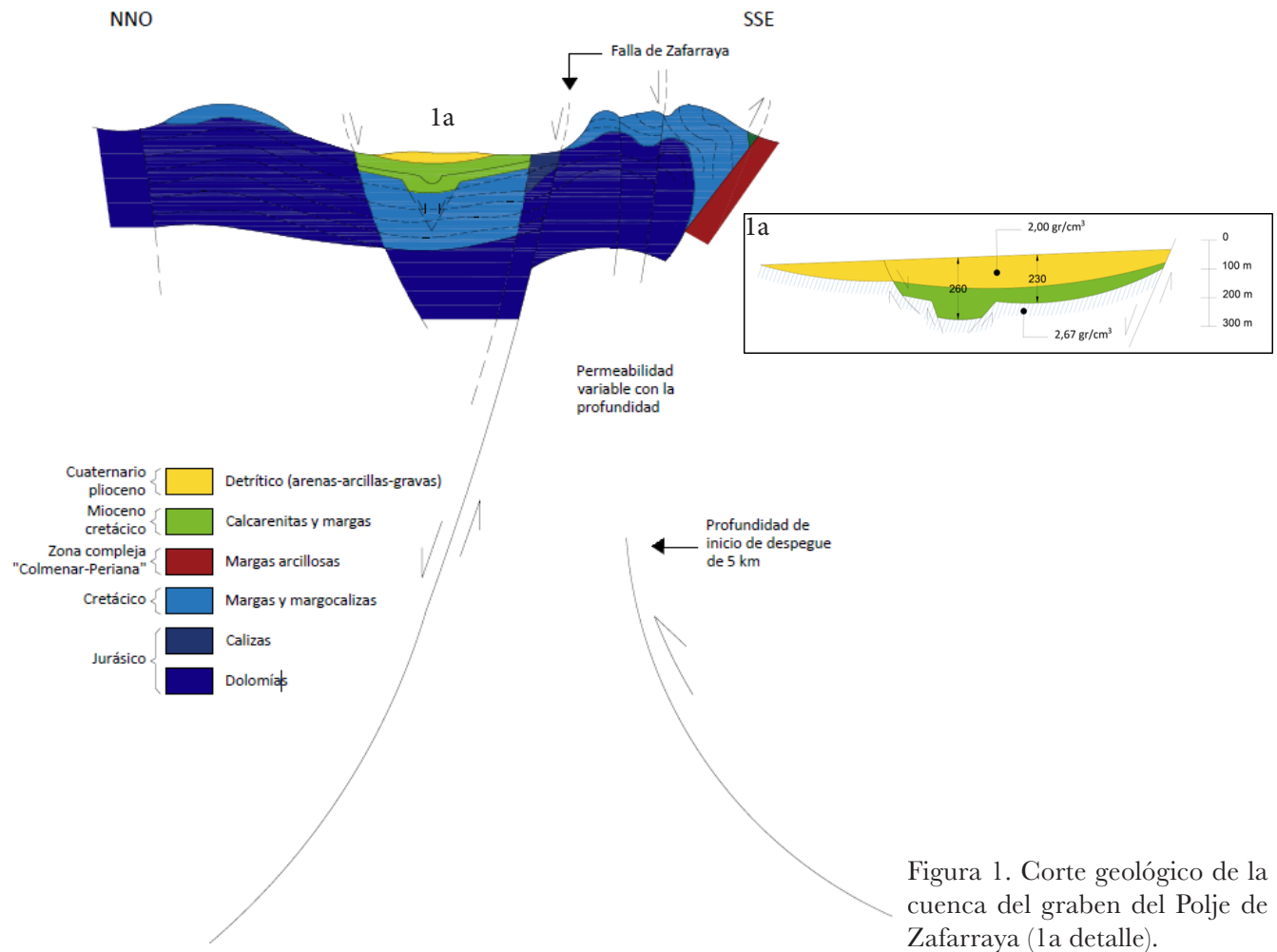
El Terremoto de Andalucía (España) de 1884 fue uno de los más devastadores en la Península Ibérica en los últimos siglos. Causó entre 1050 y 1200 víctimas [1]. Tuvo una magnitud de entre 6,2 y 6,7 en la escala de Richter, y duró aproximadamente 10 segundos con un hipocentro situado entre 10 y 20 kilómetros de profundidad [2-4]. El origen de este terremoto se asocia a la falla de gravedad de Ventas de Zafarraya (Granada), lo que ha sido evidenciado mediante el estudio de trincheras, y a la cual se ajustan también las isosistas [5]. Además del desprendimiento de rocas y deslizamientos de ladera, hay que agregar los efectos hidrogeológicos de distinto rango inducidos por el terremoto [5-7].

Gracias a las encuestas del Instituto Geográfico Nacional, a la información proporcionada por la Comisión del Mapa Geológico de España de 1884, y la obra de Domingo de Orueta y la Comisión Española (1885), ha sido posible caracterizar las alteraciones hidrogeológicas producidas por el terremoto, incluyendo licuefacción de suelos (en Vélez-Málaga), aparición de nuevos manantiales, desaparición de manantiales existentes y descenso del nivel freático (en Sierra Tejeda), incremento persistente de la descarga en manantiales y arroyos (el manantial termal de Alhama), variaciones de niveles en pozos, en las propiedades físicas y químicas del agua subterránea, y de la presión [8-10].

*Autor para contacto: juancarlos.mosquera@upm.es

En estos fenómenos se puede observar la interacción entre los procesos hidrogeológicos y la deformación mecánica de la corteza superficial. Por tanto, proporcionan información sobre la interacción entre el ciclo del agua, la tectónica y las propiedades de la corteza. En este sentido, y según la documentación histórica citada, se observa que, en el campo cercano a la falla, el nivel freático subió al NNO de esta, mientras que en la zona SSE descendió [10-12].

Se presenta una metodología de simulación computacional basada en modelos numéricos hidro-geomecánicos que pretenden simular las condiciones del macizo circundante a la falla principal (figura 1), de manera que su respuesta permita entender y explicar los rasgos y efectos del evento de 1884. Se describen las características esenciales del modelo y los factores que determinan la respuesta, contrastada con la información disponible en la bibliografía relacionada [1-19].

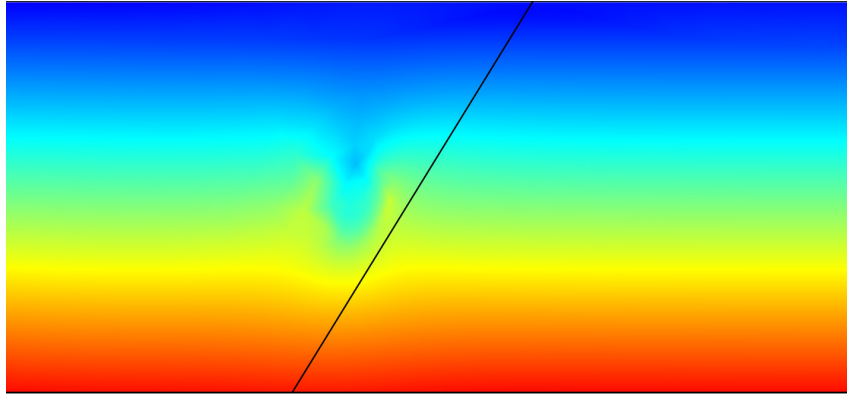


Materiales y Metodología

El modelo geológico conceptual representa la falla de Zafarraya con buzamiento variable en torno a 60° hacia el Norte, un nivel de despegue a 10 km y una falla ciega de empuje. En el modelo cinemático la falla ciega empuja por el SSE, produce una elevación de Sierra Tejada y por consiguiente una falla normal de hundimiento al NNO, con la formación de un graben, el Polje de Zafarraya [11, 12, 19].

A partir del modelo conceptual, se implementa un modelo hidro-geomecánico de elementos finitos 2D en deformación plana. La falla se representa mediante una entidad unidimensional con respuesta friccional tipo “slip-weakening”, esto es, su resistencia friccional se debilita cuando se activa el deslizamiento relativo

entre sus bordes [20]. El modelo de elementos finitos considera el fenómeno completamente acoplado, es decir, considera la fricción en la falla, la existencia de agua intersticial en los poros del medio poroelástico. El terreno se considera homogéneo e isótropo, si bien incluye un campo heterogéneo de tensiones iniciales debido a su historia tectónica. La ruptura sísmica se produce cuando las tensiones tangenciales alcanzan en alguna zona de la falla su resistencia friccional.



Se han ejecutado una batería de simulaciones con configuraciones diversas. En los bordes laterales verticales se aplican las tensiones de confinamiento necesarias para que el sistema se encuentre en equilibrio estático al comienzo del ciclo sísmico, lo cual conlleva el estado tensional correspondiente más los asentamientos naturales del terreno por consolidación (figura 2).

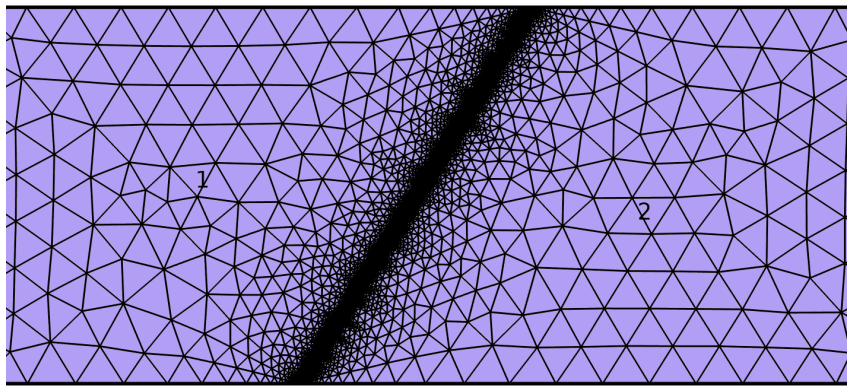


Figura 2. Estado de tensiones iniciales (von Mises) a comienso del período intersísmico y discretización del mallado de elementos finitos (inferior).

Para calibrar el modelo se varían diversos parámetros tales como la porosidad del medio, variable con la profundidad entre el 1% y el 5%; el módulo elástico del terreno se estima

alrededor de 20 *GPa*, su coeficiente de Poisson es 0,25 y su densidad seca es 2,5 T/m^3 . El medio se considera viscoelástico, según la formulación de Kelvin-Voigt, con un coeficiente de viscosidad de $10^7 Pa.s$ y una permeabilidad intrínseca variable entre $10^{-11} m^2$ en superficie y $10^{-13} m^2$ en profundidad. El coeficiente de Biot Willis se considera 1, es decir, existe pleno acoplamiento entre las variaciones de presión de poro y la deformabilidad del medio poroso [21]. La viscosidad dinámica del agua intersticial se considera $10^{-3} Pa.s$ y su compresibilidad es $4 \times 10^{-10} Pa^{-1}$. Se considera una falla más bien permeable en sentido transversal, cuyo flujo hidráulico [$kg/m^2 s$] entre sus bordes se representa simplificada mediante un coeficiente de permeabilidad transversal de $10^{-11} s/m$. Se tiene en cuenta el fenómeno de amortiguamiento por radiación como mecanismo de disipación volumétrica de las ondas sísmicas, en forma de una cohesión dependiente de la velocidad, en la definición de la resistencia a fricción de la falla [22, 23].

Así, se ha conseguido calibrar un modelo final simplificado que, sometido a las deformaciones medias del período intersísmico, alcanza finalmente la ruptura. El método permite explicar el deslizamiento de la falla durante el terremoto de Andalucía, así como el comportamiento de la presión de poro.

Resultados y Análisis

En la fase presísmica, previa al deslizamiento, la zona al sur de la falla se encuentra comprimida por efecto de la propia actividad de la falla normal y el despegue inferior que empuja y de igual forma comprime el terreno. Al norte de la falla, en la zona del valle, ocurre lo opuesto, la zona se encuentra traccionada y los poros en el terreno se encuentran abiertos y se saturan.

En la fase cosísmica, una vez que se sobrepasa el límite de resistencia de la falla y se sucede el terremoto, la zona del valle se hunde y se comprime cerrando los poros que en la fase anterior se encontraban abiertos, por lo que

el agua retenida es expulsada originando nuevas fuentes y otras alteraciones hidrogeológicas. Los resultados de este estudio simulan estos efectos descritos de forma similar a lo ocurrido en realidad.

El inconveniente de este tipo de estudios retrospectivos es la escasez de buenas estimaciones de los diversos parámetros constitutivos del modelo, de forma que sus valores se tienen que ir ajustando para que los resultados que se obtengan sean lo más parecidos a los efectos observados en la realidad; por ejemplo, los asientos o elevaciones registrados, la aparición o desecación de fuentes, entre otros.

Conclusiones

Por una parte, esta metodología simplificada permite ayudar a entender el papel que juega la presión de poro en el desencadenamiento del terremoto.

Por otra parte, la aplicación de este tipo de modelos es transversal; puede proporcionar un mayor conocimiento del Catálogo de Sismos español, dado que el acervo de registros de las alteraciones hidrogeológicas producidas por los terremotos históricos ofrece una utilidad práctica decisiva; ayuda a entender mejor los modelos conceptuales y a calibrar los modelos de simulación.

Referencias bibliográficas

1. Quidam, U. (1885) Cartas desde los sitios azotados por los terremotos de Andalucía. Librería Nacional y Extranjera. Madrid, 142.
2. Lasala y Collado, F. (1888). Memoria del comisario regio para la reedificación de los pueblos destruidos por los terremotos en las provincias de Granada y Málaga. M. Minuesa de los Ríos, Impresor, Madrid.
3. Fouqué, F. (1889). Estudios referentes al terremoto de Andalucía ocurrido el 25 de diciembre de 1884 ya la constitución geológica del terreno conmovido, hecho por la comisión destinada al objeto por la Academia de Ciencias de París.
4. Botella y Hornos, F. (1885). Los terremotos de Málaga y Granada. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Madrid*, t. XVII, 30.
5. Fernández de Castro, M., Lasal, J. P., Cortazar, D., & Tarín, J. G. (1885). Terremotos de Andalucía. Informe de la Comisión nombrada para su estudio dando cuenta del estado de los trabajos en 7 de Marzo de 1885.
6. Comisión Italiana. (1886). Informe del terremoto de Andalucía de 1884. R. Accademia dei Lincei. *Memorie della classe di scienze fisiche, matematiche e naturalli*. Volume III, 195 y mapas.
7. Seco de Lucena, L. (1941): Crónicas sobre el terremoto de Andalucía de 1884. *Memorias*. 79-103.
8. Reicherter, K. R., Jabaloy, A., Galindo-Zaldívar, J., Ruano, P., Becker-Heidmann, P., et al. (2003). Repeated palaeoseismic activity of the Ventas de Zafarraya fault (S Spain) and its relation with the 1884 Andalusian earthquake. *International Journal of Earth Sciences*, 92(6), 912-922.
9. López Arroyo, A., Martín Martín, A. J., & Mezcua Rodríguez, J. (1980). Terremoto de Andalucía. Influencia en sus efectos de las condiciones del terreno y del tipo de construcción. *El terremoto de Andalucía de 1884*, 5-94.
10. Udías, A., & Muñoz, D. (1979). The Andalusian earthquake of 25 December 1884. *Tectonophysics*, 53(3-4), 291-299.
11. Fernández-García, C., & Ruano, P. (2016). Caracterización de la geometría del Polje de Zafarraya a partir de prospección gravimétrica (Cordillera Bética). *Geogaceta*.
12. de Galdeano, C. S. (2013). The Zafarraya Polje (Betic Cordillera, Granada, Spain), a basin open by lateral displacement and bending. *Journal of Geodynamics*, 64, 62-70.
13. Garzón Pareja, M. (1981). Historia de Granada. Tomo II. 375.

14. Martínez Aguirre, C. (1885). Los temblores de tierra. Estudio de estos fenómenos con motivo de los terremotos sentidos en las provincias de Málaga y Granada durante los 7 últimos días del año 1884 y enero de 1885. Biblioteca Andaluza, Málaga, 166.
15. Muñoz, D., & Udías, A. (1981). El Terremoto de Andalucía del 25 de diciembre de 1884. IGN.
16. Muñoz, D., & Udías, A. (1991). Seismicity, Seismotectonics and Seismic Risk of the Ibero-Maghrebian Region. Madrid: Instituto Geográfico Nacional.
17. Galindo-Zaldívar, J., Gil, A. J., Borque, M. J., González-Lodeiro, F., Jabaloy, A., Marín-Lechado, C., ... & Sanz de Galdeano, C. (2004). Desarrollo simultáneo reciente de pliegues y fallas en las Cordilleras Béticas: la Falla de Zafarraya y el Pliegue de Sierra Tejeda. *Geo-Temas*, 6, 147-150.
18. Grützner, C., Ruano, P., Galindo-Zaldívar, J., Becker-Heidmann, P., Sanz de Galdeano, C., Rudersdorf, A., & Reicherter, K. (2013). Late Holocene rupture history of the Ventas de Zafarraya Fault (Southern Spain). *Cuaternario y Geomorfología*.
19. Pulido-Bosch, A., & López Chicano, M. (s.f.). Síntesis hidrogeológica de los acuíferos de Sierra Gorda, Polje de Zafarraya y Hacho de Loja.
20. Bizzarri, A. (2010). How to promote earthquake ruptures: Different nucleation strategies in a dynamic model with slip-weakening friction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(3), 923-940.
21. Rice, J. R., & Cleary, M. P. (1976). Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents. *Reviews of Geophysics*, 14(2), 227-241.
22. Rice, J.R. (1993), Spatio-temporal complexity of slip on a fault, *Journal of Geophysical Research*, 98, 9885–9907.
23. Cueto-Felgueroso, L., Santillán, D., & Mosquera, J. C. (2017). Stick-slip dynamics of flow-induced seismicity on rate and state faults. *Geophysical Research Letters*, 44(9), 4098-4106.





MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Metodología para el estudio del comportamiento agregado de estructuras de mampostería reforzadas

Sebastián Torres Olivares^{a,b*}, Beatriz González Rodrigo^b,
Erick I. Saavedra Flores^a, Juan Carlos Mosquera Feijoo^b

^aDepartamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de Santiago de Chile, Av. Ecuador 3659, Estación Central, Santiago, Chile.

^bEscuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

Abstract: Seismic vulnerability is always characterized by individual units. Previous studies carried out at the universities of Bologna and Minho confirm the importance of the effect of aggregate buildings on the structural response to seismic actions. The objective of this work is to validate a methodology to obtain a model of the dynamic behavior of the aggregate system of confined and reinforced masonry, a predominant constructive typology in San José, Costa Rica. Nonlinear pseudo-static analysis is performed using the equivalent frame model. Parameters are calibrated from experimental results in pushover tests performed on simple walls, comparison with previous numerical models of isolated structures, and later application to different aggregate configurations with diverse mechanical properties, geometric configurations and interfaces between colliding walls.

Palabras clave: Mampostería reforzada, edificios agregados, marcos equivalentes, vulnerabilidad sísmica.

Key words: Reinforced masonry, aggregate buildings, equivalent frames, seismic vulnerability.

Introducción

Actualmente, los estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico se realizan considerando el comportamiento de las edificaciones como elementos aislados. Sin embargo, distintos estudios han analizado el comportamiento dinámico de estructuras de mampostería que actúan en conjunto con las adyacentes (estructura agregada), centrándose principalmente en tipologías de mampostería de fábrica no reforzada en centros históricos europeos, principalmente Italia y Portugal [1, 2, 3].

Resultados obtenidos en estudios previos concluyen que existen diferencias significativas en la vulnerabilidad sísmica de las estructuras cuando estas se encuentran agregadas o aisladas. Se ha observado, además, que cuando los edificios están agregados, el sismo afecta de distinta manera a las estructuras según su posición en la distribución, debido principalmente a los efectos de torsión derivados de la geometría. Este es el motivo que explica que en investigaciones anteriores las mayores sollicitaciones de corte estaban concentradas en los muros de viviendas extremas en agregados de edificios en línea [4, 5].

San José de Costa Rica es un importante núcleo urbano ubicado en una zona de peligrosidad sísmica. El

*Autor para contacto: sebastian.torres.o@usach.cl

sistema constructivo de viviendas unifamiliares, el más extendido en la ciudad, debe ser capaz de presentar un buen comportamiento ante cargas sísmicas, asegurar un coste asequible y una ejecución en obra sencilla. El código sísmico costarricense (CSCR) recoge el sistema constructivo basado en muros de mampostería de bloques de concreto parcialmente rellenos con reforzamiento horizontal y vertical en barras de acero, acompañados de una viga de corona de concreto armado [6]. Debido a la constante expansión del centro urbano, al aprovechamiento de terrenos y a la proyección de viviendas tipo condominio, se observa una importante presencia de edificaciones que comparten una o dos fachadas con las viviendas adyacentes. Sin embargo, actualmente no existe investigación previa del comportamiento de edificios agregados para este tipo de construcción.

El estudio tiene como objetivo principal determinar una metodología válida que permita caracterizar el comportamiento sísmico de la tipología de estructuras agregadas más habituales en San José de Costa Rica y analizar si existen diferencias entre los distintos tipos de contactos entre edificios adyacentes. Esta metodología debe permitir verificar las diferencias entre el comportamiento de estructuras aisladas y agregadas de mampostería reforzada confinada sometidas a cargas dinámicas, y comprobar la aplicabilidad del método de marcos equivalentes para modelizar este sistema constructivo.

Metodología

Se plantea la utilización del método de marcos equivalentes [7, 8] para el análisis. Este método ha sido desarrollado principalmente para el estudio del comportamiento sísmico global de estructuras de mampostería no reforzada, con un muy bajo coste computacional y resultados comparables a modelos de mayor complejidad [9], por lo que se considera adecuado para el estudio de modelos de múltiples viviendas, ya que estos poseen gran cantidad de elementos y variables susceptibles de simulaciones versátiles. Los modelos de marcos equivalentes consisten principalmente en la representación de la estructura como un marco equivalente tridimensional basado en la unión de marcos bidimensionales, los cuales desglosan del muro en tres clases de elementos definidos por dos nodos interconectados: Elementos verticales (piers), horizontales (spandrels) y elementos rígidos (figura 1)

La implementación computacional del método de marco equivalente se realiza a través del software TREMURI [10] desarrollado por la Universidad de Génova y su versión comercial 3Muri. Permite definir los materiales a través de una curva bilineal y estudiar el comportamiento sísmico de la estructura mediante análisis estáticos no lineales de empuje incremental, método pushover.

La metodología del estudio se plantea de tal forma que se ha de validar a través de distintas etapas progresivas el método numérico empleado:

1. Como primera etapa se plantea la calibración y validación del método de marco equivalente para muros de mampostería de bloques de concreto parcialmente rellenos con refuerzo vertical y horizontal. Para esto se emplean los resultados experimentales obtenidos para el ensayo dinámico de muros de esta tipología realizado en la Universidad de Costa Rica [11].



Figura 1. Método del marco equivalente aplicado sobre viviendas agregadas en San José (Costa Rica).

2. De esta manera se asegura que, a nivel de panel de muro, el software es capaz de representar adecuadamente el comportamiento real de la estructura. La verificación se realiza asegurando que las simulaciones en dos dimensiones representan mecanismos de fallo similares a los observados experimentalmente y que las curvas pushover se encuentran dentro del orden de magnitud de lo observado en la envolvente de las curvas histeréticas de los ensayos. Es importante guardar especial cuidado en la rigidez de los muros, ya que los valores teóricos y experimentales (reales) se diferencian considerablemente en este tipo de mampostería [12], por lo que es necesario calibrar este parámetro de tal manera que los resultados se ajusten satisfactoriamente para todas las dimensiones de muro estudiadas.

3. Una vez calibrado el modelo computacional con el comportamiento del muro, se emplearon los resultados para simular una vivienda típica de Costa Rica en 3 dimensiones. Este diseño estructural presenta un modelo previo [13] realizado para vivienda aislada. La verificación se realiza a través de los periodos de los principales modos de vibración y las curvas de capacidad obtenidas para la vivienda en sus dos direcciones principales, además, los tipos de fallo y elementos más vulnerables de la estructura deben corresponder a los observados en el estudio previo.

4. Confirmada una representación correcta de la vivienda aislada, se estudia el comportamiento de viviendas agregadas de mampostería y sus contactos mediante un modelo de tres dimensiones. Para la validación del método, se ha trabajado sobre un estudio realizado por la Universidad de Minho [14], el cual analiza el comportamiento de tres viviendas de mampostería de bloque de concreto de geometría simple agregadas a través del método de marco equivalente (figura 2). Utilizando la disposición planteada originalmente por los autores y basándose en lo planteado por otros autores respecto del contacto [15], se prueban distintas configuraciones inter-vivienda de la malla de elemento de marco equivalente para comparar los resultados obtenidos en distintos modelos. Durante esta etapa se analizan los resultados de manera comparativa, contrastando elementos y mecanismos de falla, tanto entre la vivienda aislada y las distintas configuraciones de agregados, como para las distintas viviendas dentro del propio agregado. Se verifica, en todo momento, que los resultados obtenidos se correlacionan con los observados en el estudio previo.

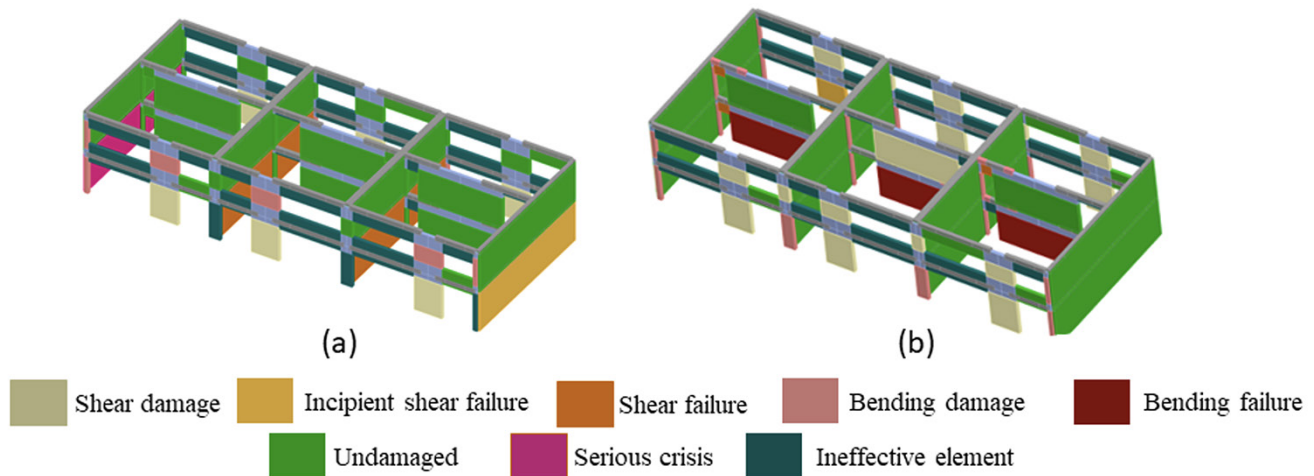


Figura 2. Aplicación del modelo de marco equivalente sobre un conjunto de tres viviendas agregadas de mampostería de bloque de concreto analizadas en la Universidad de Minho [14]. Representación de los modos de fallo si la acción es: a) paralela a la fachada principal b) perpendicular.

5. Como última etapa, y tras haber revisado y comparado con resultados previos del comportamiento de muros, estructura y agregados, se propone una configuración agregada de la vivienda unifamiliar típica estudiada en la segunda etapa. El agregado se plantea de manera lineal, la conexión entre muros adyacentes se realiza según los métodos probados en la etapa anterior y la replicación de la residencia se realiza por simetría especular, emulando de esta forma condominios observados en la ciudad de San José. Los resultados obtenidos para formas de vibración, desplazamientos, curvas de capacidad y mecanismos de falla, son comparados con lo observado en la vivienda aislada. Un resultado decisivo es la respuesta comparada entre una vivienda aislada y una agregación.

Conclusiones

La metodología planteada permite caracterizar de manera confiable los agregados de la tipología estructural estudiada al presentar una validación del proceso en todas sus etapas permitiendo caracterizar la vivienda aislada y el comportamiento cuando presenta contacto con adyacente.

A través del proceso indicado es posible evaluar el impacto del sismo en términos de daños de manera diferencial en las distintas edificaciones que componen a los agregados y además, en los elementos estructurales que componen a estas viviendas, facilitando así el análisis comparativo con respecto a los resultados de un elemento aislado.

La consideración de las diferentes maneras de ejecutar el contacto entre las viviendas que componen el agregado evita la generación de modelos sobre-idealizados y permite estudiar situaciones más cercanas a la realidad de las zonas inter-estructuras.

Referencias bibliográficas

1. Greco, A., Lombardo, G., Pantò, B., Famà, A. (2020). «Seismic Vulnerability of Historical Masonry Aggregate Buildings in Oriental Sicily». *International Journal of Architectural Heritage* 14 (4): 517-40. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1553075>.
2. Chieffo, N., Formisano, A. (2019) . “Comparative Seismic Assessment Methods for Masonry Building Aggregates: A Case Study.” *Frontiers in Built Environment*: n. pag. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00123>.
3. Bernardini, C., Rui, M., Boschi, S., Ferreira, T. M., Romeu, V., Vignoli, A. (2019): The seismic performance-based assessment of a masonry building enclosed in aggregate in Faro (Portugal) by means of a new target structural unit approach. *Engineering Structures* 19: 386-400. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.040>.
4. Battaglia, L., Buratti, N., Savoia, M. (2018). Seismic fragility assessment of masonry structural units and masonry aggregates, 13th North American Masonry Conference, pp. 1873–1887. <http://dx.doi.org/10.1201/9781003098508-129>.
5. Battaglia, L., Ferreira, T. M., Lourenço, P. L. (2021). Seismic fragility assessment of masonry building aggregates: A case study in the old city Centre of Seixal, Portugal. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 50 (5): 1358-77. <https://doi.org/10.1002/eqe.3405>.
6. Esquivel-Salas, L. C. (2020). Inventario de edificaciones del Cantón de San José para el caso específico de amenaza sísmica utilizando el método de mapeo ambiental rápido. Individual Study, Universidad de Costa Rica.
7. Magenes, G., Fontana, A.D. (1998). Simplified non-linear seismic analysis of masonry buildings, 5th International Masonry Conference, *Proceedings of the British Masonry Society*, vol. 8: 190-195.
8. Penelis, G. (2006). An efficient approach for pushover analysis of unreinforced masonry (URM) structures. *Journal of Earthquake Engineering*. 10 (3): 359-379.
9. Sabatino, R., Rizzano, G. (2011). A simplified approach for the seismic analysis of masonry structures, *The Open Construction and Building Technology Journal*, 1-M7, pp. 97–104. doi: <https://doi.org/10.2174/1874836801105010097>.
10. Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S. (2013). TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures* 56: 1787-99. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.002>.
11. Hidalgo-Leiva, D. A., Picado-Arguedas, A., Sánchez-Vargas, N. (2021). In-plane cyclic performance of confined partially grouted masonry walls with joint and vertical reinforcement». *Engineering Structures* 245: 112881. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112881>.
12. Haach, V. G., Vasconcelos, G., Lourenço, P. B. (2010). Experimental Analysis of Reinforced Concrete Block Masonry Walls Subjected to In-Plane Cyclic Loading». *Journal of Structural Engineering* 136 (4): 452-62. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000125).
13. Hidalgo-Leiva, D. A., Pujades, L.G., Barbat, A.H., Vargas, Y.F., Díaz, S.A. (2021). Nonlinear static and dynamic analyses of Costa Rican reinforced concrete masonry structures. *Engineering Structures* 234: 111998. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111998>.
14. Rui, M., Pedreira, F., Vasconcelos, G., Lourenço, P.B. (2012). Pushover analysis of a modern aggregate of masonry buildings through macro-element modeling”.
15. Angiolilli, M., Lagomarsino, S., Cattari, S., Degli Abbatì, S. (2021). Seismic fragility assessment of existing masonry buildings in aggregate. *Engineering Structures* 247: 113218. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113218>.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Análisis de la dinámica de deformación en el área urbana del área metropolitana de la Ciudad de Guatemala con metodología InSAR sentinel-1

Carlos García-Lanchares^{a,b,c*}, Miguel Marchamalo^{a,b}, María Belén Benito^a, Candela Sancho^c, Alfredo Fernández-Landa^c, Adriana Ornelas^a, Rebeca Franco^{a,b}, Orlando Hernández^a, Carlos Gamboa^b

^aLab. de Topografía y Geomática, ETSI CCP, Universidad Politécnica de Madrid, España.

^bTopografía y Geomática Lb. ETSI Caminos, Canales y Puertos, UPM.

^cDetektia earth Surface Monitoring S.L. Madrid, España.

Abstract: Remote sensing techniques have become a considerable solution to manage huge areas. In case of emerging countries, this means having the economic capability to manage their budgets and staying one step closer to a sustainable development by being able to guarantee safe settlements.

Palabras clave: Teledetección, InSAR, Deformación, Riesgo, zonificación.

Key words: Remote-sensing, InSAR, deformation, Geo.hazards, clustering.

Introducción

En este trabajo se ha realizado un análisis InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) con el objetivo de describir la dinámica de deformación en Ciudad de Guatemala (ver figura 1) en el período de enero de 2017 a septiembre de 2021. Las deformaciones se han medido en la línea de mira del satélite (LOS por sus siglas en inglés) en la geometría Ascendente. Los resultados InSAR han probado ser un recurso efectivo y de un gran valor en el análisis del fenómeno de la subsidencia en entornos urbanos [1]

Se utilizó la técnica Persistent Scatterer Interferometry (PSI), esta técnica genera información sobre los procesos de deformación en áreas urbanas con muy alta resolución. En áreas vegetadas, esta técnica tiene grandes limitaciones para capturar los procesos de deformación. El resultado final son mapas de deformación que muestran los puntos persistentes obtenidos, sus velocidades medias y la serie temporal de deformación en el periodo de estudio (mm/año).

*Autor para contacto: cglanchares@detektia.com

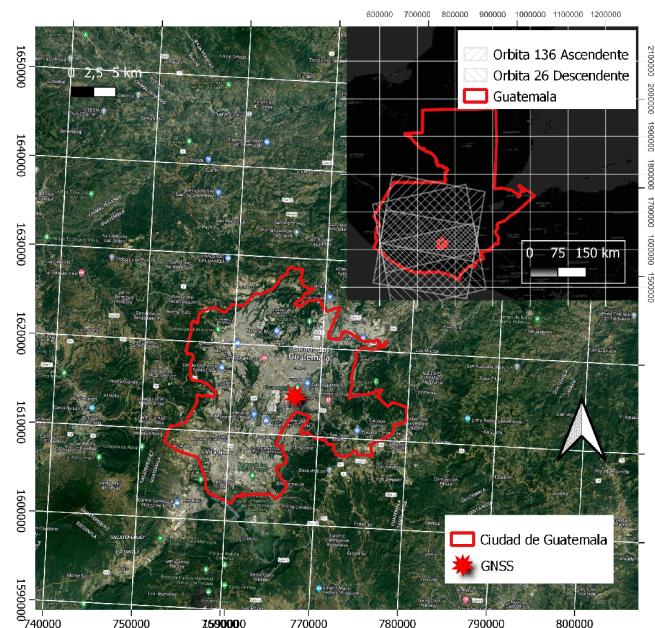


Figura 1. Área de interés en Ciudad de Guatemala y en esquina superior derecha área de las imágenes sentinel-1 obtenidas en ambas geometrías.

El valle en el que se ubica Ciudad de Guatemala interaccionan tres placas tectónicas: Norte América, Caribe Cocos. La placa de Cocos subduce bajo la del Caribe en la fosa mesoamericana, induciendo a la formación de la cordillera de volcanes de Centro América, que encuentran su máximo crecimiento en Guatemala, porque afloran los más elevados conos y depresiones caldéricas, con vulcanismo ácido, representado por riolitas, ignimbritas y piroclastos. El valle de Ciudad de Guatemala se puede definir como un graben limitado por las fallas de Pinula y la de Mixco al este y oeste, respectivamente [2].

La técnica InSAR ha sido utilizada con anterioridad en Guatemala para el estudio de deformaciones en ámbitos vulcanológicos [3], [4], sísmicos [5] o en otros países para analizar deformación provocada por la explotación de aguas subterráneas [6], [7]. No se han encontrado referencias conocidas de ningún estudio académico que analice exclusivamente la capital de Guatemala. El interés de realizar un análisis del comportamiento del suelo de la ciudad es fundamental para garantizar un desarrollo sostenible de las infraestructuras contribuyendo a reducir los efectos catastróficos de terremotos y otros eventos naturales que se producen en estos lugares [7].

Materiales y Metodología

Fueron empleadas 112 imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR por sus siglas en inglés) en geometría ascendente, para el periodo de tiempo comprendido entre el 8 de enero de 2017 y el 8 de Septiembre de 2021.

Las nubes de puntos de deformación del terreno se obtuvieron mediante la interferometría con el algoritmo StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers), desarrollado en la Universidad de Stanford. Para seleccionar la imagen master, aplicar los orbitales, elegir las secciones de las imágenes en las que se encontraba el área de estudio (subswath y burst), la corrección y la creación de los interferogramas se empleó el software SNAP, creado por la ESA (European Space Agency). Para seleccionar las fechas del estudio, se aseguró que el número de imágenes era constante para todo el periodo, se consiguió una adquisición mínima de 2 imágenes al mes. Ambos satélites de la constelación Sentinel-1 fueron utilizados (A y B) (ver cuadro 1).

Cuadro 1. Información de las imágenes empleadas para el procesamiento.

Satélite	Sentinel-1
Banda	C
Longitud de onda	5.55 cm
Modo de adquisición	<i>Wide Swath</i>
Polarización	VV
Producto SAR	<i>Single Look Complex</i>
Orbita de adquisición	Ascendente/Descendente
Periodo de adquisición	Enero de 2017 – septiembre 2021
Resolución	6-12 días
Ángulo de incidencia medio	39°
Órbita	Ascendente: 136 /Descendente: 26
Número de Imágenes	Ascendente: 112 /Descendente: 114
Punto de referencia	(14.589, -90.502)

La selección del punto de referencia se hizo seleccionando el punto con el menor error cuadrático medio y con una velocidad de deformación cercana a cero; en este caso, el punto seleccionado tenía una velocidad de -0.2 mm/año, referido a la media de velocidades de todo el procesado.

La información procesada se validará con las estaciones GNSS ubicadas en Ciudad de Guatemala para el mismo periodo de tiempo. Las deformaciones resultantes de procesados InSAR para analizar series temporales en LOS tiene precisiones inferiores a los 8 mm [8] o incluso 5 mm [9], mientras que los resultados en las componentes vertical y horizontal pueden oscilar en unos pocos mm/año [10], [11],[12].

Resultados preliminares

Los resultados preliminares se centran en las interpretaciones derivadas del mapa de deformación obtenido para la geometría ascendente en el periodo de estudio dado.

El mapa de deformación resultante se puede ver en la figura 2. Se consiguieron obtener 580,872 puntos persistentes. En la figura 2 se pueden observar áreas que destacan del resto por sus valores de magnitud negativos. Se consideran 6 áreas en estado de subsidencia en el periodo de estudio.

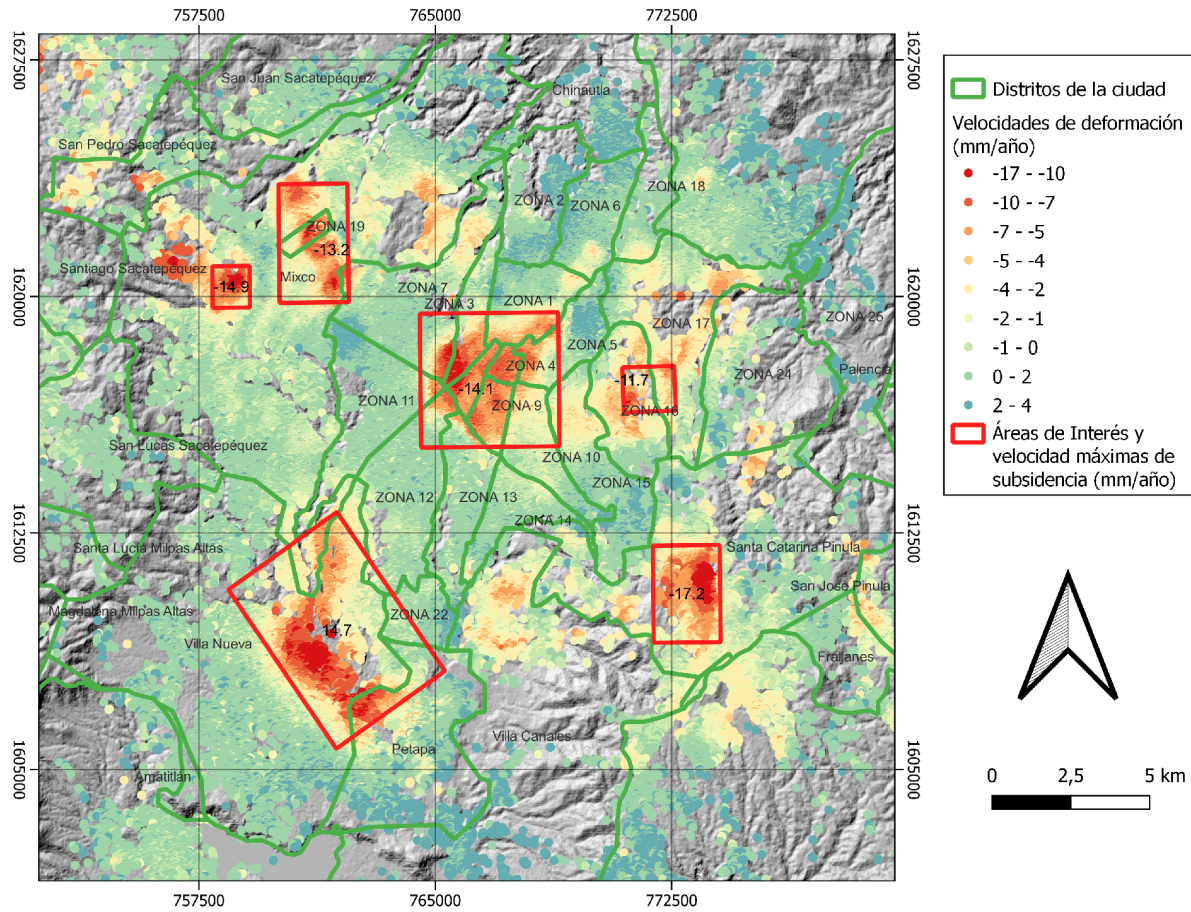


Figura 2. Resultados preliminares de deformación sobre Ciudad de Guatemala para la geometría ascendente, en el Área de interés 1, perfil longitudinal.

Las áreas definidas se encuentran en zona urbana, y en todas se observan valores inferiores a -11 mm/año. Además, como se puede observar en el cuadro 2, las áreas de deformación importante afectan a varios distritos de la ciudad y municipios colindantes.

Cuadro 2. Estadísticos de la velocidad de deformación sobre áreas de la ciudad más afectadas (mm/año) para el periodo febrero 2017 a septiembre 2021.

Área de interés	Superficie (km ²)	Número de puntos	Densidad pto/s/km ²	Zonas afectadas	Velocidad de deformación			
					Mínima	Media	P05	P95
1	10.17	25,319	2489.6	Zona 1, 3, 4, 5, 6, 9	-14.1	-4.3	-8.5	0.4

Se han analizado los resultados de los puntos persistentes dentro del área de interés 1. El 7.1% de los puntos tiene valores en el rango (0;4.2) mientras que el 92.9% restante tiene valores negativos. En el perfil longitudinal (ver

figura 3) se pueden ver dos perfiles longitudinales que atraviesan el área de interés 1 y que se encuentra en varias zonas administrativas de la ciudad.

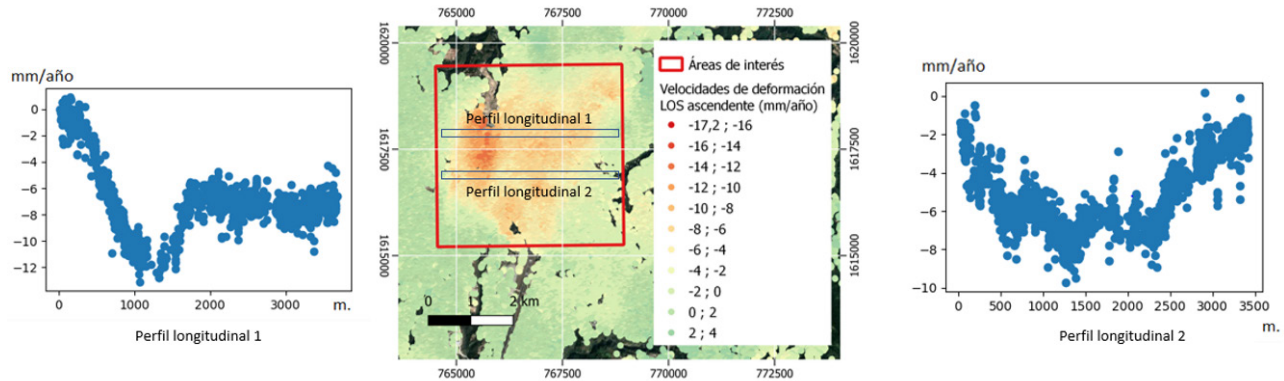


Figura 3. Perfiles longitudinales en el área de interés 1.

Conclusiones

Este resumen está basado en los resultados proporcionados por la interpretación de una de las geometrías de Sentinel-1. Se localizan hasta seis áreas homogéneas con magnitudes de subsidencia dentro de la zona de estudio planteada que afectan a varios distritos de la ciudad y localidades cercanas.

En referencia a los motivos detrás de las subsidencias observadas, los datos obtenidos pueden ser consecuencia de una o varias causas. No obstante, este documento se centrará únicamente en describir la dinámica de deformación de la ciudad. La causalidad podrá ser objeto de un estudio posterior.

Referencias bibliográficas

1. Ferretti, A., Colombo, D., Fumagalli, A., Novali, F., Rucci, A. (2015) : InSAR data for monitoring land subsidence: time to think big, *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 331–334.
2. Ramírez, Esaú Guzmán. (2002). Estudio geológico-geotécnico de la susceptibilidad de deslizamientos en la colonia El Carmen zona 12 de la ciudad de Guatemala, 101.
3. Chard, M. E., J. Biggs, C. Wauthier, E. Sansosti, D. W. D. Arnold, F. Delgado, S. K. Ebmeier, et al. (2018). Towards Coordinated Regional Multi-Satellite InSAR Volcano Observations: Results from the Latin America Pilot Project». *Journal of Applied Volcanology* 7 (1): 5.
4. Wnuk, K., y C. Wauthier. (2017). Surface Deformation Induced by Magmatic Processes at Pacaya Volcano, Guatemala Revealed by InSAR. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 344 (septiembre): 197-211.
5. Cosenza-Murales, B. et al. (2022). Large Scale Observations and Modeling of Strain Partitioning in Guatemala from SAR Interferometry. Preprint. Geodesy.
6. Hussain, M. et al. (2022). Sentinel-1A for Monitoring Land Subsidence of Coastal City of Pakistan Using Persistent Scatterers In-SAR Technique. *Scientific Reports* 12 (1): 5294.
7. Fernández-Torres et al. (2020). Land Subsidence Risk Maps and InSAR Based Angular Distortion Structural Vulnerability Assessment: An Example in Mexico City». *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 382 (abril): 583-87.

8. Duan, Wei, Hong Zhang, Chao Wang, y Yixian Tang. (2020) . Multi-Temporal InSAR Parallel Processing for Sentinel-1 Large-Scale Surface Deformation Mapping. *Remote Sensing* 12 (22): 3749.
9. Manunta, M. et al. (2019). The Parallel SBAS Approach for Sentinel-1 Interferometric Wide Swath Deformation Time-Series Generation: Algorithm Description and Products Quality Assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 57 (9): 6259-81.
10. Yalvac, Sefa. (2020). Validating InSAR-SBAS Results by Means of Different GNSS Analysis Techniques in Medium- and High-Grade Deformation Areas. *Environmental Monitoring and Assessment* 192 (2): 12.
11. Cigna, F. et al. (2021). Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR Displacement Velocities against GNSS and Geodetic Leveling Monitoring Data. *Remote Sensing* 13 (23): 4800.
12. Cigna, F.; Tapete, D. (2021). Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014–2020 Sentinel-1 IW InSAR. *Remote Sensing of Environment* 253, 1–19.





MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Migración e interacción sísmica a lo largo de la Zona de Fractura de Panamá durante la secuencia del terremoto de julio 2021

Nathalie Chavarría^{a*}, Esteban J. Chaves^a, Cyril Müller^a, Evelyn Nuñez^a

^aObservatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

La caracterización dinámica de los procesos de ruptura a lo largo de las fallas transformantes en el suelo oceánico, así como su impacto e interacción con otros sistemas de falla, siguen siendo un tema de estudio sin resolver, con implicaciones directas sobre la comprensión del potencial y riesgo sísmico local y regional.

La Zona de Fractura de Panamá (ZFP) es una falla transformante, que limita la placa del Coco de la placa Nazca, formando un punto triple con la microplaca de Panamá hacia el sur de la Península de Burica. El evento del 21 de julio de 2021, $M_w=6,8$, generado en la sección norte de la ZFP, es el segundo evento más grande registrado instrumentalmente en este sistema de fallas. Este sismo fue precedido por una secuencia premonitorea de 22 eventos, que inició 7 días antes de la ocurrencia del evento principal, incluyendo el sismo del 17 de julio, $M_w=6,2$. La relocalización hipocentral de la sismicidad en conjunto con métodos de interferometría sísmica, muestran una migración de la secuencia hacia el Norte, en dirección del área de ruptura del evento principal, iluminando el proceso de nucleación y evolución en cascada de la secuencia sísmica.

En este trabajo postulamos que los cambios en los esfuerzos estáticos y el incremento en la tasa de carga a lo largo del sistema de falla, ambos inducidos por la secuencia premonitorea pudieron contribuir a la generación del sismo del 21 de julio. La deformación co-sísmica registrada por los instrumentos GNSS, así como la reducción en la velocidad de las ondas sísmicas superficiales (0.3%) observada en la península de Burica, demuestran la necesidad de monitorear y comprender la interacción sísmica entre el sistema de fallas transformante y la zona de subducción del Pacífico Sur costarricense.

*Autor para contacto: nathalie.chavarria.esquivel@una.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



History of the cooperation on seismology between Norway and Central America 1992 - 2010 and the furtherance through the KUK-AHPAN project

Conrad Lindholm^{a*}

^aSeismoConsult, Oslo, Norway.

Within the area of seismology and earthquake risk was conducted in three phases: From 1991 – 1994; from 1996 – 2000; from 2003 – 2006 and from 2006 – 2010. From Central America seven institutions devoted to seismology participated: INSIVUMEH in Guatemala, UNAH in Honduras, SNET in El Salvador, INETER from Nicaragua, UCR and UNA from Costa Rica and UPA from Panama. Norway engaged three institutions: University of Bergen, NORSAR and the Norwegian Geotechnical Institute.

The important issues that were focused on in the first phase was instrumentation, software for analysis of earthquake data, training and scholarships, computer installations and digitization of the seismological networks and not the least: Regional cooperation between the seismological institutions in Central America involving frequent travels and meetings. The horizontal cooperation involved the establishment of the Central American Seismological Centre (CASC).

Later in the cooperation we could embark on microzonation studies in several cities, fault stability investigations and hazard studies. As a result of the new regional earthquake catalogue several studies on seismic hazard were conducted using the PSHA methodology. Later, also active fault mapping and fault potential evaluation with trenching found its place and resulted also in deterministic hazard and risk models. The risk models were based on detailed mapping of structures (housing typologies) in main cities and assignment of vulnerability functions for the various building typologies, and this ultimately culminated in several loss scenarios for cities in Central America.

As the Norway – Central America cooperation came to an end the projects translated into the RESIS II project lead by the UPM and Maria Belen Benito. Thanks to this extension and cooperation it was also possible to publish the seminal book on seismic hazard in Central America by Benito and Torres in 2012. It is with great pleasure and satisfaction that it is observed that continued collaboration through the KUK-AHPAN project will further improve seismological expertise and knowledge.

*Autor para contacto: conrad.lindholm@outlook.com



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Geología y estratigrafía de la Hoja 3346-IV Quesada

http://geologia.go.cr/geologia/mapas/mapas_geologicos/Hoja%20Geologica%20Quesada.pdf

Ana Sofia Huapaya^{a*}, Evelyn Rodríguez^a

^aDirección de Geología y Minas, San Francisco de Guadalupe, 10104-1000, Costa Rica.

Abstract: The oldest rocks of the Quesada map are characterized by volcanic rocks of the Río Seco Unit from Aguacate Grup (Upper Middle Miocene), which are exposed along the Zarcero fault, and by ignimbrite deposits, observable at the E and at the SW of Anateri town. The vulcanites of the Monteverde Formation (Upper Pliocene-Lower Pleistocene), are showed at the SW corner of the quadrangle. The predominant geology is Quaternary, a product of the volcanic evolution of the NW end of the Central Volcanic Cordillera: Proto-Platanar (Lower Pleistocene), Paleo-Platanar (Middle Pleistocene-Upper Pleistocene), and Neo-Platanar (Upper Pleistocene to the Holocene). The Proto-Platanar is represented by the unit Ron Ron. The units Bajo del Toro and Alto Palomo are representative the Paleo-Platanar. The units Andesites La Paz and Achiote is a product of the temporary phase Paleo-Poás, is contemporary with the Paleo-Platanar. The Neo-Platanar is represented by Platanar-Porvenir Formation, contemporary with the Neo-Poás: Von Frantzius Unit, Congo Unit, Cima Poás Unit at the E of the study area. New ages of the lithological units are defined by K-Ar analysis. Definition of lithological units is based on detailed petrography, XRD, scanning electron microscopy (SEM), and chemical analyses.

Palabras clave: hoja Quesada, Costa Rica, Proto-Platanar, Paleo-Platanar, Neo-Platanar dataciones K-Ar.

Key words: Quesada quadrangle, Costa Rica, Proto-Platanar, Paleo-Platanar, Neo-Platanar, K-Ar geochronology.

Introducción

En el año 2021 concluyó el proyecto de investigación geológica de la hoja cartográfica 3346-IV, Quesada. El mismo fue ejecutado bajo el programa presupuestario 898 de la Dirección de Geología y Minas del Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, y tuvo como objetivo la consolidación del mapa geológico de la Hoja Quesada a escala 1:50 000, herramienta fundamental para el desarrollo en el planeamiento y toma de decisiones del Estado costarricense y de los gobiernos locales de la región norte del país.

El trabajo agrupa los resultados del estudio geológico realizado en el sector occidental de la Cordillera Volcánica Central, región Huetar Norte, entre longitudes 472837 - 445455 y latitudes 1124067 – 11742469 según coordenadas CRTM05. El área de estudio comprende aproximadamente 500 km².

Los trabajos previamente realizados en el área de estudio estuvieron enfocados en la morfotectónica, [1], geoquímica [2], dataciones radiométricas [3], exploración minera [4] y en la caracterización de los depósitos de corrientes de densidad piroclástica del vulcanismo del Pleistoceno [5,6] en la geología local [7] del sector volcán Poás [8].

Los cortes de caminos realizados durante la construcción de la ruta N° 35, en la sección comprendida entre

*Autor para contacto: sofia.huapayar@gmail.com

las comunidades de “La Abundancia” y “Anateri”, fueron cruciales para el establecimiento y caracterización de nuevas unidades litológicas aflorantes en el área de estudio e igualmente determinantes para la identificación de marcadores morfoestructurales y tectónicos, generando nuevas evidencias acerca de la evolución del extremo Oeste de la Cordillera Volcánica Central.

Metodología

Integración y análisis de sensores remotos y fotografías aéreas

Para la construcción del modelo de elevación digital y el mapa geomorfológico se realizó la Integración y análisis de la información de sensores remotos y fotografías aéreas. Se utilizó imágenes de radar del sensor Alos Palsar (resolución 12,5 metros), fotografías aéreas Carta y Terra, imagen espectral de Landsat 7ETM y los modelos de elevación SRTM y Aster (DEM).

Levantamiento geológico y muestreo

Se levantaron 598 nuevos puntos de documentación, de donde también se obtuvieron muestras de rocas para los diferentes tipos de análisis realizados. Para la caracterización petrográfica se utilizaron 78 muestras, de las cuales se prepararon secciones delgadas para dicho estudio.

Geoquímica

Se realizaron 16 análisis químicos, todos estos se hicieron en los laboratorios de Acme Analytical Laboratories S.A. (Vancouver, Canadá). Los óxidos principales se analizaron por el método clásico “whole rock” “wet analysis”, los oligoelementos se determinaron por ICP-OES, RFA y FAAS, las REE (tierras raras) mediante el método ICP-MS. Los datos fueron procesados con el programa GCDkit [9].

Difractometría

Se analizaron 13 muestras con el difractógrafo Bruker D & Avance, con radiación de $\text{CuK}\alpha - \text{K}\alpha_2$, ángulo de carga 2θ 3,5–70°, paso de 0,019°, el tiempo de carga 768 s y se utilizó un detector lineal Lynx-eye. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de la facultad de Química de la Universidad de Costa Rica.

Dataciones K-Ar

Fueron analizadas 11 muestras, 9 de ellas se realizaron en el Instituto de Investigaciones Nucleares en Debrecen (ATOMKI), Hungría. Para la obtención de las fracciones deseadas se utilizó el método whole rock realizado en los laboratorios del Servicio Geológico Checo (Praga, República Checa). De 1 de las muestras fueron separadas partículas de anfíbol y biotita. El potasio fue determinado por fotometría de llama con un búfer de Na y Li patrón interno. El argón se extrajo por el método high frequency induction heating. En [10 y 11] describen en detalle los métodos aquí aplicados.

Las otras 2 muestras fueron analizadas en el laboratorio de la Unidad de Geología Isotópica del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. Se utilizó el método whole rock para la obtención de las fracciones y además se realiza prueba de contenido de carbonatos, separación por susceptibilidad magnética, separación por decantación de líquidos densos, separación manual, separación por disgregación con mortero, tamiz, análisis espectrométrico y de rayos X.

Microscopio de barrido

Para el estudio de flujos piroclásticos se analizaron 6 muestras mediante el microscopio electrónico de barrido SEM. Este se realizó en la escuela de química de la Universidad de Costa Rica.

Procesamiento de datos en SIG y edición

A partir de la creación de la base de datos usando el programa ArcMap se creó las capas que conforman el mapa geológico entre ellas se destacan la capa de topografía, hidrografía, geografía, fallas y lineamientos, litológica, georecursos, puntos de documentación entre otras. La edición final incluyó la creación del perfil geológico

esquemático, la columna estratigráfica, leyenda, simbología y todos los elementos que incluyen los lineamientos y estándares cartográficos del Mapa Geológico de Costa Rica a escala 1:50 000 [12].

Resultados y Análisis

Geología y estratigrafía de la Hoja Quesada

Las evidencias más antiguas en la Hoja Quesada datan de un vulcanismo perteneciente al Mioceno Medio. Se identificó afloramientos puntuales muy importantes en la zona y se reconocieron lavas resultantes de relictos del Grupo Aguacate denominado Unidad Río Seco (Fig. 3A) y las ignimbritas de la Unidad Anateri (Fig. 3B). La presencia de productos volcánicos del Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior son lavas y tobas subordinadas de la Formación Monteverde aflorantes en el sector Suroeste de la Hoja (figura 3C).

Los productos eruptivos del Pleistoceno Medio están relacionados en su gran mayoría con las fases constructivas y destructivas del vulcanismo del extremo noroccidental de la Cordillera Volcánica Central.

Con base a las fases temporales Proto-Cordillera (1.61 - 0,85 Ma), Paleo-Cordillera (cerca de 0,74 - 0.2 Ma) y Neo-Cordillera (0.25 - 0,0 Ma) [3], se designaron tres períodos para aquellas unidades que tienen su origen en el complejo volcánico Platanar-Porvenir: a) Proto-Platanar, b) Paleo-Platanar, y c) Neo-Platanar. Estos depósitos se ven limitados al Este de la Hoja Quesada con las estribaciones del macizo del volcán Poás y que han sido consideradas previamente como fases temporales del Paleo-Poás y Neo-Poás [8], figuras.1 y 2.

Fases temporales de la Cordillera Volcánica Central, evolución del vulcanismo Poás y Platanar				
Edad (Ma)	Epoca	Alvarado & Gans (2012)	Ruiz et al. (2010)	En el presente trabajo
0,01	Holoceno	Neo-Cordillera (0,25-0,0 Ma)	Neo-Poás (desde 0,05 Ma)	Neo-Platanar (0,27- 0,0Ma)
			?	
			0,12	Pleistoceno
Paleo-Platanar (0,75- 0,40 Ma)				
0,77	I	Proto-Cordillera (0,61-0,85 Ma)		
			?	
1,80				

Figura 1. Esquema de correlación de las fases temporales de la Cordillera Volcánica Central, y del vulcanismo de las estructuras del Poás y Platanar.

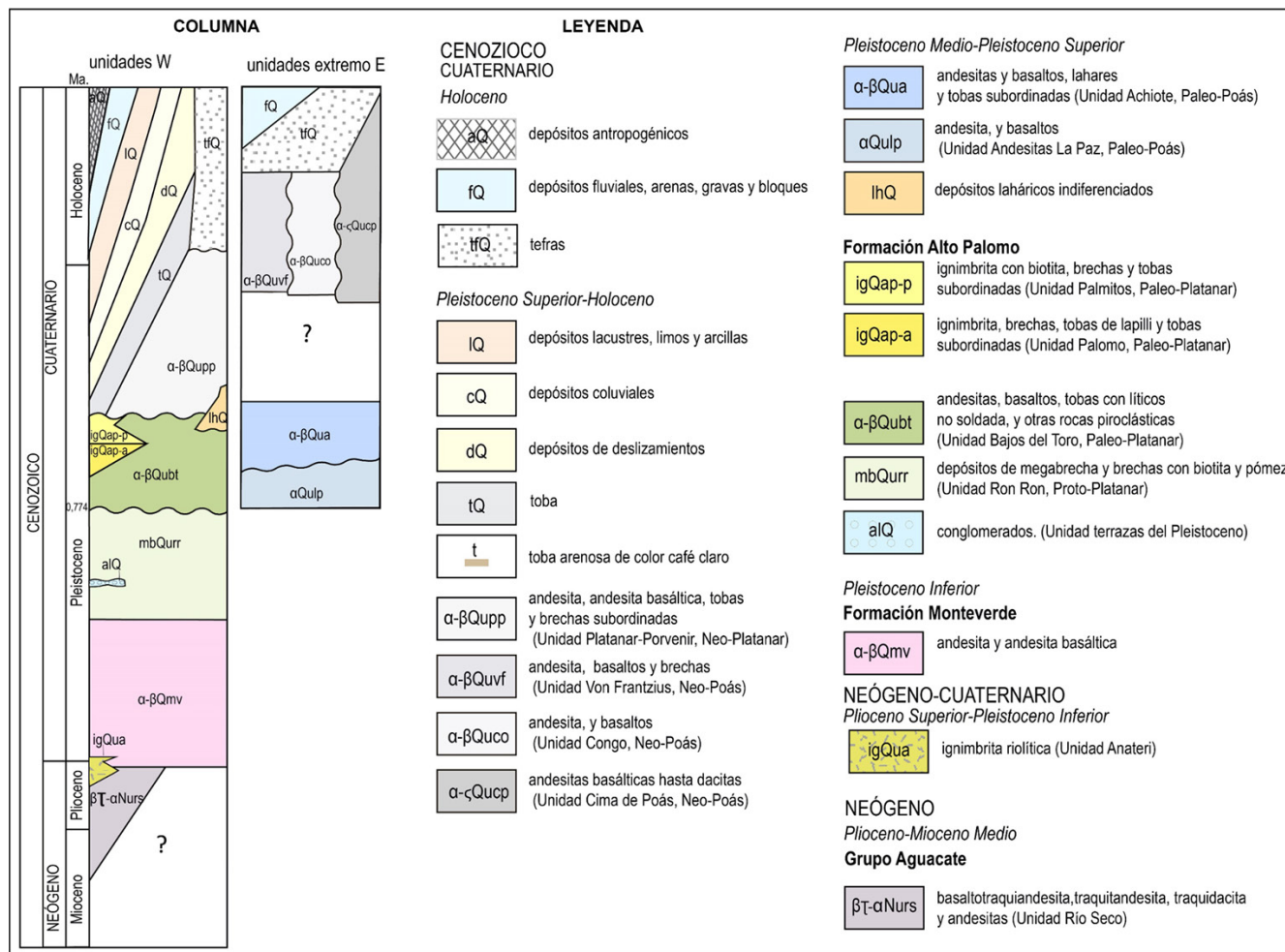
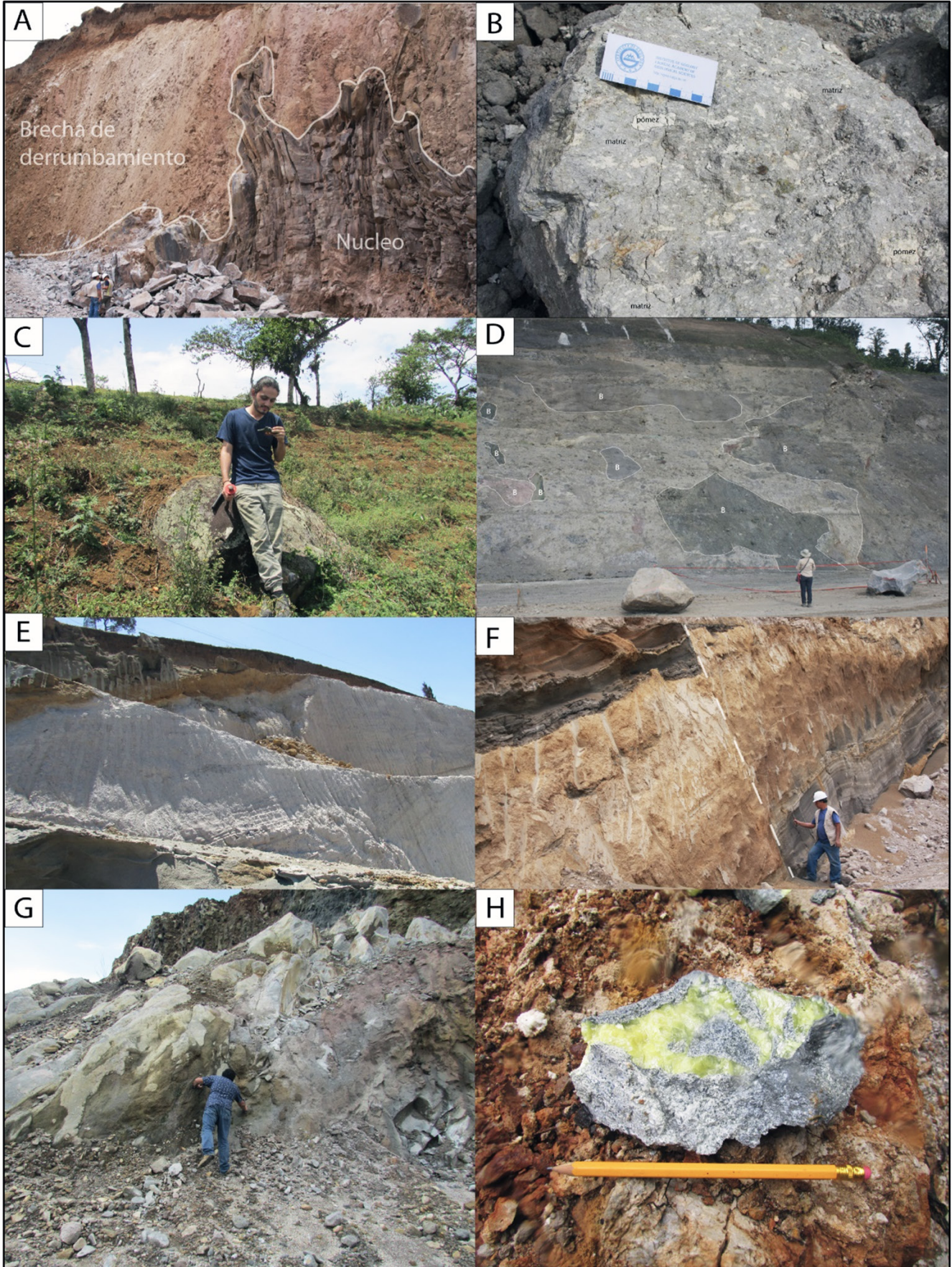


Figura 2. Columna estratigráfica y leyenda Hoja Quesada.

El primer periodo Proto-Platanar (0,92 - 0,76 Ma) corresponde con las unidades que incluyen las rocas del Pleistoceno Medio, derivadas de procesos explosivos tal como la Unidad Ron Ron (figura 3D) y la cual se encuentran de manera caótica e interdigitada con paleoterrazas contemporáneas. El Paleo-Platanar (0,75 - 0,40 Ma), Pleistoceno Medio-Superior, corresponde con la construcción y evolución de los antiguos edificios volcánicos, dentro de los cuales se preservan los remanentes del volcán Viejo en la parte central de la Hoja, así como los remanentes caldericos de la Picada y de la fila Chocosuela constituidos con productos volcánicos de la Unidad Bajos del Toro y que culminan nuevamente en una etapa explosiva, de corrientes de densidad piroclástica de la Formación Alto Palomo (figura 3E). Además, de los productos erosivos de remoción como los lahares. Finalmente, el periodo Neo-Platanar (a partir de 0.27 Ma), Pleistoceno Superior-Holoceno, se ve reflejado en el crecimiento de los estratovolcanes que dieron origen a la Formación Platanar-Porvenir (figuras 3G y 3H), coetáneos con la fase temporal del Neo-Poás.

Relacionado a la evolución del complejo volcán Poás, Pleistoceno Medio - Holoceno, se limita a los periodos de origen Paleo y Neo-Poás [8].

Figura 3. A) Lavas traquiandesíticas, Unidad Río Seco. B) Ignimbrita riolítica, Unidad Anateri. C) Lavas basaltoandesíticas, Formación Monteverde. D) Megabrechas polimícticas, Unidad Ron Ron. E) Flujo de pómez, Miembro Palmitos, Formación Alto Palomo. F) Tobas y tefras reciente desplazadas por la falla Zarcero. G) Coladas de lava, Unidad Platanar-Porvenir H) Azufre nativo, Unidad Platanar-Porvenir (página opuesta).



El Paleo-Poás (0,78 - 0,2 Ma) está conformado por las unidades Andesitas La Paz y Achioté, ambas provenientes de focos eruptivos cercanos a la cúspide del volcán Poás [8]. El Neo-Poás (desde 56 ka) está conformada por las unidades Von Frantzius, Cerro Congo y Cima Poás. Los productos piroclásticos de la actividad reciente se extienden en gran parte de la Hoja.

Contexto tectónico

El área evidencia un control estructural que está condicionado a la actividad tectónica del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR). En el caso de la Hoja Quesada se caracteriza por tener lineamientos prominentes de diversos rumbos, principalmente NW-SE, NNW-SSE, NE-SW, y en menor medida N-S y E-W. El colapso de la estructura volcánica Chocosuela-Palmira originó las morfologías remanentes de estructuras caldéricas actualmente erosionadas y a su vez generó una posible reactivación de las fallas antiguas de tipo normales dextrales con rumbo NW como la falla Zarcero, (Fig. 3F) [13,14] y la falla en tijera el Viejo-Aguas Zarcas, esta última asociada con los terremotos de Bajos del Toro en los años 1911 y 1912 [1]. Estas fallas y otros lineamientos son estructuras que cortan los productos volcánicos del Cuaternario.

Contexto tectónico

El área evidencia un control estructural que está condicionado a la actividad tectónica del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR). En el caso de la Hoja Quesada se caracteriza por tener lineamientos prominentes de diversos rumbos, principalmente NW-SE, NNW-SSE, NE-SW, y en menor medida N-S y E-W. El colapso de la estructura volcánica Chocosuela-Palmira originó las morfologías remanentes de estructuras caldéricas actualmente erosionadas y a su vez generó una posible reactivación de las fallas antiguas de tipo normales dextrales con rumbo NW como la falla Zarcero, (Fig. 3F) [13,14] y la falla en tijera el Viejo-Aguas Zarcas, esta última asociada con los terremotos de Bajos del Toro en los años 1911 y 1912 [1]. Estas fallas y otros lineamientos son estructuras que cortan los productos volcánicos del Cuaternario.

Conclusiones

1. Se replanteó y actualizó la estratigrafía ígnea establecida previamente [2 y 11] y su correlación con las fases constructivas y destructivas del vulcanismo del extremo noroccidental de la Cordillera Volcánica Central, clasificándolo en las fases temporales Proto-Platanar (0,92 - 0,76 Ma), Paleo-Platanar (0,75 - 0,40 Ma) y Neo-Platanar (a partir de 0,27 Ma). Así mismo se comprobó la evolución estructural y tectónica asociada al extremo Noroeste del CDCCR.

2. Este trabajo permitió dotar al país de un nuevo mapa geológico a escala 1:50 000 para ser utilizado en el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, en el ordenamiento territorial y en la prevención de desastres y gestión de riesgo de la región Norte de Costa Rica.

Referencias bibliográficas

1. Alvarado, G.E., Morales, L., Montero, W., Climent, A. & Rojas, W., 1988: Aspectos sismológicos y morfotectónicos en el extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 9:75-98.
2. Alvarado, G.E., & Carr, M., 1993: The Platanar-Aguas Zarcas volcanic centers, Costa Rica: spatial-temporal association of Quaternary calc-alkaline and alkaline volcanism. *Bulletin of Volcanology*. 55:443-453.
3. Alvarado, G.E. & Gans, P.B., 2012: Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogénica de Costa Rica, América Central. *Revista Geológica de América Central*, 46: 7-122.

4. EUROSPEC, S.A., 1987: Informe de factibilidad técnico minero, proyecto del azufre de Chocosuela. San Carlos, Costa Rica. [Informe inédito]. 68 págs.
5. Villegas, A. 2004: La Formación Alto Palomo: flujos pumíticos de la Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 30:73-81.
6. Madrigal, R., 1967: Estudio geológico y evaluación de algunos yacimientos de piedra pómez en Costa Rica. *Informes técnicos y notas geológicas*. 9 págs.
7. Herrera, A., Mata, A., Monroe, R. & Sibaja, G., 1996: Geología del área Platanar Porvenir: Práctica geológica de la Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica [informe inédito]. 59 págs.
8. Ruíz, P., Gazel, E., Alvarado, G.E., Carr, M., y Soto, G., 2010: Caracterización geoquímica y petrográfica de las unidades geológicas del macizo del volcán Poás, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 43:37-66.
9. Janoušek, V., Moyen, J.F., Martin, H., Erban, V., Farrow, C., 2016: Geochemical modelling of igneous process-principles and recipes in R language. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 341 págs.
10. Dalrymple, B.G., Lanphere, M.A., 1969: Potassium-Argon Dating Principles, Techniques and Application to Geochronology. – W.H. Freenan and Co., San Francisco: 1-288.
11. Balogh, K., 1985: K/Ar dating of neogene volcanic activity in Hungary: Experimental technique, experiences and methods of chronologic studies. *ATOMKI Rep. D/1*: 277-288. Debrecen.
12. Huapaya, S., 2017: *Lineamientos y estándares del mapa Geológico de Costa Rica a escala 150000/DGM, MINAE*. -San José, Costa Rica: DGM, MINAE, 124 págs.
13. Rojas, M., 2011: Neotectónica del extremo occidental de la cordillera volcánica central, enfocado en la falla Zarcerro, sector Oeste del complejo volcánico Platanar-Porvenir. 107 p gs. Universidad de Costa Rica [Tesis de Lic].
14. Montero, W., 2001: Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera Oeste de la microplaca Panamá. *Revista Geológica de América Central*, 24:29-56



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Actualización y propuesta estratigráfica de las erupciones volcánicas del Plioceno al Holoceno en El Salvador

Walter Hernández^{a,b*}, Brian Jicha^c, Luis Mixco^d, Carlos Pullinger^c

^aJubilado del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Km. 5 1/2 carretera a Santa Tecla, colonia y calle Las Mercedes, San Salvador, El Salvador.

^bUniversidad de El Salvador. Ciudad Universitaria, San Salvador.

^cUniversity of Wisconsin-Madison, Department of Geoscience, 1215 West Dayton St., Madison, WI 53706.

^dMinisterio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Km. 5 1/2 carretera a Santa Tecla, colonia y calle Las Mercedes, San Salvador, El Salvador.

Abstract: This work presents a two-dimensional graph of selected eruptions with radiometric dating and geochemistry analysis from some volcanoes in El Salvador. Eruptions that are only generally known and identified in outcrops are also considered. Monogenetic volcanoes whose stratigraphic position is known from the field relationships are also included. A color code represents the chemistry of the eruptions, which will help identify those eruptions that can serve as guides and time markers, improving the stratigraphic limits of local members and formations. Due to their wide distribution nationwide, the distal Los Chocoyos 75 ka tephra from Atitlán caldera, Guatemala, are considered a time marker for the Las Tobas Color Café Member. The 2.86 Ma Zaragoza Ignimbrites with fiammes from Cuscatlán Formation, represent the period of ignimbrites from large calderas, but not all of them are dated. These are proposed to define the base of the Cuscatlán Formation for the time being. Those volcanic deposits older than these ignimbrites will be grouped with the Bálsamo Formation. The large eruption of Tierra Blanca Joven (TBJ) 540 CE is a local time marker for all recent deposits. We propose TBJ tephra as the base of these recent deposits younger than itself. Los Chocoyos as the base of all deposits older than TBJ. Furthermore, the ignimbrites of big calderas as the c1 Member of Cuscatlán Formation, and the older lavas of large calderas as the b3 Member, or top of Bálsamo Formation.

Palabras clave: Erupciones ultra-plinianas, Los Chocoyos, Ignimbrites de Zaragoza, marcadores de tiempo.

Key words: Ultra-plinian eruptions, Los Chocoyos, Zaragoza Ignimbrite. Time marker.

Introducción

La estratigrafía en el arco volcánico de El Salvador se torna compleja por la presencia de grupos de volcanes y superposición de muchos depósitos volcánicos. La erosión y la actividad tectónica se suman a esta problemática. Los depósitos de las erupciones plinianas y ultra-plinianas juegan un papel importante por su amplia distribución dentro y fuera del territorio, así como aquellos depósitos distales de volcanes de países vecinos que se depositaron en este territorio. Los estudios de algunas erupciones para conocer la distribución espacial de los materiales han contribuido para comprender algo de la estratigrafía del periodo tratado [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

*Autor para contacto: whernandez@geologist.com

El mapa geológico a escala 1:100.000 de El Salvador [1] no cuenta con texto explicativo, solamente una leyenda, lo que se torna difícil su entendimiento. Nuestro propósito es presentar una propuesta para hacer los cambios necesarios en la estratigrafía, basados en una serie de datos de fechamientos y química de rocas que se han venido produciendo principalmente en la última década. La figura 1 muestra la leyenda de los Miembros y de las Formaciones en el período que estamos tratando en este trabajo. Las descripciones de los Miembros parecen bastante genéricas. De este contexto ha partido la presente propuesta, que pretende situar a los interesados para asociar en campo, aquellas erupciones mencionadas en las figuras de la 2 a 5 para que sirvan como un apoyo crono-estratigráfico.








Formación SAN SALVADOR	s5'c	Cenizas volcánicas y tobas de lapilli,  sobre s3'a  sobre s4
	s5'b	Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder),
	s5'a	Efusivas básicas - intermedias,
	s4	"Tierra blanca": piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas (s3'b),
	s3'b	Efusivas ácidas,
	s3'a	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café"),  sobre lavas
	s2	Efusivas básicas -intermedias, piroclastitas subordinadas,
	s1	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas básicas -intermedias,  sobre lavas
Formación CUSCATLAN	c3	Efusivas-básicas-intermedias,
	c2	Efusivas ácidas y intermedias ácidas (ocurrencias aisladas en parte eventualmente =ch2),
	c1	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas,  Depósitos fluvio-lacustre en la cuenca del río Lempa: principalmente depósitos fluviales  sobre m o ch (en parte eventualmente más antiguas)
Formación BALSAMO	b3	Efusivas básicas-intermedias,
	b2	Efusivas básicas-intermedias, piroclastitas, epiclastitas volcánicas subordinadas (estratos no diferenciados y edificios volcánicos),
	b1	Epiclastitas volcánicas y piroclastitas; localmente efusivas básicas -intermedias intercaladas.,  facies claro (con lapilli de pomez)

Figura 1. Leyenda de los Miembros de las Formaciones San Salvador, Cuscatlán y Bálsamo, tomado del Mapa Geológico de la República El Salvador, escala 1:100,000.

La mayoría de las erupciones del arco volcánico son pequeñas y moderadas (estrombolianas y vulcanianas) y tienen distribución bastante local, sin embargo, una minoría son plinianas y hasta ultra-plinianas como Tierra Blanca Joven (TBJ) de la caldera de Ilopango, con amplios afloramientos a nivel nacional y que tuvo impacto catastrófico en la población Maya en el año 540 E.C. ¹⁴C [6, 9] (figura 2).

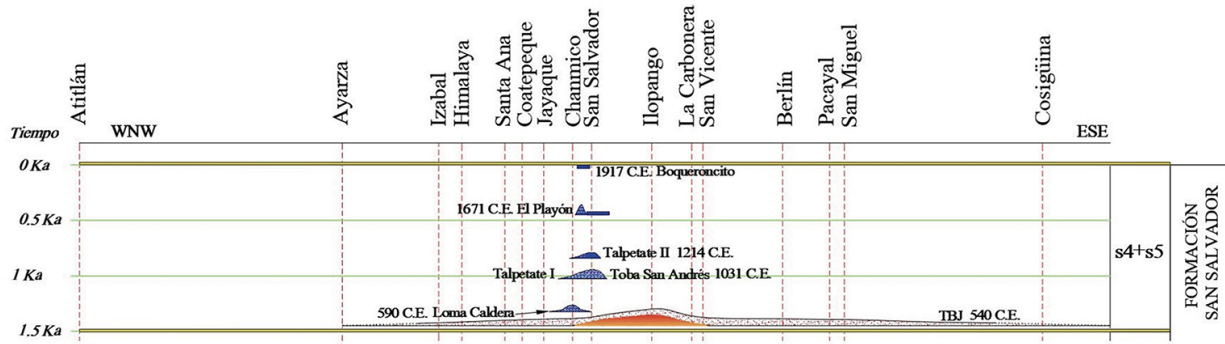


Figure 2. Imagen mostrando la dispersión lateral de las tefras de Tierra Blanca Joven (TBJ) que cubrieron todo el territorio salvadoreño y se extendieron hacia Guatemala y Nicaragua. Las tefras de esta erupción constituyen el Miembro TBJ. El espesor máximo medido de las tefras proximales es mayor a los 80 m en el municipio de Ilopango.

La erupción Los Chocoyos de la caldera de Atitlán, Guatemala, edad determinada en zircón [10] en $74.8 \pm 1.8 \text{ ka } ^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$, representa la erupción más grande en los últimos 100 mil años que tuvo amplia cobertura del istmo de América Central y parte del Caribe [10, 11, 12, 13]. Estas cenizas quedaron registradas en amplio territorio de Guatemala y en el arco volcánico salvadoreño y probablemente se localicen en territorio nicaragüense. Las erupciones de este tipo cuando tienen gran cobertura espacial y cuentan con fechamientos, sirven como marcadores de tiempo y de capas guías (figura 3).

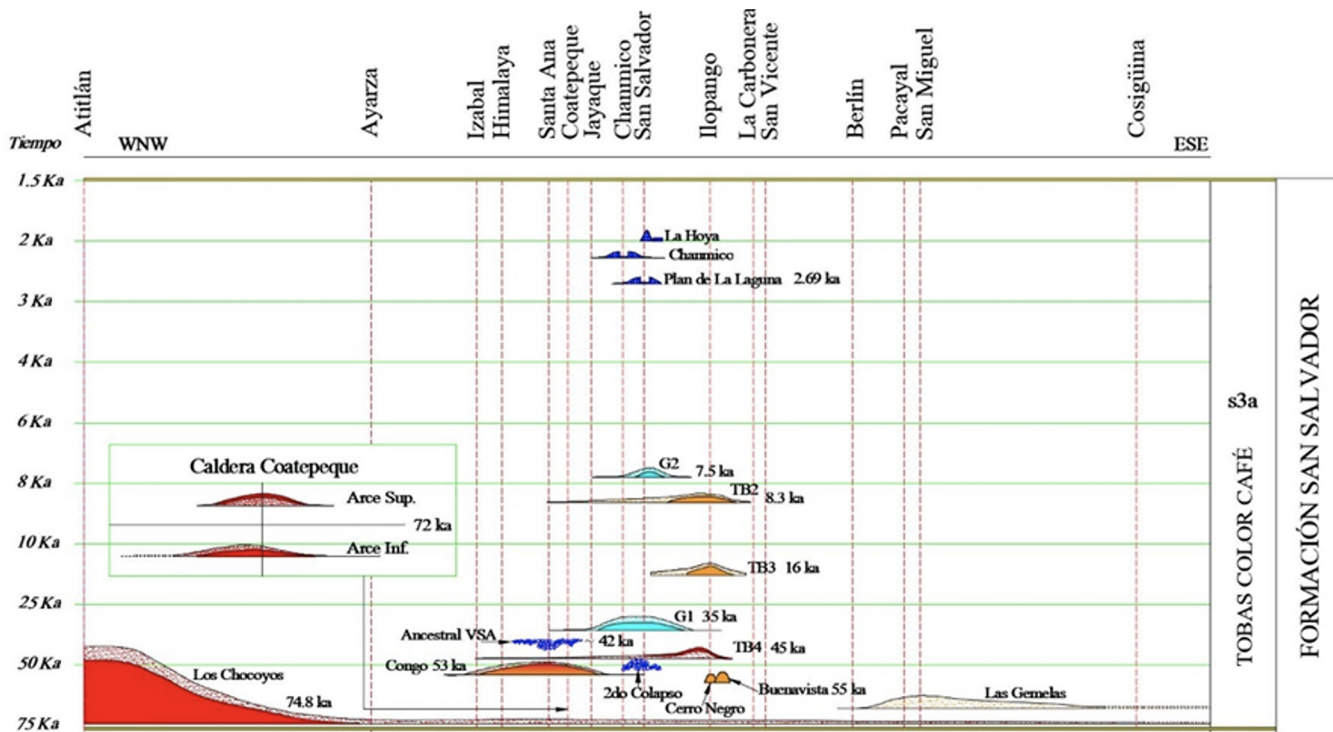


Figura 3. La gráfica muestra las tefras que forman el Miembro s3a “Tobas Color Café” de la Formación San Salvador: El techo está formado por los eventos más antiguos que TBJ, mientras que, se propone la base para s3a las cenizas distales, Los Chocoyos. Las tefras Arce Inferior de la caldera de Coatepeque yacen directamente sobre Los Chocoyos.

En la parte occidental de El Salvador, las ignimbritas de la erupción Empalizada de la caldera de Ataco y las tefras Cebras del volcán Himalaya [3], se extendieron hasta la parte occidental de Guatemala [11, 13]. Las erupciones Arce Inferior y Superior [14] de la caldera de Coatepeque tienen cobertura significativa en el occidente y centro del territorio salvadoreño. Igualmente, la pómez de caída de la erupción TB4 (45 ± 4.6 ka) de la caldera de Ilopango [10, 15]. En la parte oriental del país las tefras Blanca Rosa de la caldera de Berlín, tienen amplia dispersión hacia el oriente y probablemente se extiendan a Nicaragua. Estratigráficamente se encuentran subyacentes a cenizas distales Los Chocoyos. Las Ignimbritas Gris y Negra de la misma caldera son más antiguas que Blanca Rosa (figura 4).

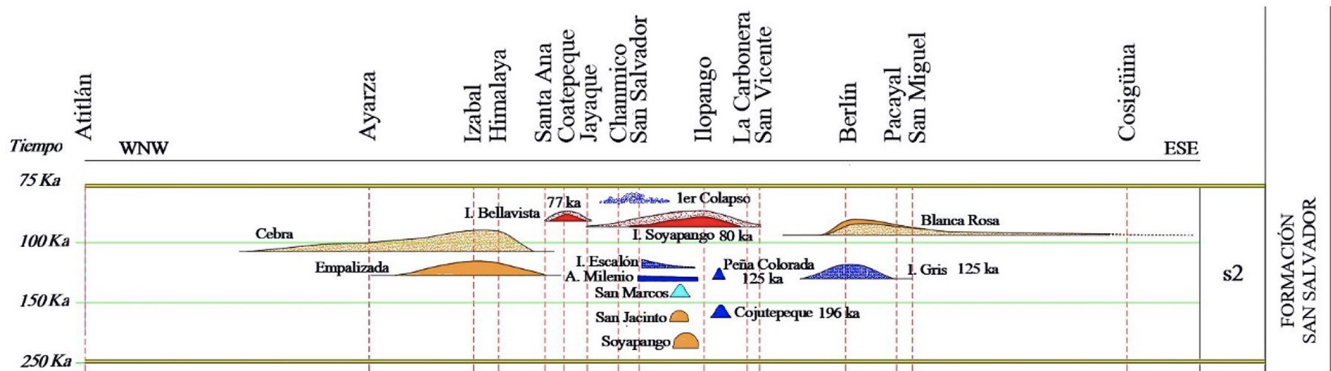


Figura 4. Distribución de las tefras del Miembro s2 de la Formación San Salvador y presencia de volcanes monogenéticos. Las tefras Cebra y Blanca Rosa tienen presencia importante en occidente y oriente. La Ignimbrita Escalón probablemente fue el último evento explosivo de naturaleza máfico antes del colapso del volcán San Salvador.

Por otro lado, los volcanes monogenéticos son abundantes en el arco volcánico, sin embargo, solo un buen número de la parte central del arco volcánico han sido los analizados en laboratorio: dataciones radiométricas y geoquímicas. Ese tipo de estudios es necesario que se extienda hacia todo el arco volcánico.

Datos sobre dataciones de lavas de los restos de antiguas calderas que constituyen la Cordillera Costera [16] son muy escasas. Esas lavas pueden representar las etapas iniciales de la edificación de grandes volcanes que en la actualidad solamente quedan los relictos de la porción sur que formaron calderas gigantes. Esas lavas representan el techo de la Formación El Bálsamo del Plioceno Superior. El desarrollo posterior de esos grandes volcanes estuvo asociado con grandes erupciones ignimbríticas, como es el caso de las erupciones de las ignimbritas de Zaragoza y de Olocuilta (2.862 ± 0.040 Ma y 1.707 ± 0.022 Ma respectivamente [17]). Estas grandes erupciones conforman la base de la Formación Cuscatlán (Figura 4). Las lavas de la caldera de Jayaque (3.319 ± 0.012 Ma Ar/Ar) [17] y las lavas de las canteras La Roca en Panchimalco y San Diego, en La Libertad, constituirían el techo de la Formación El Bálsamo (figura 5).

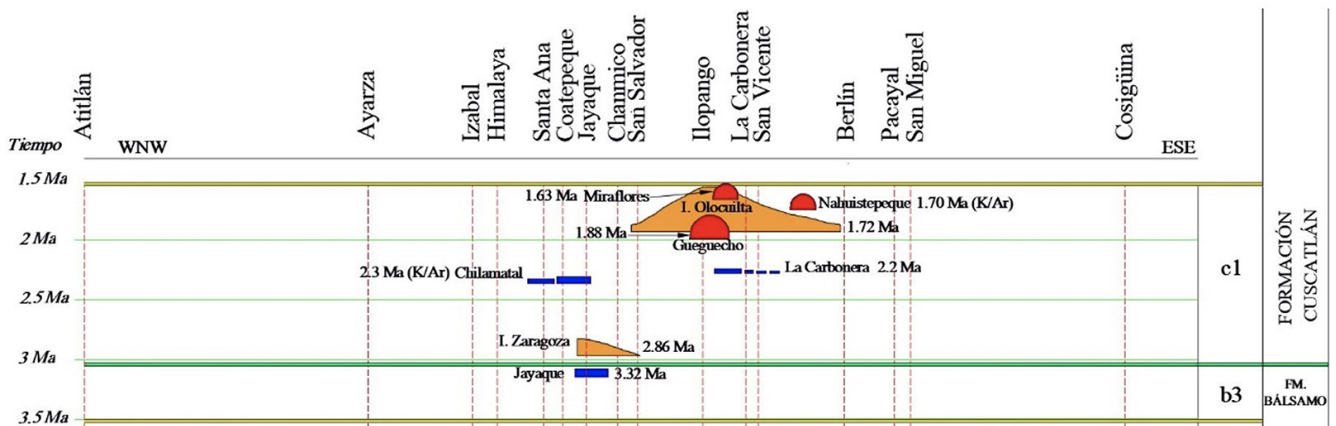


Figura 5. Límite entre las Formaciones Cuscatlán y Bálsamo. La Formación Cuscatlán está formada por grandes erupciones ignimbríticas de las calderas de Ilopango, Jayaque, y otras más aún no estudiadas. Las lavas basálticas y andesíticas de esos grandes volcanes constituirían el Miembro b3 o techo de la Formación Bálsamo.

Metodología

Estratovolcanes: Se trazó una línea WNW-ESE que sigue paralela al arco volcánico. En esa línea se han referenciado algunos centros volcánicos. Aquellas estructuras o depósitos volcánicos que están ubicados al norte o al sur de esa línea, son proyectados ortogonalmente hacia ella. Los nombres y edades se indican en el gráfico. La escala del tiempo no está a escala.

Volcanes Monogenéticos: La ubicación de un monogenético es proyectada ortogonalmente hacia la línea WNW-ESE. El tamaño o volumen del monogenético no está a escala.

Tefras y lavas: Para todos los depósitos de tefra se utiliza la evidencia de campo, la distribución espacial de los depósitos de tefras, las dataciones y geoquímica. En la vertical están distribuidas las edades las que se tornan más antiguas hacia abajo. En la horizontal se ubican los depósitos en dos dimensiones a lo largo de esa línea, que son obtenidos de los mapas de isopacas. Cuando se conocen solo afloramientos y no hay isopacas, son inferidos y aparecen en líneas discontinuas sus límites más externos. Las corrientes piroclásticas densas, son identificadas por tener color más oscuro que el tono más claro del depósito de caída. Cuando las cenizas distales pasan las fronteras se indican con trazo discontinuo. Para las lavas estas se proyectan hacia el rumbo de la sección.

Composición química: La química de los depósitos de tefras y de los volcanes monogenéticos están representados por tres colores: rojo (riolítico-riodacítico), anaranjado (dacítico) y azul (andesítico-basáltico), celeste (andesita félsica).

Resultados y Análisis

Esas figuras permiten visualizar geográficamente la distribución de los productos volcánicos y su ubicación cronológica. Las tefras Los Chocoyos en el sector de Atitlán alcanzan espesores de hasta 200 m y tienen presencia importante en la región [10]. Los Chocoyos se encuentran como cenizas finas a lo largo de todo el arco volcánico de El Salvador; en Tacuba y Ahuachapán tienen 35-40 cm de espesor, mientras que, en Jucuapa en el oriente del país son de 8-10 cm. Los Chocoyos yacen subyacentes a las tefras Arce Inferior de la caldera de Coatepeque. Hacia Nicaragua probablemente se localicen formando una capa muy delgada en el sector entre los volcanes Cosigüina y Concepción.

De las erupciones de la caldera de Ilopango solamente TBJ tiene trabajo de detalle [19], cuyo espesor máximo es mayor que 80 m [20] y parcialmente TB4, el resto de las erupciones tienen definido sus perfiles y la mayoría están fechadas, se conoce su composición mineralógica y parcialmente la química; sin embargo, cada erupción requerirá de un estudio de detalle. La Ignimbrita Olocuilta con 125 m de espesor fue la que originó la caldera de Ilopango y tiene amplia distribución en la parte central del arco volcánico [7]. En la planicie costera estas ignimbritas se encuentran cubiertas por sedimentos aluviales y representan la erupción de mayor volumen de la caldera de Ilopango y probablemente de los volcanes de El Salvador. La caldera de Coatepeque tiene las erupciones Arce Inferior y Superior con bastante detalle [14] y Congo también [4, 21].

Conclusiones

La erupción TBJ que causó gran impacto en la población Maya de El Salvador, por tener amplia cobertura nacional, constituye el Miembro s4, el cual es la capa guía para arqueólogos, antropólogos y geólogos. Por tanto, se propone que aquellas erupciones posteriores a este evento (s5) pasen a formar parte del Miembro s4. La erupción Los Chocoyos, por encontrarse en toda la franja volcánica, se propone en este trabajo para establecer el límite inferior del Miembro s3a conocido como Tobas Color Café de la Formación San Salvador.

Agradecimientos

Agradecemos grandemente el apoyo financiero del proyecto IPGARAMSS de Geólogos del Mundo por la valiosa ayuda que representó para la realización de los trabajos de campo y de laboratorio de suelos. Igualmente, al soporte económico de la Universidad Tecnológica de El Salvador. A Celina Kattan, Luis Menjivar y Manuel Díaz del Observatorio Ambiental/MARN, por facilitar el apoyo logístico en esos años de trabajo de campo.

Referencias bibliográficas

1. Bosse, R.H.; Lorenz, W.; Merino, A.; Minhm, A.; Rode, K.; SchmitdThomé, M.; Webber, H.S. y Wiesemann, G. (1978). Mapa Geológico de la República de El Salvador, escala 1:100.000. Misión Geológica Alemana. Hannover, República Federal de Alemania.
2. Corti, G., Carminati, E., Mazzarini, F., García, M.O. (2005) Active strike-slip faulting in El Salvador, Central America. *Geology*; 33 (12): 989–992; doi: 10.1130/G21992.1
3. González-Partida, E., Torres Rodriguez, Birkle P. (1987). Plio-Pleistocene volcanic history of the Ahuachapan geothermal system, El Salvador: The Concepcion de Ataco Caldera. *Geothermic*,26 (5/6): 555-575.
4. Kutterolf, S., Freundt, A., Pérez, W., Mörz, T., Schacht, U., Wehrmann, H., y Schmincke, H.-U. (2008). Pacific offshore record of plinian arc volcanism in Central America: 1. Along-arc correlations. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(2). doi: 10.1029/2007GC001631
5. Ferrés, D. (2014) Estratigrafía, geología y evaluación de peligros volcánicos del complejo volcánico de San Salvador (El Salvador), Tesis, Universidad Nacional Autónoma de Mexico, 1-296.
6. Dull, R., Wiemann, M., Anchukaitis, K., Amaroli, P., Kutterolf, S., Southon, J., Oppenheimer, C., Hernandez, W., Wahl, D., Sheets, P., Freundt, A. (2019). Radiocarbon and geologic evidence reveal Ilopango volcano as source of the colossal ‘mystery’ eruption of 539/40 CE. *Quaternary Science Reviews* 222. 105855.
7. Suñe-Puchol, I., Aguirre-Díaz, G., Dávila-Harris, Miggins, P. D., Pedrazzi, D., Costa, A., Ortega-Obregón, C., Lacan, P., Hernández, W., Gutiérrez. E., (2019a). The Ilopango caldera complex, El Salvador: Origin and early ignimbrite-forming eruptions of a graben/pull-apart caldera structure. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 371. 1–19.
8. Suñe-Puchol, I., Aguirre-Díaz, G., Pedrazzi, D., Dávila-Harris, P., Miggins, D., Costa, A., Ortega-Obregón, C., Lacan, P., Gutierrez, E., Hernández. W., (2019b). The Ilopango caldera complex, El Salvador: Stratigraphic revision of the complete eruptive sequence and recurrence of large explosive eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 374,100–119.
9. Hernández, W.; Aguirre-Díaz, G.; Ayala, P. 2015. La erupción Tierra Blanca Joven y la diáspora de los Mayas. En Ed. José Erquicia, J., y Shione Shibata, V Congreso Centroamericano de Arqueología en El Salvador. MUNA. ISBN: 978-99961-958-0-8. 227-237.
10. Cisneros de León, A., Schindlbeck-Belo, J. C., Kutterolf, S., Danišik, M., Schmitt, A. K., Freundt, A., et al. (2021). A history of violence: Magma incubation, timing, and tephra distribution of the Los Chocoyos supereruption (Atitlán, Guatemala). *Journal of Quaternay Science*, 36(2), 169–179.
11. Rose, W. I., Conway, F. M., Pullinger, C. R., Deino, A., & McIntosh, W. C. (1999). An improved age framework for late Quaternary silicic eruptions in northern Central America. *Bulletin of Volcanology*, 61, 106–120. <https://doi.org/10.1007/s004450050266>
12. Garnier, B., Tikoff, B., Flores, O., Jicha, B., DeMets, C., Cosenza-Murales, B., et al. (2020). An integrated structural and GPS study of the Jalpatagua Fault, Southeastern Guatemala. *Geosphere*, 17, 1–25. <https://doi.org/10.1130/ges02243.1>
13. Garnier, B., Tikoff, B., Flores, O., Jicha, B., DeMets, C. Hernandez, W., Greene, D. (2021). Analysis of deformation and timing of faulting west of the Guatemala City Graben: Time-progressive strain localization North America-Caribbean plate interactions (Tectonics).
14. Kutterolf, S., Schindlbeck, J.C., Rohr, I., Rademacher, M., Cisneros, A., Eisele, S., Freundt, A., Hernandez, W., K.-L. Wang.

- K.L., (2020). The Arce Tephra: two subsequent paroxysmal Plinian eruptions from Coatepeque Caldera (El Salvador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 390. 106673. 21 p.
15. Hernández, W., Ferrés D, Delgado-Granados H., Pullinger, C, Gutiérrez, E., De Henriquez, E, (2010). The last 40 ka eruptive cycle of Ilopango caldera deposits: a settlement for the San Salvador Metropolitan Area (El Salvador). Abstract volume, International Conference Cities on Volcanoes, Fundación Canaria ITER, Tenerife, pp 56.
16. Lessmann, K.W.H. La morfología litoral (1986), capítulo III. P149-209. Geografía de El Salvador. Dirección de Publicaciones, Ministerio de Cultura y Comunicaciones.
17. Jicha, B., & Hernández, W. (2022). Effusive and explosive eruptive history of the Ilopango caldera complex, El Salvador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 12p. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107426>
18. Cisneros de León, A., Schmitt, A. K., Kutterolf, S., Schindlbeck-Belo, J.C., Hernández, W., Sims, K. W. W., Garrison, J., Kant, L., Webe, B. B., Wang, K.-L. Lee, H.-Y. Trumbull, R. B. (2021) Zircon and Melt Extraction from a Long-Lived and Vertically Extensive Magma System Underneath Ilopango Caldera (El Salvador). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2020GC009507. <https://doi.org/10.1029/2020GC009507>.
19. Dario Pedrazzi, Ivan Sunye-Puchol, Gerardo Aguirre-Díaz, Antonio Costa, Victoria C. Smith, Matthieu Poret, Pablo Dávila-Harris, Daniel P. Miggins, Walter Hernández, Eduardo Gutiérrez. 2019. The Ilopango Tierra Blanca Joven (TBJ) eruption, El Salvador: Volcano-stratigraphy and physical characterization of the major Holocene event of Central America. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 376. 81-102.
20. Hernández, W. (2019). Informe análisis geológico del sondeo con recuperación de núcleo de perforación de Ilopango, Proyecto Plan de Acción para la Implementación del Índice de Gobernabilidad y Política Pública para la Gestión de Riesgo de Desastre. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [Informe Interno no publicado].
21. Pullinger, C. (1998) Evolution of the Santa Anna Volcanic Complex, El Salvador. Unpublished MSci. thesis, Michigan Technological University, Houghton, pp 1-145.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES

Estratigrafía preliminar del flanco Este del volcán de Santa Ana

Dennis Lemus^{a,*}, Christopher J. Harpel^b, Ángela V. García^a, Demetrio Escobar^a,
Alexander Hernández^a, Estefany Alvarenga^c

^aDirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales-MARN, San Salvador, El Salvador.

^bU.S. Geological Survey Volcano Disaster Assistance Program, Cascades Volcano Observatory, Vancouver, Washington, EE.UU.

^cUniversidad de El Salvador, Facultad Multidisciplinaria de Occidente, San Salvador.

Abstract: We present the eruption sequence for the east flank of Santa Ana volcano, which we divide into the sections above and below the Tierra Blanca Joven (TBJ) formation. The sequence below the TBJ suggests a series of mafic magmatic eruptions that began before 7,800 cal BP and continued until after 5,800 cal BP. These eruptions emplaced tephra-fall and pyroclastic-density-current deposits. The sequence above the TBJ are deposits from recent eruptions during the last 1.5 ky. Most of these eruptions were phreatomagmatic with associated pyroclastic surges. The two sequences demonstrate a shift in eruptive style possibly related to an increase in water volume in the hydrothermal system.

Palabras clave: Volcán de Santa Ana, estratigrafía, Holoceno, historia eruptiva, sistema hidrotermal.

Key words: : Santa Ana volcano, stratigraphy, Holocene, eruptive history, hydrothermal system.

Introducción

El volcán de Santa Ana (VSA) es uno de los volcanes más activos de El Salvador y es parte del complejo volcánico Santa Ana compuesto también por la Caldera de Coatepeque y el volcán Izalco [1, 2]. Erupciones del VSA han afectado municipios del área, con poblaciones significativas, pertenecientes a los departamentos de Santa Ana y Sonsonate [2, 3, 4]. En el año 2005, una erupción freatomagmática de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 3 generó caída de ceniza, proyectiles balísticos, corrientes de densidad piroclásticas (CDP) diluidas (oleadas piroclásticas) que viajaron hasta 1.8 km desde el cráter y lahares que impactaron en la comunidad Los Planes de La Laguna a más de 5 km del cráter [1, 4]. Las erupciones del año 1904 y 1880 probablemente fueron de mayor magnitud a la del año 2005 [5]. La erupción del año 1904 generó espesores mínimos de 3 m de escoria en el cráter [2, 3, 5], lahares y CDPs que viajaron hasta 5 km al oeste del cráter. La erupción de 1880 impactó con emisión de ceniza, de hasta 0.1 m de espesor en lugares hasta 18 km, como algunas haciendas de Sonsonate [2, 5].

El historial eruptivo conocido del volcán indica que hay 13 posibles actividades eruptivas (figura 2) por el cráter central, erupciones freáticas y freatomagmáticas. Recientes estudios afirman una posible erupción freatomagmática durante la década de 1950 [1, 3]. Se ha identificado además el colapso parcial del VSA, la avalancha de escombros Acajutla [6], posterior al depósito Congo de la caldera de Coatepeque datado en

*Autor para contacto: dennislemusdennis@gmail.com

57.000–53.000 ^{14}C años BP [3, 7, 8]. En la dirección Noroeste-Sureste existen conos de escoria, como el cono San Marcelino y cráteres de explosión relacionados a la actividad del VSA [2, 3].

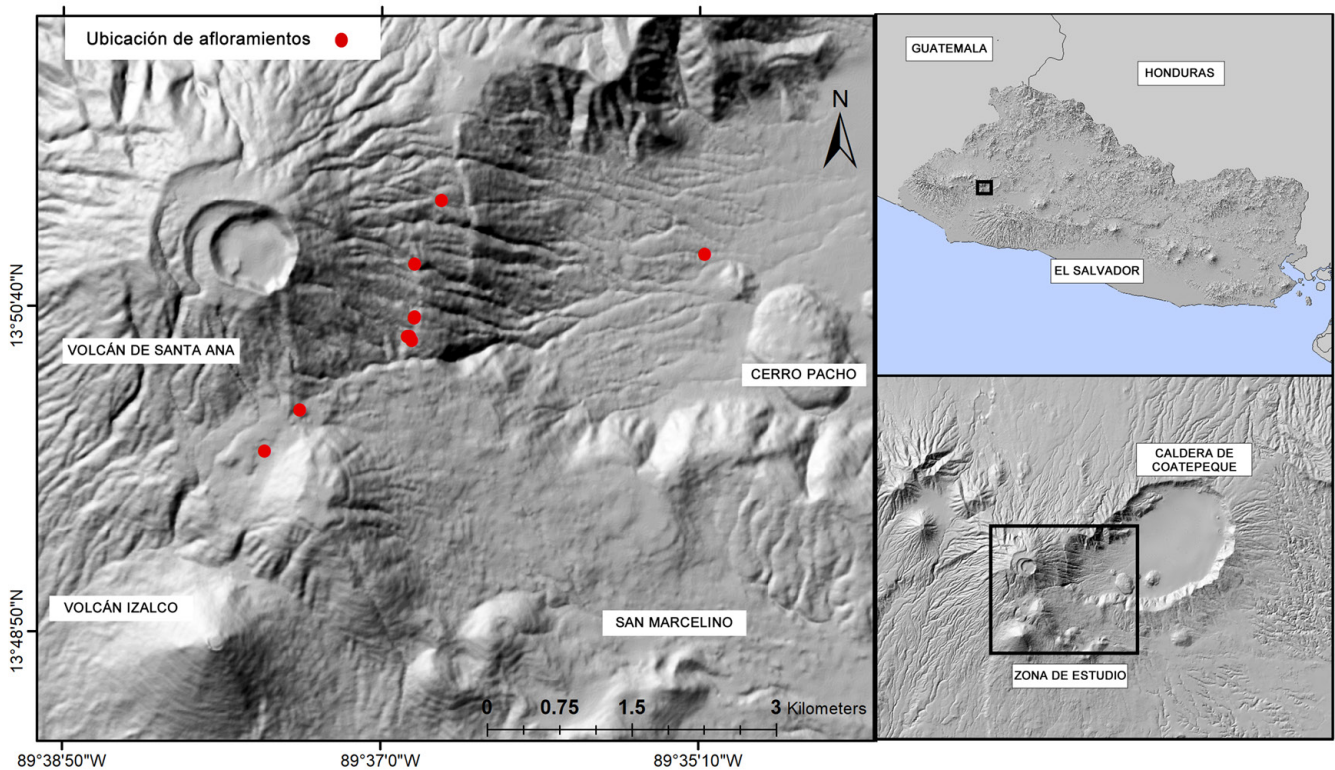


Figura 1. Mapa de ubicación del volcán de Santa Ana.

Metodología

Se tomaron muestras de carbón para dataciones de ^{14}C en paleosuelos intercalados con los depósitos volcánoclasticos. Para evitar contaminar las muestras al tacto con las manos, se extrajeron de los afloramientos con herramientas de metal y se colocaron directamente en bolsas de plástico sellables. Para evitar el crecimiento de moho en las muestras de carbón, se secaron al aire en sus bolsas abiertas en un lugar protegido después de la recolección. El análisis de ^{14}C se llevó a cabo utilizando el método de espectrometría de masas con acelerador, en el U.S. Geological Survey Radiocarbon Laboratory en Denver, Colorado, y en el National Ocean Sciences Accelerator Mass Spectrometry Radiocarbon Facility en Woods Hole, Massachusetts. Las muestras se prepararon utilizando los procedimientos estándares ácido-base-ácido y las edades convencionales de ^{14}C fueron convertidas a edades calibradas usando el programa OxCal 4.4.4 [9], con las curvas de calibración de IntCal20 y Bomb21 [10, 11]. Elementos mayores de muestras de roca completa fueron medidos por X-ray fluorescence en el Hamilton Analytical Lab, en Clinton, New York, siguiendo el método de [12].

Resultados y Análisis

Los depósitos volcánoclasticos analizados fueron divididos en dos secuencias, divididos por el marcador tefroestratigráfico de la Tierra Blanca Joven (TBJ), producida por la caldera de Ilopango en 431 EC [13], estableciendo la secuencia inferior a la TBJ, y la secuencia superior a la TBJ. Se correlacionaron ocho columnas estratigráficas, para la elaboración de la columna estratigráfica general. En la secuencia inferior, se identificó por primera vez una corriente de densidad piroclástica (CDP) concentrada del VSA, nombrado informalmente como Morfo Azul, que aflórese a 1.4 km del cráter. Se identificaron además en la secuencia

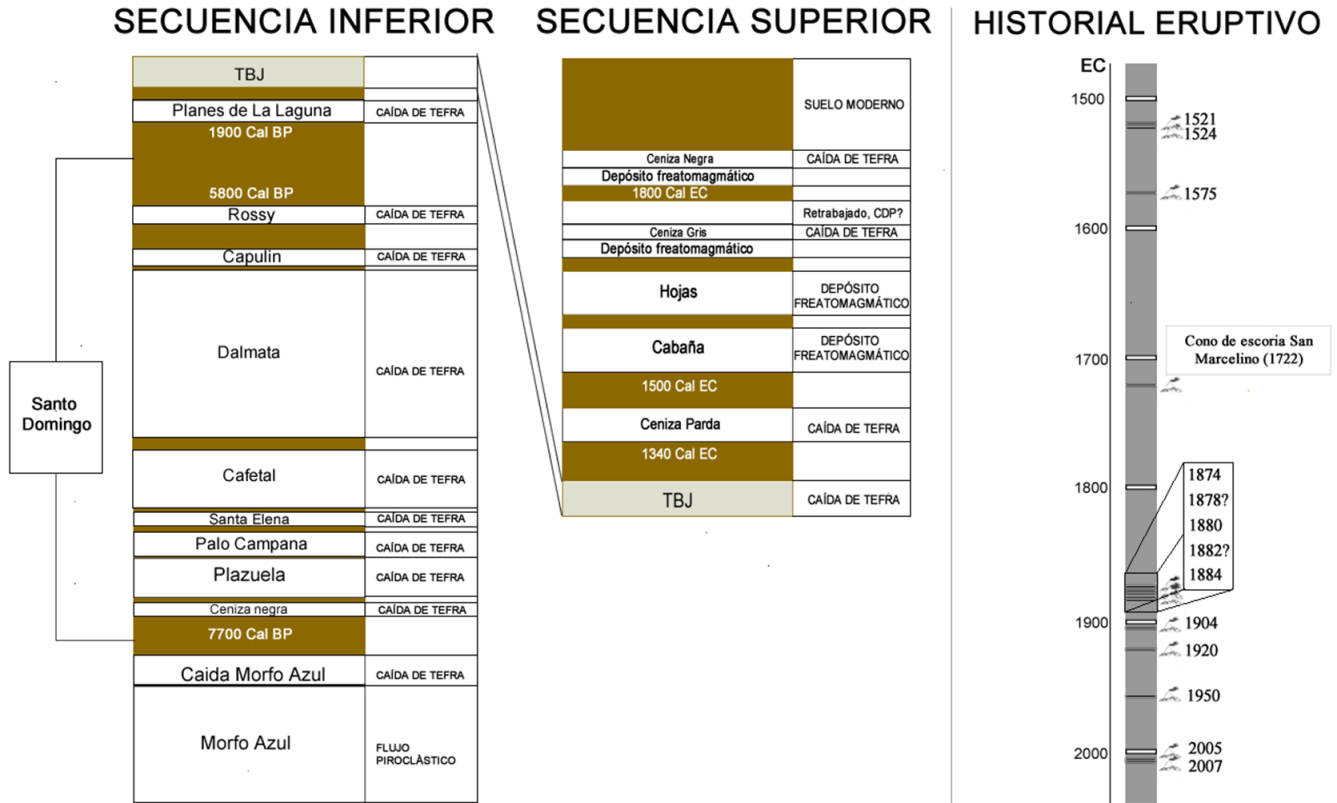


Figura 2. Columna estratigráfica general e historial conocido del VSA.

inferior 11 depósitos de caída de tefra, nueve relacionados al VSA (Morfo Azul, ceniza negra sin nombre, Plazuela, Palo Campana, Santa Elena, Cafetal, Dálmata, Capulín y Rossy), depósitos de escoria bien sorteados y que se ajustan a la topografía. El depósito Planes de La Laguna posiblemente está relacionado a los domos de obsidiana de la Caldera de Coatepeque, como el Cerro Pacho. La fuente del depósito Santo Domingo es actualmente desconocida, pero es posiblemente asociada al VSA. El depósito de caída de tefra Dálmata es el de mayor espesor, con 1.6 m aproximadamente a 1.4 km del cráter. En la secuencia superior se identificaron cinco depósitos freatomagmáticos, incluyendo al menos dos oleadas piroclásticas (Cabaña y Hojas). Los depósitos son compactos, finos, algunos laminados, con burbujas de aire, impresiones de plantas preservadas y algunos con lapillis acrecionales y capas cruzadas. Además, se identificaron tres posibles caídas de tefra (ceniza) que tienen fuentes probables el volcán de Santa Ana o Izalco.

Las dataciones de ^{14}C calibradas en la secuencia inferior indican que la erupción Morfo Azul es más antigua a 7.800 cal Ap. Las erupciones que generaron los depósitos Plazuela, Palo Campana, Santa Elena, Cafetal, Dálmata y Capulín, ocurrieron entre las 7.100 cal Ap a 5.800 cal Ap. Para el depósito Planes de la Laguna, asociado a Cerro Pacho, estimamos un nuevo periodo de tiempo restringido entre 1.900 cal Ap y 431 EC (edad de la TBJ). En la secuencia superior, hay cinco depósitos freatomagmáticos, más jóvenes que 431 EC, los tres más inferiores se podrían quizás correlacionar con erupciones del VSA para la época de la conquista. Al observar la secuencia superior donde se identificaron depósitos freatomagmáticos de erupciones “húmedas”, diferentes a las erupciones magmáticas de la secuencia inferior. Por el cambio de estilo de erupción inferimos que había un volumen más amplio de agua disponible en el sistema hidrotermal del volcán. Es posible que las erupciones freatomagmáticas de la secuencia superior, sean similares a la ocurrida en 2005, con IEVs entre 1 y 3. Los peligros de oleadas piroclásticas y lahares son importantes considerando las recientes erupciones freatomagmáticas del VSA.

Se analizaron diez muestras de escoria de la secuencia inferior, siete de ellas tienen composiciones basálticas y andesita basálticas, con contenidos de SiO₂, menor al 53%, entre estos el depósito Santo Domingo que preliminarmente parece pertenecer al grupo de erupciones del VSA. En el caso de la CDP concentrada morfo azul y la caída de tefra asociada, su composición es andesita basáltica con un porcentaje de SiO₂ del 56%. Muestras tomadas del VSA por otros autores [14] muestran composiciones andesita basáltica, traquiandesita y traquiandesita basáltica en rangos de SiO₂ desde el 52% hasta el 63%.

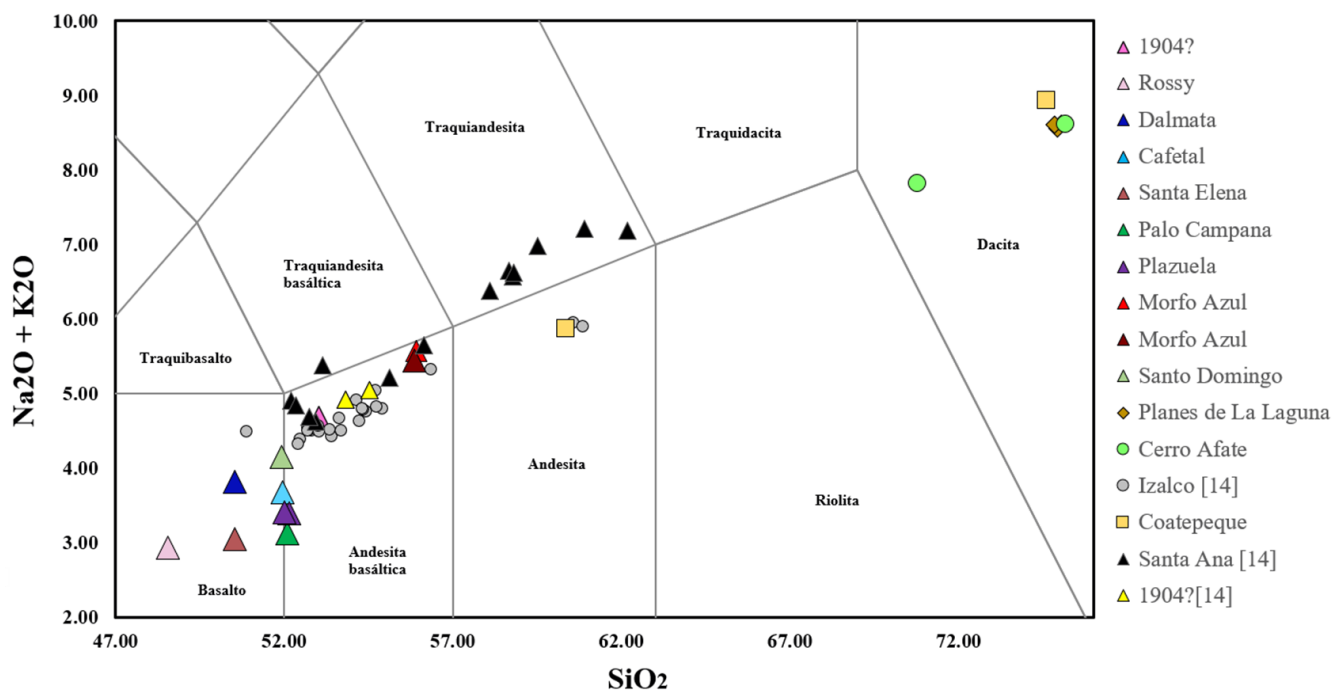


Figura 3. Composición del VSA y volcanes cercanos. Datos de [14] no son atribuidos a depósitos específicos.

Conclusiones

El volcán de Santa Ana tuvo mínimo nueve erupciones entre las 7.100 cal Ap y 5.800 cal Ap, con magmas máficos, entre las composiciones basálticas y andesita basálticas. El depósito más antiguo conocido de una erupción del volcán de Santa Ana es la CDP concentrada Morfo Azul, más antiguo a la 7.750 cal Ap. Estas erupciones antiguas del volcán de Santa Ana sugieren la probabilidad de erupciones con generación de CDPs concentradas y emisión de volúmenes considerables de tefra.

Cinco erupciones freatomagmáticas más jóvenes a los 431 EC fueron identificadas, con algunas oleadas piroclásticas asociadas. Actualmente es notable que existen zonas agrícolas y comunidades con poblaciones considerables dentro de las zonas de impacto conocidas de lahares, CDPs y caídas de tefra, por esa razón los estudios del peligro y riesgo volcánico para el volcán de Santa Ana tienen relevancia particular.

Referencias

1. Siebert, L., Kimberly, P., Pullinger, C. (2004). The voluminous Acajutla debris avalanche from Santa Ana volcano, western . Scolamacchia, T., Pullinger, C., Caballero, L., Montalvo, F., Orosco, L. E. B., & Hernández, G. G. (2010). The 2005 eruption of Ilamatepec (Santa Ana) volcano, El Salvador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(3-4), 291-318. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.11.016.

2. Meyer-Abich, H., 1956. Los volcanes activos de Guatemala y El Salvador (América Central). *Anales del Servicio Geológico Nacional de El Salvador*. Ministerio de Obras Públicas, República de El Salvador, pp. 3–129.
3. Pullinger, C. (1998). Evolution of the Santa Ana volcanic complex, El Salvador. Michigan Technological University, Houghton (Master thesis: 151 pp).
4. Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), 2006. Comportamiento de los principales volcanes activos de El Salvador, durante el año 2005. Recuperado de: <https://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00088/doc00088.htm>
5. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) (2020) Estudio para generar árbol de eventos eruptivos para el volcán de Santa Ana. (Documento Interno).
6. Siebert, L., Kimberly, P., Pullinger, C. (2004). The voluminous Acajutla debris avalanche from Santa Ana volcano, western El Salvador, and comparison with other Central American edifice-failure events, *Geological Society of America Special Paper*, 375, 10.1130/0-8137-2375-2.5.
7. Kutterolf, S., Freundt, A., y Pérez, W. (2008). Pacific offshore record of Plinian arc volcanism in Central America: 2. Tephra volumes and erupted masses. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(2), 1-19. doi: 10.1029/2007GC001791, pp.
8. Rose, W., Conway, F., Pullinger, C., et al. An improved age framework for late Quaternary silicic eruptions in northern Central America. *Bull Volcanol* 61, 106–120 . <https://doi.org/10.1007/s004450050266>
9. Bronk-Ramsey, C. (2009) Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51(1), 337–360. doi:10.1017/S0033822200033865
10. Reimir , P., Austin, W., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P., Bronk, C. et al. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725-757. doi:10.1017/RDC.2020.41
11. Hua, Q., Turnbull, J., Santos, G., Rakowski, A., Ancapichún, S., De Pol-Holz, R., et al. (2021). Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2019. *Radiocarbon*, 1-23. doi:10.1017/RDC.2021.95
12. Johnson, D.M., Hooper, P.R., y Conrey, R.M. (1999). XRF analysis of rocks and minerals for major and trace elements on a single low dilution Li-tetraborate fused bead. *Advances in X-ray analysis*, 41:843-867.
13. Smith, V., Antonio, C., Aguirre-Díaz, G., Pedrazzi, D., Scifo, A., Plunkett, G., et al. (2020). The magnitude and impact of the 431 CE Tierra Blanca Joven eruption of Ilopango, El Salvador. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(42), 26061–26068. <https://doi.org/10.1073/pnas.2003008117>
14. Carr, M.J., y Pointer, N.K., (1981). Evolution of a young parasitic cone toward a mature central vent; Izalco and Santa Ana volcanoes in El Salvador, Central America. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 11, 277–292. doi: 10.1016/0377-0273(81)90027-5



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Geocronología U-Pb en zircones detríticos de la cuenca de San Carlos, Costa Rica: Evidencia del vulcanismo de arco del Mioceno e implicaciones en la historia Paleozoica y Precámbrica del istmo Centroamericano

Martín Rojas-Barrantes^{a*}, Ana Sofia Huapaya^a, Luigi A. Solari^b, Vladimír Žáček^c

^aDirección de Geología y Minas, San Francisco de Guadalupe, 10104-1000, Costa Rica.

^bCentro de Geociencias, Laboratorio de Estudios Isotópicos, UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro, Qro, 76230, México.

^cCzech Geological Survey, Klárov 3, 118 21, Prague 1, Czech Republic.

Abstract: U-Pb geochronology on detrital zircons of San Carlos Basin in Costa Rica yielded a wide range of ages from Paleoproterozoic to Cenozoic. The Miocene population (66%) constrained to a maximum depositional age of 6.9 ± 0.2 Ma of late Miocene-Pliocene basin sedimentation. Cenozoic and Mesozoic ages reflect the local volcanic activity of the evolving island arc and the recycling of sediments from the north of Costa Rica and Central America. Zircon grains of Paleozoic and Proterozoic age bring new insights on provenance and indicate sediment recycling from a variety of sources. These primordial detrital zircons have a possible connection with northern Central America or southern Mexico, or a possible Gondwanic or Laurentian origin. However, it could also indicate the presence of hidden continental crust fragments underneath southern Central America.

Palabras clave: Zircones detríticos, Datación U-Pb, Crecimiento de corteza, Terreno Precámbrico, América Central.

Key words: Detrital zircons, U-Pb dating, Crust growth, Precambrian terrane, Central America.

Introducción

América Central está constituida por una serie de terrenos y unidades geológicas cuya evolución está relacionada con cinco placas tectónicas (Norte América, Caribe, Cocos, Nazca y Sur América), al igual que bloques tectono-estratigráficos y fragmentos de corteza de origen continental y oceánico (Maya, Chortís, Chorotega, Chocó), así como posiblemente otros terrenos geológicos cubiertos [1 y 2] y referencias citadas). Los bloques Maya y Chortís son de origen continental, en tanto los bloques Chorotega y Chocó están constituidos por terrenos acrecionados y colisionados de corteza oceánica. América Central meridional se caracteriza por la ausencia de rocas pre-Mesozoicas en contraste con el norte de América Central que contiene una variedad de rocas Precámbricas/Paleozoicas, metamórficas del Triásico y rocas ígneas con un amplio rango de edades [3, 4, 1, 5 y 6]. La Cuenca de San Carlos (CSC) es una cuenca extensional localizada en la región tras-arco de América Central meridional al noroeste de Costa Rica ($10^{\circ}22' - 11^{\circ}08'$), en el margen convergente de la subducción de la placa Cocos debajo de la placa Caribe. El basamento de la cuenca está constituido por rocas máficas, ultramáficas y sedimentos pelágicos de edad Jurásico Medio – Cretácico, así como rocas volcano-sedimentarias de edad Paleógena y Neógena.

Varias teorías explican la proveniencia de zircones primordiales en cuencas sedimentarias no relacionadas con áreas adyacentes a corteza continental o arcos de islas sin historia geológica pre-Mesozoica: (i) del manto profundo y emergencia con

*Autor para contacto: martinr@minae.go.cr

vulcanismo; (ii) xenocristales de manto litosférico antiguo; (iii) subducción de sedimentos o cuñas mantélicas muy antiguos que alimentan las fuentes de los magmas en ambientes de arcos; (iv) de origen continental a pesar de largas distancias como por ejemplo fuertes corrientes oceánicas o transportados por fuertes vientos similar a las arenas transportadas desde el Sahara hasta los Alpes o el este de USA [7, 8 y 9]. Tamaños de partículas transportadas por los vientos del Sahara en el Caribe y Costa Rica varían de 2,5-10 μm [10], comparado con los tamaños de 120-300 μm de zircons detríticos encontrados en la CSC. Se presenta un amplio registro de edades U-Pb en zircons detríticos de 5 muestras obtenidas en sedimentos clásticos depositados en la CSC durante el Mioceno Superior – Plioceno Temprano en Costa Rica.

El objetivo del estudio pretende establecer la proveniencia de los zircons detríticos, la historia geológica y eventos de sedimentación en esta área de América Central meridional durante el Mioceno – Plioceno, para entender la paleogeografía local y regional. También, busca comprender la proveniencia de sedimentos del norte de América Central durante el cierre del istmo a partir del Mioceno Medio. Dos hipótesis surgen del estudio: (1) ¿el espectro de edades geocronológicas obtenidas de los zircons detríticos representa información complementaria o valida la hipótesis de un istmo todavía abierto durante el Mioceno Medio – Tardío? y (2) ¿los zircons heredados del Proterozoico y Paleozoico sugieren el reciclaje de sedimentos y/o exhumación de corteza continental más probable del norte de Centroamérica en un canal todavía abierto entre el istmo de América Central meridional y el norte? Se realiza un esfuerzo por entender y elucidar la proveniencia de zircons Paleozoicos y Precámbricos en esta área de la CSC y Costa Rica.

Materiales y Metodología

Se realiza el muestreo en sedimentos clásticos (areniscas) para datar zircons detríticos en cinco sitios, dos exposiciones en los ríos Nilo y La Muerte (My475 y My611) y tres en cortados de roca de los pozos Pataste y Tonjibe (P1s, T1s y T2i). Las muestras se tomaron de la sección superior de la Fm. Venado y la sedimentación del Plioceno. Las areniscas son de especial interés debido a que el tamaño del grano se considera registra mejor la proveniencia de sedimentos en una región con una alta diversidad y fuente de rocas.

Catodoluminiscencia (CL)

Los zircons fueron sometidos a análisis de Catodoluminiscencia (CL) utilizando un luminoscopio ELM-3R [11], así como imágenes de luz reflejada y transmitida utilizando un estereoscopio Olympus convencional. La morfología y estructuras internas de los zircons fueron caracterizados mediante CL, en tanto las inspecciones de luz reflejada y transmitida para definir los puntos de análisis mediante ablación laser. Esta técnica es útil para caracterizar zonaciones relacionadas a cambios en la composición química de los zircons, detectar posibles inclusiones, crecimientos metamórficos o núcleos heredados [12 y 13].

Geocronología U-Pb mediante el método LA-ICPMS

La preparación y análisis de las muestras se realizó en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) del Centro de Geociencias de la UNAM, México. El procedimiento analítico y detalles técnicos están dados en [14]. La separación de zircons se realiza mediante métodos estandarizados utilizando un separador magnético Frants y líquidos pesados. Los zircons fueron seleccionados manualmente bajo un microscopio binocular. Los análisis de datación U-Pb se realizaron mediante el método LA-ICPMS (Laser Ablation Inductively-Coupled Plasma Mass Spectrometry [14]. Las edades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ fueron consideradas para dataciones <1000 Ma, en tanto las edades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ para dataciones >1000 Ma. Los isótopos ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th y ^{238}U fueron medidos para las composiciones isotópicas U (Th)-Pb y dataciones. Los diagramas de concordia y medias ponderadas se graficaron utilizando Iso-plotR, la reducción de datos y análisis concordantes graficados utilizando Kernel Density Estimation [15 y 16]. La discordancia solo es considerada como un buen método de filtrado para aquellos zircons con edades mayores al Mesozoico. Las edades máximas de depositación fueron calculadas de acuerdo con las edades medias $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ del grupo de zircons concordantes (dentro del error) más jóvenes [p.ej. 17].

Resultados y Análisis

Los granos de zircón analizados tienen tamaños variables de 120-300 μm , con formas prismáticas bipiramidales hasta alargadas y ovaladas, con patrones de zonación oscilatoria y sectorial (figura 1). Los zircons de la muestra My475 son bipiramidales y prismáticos, la mayoría subhedrales con poco desarrollo de zonación concéntrica (figura 1a). Los zircons de la muestra My611 son subhedrales de formas prismáticas cortas hasta ovaladas con zonación sectorial y rara vez concéntrica (fig. 1b). Los zircons de la muestra P1s son mayormente alargados y ovalados, raramente como cristales prismáticos alargados con zonación oscilatoria característico de crecimiento ígneo (fig. 1c). Los zircons de la muestra T1s tienen formas variadas desde grandes cristales de crecimiento prismático con terminaciones bipiramidales >300 μm hasta cristales cortos $\sim 120 \mu\text{m}$ de morfología ovalada (fig. 1d). Los zircons de la muestra T2i son alargados con buen desarrollo piramidal, muestran zonación sectorial, a veces concéntrica y no muestran núcleos heredados (figura 1e). En general, la mayoría de los zircons analizados parecen tener un origen ígneo mientras algunos cristales como en la muestra My611 pueden tener un origen metamórfico. El Cuadro 1 muestra un resumen de los resultados de las muestras analizadas.

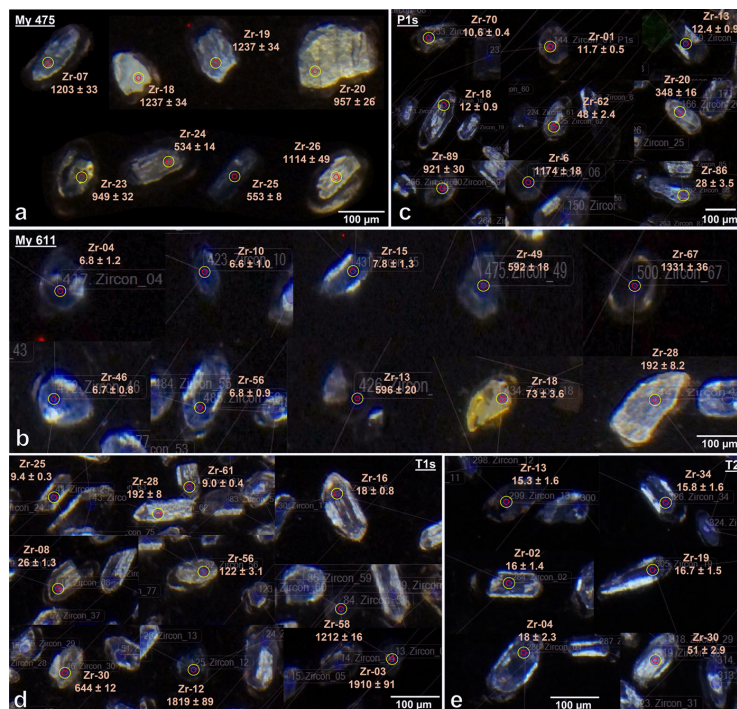


Figura 1. imágenes de catodoluminiscencia de los zircons seleccionados para los análisis de datación. a. My 475, b. My 611, c. My P1s (Pataste), d. T1s (Tonjibe) y e. T2i (Tonjibe). Para los detalles ver en el texto los resultados referidos a esta figura.

Cuadro 1. Distribución de las edades U-Pb en zircons detríticos de la Cuenca de San Carlos (Mioceno Superior-Tardío de la Fm. Venado y sedimentación del Plioceno). Se presenta un resumen estadístico, código y ubicación de las muestras analizadas.

Muestra	Ubicación	Proterozoico		Paleozoico		Mesozoico		Cenoico		Edad máxima
		Edades (Ma)	n%	Edades (Ma)	n%	Edades (Ma)	n%	Edades (Ma)	n%	
My475 (60 zircons)	10,53°/84,76°	552,3, 865,5, 946 –		275,8-292,1, 521-536,5	(n=8) 14%	68,9-117,5, 243	(n=19) 31%	7,5-19,2	(n=15) 25%	8,2 ± 0,7 Ma
		989,2, 1019,4 - 1034, 1105 -1114, 1185-1274	(n=18) 30%							
My611 (69 zircons)	10,61°/84,74°	592, 596, 1101, 1331	(n=4) 6%			71, 72,5, 191,5	(n=3) 4%	5,8-15,2	(n=62) 90%	6,9 ± 0,2 Ma
P1s, Pataste (83 zircons)	10,60°/84,72°	1003, 1174	(n=2) 3%	348, 520	(n=2) 2%	104,9, 107,6, 107,8, 111,1, 119,7, 176,3	(n=6) 7%	10,5- 65,9	(n=73) 88%	10,6 ± 0,3 Ma
T1s, Tonjibe (94 zircons)	10,79°/84,59°	644, 1212, 1819, 1910	(n=4) 4%			103,9, 107,3, 122,2	(n=3) 3%	9-43,3	(n=31) 91%	9,1 ± 0,3 Ma
T2i, Tonjibe (34 zircons)	10,79°/84,59°			264,9, 277	(n=2) 6%	101	(n=1) 3%	13,8- 51,3	(n=31) 91%	15,4 ± 0,5 Ma
Total de zircons (340)			8%		4%		9%		79%	

Los resultados muestran una amplia distribución de edades y generación de zircons en la CSC. Aproximadamente el 12% de los zircons datados son reciclados de fuentes Paleozoicas y Proterozoicas, mientras el 88% provienen del magmatismo y vulcanismo de arco del Mesozoico y Cenozoico. La población más frecuente es del Cenozoico (79%), seguido por Mesozoico (9%), Proterozoico (8%) y Paleozoico (4%) (Cuadro 1 y figura 2). La población del Mioceno es la más importante (66%) asociado al vulcanismo del Proto/Paleo Arco volcánico del norte de Costa Rica (figura 2b). Zircons pre-Miocenos del Cenozoico posiblemente son reciclados de rocas más antiguas del Proto-Arco de Costa Rica, Nicaragua, Honduras y en algún grado de los complejos oceánicos (figura 2b).

En general, el volumen de sedimentos de la CSC tuvo como fuente de sedimentos las rocas volcánicas del Cenozoico. El grupo de zircons Miocénicos concordantes más jóvenes en la muestra My611, restringen una edad máxima de sedimentación de $6,9 \pm 0,2$ Ma definida como la edad de depositación de los sedimentos del Mioceno Tardío (Cuadro 1). Zircons Mesozoicos

son reciclados de las Secuencias de Arco del Jurásico-Eoceno del norte de la CSC (Nicaragua y Honduras), o de complejos ofiolíticos del margen pacífico de Costa Rica (figura 2). Zircons Paleozoicos y Proterozoicos son reciclados de la corteza continental de varios plutones y rocas metamórficas que componen el basamento del norte de América Central y/o sur de México, o de posible origen Gondwanico o Laurentiano (figura 2). Sin embargo, podrían indicar también la presencia de fragmentos de corteza continental debajo de América Central meridional. La tectónica y vulcanismo fue un proceso dominante durante el Cenozoico en el norte y sur de América Central, donde el aporte de sedimentos retrabajados hacia la CSC fue posiblemente un proceso activo en un istmo todavía abierto durante el Mioceno.

La abundancia de zircons detríticos se presenta en la sedimentación del Mioceno Superior a Terminal y el Plioceno con la aparente ausencia de zircons detríticos en sedimentos más antiguos. Lo anterior es evidencia de la intensa actividad geotectónica y volcánica y el inicio del cierre del istmo Centroamericano durante el Mioceno Medio, con la exhumación, erosión y levantamiento/traslación de terrenos de origen continental, rocas sedimentarias antiguas o complejos ofiolíticos conteniendo zircons reciclados del norte de América Central y el vulcanismo de arco del Mioceno. La mayoría de los zircons (96%) tienen un origen continental según el diagrama discriminadorio Y/U-Yb [18], en tanto un 6% de los zircons del Mioceno son de origen oceánico posiblemente asociado a una fuente tipo MORB del vulcanismo de arco.

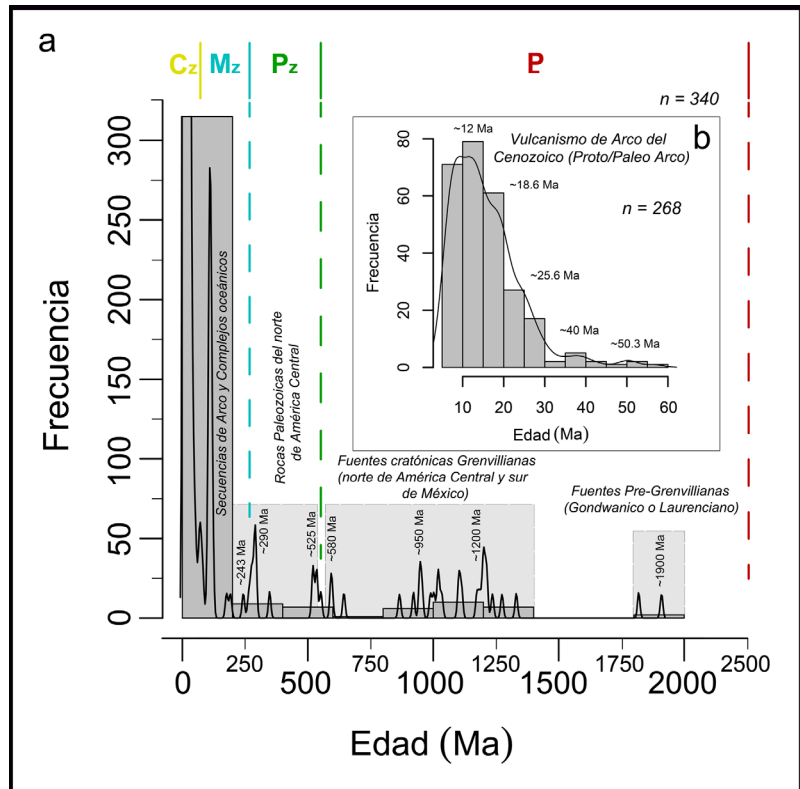


Figura 2. a. Histograma de frecuencia y probabilidad con las edades concordantes de los zircons detríticos Precámbricos y Fanerozoicos mostrando las diferentes generaciones de zircons; b. Histograma de frecuencia y probabilidad con las edades concordantes de los zircons detríticos Cenozoicos, mostrando una curva de distribución normal ligeramente sesgada, con una probabilidad máxima/moda cercano a 12 Ma. Se presentan diferentes generaciones y probablemente orígenes de zircons detríticos.

Conclusiones

El grupo de zircones más jóvenes restringen la edad de sedimentación de 6.9 ± 0.2 Ma al Mioceno Terminal y Plioceno. La población de zircones del Mioceno (66%) representa el desarrollo y vulcanismo del arco de islas de Costa Rica como fuente de sedimentos y zircones de la Fm. Venado, y aportan nueva información sobre el inicio del cierre del istmo de América Central durante el Mioceno Medio – Superior.

Las poblaciones de zircones de edad Paleoceno, Eoceno y Mioceno Tardío proveen nuevas edades en brechas del vulcanismo no reportadas hasta el momento. Zircones pre-Miocénicos del Cenozoico son reciclados del vulcanismo del Proto/Paleo Arco del norte y margen pacífico de Costa Rica y los Mesozoicos de las Secuencias de Arco del Jurásico - Eoceno del norte de América Central (Nicaragua y Honduras).

Zircones Paleozoicos y Proterozoicos son reciclados de la corteza continental y rocas metamórficas del norte de América Central y/o sur de México, o de posible origen Gondwanico o Laurenciano. Sin embargo, podrían indicar también la presencia de fragmentos de corteza continental debajo de América Central meridional del norte de América Central. Esto evidencia una intensa actividad geotectónica y volcánica durante el Mioceno Medio, con la exhumación, erosión y levantamiento/traslación de terrenos de origen continental, rocas sedimentarias antiguas o complejos ofiolíticos conteniendo zircones reciclados del norte de América Central.

La normalización de REE a condritos y la relación Y/U-Yb sugieren que la mayoría de los zircones tienen un origen continental. El registro sedimentario prueba ser un proceso geológico de gran importancia en proveer información invaluable acerca de la historia y evolución geológica de una región, en este caso con nuevos datos geocronológicos de estos complejos continentales y el desarrollo del istmo Centroamericano.

Referencias bibliográficas

1. Alvarado, G.E., Dengo, C., Martens, U., Bundschuh, J., Aguilar, T. y Bonis, S.B (2007). Stratigraphy and geologic history. En J., Bundschuh, y G.E., Alvarado (Eds), Central American: Geology, Resources and Hazards (pp.345-394). London, UK. Taylor and Francis Group pcl.
2. Flores, K.E. y Gazel E. (2020). A 100 m.y. record of volcanic arc evolution in Nicaragua. <https://doi.org/10.1111/iar.12346>.
3. Dengo, G. y Bohnenberger, O. (1969). Structural development of northern Central America. Am. Assoc. Petroleum Geol., Memoir 11.
4. Dengo, G. (1973). Estructura geológica, historia tectónica y morfológica de América Central. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI), Guatemala.
5. Denyer, P. y Gazel, E. (2009). The Costa Rican Jurassic to Miocene oceanic complexes: Origin, tectonics and relations. <https://doi:10.1016/j.jsames.2009.04.010>.
6. Flores, K., Skora, S., Martin, C., Harlow, G.E., Rodríguez, D. y Baumgartner, P.O. (2015). Metamorphic history of riebeckite - and aegirine-augite-bearing high-pressure-low-temperature blocks within the Siuna Serpentine Mélange, northeastern Nicaragua. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2015.1027747>.
7. Rojas-Agramonte, Y., Garcia-Casco, A., Kemp, A., Kröner, A., Proenza, J.A., Lázaro, C., y Liu, D. (2015). Recycling and transport of continental material through the mantle wedge above subduction zones: A Caribbean example. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.040>

8. Rojas-Agramonte, Y., Toulkeridis, Th., Kröner, A., Kemp, T., Garcia-Casco, A., Suhr, N., Xie, H. y Liu, D. (2018). Palaeozoic to Archean zircons in rocks derived from the Galapagos mantle hotspot: where do they come from? 35th International Geological Congress Abstracts: Paper N°5295, American Geosciences Institute (AGI).
9. Pindell, J. (2015). Encore! A new case for the Caribbean's Origin. Recuperado de <https://www.aapg.org/publications/news/explorer/column/articleid/21144/>.
10. Poleo, D. y Briceño, J. (2013). La intrusión de polvo del Sahara y del Sahel en la capa límite atmosférica del Mar Caribe: episodio de agosto 2013. Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica y Universidad Nacional de Costa Rica.
11. Marshall, D.J. (1988). Cathodoluminescence of geological materials. Unwin Hyman.
12. Koschek, G. (1993). Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1993.tb03379.x>.
13. Rubatto, D. (2002). Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00355-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00355-2).
14. Solari, L.A., González-León, C.M., Ortega-Obregón, C., Valencia-Moreno, M. y Rascón-Heimpel, M.A. (2018). The Proterozoic of NW Mexico revisited: U-Pb geochronology and Hf isotopes of Sonoran rocks and their tectonic implications. <https://dx.doi.org/10.1007/s00531-017-1517-2>.
15. Vermeesch, P. (2012). On the visualisation of detrital age distributions. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.021>.
16. Vermeesch, P., 2018. IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology. <https://doi:10.1016/j.gsf.2018.04.001>.
17. Dickinson, W. R. y Gehrels, G. E. (2009). Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: A test against a Colorado Plateau Mesozoic database. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.013>.
18. Grimes, C.B., John, B.E., Kelemen, P.B., Mazdab, F.K., Wooden, J.L., Cheadle, M.J., Hanghøj y K., Schwartz, J.J. (2007). Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: a method for distinguishing detrital zircon provenance. <https://doi.org/10.1130/g23603a.1>.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Cartografía geológica y estratigrafía de la Hoja Tilarán, escala 1:50.000

Luis David Jara Díaz^{a*}, Patrick Durán Leiva^b,
Ana Sofia Huapaya^a, Martin Rojas-Barrantes^a

^aDirección de Geología y Minas, San Francisco de Guadalupe, 10104-1000, Costa Rica.

^bEscuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, Apto 214-2060, San José, Costa Rica.

Abstract: The Tilarán area and its surroundings present volcanic rocks from the Miocene, to recent rock deposits from the Quaternary. The stratigraphy is constituted from the base by the volcanism of the Aguacate Group, composed of andesitic to basaltic lavas and breccias, ranging from the Upper Miocene to the beginning of the Pleistocene. These present occasional gold mineralization. In the Lower Pleistocene, deposits of pyroclastic flows of the Bagaces Formation are recorded, mainly ignimbrites not welded with pumice and lithics. The Quaternary comprises a fissural volcanism initially formed by the Monteverde Formation, with andesitic lava units that outcrop in most of the area, as well as tuffs, andesites with xenoliths and dacitic rocks, which comprise a very localized dome-type volcanism.

Later recent materials (Pleistocene-Holocene) comprise landslide deposits, fluvial and alluvial deposits, as well as recent ash from the activity of the Arenal Volcano.

Palabras clave: Estratigrafía, Tilarán, Vulcanismo Neógeno-Cuaternario, Formación Bagaces.

Key words: Stratigraphy, Tilarán, Neogene-Quaternary Volcanism, Bagaces Formation.

Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo conocer el contexto geológico de Tilarán y sus alrededores, contribuyendo al conocimiento de la estratigrafía de la zona y al proyecto del Mapa Geológico de Costa Rica a escala 1:50.000, a través del cartografiado geológico de la Hoja Tilarán.

La Hoja Tilarán a escala 1:50.000 se ubica en la Provincia de Guanacaste, entre la Cordillera Volcánica Central y la Cordillera de Guanacaste; con la numeración 3247-III del Instituto Geográfico Nacional; entre las coordenadas CRTM05 (oficial para el país), longitudes 398045 - 411682 y latitudes 1158726 - 1149585 (fig. 1).

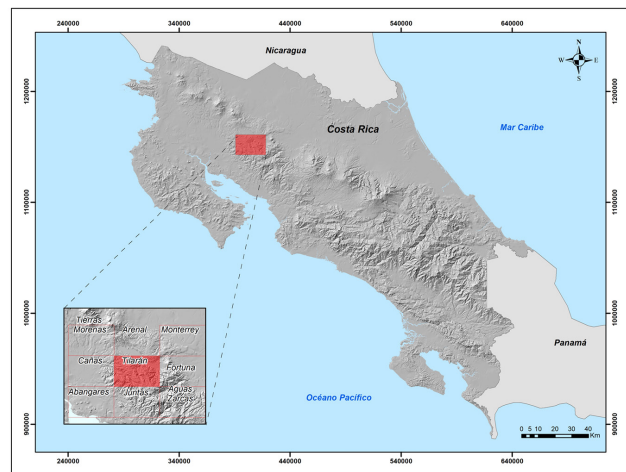


Figura 1: Mapa de ubicación de la Hoja Tilarán.

*Autor para contacto: ljara@minae.go.cr

La cordillera de Tilarán ha sido de mucho interés por el contexto geológico de su, por lo que se han realizado varios estudios geológicos desde el siglo pasado con el fin de conocer la orogénesis de la cordillera y su potencial metalogénico, que se dio principalmente durante el Mioceno con el levantamiento de los intrusivos de Talamanca [1] y se propone que la Cordillera de Tilarán evolucionó paralelamente al orógeno de Talamanca. Otros autores [2] estudian la interrupción del eje de intrusiones hacia el Valle Central y [1] identifica importantes zonas de levantamiento y fallas, asociadas con el graben de Nicaragua como la falla Cote y con la formación del horst que en principio dio origen a la Cordillera de Tilarán.

Nuevos estudios sismológicos y geológicos fueron realizados en la zona a raíz de una activación del Volcán Arenal en 1968, y del terremoto de Tilarán de 1973 al suroeste de la laguna de Arenal en la Falla Chiripa [3 y 4]. Otros estudios fueron realizados por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) durante la década de los 70, para la factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Arenal, con lo que se generaron nuevos estudios geológicos y sismológicos por medio de las estaciones sísmicas colocadas. Posteriormente [5 y 6] realizaron estudios morfotectónicos en la zona. Además, se analiza [7] la compresión en sentido NW - SE sobre la Cordillera de Tilarán, provocando fallamiento de rumbo con componentes normal e inversa. También algunas campañas geológicas de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica se realizaron en la zona, además de estudios recientes del ICE para estudio de proyectos geotérmicos, como el Proyecto Pailas II, donde se hace un estudio de amenaza sísmica y a la vez aporta información de la tectónica local que abarca Tilarán y alrededores.

Metodología

La metodología utilizada fue desarrollar el cartografiado geológico de los depósitos volcánicos de la Hoja Tilarán mediante la aplicación de los Lineamientos y Estándares del Mapa Geológico de Costa Rica a escala 1:50,000. Esto fue realizado siguiendo una serie de objetivos metodológicos donde primeramente se realizó la investigación bibliográfica de trabajos previos tales como publicaciones, mapas, informes internos, entre otros; cartografiado geológico de campo mediante el levantamiento de puntos (GPS) de afloramientos de roca y descripciones para el establecimiento de unidades litológicas. Junto al cartografiado de campo se hace la recolección de muestras, además se va levantando un registro fotográfico tanto de los afloramientos como de las muestras de mano.

Posteriormente se procede al procesamiento de los datos de campo para la creación de la base de datos, lo cual da paso a los primeros borradores del mapa geológico digital a partir del mapa de afloramientos y mapa de elementos estructurales. Con toda la información anterior se crea la columna estratigráfica, la cual contempla los tipos de litología en su orden cronológico para su comprensión en el espacio-tiempo y con lo cual se interpretan los resultados.

Resultados y Análisis

Con base en el trabajo de campo y cartografía geológica realizados, se obtuvo un panorama estratigráfico de la zona de Tilarán, el cual está conformado en su mayoría por rocas volcánicas, con edades que van desde el Mioceno al reciente.

Las rocas más antiguas que conforman el basamento de la secuencia estratigráfica, son parte del vulcanismo de un antiguo arco volcánico representado por la Cordillera de Tilarán y los Montes del Aguacate que tiene una edad Mioceno – Plioceno y conforman el denominado Grupo Aguacate, y que se define como Formación Grifo Alto [8], en su mayoría de la edad del plioceno (alrededor de 6-2.1 Ma), con su máxima actividad volcánica entre los 4-6 Ma. En la zona de estudio está conformado principalmente por lavas basálticas a andesíticas en su mayoría con alteración hidrotermal que se extiende en lugares como Río Chiquito, poblados al suroeste de Tilarán, Río Cañas, entre otros, y con mineralización aurífera en algunas zonas como en el sector de Líbano y Río Chiquito. Dentro de este período de vulcanismo hacia el Plioceno, también se encuentran las Brechas La

Unión pertenecientes al Grupo Aguacate y definidas como brechas de composición andesítica, y que afloran aisladamente en algunos sectores al suroeste de Tilarán [9].

Contemporáneamente hacia el final del vulcanismo del Grupo Aguacate, se identifica un vulcanismo explosivo representado por ignimbritas no soldadas con pómez y líticos, y tobas con materia orgánica de la Formación Bagaces, ubicadas hacia finales del Plioceno e inicios del Pleistoceno, asociadas a la Toba Cañas [10] compuesta por depósitos de tobas de flujo con pómez y líticos.

La Formación Monteverde se encuentra sobreyaciendo al Grupo Aguacate de forma discordante y representa un cambio en el vulcanismo a tipo efusivo fisural, el cual está compuesto por lavas andesíticas con tobas y lahares subordinados del Pleistoceno Inferior – Medio, entre 2,1 – 1,1 M.a. [11]. Esta unidad de lavas se puede localizar en la mayor parte de la Hoja Tilarán y sobre los 800 a 1000 m.s.n.m., generalmente. Las lavas son andesíticas, generalmente meteorizadas formando suelos lateríticos alrededor y dejando relictos de lavas, así como lavas sanas en lajas ocasionales.

Durante este período de tiempo fueron depositados otras rocas asociadas al vulcanismo de la Formación Monteverde [12], entre estas Andesitas con xenolitos ácidos, Dacitas y Tobas, las cuales se presentan en la zona como afloramientos con una distribución homogénea. La figura 3 muestra la distribución de las unidades geológicas anteriores contemporáneas a las lavas de la Formación Monteverde.

La cima de la secuencia está coronada por todos los depósitos recientes tales como: depósitos fluviales y aluviales, depósitos de deslizamientos y depósitos de lapilli del Volcán Arenal, así como tefras recientes depositadas durante el Holoceno, las cuales cubren gran parte del área de la Hoja Tilarán.

A partir del cartografiado y análisis de las unidades geológicas mencionadas, se elaboró la columna estratigráfica de la zona de estudio, la cual muestra la distribución cronoestratigráfica de las unidades desde el Plioceno superior con las unidades volcánicas explosivas del Grupo Aguacate, pasando por el Pleistoceno con las unidades asociadas a la Formación Monteverde y hasta el Holoceno con los depósitos recientes fluviales, así como tefras del Volcán Arenal. La figura 2 muestra la columna cronoestratigráfica de la zona de estudio.

Cabe mencionar que la zona de estudio presenta una configuración estructural dominada por fallas importantes de tipo dextral y normales, como las fallas Cañas y Chiripa, así como otras estructuras que marcan largos alineamientos y valles profundos con cambios bruscos de pendiente y litología.

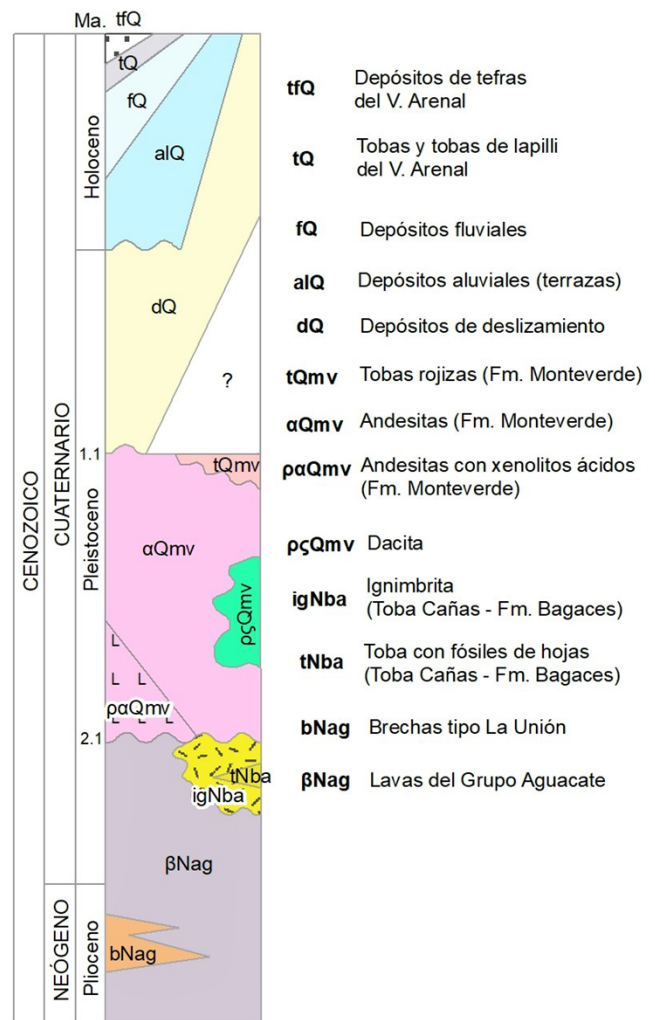


Figura 2: Columna cronoestratigráfica de la zona de Tilarán y alrededores.

Conclusiones

La zona de Tilarán y sus alrededores comprendida en la Hoja cartográfica Tilarán a escala 1:50.000, está conformada por una secuencia volcánica que formó lo que hoy se conoce como la Cordillera de Tilarán y los Montes del Aguacate. Esta secuencia comenzó con un vulcanismo explosivo durante el Mioceno y Plioceno, culminando hacia el Pleistoceno inferior y depositando así lavas andesítico-basálticas en ocasiones con mineralización de oro, brechas y posteriormente flujos piroclásticos.

Las lavas de la Formación Monteverde forman un manteado discordante con el Grupo Aguacate subyacente, marcando así un cambio a un vulcanismo efusivo que depositó lavas andesíticas más ácidas y sin mineralización. Estas se encuentran en elevaciones superiores a los 800 m.s.n.m.

Los depósitos recientes se ubican principalmente en los valles fluviales de ríos importantes y con marcas de estructuras geológicas, como en el caso del Río Cañas y Río Chiquito, donde se hayan depósitos fluviales y valles profundos de falla.

En la mayoría de la zona se observan los depósitos de ceniza recientes del Volcán Arenal, que recubren la topografía y generan suelos de color pardo a negro, los cuales presentan fertilidad agrícola en la zona.

La presente cartografía geológica de la zona de Tilarán y sus alrededores ha generado información valiosa que puede ser utilizada por los gobiernos locales para ordenamiento territorial y dictaminar futuros estudios a detalle sobre proyectos civiles específicos. Además, es un aporte al conocimiento geológico de la comunidad científica, dando a conocer una estratigrafía más amplia de la zona.

Referencias bibliográficas

1. Dengo, G. (1962). Estudio Geológico de la Región de Guanacaste, Costa Rica. Ministerio de Obras Públicas, *Instituto Geográfico de Costa Rica*, San José, Costa Rica.
2. Chaves, R. y Sáenz, R. (1974). Geología de la Cordillera de Tilarán. Ministerio de Economía Industria y Comercio, Dirección de Geología, Minas y Petróleo, San José, Costa Rica.
3. Plafker G. (1973). Field reconnaissance of the effects of the earthquake of april, 1973, near Laguna de Arenal, Costa Rica.
4. Alvarado, G. E., Morales, L. D., Montero, W., Climent, A. y Rojas, W. (1988). Aspectos sismológicos y morfotectónicos en el extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica. *Revista Geológica de America Central*, 9 (75-98).
5. Montero, W. (1986). Periodos de recurrencia y tipos de secuencias sísmicas de los temblores interplaca e intraplaca en la region de Costa Rica. *Revista Geológica de America Central*, 5 (35-72).
6. Fernández, M. y Pacheco, J. (1997). Sismotectónica de la región central de Costa Rica. *Revista Geológica de America Central*, 21 (8 -20).
7. Villegas, A. (1997). Geodinámica de la Cordillera de Tilarán, relación entre la volcanología y la tectónica. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Costa Rica, San José.
8. Denyer, P. y Alvarado, G. (2007). Mapa Geológico de Costa Rica. San José, Costa Rica: Librería Francesa.
9. Kussmaul, S. y Sprechmann, P. (1982). Estratigrafía de Costa Rica (América Central), II: Unidades Litoestratigráficas Ígneas.- Actas, 5to Congr. Latinoamer. Geol., Buenos Aires, I: 73-79. Reimpreso en: Sprechmann, P. (ed.): *Manual de Geología de Costa Rica*. Vol. I: Estratigrafía. Univ. de Costa Rica, 291-299.
10. Solano, J. P., Denyer, P., Pérez, W., Lücke, O. H. y Madrigal, P. (2019). Formación Bagaces: Caracterización de sus unidades para la identificación de depósitos y litofacies. doi: 10.15517/rgac.v2019i60.36461
11. Alvarado, G.E. y Gans, P.B. (2012). Síntesis Geocronológica del Magmatismo, y Metalogenia de Costa Rica, América Central. *Revista Geológica de America Central*, 46 (7-122).
12. Žáček, V., Vorel, T., Kycl, P., Huapaya, S., Mixa, P., Grygar, R., Havlíček, P., Čech, S., Hrazdára, P., Metelka, V., Ševčík, J. & Pécskay, Z. (2012). Geología y Estratigrafía de la Hoja 3246-II Miramar, Costa Rica. *Revista Geológica de America Central*, 47 (7 -54).



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



CZECH
GEOLOGICAL
SURVEY

Métodos de muestreo geológico para análisis geocronológicos, isotópicos y radiológicos

Petr Mixa^{a*}, Vladimír Žáček^a

^aServicio Geológico Checo, Klárov 3 118 21 Praha, República Checa.

Abstract: The basic principles of correct and successful sampling of rocks for their determination and studies using advanced geochronological, XRF – spectroscopy and X ray diffraction methods are presented as a working material designed in particular for students of geology in Central America. These methods provide an overview of the possibilities of determining the age, origin and geodynamics and tectonics of rock massifs and formations, the chemistry of groundwater, the application of U-Pb, K-Ar, Ar- Ar dating and the estimation of landscape evolution rates using cosmogenic isotopes Be, Al and organic materials (¹⁴C). The X-ray diffraction method for identification of minerals, and the sources and origin or even pollution of groundwater (S, N, C isotopes, freons) will be also dealt with.

Palabras clave: geocronología, geoquímica de isótopos, difracción de rayos X, métodos.

Key words: geochronology, isotopic geochemistry, X-ray diffraction, methods .

Introducción

La rapidez con la que se desarrollan los métodos instrumentales para el estudio de la geocronología y de la génesis de rocas y minerales, aporta excelentes posibilidades para el examen de un amplio rango de procesos geológicos. Sin embargo, los análisis geoquímicos e isotópicos de toda índole son cada vez más sensibles y exigen un proceso de toma y preparación de muestras para análisis sumamente minuciosos y precisos. A petición de la parte costarricense y con referencia a la larga y exitosa cooperación entre el Servicio Geológico Checo y las instituciones geológicas de Costa Rica, fue elaborado un sumario selectivo de los métodos destinados especialmente a los estudios geocronológicos y genéticos, orientado a los conocimientos prácticos para una correcta toma de muestras.

Materiales y Metodología

Muestreo de circones/monacitas para el análisis geocronológico U(Th) – Pb

Método analítico: ablación por láser en combinación con espectrometría de masas ICP-MS/MC ICP MS.

Uso: datación de cristalización (metamorfismo de rocas magmáticas y metamórficas), circones detríticos en sedimentos clásticos (zonas de origen, edad de sedimentación máxima).

*Autor para contacto: petr.mixa@geology.cz

Tipo de muestra: rocas magmáticas/metamórficas ácidas y máficas y rocas sedimentarias.

Toma de la muestra: las rocas magmáticas y sedimentarias no deberán ser de grano fino, preferiblemente sedimentos psamíticos y magmatitas de grano más grueso. Sin embargo, para datación de metamorfismo convienen las metapelitas. La monacita metamórfica suele estar presente en metapelitas, sedimentos clásticos y magmatitas ácidas, pero no suele encontrarse en rocas alcalinas metamórficas.

Para las rocas magmáticas ácidas son suficientes algunos kilos de material, se recomienda que la muestra no esté meteorizada, ni contaminada por vetas, xenolitos y otras heterogeneidades. La roca debe de estar sana, sin alteraciones, ni meteorización (lo ideal son las rocas de cantera).

El tamaño de la muestra se rige por el contenido de Zr, en el caso de la monacita se rige por el contenido de U y Th. Para rocas ácidas y sedimentos clásticos la muestra puede ser de 1 kg o más.

Los granitoides peraluminicos representan buen material para datar monacitas. En el caso de las rocas alcalinas a menudo se requiere una cantidad >10kg (a veces incluso hasta más).

Antes del análisis geocronológico conviene hacer un análisis químico para determinar el contenido de Zr (>50ppm), U (>5ppm) y Th (>10ppm), junto con un estudio de secciones pulidas para identificar la presencia, frecuencia y características de los minerales accesorios. En el caso de tener una buena cantidad de monacita en la muestra, se puede realizar la datación directamente de la lámina delgada o pulida a través de la microsonda electrónica (SHIME).

Tratamiento de la muestra: de cada muestra guardamos una parte para documentación, preparación de sección pulida y análisis químico. La trituration de muestras sigue varios pasos:

- trituration gruesa en trituradora preliminar, seguida de
- trituration a 6mm repetida 5× + tamizado con tamiz 0,5mm
- trituration a 2mm repetida 5× + tamizado con tamiz 0,5mm
- trituration a 1mm repetida 5× + tamizado con tamiz 0,5mm

Separación de minerales: en caso de grandes volúmenes de fracciones pesadas, se puede optar por el método húmedo de concentración gravimétrica en mesa vibratoria tipo Wilfley. Otro es el método seco, donde se procede con el secado de la muestra para realizar la separación magnética gradualmente a 0,2/0,4/0,8/1,5/2,5 Amperios. Posteriormente se continúa con la separación en líquidos pesados (LST politungstato de sodio, diyodometano y tetrabrometano), para después proceder con la selección manual, utilizando el binocular, y clasificando los granos según su morfología y tamaño.

Es importante separar las fracciones que se encuentran alteradas o quebradas ya que representan pérdida de Pb y aumento de Fe.

Si la roca contiene 2 o más generaciones de circones, conviene agruparlas y colocarlas distanciadas una de otra en las secciones pulidas.

Antes de datar los circones, mediante el método de luminiscencia catódica (CL) y/o el método de electrones rebotados (BSE) se identifica los diferentes zonados de los circones, para realizar el mapa del grano.

En caso de la monacita se utiliza la microsonda electrónica con el método de electrones rebotados (BSE) y se recomienda que la escogencia de spots analíticos no sea en zonalidades menores a 8–15 micrones de diámetro. Este método también se puede complementar con mapas químicos de Y, Th, La.

Muestreo para geocronología por el método K/Ar y Ar/Ar

Método analítico: ablación por láser combinada con espectrometría de masas ICP-MS/MC ICP MS

Uso: rocas volcánicas, magmáticas y metamórficas. Para rocas pobres en potasio (basaltos) el límite analítico inferior es entre 100-200 mil años y para rocas ricas en potasio, de pocas decenas de miles de años. El límite superior es ilimitado, pero conforme aumenta en edad mayor es el margen de error.

Tipo de muestra: se analiza la roca total “*whole rock*” (ej. basaltos de grano fino, vidrios etc.) o se analiza por separado aquellos minerales ricos en potasio (anfíbol, micas, glauconita, K-feldespatos). Para una datación correcta la muestra debe estar absolutamente sana, nunca meteorizada, alterada o con amígdalas. En rocas de enfriamiento lento (especialmente metamorfitas y magmatitas) el Ar establece la edad de enfriamiento, es decir las temperaturas que bloquean el escape de Ar del mineral. Según la homogeneidad de la muestra tomamos generalmente entre 0,5–2kg.

Toma de la muestra e información preliminar relevante: antes de la realización del análisis es necesario hacer una microscopía de calidad, análisis químico y análisis de minerales utilizando la microsonda electrónica. Durante la trituración de la roca se elimina xenolitos, mineralización secundaria, manifestaciones hidrotermales y de calentamiento secundario (intrusión).

Tratamiento de la muestra: con el análisis “*whole rock*” se procede en primer lugar con la eliminación de xenolitos y otras partes heterogéneas. En el caso de rocas porfídicas eliminamos aquellos minerales que no contienen K tal como olivino y piroxeno. Posteriormente se realizan otros tratamientos de laboratorio tales como trituración, lavado de partículas de polvo con Ar atmosférico, disolución de carbonatos por ácido acético y secado. La granulometría ideal para la datación es 0,1 mm.

Muestreo para dataciones de paleoactividad de fallas

Método analítico: método geocronológico K-Ar, Ar-Ar y U-Pb

Uso: El conocimiento de la edad absoluta del origen o de la reactivación de las estructuras de fallas es importante para:

- a) estudio de actividad sísmica
- b) reconstrucción de la evolución tectónica regional
- c) comprensión de la génesis de los yacimientos minerales vinculados a la deformación frágil
- d) aplicación en temas aplicados (p.e. análisis de riesgos geológicos, flujo de aguas subterráneas, propiedades geotécnicas del macizo rocoso)

Las fallas contienen a menudo un relleno mineral secundario cuyo origen está vinculado al flujo de soluciones hidrotermales o a la recristalización de las fases minerales originales. Acto seguido estos minerales de formación más reciente, crean sobre la superficie resbaladiza de la falla, agregados siguiendo una misma orientación (slickefibers).

Mediante el método potasio-argón (K-Ar) o argón-argón (Ar-Ar) y utilizando la separación de la illita autógena, es posible datar el enfriamiento o la cristalización dentro del abanico térmico 250°–350°.

Mediante el método uranio-plomo (U-Pb) y usando calcitas de origen hidrotermal u otros minerales carbonatados con altos contenidos de uranio se puede datar la actividad tectónica relacionada al origen del slickefibers de carbonatos de baja temperatura.

Tipo de muestra: illita autógena (K-Ar, Ar-Ar) obtenida de un proceso de separación previo o también, una sección

pulida de carbonato hidrotermal para el método U-Pb. Cantidad mínima de material: 2 gramos (en el caso de la Illita).

Toma de la muestra e información preliminar relevante: es necesario el análisis estructural detallado del terreno que presenta la deformación frágil para determinar la orientación y el ancho de la falla o fallas, las relaciones espaciales mutuas, el marco cinemático, los indicadores de reactivación polifásica de los movimientos tectónicos, la distancia del desplazamiento de los planos de falla, la identificación del relleno mineral secundario, etc.

Es importante utilizar herramientas y técnicas adecuadas para la toma de las fracciones de minerales: a) material compacto – taladro manual o pulidora de diamante; b) material friable – navaja pequeña o pinzas. Asimismo, determinar las partes idóneas para la toma de muestras. Se recomienda como mínimo 3 áreas diferentes de la falla con una orientación paralela a las estrías de falla y de los agregados minerales (slickenfibers) identificados.

Antes del análisis geocronológico es imprescindible identificar el tipo de mineral, usando un microscopio electrónico de barrido (SEM) o difracción de rayos X (XRD). Durante la toma hay que evitar la contaminación por los minerales adyacentes (especialmente feldespatos y muscovita).

Notas: los resultados de datación de la illita autógena están relacionados al tamaño del grano (o sea la fracción datada más gruesa a menudo equivale a la datación más remota). De ahí que durante la preparación de la muestra será necesario separar las fracciones según el tamaño, usando agua destilada o con el separador de partículas láser. Los minerales carbonatados se pueden datar con el método anterior U-Pb, si tienen un alto contenido de U ($\sim < 1$ hasta 10 ppm) y poco de Pb.

Muestreo para datación expositiva de las superficies con la ayuda de radionúclidos cosmogénico (TCN)

Método analítico: espectrometría de masas (AMS) con energías elevadas (> 3 MeV).

Uso: datación de superficies, es decir de la duración de la exposición con respecto al Sol (velocidad de denudación). El método Isotopo ^{10}Be es el más usual y se utiliza para rocas con edades entre los 40 ka y 3 Ma.

Tipo de muestra: los minerales idóneos para el método radionúclido cosmogénico ^{10}Be son el cuarzo, olivino, magnetita, plagioclasa, piroxeno; para el ^3He son olivino, piroxeno, anfíbol, granate; para ^{21}Ne el cuarzo, olivino, granate, plagioclasa; para el ^{26}Al el cuarzo y para el ^{36}Cl -K-feldespatos, la calcita, plagioclasa, clorita e inclusiones fluidas en el cuarzo.

Toma de la muestra e información preliminar relevante: Para el isotopo ^{10}Be la muestra más común es el cuarzo obtenido de las rocas cristalinas o de sedimentos siliciclásticos, eventualmente este mismo también sirve para el Isótopo ^{26}Al . Siempre tomamos las muestras de la capa superficial de la roca (aprox. 2 cm). Preferimos bloques fijos, los más grande posible, situados en una superficie plana donde no hay peligro de volcado o rotación. Las mejores superficies de la roca son aquellas que no son erosionadas durante su exposición al Sol – esto nos permite datar la denudación de la superficie. Hay que tener cuidado con el sombreado que produce el relieve con buzamiento de 30° ya que la producción disminuye en un 10%. En zanjas estrechas la producción de TCN se reduce $> 60\%$.

Tratamiento de la muestra: el cuarzo que es el mineral más común en la muestra (ej. en paleoterrazas) tiene una preparación simple debido a su abundancia y resistencia a la erosión química. Se toma los primeros 2 cm de la capa superficial de la roca.

El tratamiento posterior de la muestra comprende la trituration y la añadidura de soluciones químicas, ello se realiza en el laboratorio especializado en este tipo de dataciones.

Muestreo para el análisis mineralógico mediante difracción de rayos X

Método analítico: difracción de rayos X de polvos (DRX-P)

Uso: análisis mineralógico cualitativo y cuantitativo de cualquier muestra cristalina sólida como rocas, productos de alteración, granos de minerales seleccionados, minerales arcillosos, suelos, bentonitas, materias cristalinas sintéticas (cemento, lodos industriales). Además, se utiliza para determinar la estructura y característica cristalográfica de los minerales. La ventaja de utilizar este método en comparación con la microscopía y la microsonda consisten en su rapidez, precisión y precio.

Toma de la muestra: la cantidad óptima de la muestra corresponde a 3 gramos, sin embargo, para casos de análisis de minerales raros y escasos se puede manejar una cantidad de 0,01 gramos aproximadamente. En rocas de grano grueso hay que homogenizar y cuartear una cantidad superior a 3 gramos. Para un análisis mineralógico de minerales arcillosos, previamente seleccionados de la muestra de campo con fracción inferior a 2μ es necesario aproximadamente de 100–200g de muestra no molida.

Tratamiento de la muestra:

a) Las muestras de rocas y minerales se pulverizan en el pistilo de ágata con el mortero del mismo material mezclado con acetona hasta obtener la fracción de 10μ .

b) Los minerales arcillosos son separados a una fracción $<2\mu$ mediante la sedimentación en agua destilada. En caso de rocas muy compactas la desintegración de esta se realiza con la ayuda del ultrasonido.

Muestreo para datación por radiocarbono ^{14}C

Método analítico: medición convencional de radiocarbono con el método LSC (contador de centelleos de líquidos) o por espectrometría de masas.

Uso: en datación de cuerpos vegetales o animales a partir del momento de su muerte o inclusión de materia con presencia de CO_2 . La edad máxima para esta datación es de hasta 50 000 años.

Este método también se aprovecha en otros campos de la ciencia tales como geología, geografía, paleoecología, glaciología, arqueología e historia.

Tipo de muestra: madera, turba, sedimentos lacustres orgánicos, carbonatos, restos de plantas, carbón, conchas de moluscos, corales, burbujas de CO_2 en agua o en hielo, huesos, papel, tejidos, cuero y pigmentos.

Toma de la muestra e información preliminar relevante: Es importante saber que con este método no se data la edad de la sedimentación, se data la edad del material orgánico.

Para datar los sedimentos de un determinado estrato, resultan óptimas las conchas en posición vital, eventualmente películas de algas o cianofíceas sepultadas en lagos y capas veraniegas/otoñales (varvas) en sedimentos laminados (varvitas).

Hay que evitar la resedimentación del material analizado, cambios secundarios (rejuvenecimiento) de los procesos pedógenos y biológicos, así como remolinos de sedimentos friable por ondeo en el caso de sedimentos marinos y de lagos.

La muestra no puede ser tocada con la mano. Por lo que es necesario usar una bolsa plástica para tomar la

muestra y se debe cerrar inmediatamente.

Notas: la muestra no exige ningún tratamiento especial, conviene secarla después de la toma. Es importante evitar la contaminación por materia orgánica (p.e. por moho, herramientas de trabajo sucias, etc.) Es recomendable determinar el contenido de carbono orgánico (TOC) antes del análisis.

Muestreo de aguas subterráneas para datación del Freón (CFC)

Método analítico: cromatografía por gas de cantidades menores de freones disueltos en agua; un laboratorio especializado es imprescindible (p.e. USGS Reston Lab, USA/ University of Heidelberg, Germany/BGS Wallingford, UK; etc.)

Para identificar la edad de las aguas subterráneas se utilizan freón 11 (CFCl_3), freón 12 (CF_2Cl_2) y freón 113 ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$). El período de desintegración en la atmósfera corresponde para freón 11 al período de 45 ± 7 años, freón 12 al período de ± 17 años y para freón 113 al período de ± 32 años. La concentración de freones en la atmósfera empezó a subir después de 1940.

Uso: determinación del tiempo de demora (o sea del tiempo transcurrido entre el momento de infiltración del agua en el ambiente rocoso y su drenaje natural o artificial) de aguas subterráneas, edad límite de medición es hasta 60 años de antigüedad.

Tipo de muestra: solo agua subterránea no contaminada por precipitaciones.

Toma de la muestra e información preliminar relevante: proceder con el llenado de la botella de muestra, utilizando otros equipos auxiliares de llenado (manguera). Por otro lado, mantener en un recipiente plástico aproximadamente 15l de agua de la naciente. Una vez llena la botella de muestra, sumergirla en el recipiente plástico y taponarla firmemente para evitar el escape de los freones o contaminación con el aire u otros gases. El método del muestreo depende generalmente del laboratorio en dónde se realiza el análisis.

Tratamiento de la muestra: La muestra se debe tomar con recipientes especiales (habitualmente de vidrio), suministrados y limpios por el laboratorio encargado de realizar el análisis de la muestra.

Muestreo de agua para determinar edad y génesis con el uso de isótopo $\delta^{34}\text{S}$ en SO_4^{2-} , $\delta^{15}\text{N}$ en NO_3^- y NH_4^+ y $\delta^{13}\text{C}$ en DIC (HCO_3^-)

Método analítico: espectroscopia de plasma inducido por láser, espectrometría de masas.

Uso: identificación de procesos de movimiento de aguas especialmente aguas subterráneas, modelación del nacimiento de escorrentía superficial y subterráneas, contribuye a la realización de modelos hidráulicos y en la complementación de datos sobre los procesos y la química del subsuelo – origen de iones disueltos. También se usa para determinar el origen de contaminación de las aguas subterráneas, la contaminación potencial del agua subterránea inclusive la predicción del desarrollo de la expansión de la contaminación. Asimismo, para determinar la demora mediana (aprox. hasta 100 años) de agua subterránea por análisis de tritio (^3H) y establecer edades remotas de aguas subterráneas (centenares o decenas de miles de años) por carbono ^{14}C .

Tipo de muestra: aguas de precipitaciones, aguas superficiales, terreas, geotermales.

Toma de la muestra: se utiliza una botella de muestra de tipo HDPE (polietileno de alta densidad), con una tapa de buen ajuste. La botella de vidrio es menos práctica. El frasco debe de estar totalmente lleno de agua (sin aire alguno bajo la tapa). La cantidad mínima de muestra suele ser de 0,25–2l.

Descripción de la muestra: GPS, descripción hidrológica (caudal, superficie del lago, profundidad en el momento de la toma, estado de pluviómetro y condiciones meteorológicas) y la química medida in situ (al menos pH, T, conductividad).

Pluviómetros: construcción y ubicación según **IAEA**, la reducción de la evaporación se logra añadiendo una fina capa de aceite mineral dentro de la botella de recolección, la frecuencia de la toma de muestras correcta según el tipo de investigación es muy importante.

Tratamiento de la muestra: tratamiento de la muestra – filtración, uso de estabilizadores (HgCl_2) según las instrucciones del laboratorio.

Conclusiones

Una toma de muestra minuciosa y exacta para los análisis geocronológicos e isotópicos altamente sensibles es un requisito para una interpretación correcta de los datos obtenidos. Los conocimientos y procedimientos prácticos, reunidos por los especialistas del Servicio Geológico Checo durante la larga historia de la geoquímica isotópica y la geocronología en el seno de esta institución, debería servir sobre todo, a los estudiantes de las diferentes ramas de la geología en los países centroamericanos a fin de incrementar el potencial científico.

Agradecimientos:

Nos permitimos agradecer a: Janoušek V., Štípská P., Rapprich V., Verner K., Nývlt D., Laufek F., Čejková b., Kadlecová R, todos del Servicio Geológico Checo, por compartir sus conocimientos y experiencias en el muestreo para los distintos tipos de muestras utilizadas en los métodos arriba citados. De igual forma, hacemos extensivo nuestro agradecimiento a Alena Jurionová y Sofia Huapaya por colaborar en la traducción del documento.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



CZECH
GEOLOGICAL
SURVEY

Cincuenta años de cooperación del Servicio Geológico Checo con países de América Latina

Vladimír Žáček^a, Petr Mixa^{a*}

^aServicio Geológico Checo, Klárov 3 118 21 Praha, República Checa.

Abstract: The cooperation of the Czech Geological Survey (CGS) with Latinoamerican countries was realised from 1972; first in Ecuador, later in Cuba, Nicaragua, San Salvador, Costa Rica, Peru, Honduras, and Argentina. Main project “Geological mapping at 1:50,000 scale and assessment of natural risks in Central America”, was implemented between 1997–2009 in Nicaragua, San Salvador and Costa Rica. Several dozen geological and applied maps of 1:50 000 scale were processed, along with methodology implemented, and a number of scientific publications. The geologists of CGS mapped first the Somoto Grand Canyon in Nicaragua and also contributed significantly for the inclusion of the Río Coco Geopark into the UNESCO global network of geoparks. The CGS looks for continuation of the cooperation.

Palabras clave: Nicaragua, San Salvador, Costa Rica, Servicio Geológico Checo, cooperación .

Key words: Nicaragua, San Salvador, Costa Rica, Czech Geological Survey, cooperation.

Introducción

El Servicio Geológico Checo (SGC) existe desde el año 1919, es miembro de EuroGeoSurveys desde 2002, tiene aproximadamente 380 empleados (200 de ellos son geocientíficos) y sedes en las ciudades de Praga y Brno. En Praga se encuentran la sede central, laboratorios, centro de informática, centro de archivo y biblioteca; en Brno la oficina regional y el laboratorio de geoquímica orgánica. La misión del CGS es prestar servicios a una sociedad sostenible, basados en la ciencia: recopilar, asesorar y difundir información sobre geología, yacimientos minerales, aguas subterráneas y de riesgos naturales, igualmente proporcionar información geocientífica a las autoridades estatales y locales para la toma de decisiones, divulgación y aplicación de la geociencias.

Una de las actividades de importancia es la cooperación internacional que se realiza mediante el levantamiento geológico, estudios de recursos minerales y del agua subterránea, asesoría en gestión de riesgo y de impactos naturales, patrimonio geológico y otros proyectos científicos. Asimismo incluye la capacitación a estudiantes y geólogos. Los proyectos internacionales del SGC, desde ~1960, se han realizado en más de 30 países del mundo.

La cooperación con los países latinoamericanos se remonta a la década de los 70', destacando la expedición al Cotopaxi, que tuvo lugar en Ecuador en 1972 y que se publicó actualmente como un libro [1]. El mapa geológico del volcán a escala 1:50 000 aún se presenta en ese país como el primero de su tipo. Además en esa expedición se realizó el primer descenso al cráter de este volcán activo. El partner fue la Escuela Politécnica de Quito, representado por el vulcanólogo Minard Hall. Nueve años

*Autor para contacto: petr.mixa@geology.cz

después se realiza una nueva expedición para el mapeo del volcán Pichincha que amenazaba con hacer erupción, así mismo se realizó el reconocimiento de los volcanes remotos Sangay y Sumaco en el oriente del país. En los años 1977–1980 se realizó el mapeo geológico y geoquímico de la Cordillera del Escambray en Cuba. En los años 1980–1989, Jiří Jiránek y después Petr Hradecký trabajan como expertos en INETER (Nicaragua) en la investigación de los volcanes Mombacho y Cosigüina, y luego se estudia tefrocronología en y alrededor de Managua. Desde el año 1997 se realizó un nuevo proyecto de cooperación: “Mapeo geológico a escala 1:50 000 y asesoramiento de riesgos naturales en América Central (1997–2009)”, liderado por Petr Hradecký. El proyecto se realizó primero en Nicaragua (1997–2009), después en El Salvador (2003–2009) y en Costa Rica (2006–2009). Proyectos más pequeños se realizaron en Honduras, Perú y Argentina. La meta de este resumen es sumarizar resultados de esta cooperación y buscar una forma para la continuidad de estos.

Materiales y Metodología

La metodología de los trabajos en Latinoamérica incluyó trabajo de campo (levantamiento geológico y aplicado) realizado según la metodología utilizada en el SGC para los mapas 1:25 000, con modificaciones según las características geológicas de cada uno de estos países. Se utilizó imágenes aéreas y satelitales. Durante el trabajo de campo se recolectó muestras de rocas y de suelos para diversos tipos de análisis, láminas delgadas para petrografía (clásicas y pulidas para microsonda electrónica); muestras de rocas y muestras mineralizadas para geoquímica, geocronología, radiografía. También se tomaron muestras de agua, minerales pesados y “stream sediments” para determinar fuentes de mineralización y por último, pero no menos importante, muestras para macro y micropaleontología. A partir de métodos de campo se utilizaron medidas estructurales, medidas de susceptibilidad magnética de rocas con un cappametro portátil KT5. Las muestras fueron examinadas y analizadas principalmente en laboratorios SGC, la datación K-Ar se realizó en el laboratorio de ATOMKI en Debrecen, Hungría y la datación de circones con el método U/Pb en Bergen, Noruega. La metodología se amplía en las publicaciones citadas a continuación.

Resultados

En Nicaragua la cooperación se llevó a cabo con el INETER con el apoyo del Director General Claudio Gutiérrez Huete y el geofísico Wilfried Strauch. Los primeros estudios se desarrollaron en la cadena volcánica Nicaragüense: hojas Managua (1997), Granada y Masaya (1998), Chinandega y Casita (1999), León y La Paz (2000) y Apoyeque y Cosigüina (2001). En los años siguientes los trabajos continuaron al NO de Nicaragua con hojas Matagalpa (2002), Jinotega (2003), Somoto (2004), Ocotal (2005), Estelí (2006), Boaca, Santa Lucía y Sébaco (2007–2008) y Jalapa (2009). Los resultados fueron mapas geológicos a escala 1:50 000 y un gran número de mapas temáticos, principalmente de amenazas naturales, los mismos se encuentran en los archivos del INETER y del SGC. Posteriormente fué publicado el Mapa de la Cadena Volcánica Nicaragüense a escala 1:200 000 [2] y otras publicaciones científicas [3–14].

Probablemente el resultado de mayor impacto de la cooperación entre el SGC e el INETER fué el primer levantamiento geológico del Gran Cañón de Somoto, durante la construcción del mapa geológico de la hoja Somoto [15, 16] a escala 1:50 000, marzo del 2004. La información sobre el potencial geoturístico de este lugar fue de beneficio para las autoridades locales y para el turismo nacional e internacional. El cañón de Somoto se hizo popular en poco tiempo y experimentó un rápido desarrollo, razón por el cual fue declarado por ley como Monumento Nacional [14] en el 2006.

En el año 2017 se llevó a cabo una nueva cooperación con el Instituto de Geología y Geofísica IGG-CIGEO de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, en el marco del proyecto “Levantamiento geológico - Geoparque Río Coco”. El objetivo fue desarrollar la justificación geológica del formulario de la UNESCO para la inclusión de este Geoparque Nacional (el Cañón de Somoto como geositio principal), en la red mundial de geoparques de la UNESCO. Tomáš Hroch, Vladimír Žáček y Petr Hradecký participaron en este proyecto por parte del SGC. En Julio del 2019 se aprobó la designación del nuevo “Geoparque Río Coco” a la red mundial de geoparques UNESCO, como octavo geoparque mundial de este tipo en América Latina y primero en América Central. La geología del geoparque Río Coco se describe en el libro bilingüe inglés-español

“Geología del Geoparque Río Coco” elaborado con la participación del SGC y publicado por la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua [17] y en el mapa geológico adjunto 1:100 000 [18].

Los primeros contactos con El Salvador inician en el año 2002 durante el establecimiento del SNET. El director de Geología de ese entonces, Sr. Carlos Pullinger y el geólogo Walter Hernández fungieron como contraparte. En el 2003 se realizó el primer levantamiento en la zona de La Unión y el Golfo de Fonseca, para luego continuar en la provincia de Cuscatlán y en la zona de la ciudad de Metapán en la capital San Salvador. Los resultados nuevamente fueron mapas geológicos 1:50 000, mapas aplicados, especialmente mapas de amenazas naturales y una serie de publicaciones científicas [19–27].

En Costa Rica, los proyectos se ejecutarán entre los años 2006–2009. Petr Kycl dirigió el proyecto por parte del SGC. La contraparte fue la Dirección de Geología y Minas (DGM) del MINAE cuyo director en ese entonces fue el Sr. José Francisco Castro Muñoz y la subdirectora la Sra. Marlene Salazar. En el trabajo de campo participó la geóloga Sofía Huapaya. Valiosa información fué brindada por el Dr. Guillermo Alvarado y el geólogo Kenneth Bolaños quién formaba parte del equipo de la mina Bellavista. El área de mapeo se ubicó en en las faldas de los Montes del Aguacate y Cordillera de Tilarán, ubicadas en las provincias de Alajuela, Puntarenas y Guanacaste. El área de estudio cubrió alrededor de 1500 km² [28], publicándose tres hojas cartográficas a escala 1:50 000: Miramar, Chapernal y Juntas [29–31]). Los resultados incluyen también una colección de mapas aplicados (p. e. mapas de amenazas naturales y mapas de indicios de depósitos minerales) y varias publicaciones científicas [32–36]. La metodología utilizada por el SGC para el levantamiento geológico y elaboración cartográfica de mapas geológicos a escala 1:50 000, también ha contribuido al desarrollo de los estándares cartográficos actualmente utilizados por la DGM [37].

Conclusiones

En diciembre de 2021 el SGC publicó un libro llamado Geólogos Checos en América Central [38]), en el que participaron 20 autores. Este fue realizado en el idioma Checo y presenta las experiencias y anécdotas de los geólogos del SGC en Centroamérica y de su colaboración con geólogos de Nicaragua, El Salvador y Costa Rica. La cooperación de EuroGeoSurveys con ASGMI puede ser una plataforma adecuada para proyectos continuos en América Central. Las oportunidades potenciales de financiamiento se pueden encontrar en el Programa EUROCLIMA+.

Referencias bibliográficas

1. Zoubková, G. y Krůta, Z. (2018). Až na dno...Cotopaxi. Hasta el fondo...Cotopaxi (pp. 1–186). Praga, República Checa: *Publicación del Servicio Geológico Checo*. [título traducido].
2. Hradecký, P. y Šebesta, eds. (2007): Mapa de Cadena Volcánica Nicaragüense 1:200 000. Map of the Nicaraguan Volcanic Chain 1:200 000. Prague, Czech Republic: *Publication of the Czech Geological Survey*.
3. Hradecký, P. (2006). Tertiary ignimbrites in Central America: volcanological aspects and lithostratigraphical correlation proposal. *Krystalinikum* 31, 11–23.
4. Hrazdíra, P., Hradecký, P., Kycl, P., Žáček V., Mixa, P. y Ševčík, J. (2009). Trabajos hidrogeológicos of the SGC en Nicaragua [título traducido]. *Geoscience Reports* 245–247.
5. Hradecký, P. y Rapprich, V. (2008): Historical tephra-stratigraphy of the Cosigüina volcano (Western Nicaragua). *Revista Geológica de América Central* 38, 65–79.
6. Baroň, I., Hradecký, P., Baratoux, L. y Vorel, T. (2007). Geomorphic features and landforms analysis for geohazard assessment in El Salvador and Nicaragua, Central America. In: European Geosciences Union: *Geophys. Res. Abstr.* Volume 9.

Vienna, Austria.

7. Baroň, I., Novotný, R., Kernstocková, M., Buriánek, D., Hradecký, P., Havlíček, P. y Melichar, R. (2011). Palaeostress analysis of a giant Holocene rockslide near Boaco and Santa Lucia (Nicaragua, Central America). In Jaboyedoff, M.: Slope tectonics, 133–145. Geological Society London.
8. Janoušek, V., Erban, V., Holub, FV, Magna, T., Bellon, H., Mlčoch, B., Wiechert, U. y Rapprich, V. (2010). Geochemistry and genesis of behind-arc basaltic lavas from eastern Nicaragua. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 192, 3–4, 232–256.
9. Buriánek, D. y Dolníček, Z. (2011). Metamorphic evolution of the contact aureole of the Dipilto Batholith, Eastern Chortis Terrane, Nicaragua. *Journal of Geosciences* 56, 9–26.
10. Pásková, M. y Hradecký, P. (2014). Aspiring Geopark Rio Coco (Nicaragua). In Pásková M.: Conference Proceedings of 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2014, Geoconference on Ecology, Economics, Education and Legislation. Ecology and Environmental Protection, vol. II, 53–60. Albena, Bulgaria.
11. Buriánek, D. y Žáček, V. (2015). Compositional variations in tourmalines from peraluminous rocks of the Dipilto Granitic Batholith, Eastern Chortis Terrane, Nicaragua: tracers of magmatic to hydrothermal evolution. *Journal of Geosciences* 60, 73–94.
12. Žáček, V., Kycl, P., Hradecký, P., Ševčík, J., Metelka, V., Baroň, I. y Pécskay, Z. (2008). Gran Cañón de Somoto, Nicaragua – Fenómeno geológico de potencial turístico. En Colegio de geólogos, Dirección de geología y minas, San José, Costa Rica: Memoria: Programa y resúmenes, IX Congreso Geológico de América Central y VI Congreso geológico Nacional, 02–04 Julio, 2008, San José, Costa Rica, 201.
13. Žáček, V., Hradecký, P. y Kycl, P. (2016). Somoto Grand Canyon (Nicaragua) a volcanic geoheritage one decade after the discovery. In American Geosciences Institute: 35th International Geological Congress Abstracts, Paper 723. AGI, American Geosciences Institute. Cape Town.
14. Žáček, V., Hradecký, P., Kycl, P., Ševčík, J., Novotný, R. y Baroň, I. (2017). The Somoto Grand Canyon (Nicaragua) – a volcanic geoheritage site one decade after discovery: from field geological mapping to the promotion of a geopark. **Geoheritage** 9, 3, 299–309.
15. Novák, Z., Babůrek, J., Havlíček, P., Havlín, A., Hradecký, P., Kycl, P., Mlčoch, B., Přichystal, A., Šebesta, J., Ševčík, J., Žáček, V. y Alvarez, A. (2004). Estudio geológico de riesgos naturales en la zona de Somoto, Nicaragua, Informe Final (pp. 1–97). Servicio geológico Checo, INETER, Praga, Managua.
16. Žáček, V., Přichystal, A., Mlčoch, B. y Novák, Z. (2004). Mapa geológico del territorio de Somoto (Nicaragua) 1:50 000. Servicio Geológico Checo, INETER. Praha, Managua.
17. UNAN-Managua (2019). Geología del Geoparque Río Coco. – Instituto de Geología y Geofísica, ed. (pp.1–86). Managua.
18. Žáček, V., Hradecký, P., Hroch, T., Guarín, F. y Pérez, E. (2019). Mapa Geológico 1:100 000 Geoparque Río Coco: ANEXO 3 en UNAN-Managua (2019).
19. Rapprich, V. y Hradecký, P. (2005). The Cinotepeque Range of Central El Salvador: Geology, magma origin and volcanism. *Bulletin of Geosciences* 80, 4, 277–286.
20. Rapprich, V., Hernández, W. y Erban, V. (2006). Geology of Metapán volcanic field NW El Salvador. *Revista Geológica de América Central*, 33, 61–74.
21. Rapprich, V., Erban, V., Fárová, K., Kopačková, V., Bellon, H. y Hernández, W. (2010). Volcanic history of the Conchagua Peninsula (eastern El Salvador). *Journal of Geosciences* 55, 2, 95–112.
22. Baratoux, L., Hradecký, P., Kopačková, V. y Šebesta, J. (2006). Late Tertiary and Quaternary tectonic evolution of volcanic regions in the central El Salvador. *Krystalinikum* 31, 75–87.

23. Baroň, I., Kycl, P., Hradecký, P., Metelka, V., Vorel, T., Šebesta, J., Hernández, W., Chávez, G., Alvarez, A. y Huapaya, S. (2007). Identifying Areas Susceptible to Landsliding and other hazardous processes in El Salvador, Nicaragua and Costa Rica, Central America. In Schaefer VR, Schuster RL y Turner AK: 1st North American Landslide Conference. Conference Presentations. AEG Special Publication 23, 37–45. Association of Environmental & Engineering Geologists. Vail.
24. Chávez Hernández, JA, Šebesta, J., Valenta, J., Hernández, W. y Schroefel, J. (2012). Engineering Geology Mapping in the Southern Part of the Metropolitan Area of San Salvador. *Revista Geológica de América Central* 46, 161–178.
25. Chávez Hernández, JA, Šebesta J., Kopecký, L., López Landaverde, R. y Adalberto Landaverde, J. (2013). Unsaturated Volcanic Tephra and Its Effect for Soil Movement in El Salvador. *Earth Sciences* 2, 2, 58–65.
26. Chávez Hernández, JA, Šebesta, J., Kopecký, L. y López Landaverde, RA (2014). Application of geomorphologic knowledge for erosion hazard mapping. *Natural Hazards* 71, 3, 1323–1354.
27. Chávez Hernández JA, Lazecký, M., Šebesta, J. y Bakoň, M. (2020). Relation between surface dynamics and remote sensor InSAR results over the Metropolitan Area of San Salvador. *Natural Hazards* 103, 3, 3661–3682.
28. Kycl, P. ed. (2009): Estudio geológico de riesgos naturales en Central Costa Rica. – Informe Final, (pp. 1–240), DGM, Servicio Geológico Checo, San José, Praga.
29. Žáček, V., Vorel, T., Kycl, P. y Huapaya, S. (2010). Mapa geológico 1:50 000, hoja 3246-II Miramar, República de Costa Rica. Praga, República Checa: Publicación del Servicio Geológico Checo.
30. Žáček, V., Čech, S., Havlíček, P., Vorel, T., Dudíková Schulmannová, B., Kycl, P. y Huapaya, S. (2010). Mapa geológico 1:50 000, hoja 3246-III Chapernal, República de Costa Rica. Praga, República Checa: Publicación del Servicio Geológico Checo.
31. Žáček, V., Čech, S., Dudíková Schulmannová, B., Vorel, T., Kycl, P. y Huapaya, S. (2010). Mapa geológico 1:50 000, hoja 3246-IV Juntas, República de Costa Rica. Praga, República Checa: Publicación del Servicio Geológico Checo.
32. Dobeš, P., Mixa, P., Žáček, V., Lukeš, P. y Quintanilla, EM (2011). Epithermal gold mineralization in Costa Rica, Cordillera de Tilarán – mineralogy and fluid inclusions. *Berichte der Geologischen Bundesanstalt* 87, 64–65.
33. Mixa, P., Dobeš, P., Žáček, V., Lukeš, P. y Quintanilla, EM (2011). Epithermal gold mineralization in Costa Rica, Cordillera de Tilarán – exploration geochemistry and genesis of gold deposits. *Journal of Geosciences* 56, Spec. iss, 81–104.
34. Žáček, V., Janoušek, V., Ulloa, A., Košler, J., Huapaya, S., Mixa, P., Vondrovicová, L. y Alvarado, G. (2011). The Late Miocene Guacimal Pluton in the Cordillera de Tilarán, Costa Rica: its nature, age and petrogenesis. **Journal of Geosciences** 56, 1, 51–79.
35. Žáček, V., Vorel, T., Kycl, P., Huapaya, S., Mixa, P., Grygar, R., Havlíček, P., Čech, S., Hrazdára, P., Metelka, V., Ševčík, J. y Pécskay, Z. (2012). Geología y estratigrafía de la hoja 3246-II Miramar, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central* 47, 7–54.
36. Rojas-Barrantes, M., Huapaya-Rodríguez Parra, S., Solari, LA y Žáček, V. (2021). U-Pb geochronology of detrital zircons from San Carlos Basin, Costa Rica: evidence of Miocene volcanism and implications for the Precambrian and Paleozoic history of the Central American Isthmus. *Journal of South American Earth Sciences*, 110, 1–22.
37. Huapaya Rodríguez Parra, S. ed. (2017). Lineamientos y Estándares del Mapa Geológico de Costa Rica a escala 1:50 000 (pp. 1–110). Dirección de Geología y Minas, Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, Imprenta Nacional, San José, Costa Rica.
38. Hradecký, P. ed. (2021). Čeští geologové ve Střední Americe [Geólogos Checos en América Central] (pp. 1–263). Praga, República Checa: Publicación del Servicio Geológico Checo. [título traducido]



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Batimetría de alta resolución del flanco sureste de la cordillera del Coco y sus recursos minerales potenciales de fondo oceánico

Martín Rojas-Barrantes^{a*}, Lourdes Muñoz-Heredia^{b*}

^aDirección de Geología y Minas, San Francisco de Guadalupe, 10104-1000, Costa Rica.

^bInstituto Oceanográfico y Antártico de la Armada del Ecuador (INOCAR), vía Puerto Marítimo, 090208, Ecuador.

Abstract: High resolution bathymetry was acquired along the southern flank of the Cocos Ridge. The analysis suggests an extended terrace from the upper-slope of the continental shelf to the transform faults and the rift zones of Ecuador and Costa Rica. The morphotectonic features of high bathymetry thickened anomalous oceanic crust, Cocos Terrace, transformed faults and rift zones is the result of the Galapagos hot-spot and rift interaction. The low rate of biogenic sediment thicknesses in the area is typical of an active continental margin. These submarine geomorphological features of the continental shelf and active continental margin are proposed as a morphotectonic province extended from the highest bathymetric highs of Cocos Ridge to the ocean floor within the Costa Rica and Ecuador oceanic domains rifts and the Inca-Ecuador morphotectonic domains fractures. Potential minerals resources in the area are mainly polymetallic massive sulphides as well as ferromanganese crusts and manganese nodules.

Palabras clave: Batimetría, Cordillera del Coco, Terraza del Coco, centros de divergencia de Costa Rica-Ecuador, centro de divergencia de Galápagos.

Key words: Bathymetry, Cocos Ridge, Cocos Terrace, Costa Rica-Ecuador rifts, Galápagos rift.

Introducción

El área de investigación se ubica en el flanco sureste de la cordillera del Coco entre las cordilleras del Coco y Carnegie (fig.1). El levantamiento de datos batimétricos representa un esfuerzo conjunto entre las repúblicas de Costa Rica y el Ecuador con el objetivo de presentar ante la Comisión de Límite de Plataforma Continental de las Naciones Unidas (CLCS por sus siglas en inglés/CLPC por sus siglas en español) la definición de los límites exteriores de sus respectivas plataformas continentales más allá de las 200 M, a partir de las Islas Galápagos en Ecuador y de la Isla del Coco en Costa Rica (fig.1). Dicho trabajo requirió integrar los estudios técnicos científicos de geología, geofísica, geoquímica y geomorfología submarina con el objetivo de sustentar la prolongación natural del margen continental y definir la base del pie del talud continental (BOS/FOS puntos de máximo cambio de gradiente) contribuyentes al trazado del límite exterior de la plataforma continental. Esta integración involucró un alto grado de complejidad en el área de estudio, dado que dicha área se ubica al noreste del punto caliente de Galápagos, norte del centro de divergencia (CD) de Galápagos (zona de ruptura de las placas Coco-Nazca) y a lo largo de la estructura de fallas de transformación entre las placas oceánicas del Coco y de Nazca, tectónica que genera una geomorfología submarina compleja en una corteza oceánica geológicamente joven, asociado también con recursos minerales de fondo oceánico. De ahí la necesidad de levantamientos batimétricos de alta resolución realizados durante las expediciones hidrográficas de crucero ECCO a bordo del buque ecuatoriano B.A.E. ORION (figuras 1 y 2).

Las coberturas de batimetría multihaz realizadas durante las campañas ECCO (ECCO2A y Alfa), se ubican en el flanco sureste de la cordillera submarina del Coco y descienden gradualmente al sureste hacia el CD de Galápagos y el

*Autor para contacto: martinr@minae.go.cr & lourdes.munoz@inocar.mil.ec

límite de las placas del Coco y de Nazca (fracturas Inca y Ecuador) (figuras 1 y 2). La complejidad tectónica, geológica y geomorfológica de esta región hace necesario un análisis batimétrico de alta resolución y de calidad en el procesamiento de los datos sobre las irregularidades del fondo oceánico, aspecto considerado durante las campañas batimétricas. Investigaciones previas a partir de datos de altimetría satelital, datos de cruceros, perforaciones del fondo marino y perfiles sísmicos, definen dos áreas de mayor interés, ubicadas en los extremos noroeste y sureste de las líneas de levantamiento y orientadas de tal forma que permitieran determinar los posibles pies de talud (FOS) y la isóbata de 2500 m, necesarios para determinar la extensión de la plataforma continental según las Directrices Científicas y Técnicas de la CLCS/11.

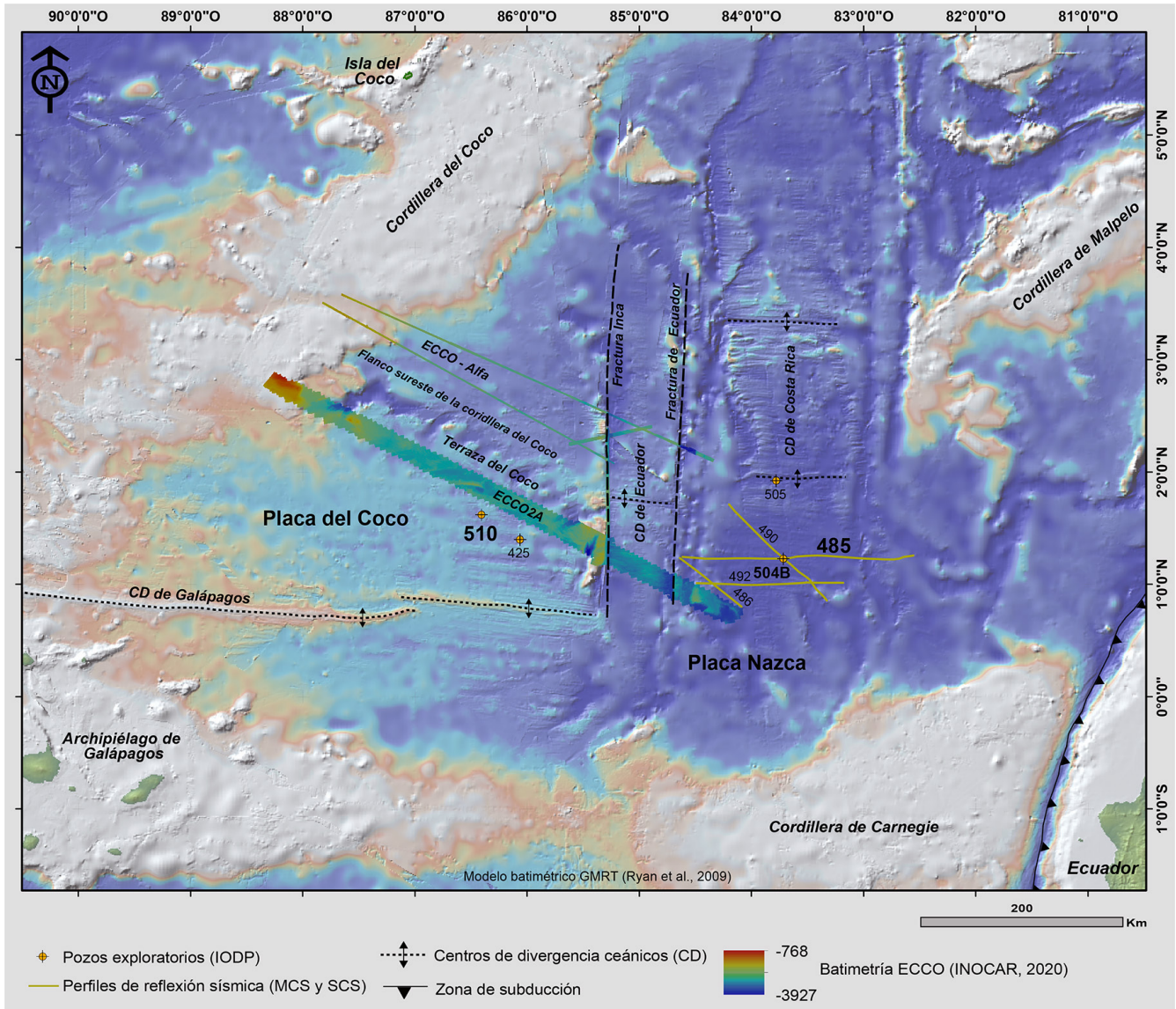


Figura 1. Ubicación regional de las áreas de levantamiento batimétrico ECCO (ECCO2A y ECCO-Alfa) con algunos de los principales rasgos batimétricos, geológicos, estructurales y otras fuentes de información de interés para el estudio (pozos 510 y 504B y línea sísmica 485). <https://www.gmrt.org/>.

Materiales y Metodología

El levantamiento de las superficies batimétricas se realizó a bordo del buque oceanográfico B.A.E. ORION del Instituto Oceanográfico de la Armada de Ecuador, utilizando una ecosonda multi-haz de aguas profundas EM-302, diseñada para ejecutar sondeos de hasta 7 km de profundidad y aperturas de 8 km. El sistema opera a una frecuencia de 30 kHz utilizando el programa Seafloor Information System (SIS por sus siglas en inglés) de la empresa noruega Kongsberg Maritime.

Batimetría en alta resolución

Se adquiere batimetría multihaz de alta resolución de 30 m sobre la cordillera del Coco, realizada en cuatro expediciones hidrográficas binacionales conjuntas denominadas ECCO2A y ECCO-Alfa durante los años 2017, 2019 y 2020 (Tabla 1 y figuras 1 y 2).

CAMPAÑAS HIDROGRÁFICAS CONJUNTAS ECUADOR – COSTA RICA EJECUTADAS EN LA CORDILLERA SUBMARINA DEL COCO POR EL BUQUE ECUATORIANO B.A.E. ORIÓN			
CAMPAÑAS	DÍAS DE EJECUCIÓN	AÑO DE EJECUCIÓN	ÁREA CUBIERTA Km ²
ECCO 2 A	14	2017	3.326,10
	29	2017	5.124,50
ALFA	13	2019	575,00
	08	2020	1.623,52

CORDILLERA SUBMARINA DEL COCO	# CAMPAÑAS EFECTUADAS	DÍAS DE LEVANTAMIENTO EFECTUADOS	ÁREA LEVANTADA (Km ²)
	4	64	10.649,12

Tabla 1. Datos generales de las expediciones de cruceo ECCO realizadas en el flanco sureste de la cordillera del Coco. Para detalles de ubicación ver figuras 1 y 2.

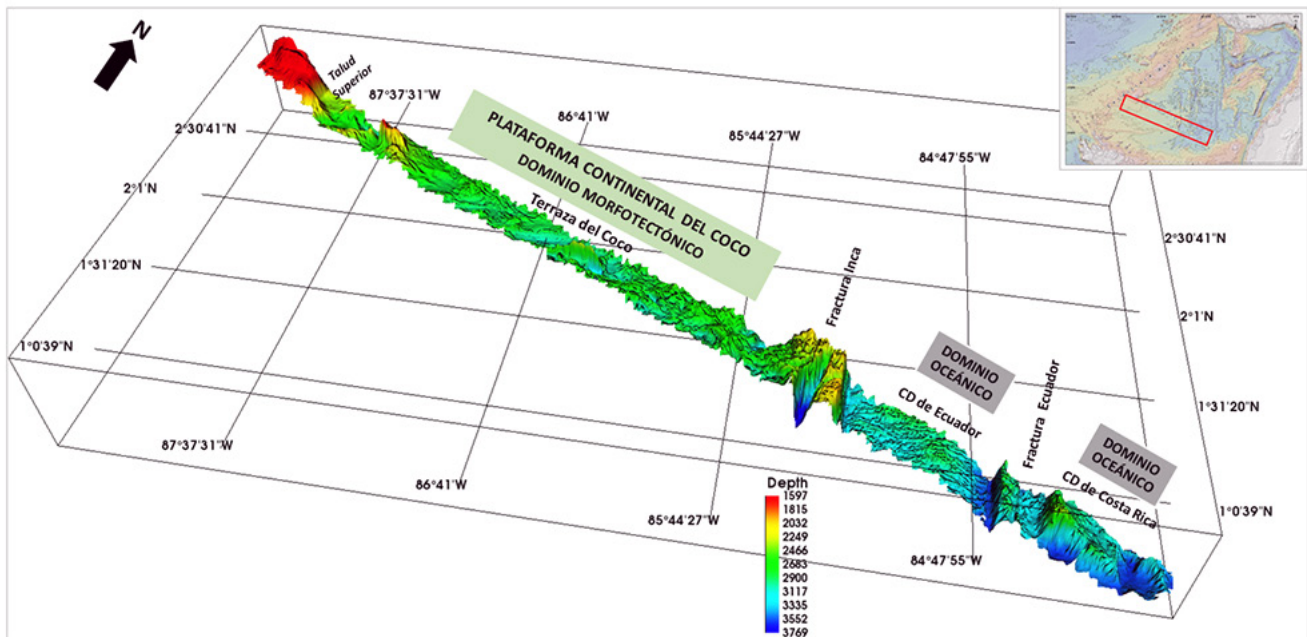


Figura. 2. Representación del talud batimétrico ECCO2A mostrando la superficie batimétrica y los elementos morfológicos y estructurales discutidos en el texto.

Retro-dispersión acústica

Un insumo obtenido durante el levantamiento de los datos batimétricos del fondo oceánico es el análisis de retro-dispersión acústica, el cual se basa en la signatura o marca acústica que presenta cada tipo de sedimento en función de la frecuencia de sonar utilizada. Este análisis permite observar diferentes niveles de retro-dispersión acústica en decibeles (dB), representado en escala de grises, donde los colores más claros (blancos) corresponden a la menor absorción (relacionados a roca expuesta) y los colores más oscuros (negros) a niveles de absorción más altos (asociados a sedimentos).

Pozos exploratorios

Datos geológicos de los pozos exploratorios 510 [1] y 504B [2] del Programa Internacional de Perforación del Fondo Oceánico (IODP por sus siglas en inglés) proporcionan información sobre el espesor de sedimentos y el basamento en las áreas cercanas a los levantamientos ECCO (fig.1). El pozo 510 fue perforado a 8 M del área ECCO2A con el objetivo de conocer las condiciones de perforación del fondo marino en este sitio alcanzando una profundidad máxima de 132 m. El pozo 504B penetró hasta la profundidad de 2111 m por debajo del fondo oceánico cuyo proceso de perforación se ejecutó en varias etapas entre 1979 y 1993 (Legs 69, 70, 83, 86, 91, 140 y 148).

Reflexión sísmica

Datos sísmicos obtenidos a partir de expediciones científicas de cruceros en el área [3], proporcionan información sobre el espesor de sedimentos y la presencia de estructuras de falla en ambos márgenes del centro de divergencia (CD) de Costa Rica al este de la fractura Ecuador (fig. 3). Las secciones sísmicas RC2606 correspondientes a las líneas 486, 492, 485 y 490 se muestran en la figura 1 y corresponden a perfiles de reflexión sísmica realizados en esta área de investigación (figura 3).

Prospección de sulfuros masivos

Se conocen como la combinación de sulfuros polimetálicos de alto contenido de cobre (calcopirita), hierro, zinc (blenda), plomo (galena), oro y plata con minerales de azufre. Se dan en ambientes tectónicos de dorsales oceánicas, rifts, parte posterior de arcos y montañas submarinas [4 y 5].

Prospección de nódulos polimetálicos de manganeso

Son concentraciones de óxido de manganeso y hierro con diámetros variables de pocos milímetros hasta decenas de centímetros con cantidades importantes de níquel, cobalto, cobre, zinc, plomo, plata y oro, trazas de platino, molibdeno y elementos tierras raras. Estos yacen semi-enterrados en el piso oceánico a profundidades entre 2500 y 5000 m. Se pueden dar en un ambiente sedimentario marino, depósito de origen hidrogenético y diagenético, en llanuras oceánicas, dorsales meso-oceánicas activas e inactivas, borde continental y piso oceánico profundo [4 y 5].

Corteza ferro-manganosa rica en cobalto

Se depositan como capas de corteza de varios milímetros hasta 20 cm de espesor directamente en el sustrato de las laderas de volcanes submarinos, cordilleras y mesetas (rocas limpias de sedimentos) durante millones de años, en forma de capas duras por lo que su extracción es más difícil que la de los nódulos. La corteza crece entre 1-6 mm/Ma y se pueden encontrar a profundidades entre 400 y 4000 metros, aunque las más gruesas se han determinado entre 800-2500 m ricas en cobalto. La presencia de corteza ferro-manganosa rica en cobalto en volcanes submarinos ha tenido interés como una fuente potencial de cobalto y níquel además de hierro y manganeso, cobre, zinc, molibdeno, bario, estroncio y cerio [4 y 5].

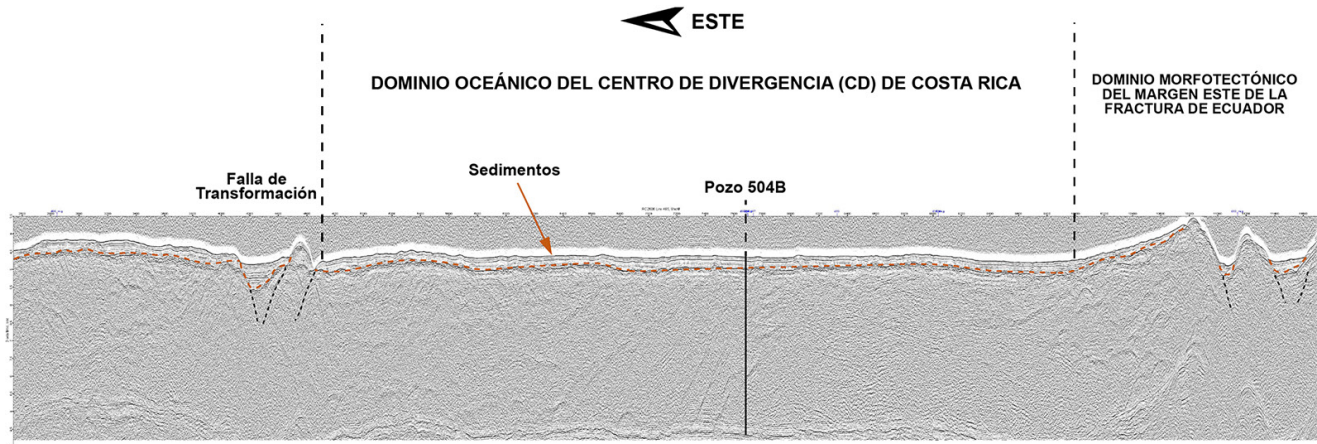


Figura 3. Perfil de reflexión sísmica (Línea 485, fig. 1). Se identifican tres dominios morfoestructurales: (1) margen este de la fractura Ecuador; (2) CD de Costa Rica; (3) falla de transformación. Se identifica la cobertura de sedimentos con espesores mayores a 200 m en contacto con los basaltos del fondo oceánico, así como la presencia de estructuras de fallas en el fondo oceánico en ambos extremos de la sección correspondientes a las fallas de transformación del límite Coco-Nazca (reflectores de alto ángulo). Se ubica también el pozo exploratorio 504B el cual reporta un espesor de sedimentos de 275 m.

Resultados y Análisis

Los datos batimétricos de baja resolución (altimetría satelital) y de alta resolución (expediciones ECCO) caracterizan el flanco sureste de la cordillera del Coco como una gran terraza submarina (denominada Terraza del Coco) (figura 2) que se extiende después del talud superior de la plataforma continental insular hasta las fallas de transformación (fracturas Inca y Ecuador) y las zonas de divergencia (CD) de Ecuador y Costa Rica (figs. 1 y 2). El sector norte del área ECCO2A (fig. 2) muestra tres rasgos morfológicos: (1) una serie de estructuras paralelas lineales remanentes con rumbo NE/SO que se interpretan como el resultado del vulcanismo submarino de la interacción del punto caliente y el CD de Galápagos; (2) una variación batimétrica desde los 766 m en la parte más somera hasta los 3857 m en la parte más profunda, interpretado como un engrosamiento anómalo de la corteza oceánica por el vulcanismo del punto caliente de Galápagos; (3) variaciones batimétricas que definen dos líneas de continuidad geomorfológica con variaciones entre los 766-2140 m (1374 m) y 2140-2827 m (687 metros). Estas variaciones en la batimetría con taludes y escarpes de alto ángulo ($>70^\circ$) con diferencias mayores a 1000 m se asocian a un régimen tectónico distensivo de fallas normales. Estas variaciones batimétricas por debajo de los 2750 m de profundidad marcan el cambio y el inicio de la Terraza del Coco según los argumentos previamente discutidos. Toda esta fisiografía submarina es el resultado de la interacción del punto caliente y el CD de Galápagos.

Los datos de retro-dispersión acústica sugieren la presencia de sedimentos en su mayoría de origen biogénico y la asociación de roca expuesta respecto a la cobertura de sedimentos. En márgenes activos como en el caso de estudio, la presencia de sedimentos no alcanza espesores considerables comparados con márgenes pasivos, debido a la dinámica y actividad geológica del vulcanismo submarino y la deriva de las placas oceánicas. Se reportan espesores de sedimentos entre 60 y 190 m [3 y 4].

Los datos del pozo 510 reporta un espesor de sedimentos no litificados de 111 m seguido por roca basáltica de fondo oceánico con un espesor perforado de 21 m. El pozo 504B (fig. 3) reporta un espesor de sedimentos de 275 m y un espesor del basamento oceánico de 1837 m constituido por basaltos de fondo oceánico de los cuales se reporta en la última etapa de 2000-2111 m (Leg 148) basaltos toleíticos de una fuente tipo MORB (fig. 2).

Los datos de reflexión sísmica proporcionan información sobre el espesor de sedimentos y la presencia de estructuras de falla en ambos márgenes del CD de Costa Rica al este de la fractura Ecuador (figura 3). En general muestran la presencia de sedimentos de poco espesor (reflectores horizontales y subhorizontales) que

cubren el basamento. En el CD de Costa Rica al este de la fractura de Ecuador, el espesor de sedimentos varía entre 200-300 m [3 y 4] (figura 3). El espesor de sedimentos hacia el área de la cordillera del Coco al oeste de las fracturas Inca y Ecuador, son menores en el rango de 60-190 m [1, 3 y 4]. Las estructuras de fallas (reflectores de alto ángulo) observadas en los extremos de las líneas sísmicas se asocian a las fallas de transformación del límite de las placas Coco-Nazca y las partes centrales del CD de Costa Rica (figs. 2 y 3). Esto se observa también en las características del relieve del fondo oceánico obtenidas con la batimetría de alta resolución del extremo sur de la ECCO2A y regionalmente con la batimetría de baja resolución GMRT [5] (figuras 1 y 2). La cordillera del Coco es producto del punto caliente de Galápagos afectada por fallas de transformación y además se sutura a un margen continental reciente al sur de Costa Rica. El área oeste de las fracturas Inca y Ecuador, denominado como la Terraza del Coco, y sus terminaciones en los centros de divergencia (CD) y fallas de transformación (fracturas Inca y Ecuador), sugiere que esta área pertenece al margen continental y no al fondo oceánico profundo (figuras 1 y 2). Los rasgos estructurales y batimétricos del sector este de las fracturas Inca y Ecuador representan el límite entre las placas del Coco y de Nazca, en tanto el sector oeste de dichas zonas de fractura representan la extensión de la plataforma continental insular (figuras 1 y 2). Toda esta información permite sustentar la hipótesis de que la plataforma continental insular se extiende hasta el área de las fracturas Inca y Ecuador. El sector este de estas fracturas definido como dominio morfotectónico del margen este de la fractura Ecuador y el dominio oceánico del CD de Costa Rica encierra la complejidad tectónica y morfológica de estructuras de rifts, dorsales y fallas de transformación en el límite entre las placas del Coco y de Nazca, diferente al sector oeste (figs. 1 y 2). Los bajos espesores de sedimentos, las estructuras de fallas en régimen distensivo (reflectores de alto ángulo), zonas de divergencia (dorsales y rifts) y fallas de transformación forman parte de una plataforma y un margen continental activo, como una gran provincia morfotectónica continua desde la cordillera del Coco hasta las fracturas Inca y Ecuador y el fondo oceánico un poco más profundo.

En la prospección de sulfuros masivos es importante valorar su presencia desde el CD de Galápagos y la cordillera submarina del Coco. Estos depósitos en dorsales oceánicas se forman a través de la circulación de agua oceánica a través de grietas de la corteza oceánica, donde el fluido hidrotermal percola y transporta metales de la roca madre a la superficie del fondo marino, a través de chimeneas a temperaturas de 350°C y profundidades de 2500 m, como montículos o vetas sub-superficiales. Dentro de las zonas de extensión de plataforma, tanto para Ecuador como Costa Rica existe posibilidad de tener prospectos de sulfuros polimetálicos, nódulos de manganeso y cortezas ferromanganesianas.

Conclusiones

La batimetría de alta resolución caracterizan el flanco sureste de la cordillera del Coco como una gran terraza (Terraza del Coco) extendida desde el talud superior de la plataforma continental insular hasta las fallas de transformación (fracturas Inca y Ecuador) y los centros de divergencia de Ecuador y Costa Rica. Los rasgos morfotectónicos de las fallas de transformación, centros de divergencia (CD), Terraza del Coco hasta la batimetría somera de engrosamiento anómalo de corteza oceánica con sus estructuras de falla alineadas, son el resultado de la interacción del punto caliente y el CD de Galápagos (zona de ruptura/dispersión de las placas Coco-Nazca). El espesor de sedimentos varía de 60-300 m típico de un margen continental activo. Los bajos espesores de sedimentos, las estructuras de fallas en régimen distensivo, centros de divergencia (CD) y fallas de transformación forman parte de una plataforma y margen continental activo sugerido como una gran provincia morfotectónica continua desde la parte más somera de la cordillera del Coco hasta el fondo oceánico. Esta provincia conforma los dominios oceánicos de los centros de divergencia de Costa Rica y Ecuador y morfotectónicos de las fracturas Inca y Ecuador (fallas de transformación) y el fondo oceánico. El potencial de recursos mineros asociados a esta provincia morfotectónica son principalmente sulfuros masivos polimetálicos de cobre, hierro, zinc, plomo, oro y plata, así como prospectos de cortezas ferro-manganosas y posibles nódulos de manganeso.

Referencias bibliográficas

1. Honnorez, J., Von Herzen, R. P., Barrett, T. J., Becker, K., Bender, M. L., Borella, P. E. y Amidei, R. (1983). Site 510. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 70: 163-180, doi:10.2973/dsdproc.70.106.1983.
2. Alt, J.C., Kinoshita, H., Stokking, L.B., et al. (1993). Proc. ODP, Init. Repts., 148: College Station, TX (Ocean Drilling Program), doi:10.2973/odp.proc.ir.148.1993. [Shipboard Scientific Party, 1993. Site 504. In Alt, J.C., Kinoshita, H., Stokking, L.B., et al., *Proceedings of Ocean Drilling Program, Initial Reports*, 148: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 27-121, doi:10.2973/odp.proc.ir.148.102.1993].
3. Recuperado de <http://www.geomapapp.org>
4. Goyes, P. (2009). Fondos Marinos de Soberanía y Jurisdicción del Ecuador (INOCAR). En: Jean-Yves Collot; Valenti Sallares & Nelson Pazmiño Eds. *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador, desde la costa continental hasta las Islas Galápagos*: PSE-001-2009.
5. Pazmiño, A. (2015). Taller Binacional, Preparación Técnica del Personal de Costa Rica, grupo de trabajo para la definición de los límites marítimos Ecuador – Costa Rica.
6. Laske, G., Masters, G., Ma, Z. y Pasyanos, M. (2013). Update on CRUST1.0 - A 1-Degree Global Model of Earth's Crust. *Geophysical Research Abstracts*, 15, Abstract EGU2013-2658. A handout of the 2013 EGU. <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.html>.
7. Ryan, W. B. F., Carbotte, S.M., Coplan, J., O'Hara, S., Melkonian, A., Arko, R., Weissel, R.A., Ferrini, V., Goodwillie, A., Nitsche, F., Bonczkowski, J. y Zemsky, R. (2009). Global Multi-Resolution Topography (GMRT) synthesis data set, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10, Q03014, doi:10.1029/2008GC002332,
8. Degree Global Model of Earth's Crust. *Geophysical Research Abstracts*



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Revisión estratigráfica de las formaciones Río Banano y Uscari, Cuenca Limón Sur, Costa Rica

Martín Rojas-Barrantes^{a*}, Ana Sofía Huapaya^a, Evelyn Rodríguez Coto^a,
 Luis David Jara Díaz^a, German González Marín^a

El trabajo de cartografía geológica que realiza la Dirección de Geología y Minas en la región Caribe de Costa Rica (hojas San Andrés, Cahuita, Amubri y Sixaola) a escala 1:50000 ha permitido la revisión de la estratigrafía de las formaciones Río Banano y Uscari.

Se realizó el muestreo en sedimentos clásticos (areniscas y limolitas) para el estudio de micropaleontología y petrografía con el fin de comprobar la estratigrafía sedimentaria del área. Se hizo el reconocimiento de los afloramientos con el propósito de cotejar las diferentes facies y ambientes sedimentarios relacionados con las formaciones Uscari y Río Banano. Para el análisis de foraminíferos plantónicos y bentónicos, nanoplancton calcáreo, palinología y petrografía se utilizaron nueve muestras de la cuenca de Limón Sur. A su vez, se revisó y analizó la información de los estudios realizados por la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) referente a la exploración de hidrocarburos durante las décadas de los 50s hasta los 90s (geología, geofísica y pozos), así como otros trabajos.

Los resultados sugieren una edad del Mioceno Tardío al Plioceno Temprano para ambas formaciones. Según las características sedimentológicas, tres de las muestras son atribuibles a la Formación Uscari.

La sedimentación se relaciona a un paleoambiente nerítico inferior hasta poco profundo asociados a la plataforma continental, surgencia costera y cercanos a la costa con aporte continental y distancias entre 5 y 15 km desde la línea de costa.

Por último, se evidencia el diacronismo de las formaciones Río Banano y Uscari el cual parece ser más evidente hacia el exterior de la plataforma continental relacionado en parte al proceso de regresión y transgresión marina (cambios eustáticos) y fenómenos tectónicos de levantamiento cortical y de subsidencia local.

*Autor para contacto: martinr@minae.go.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Losas piloteadas (Piled Raft) y su reciente aplicación en Costa Rica como una solución más óptima para la cimentación de edificios altos

Julio C. Duarte Fernández^{a*}, Karen Calderón Zayas^a, Luis A. Vargas Herrera^a, Mauricio Coto Loría^a

^aMYV Soluciones Geotécnicas, Costa Rica.

En los últimos diez años se ha dado un incremento notorio en la cantidad de desarrollos inmobiliarios con torres de oficinas o apartamentos de más de veinte niveles. Este desarrollo se ha dado principalmente en el sector de Rohrmoser, donde predominan suelos de origen volcánico (tobas) de consistencia heterogénea, pero que debido a la magnitud de las cargas requeridas por este tipo de estructuras, no es viable utilizar cimentación directa (placas o losa de fundación), y lo que se ha hecho tradicionalmente es optar por una cimentación profunda con pilotes preexcavados diseñados para transmitir las cargas a una capa portante localizada a mayor profundidad, despreciando la capacidad de soporte que puedan aportar los suelos más superficiales.

Una losa piloteada (Piled Raft) es un tipo de cimentación híbrida que combina ambos sistemas (losa de fundación y pilotes), esto permite aprovechar la capacidad portante que tienen los suelos superficiales y compensar la falta de capacidad usando pilotes ubicados en puntos estratégicos de la losa, lo cual optimiza de forma sustancial los costos de la cimentación para este tipo de estructuras.

Debido a la complejidad que implica el diseño de este tipo de cimentación, se debe hacer un análisis que considere la interacción suelo-estructura, lo cual se hace mediante un modelado con elementos finitos que integre la información estructural (cargas y planta de distribución) y la información geotécnica, para lo cual se lleva a cabo una exploración con dilatómetro Marchetti (DMT) y presiometría (Texam PMT) para caracterizar las tobas superficiales y los lahares respectivamente.

El modelo de elementos finitos permite analizar la deformabilidad (asentamientos) y establecer la geometría, longitud y magnitud de las fuerzas internas que experimentan los elementos estructurales (losa de fundación y pilotes) para las diferentes combinaciones de carga establecidas en el Código de Cimentaciones de Costa Rica. En los proyectos donde se logró implementar el uso de la losa piloteada, se comprobó un ahorro de hasta el 50% en los costos financieros de la cimentación.

*Autor para contacto: jcduarte@myv-sg.com



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Implementación del Dilatómetro Marchetti (DMT) en la caracterización y solución de deslizamientos en proyectos constructivos

Julio César Duarte Fernández ^{a,*}

^aMYV Soluciones Geotécnicas, Costa Rica.

Los deslizamientos suelen ser uno de los principales problemas geotécnicos con los que deben lidiar los desarrolladores durante las diferentes etapas constructivas de un proyecto. Cuando la magnitud de estos deslizamientos implica la afectación de estructuras o terrenos vecinos el problema se hace más grave, y es necesario llevar a cabo obras de estabilización tanto temporales como definitivas que recuperen las condiciones del terreno, impactando negativamente el financiamiento y los tiempos de entrega del proyecto. Para diseñar las obras de estabilización de los terrenos afectados lo primero que se debe hacer es tener clara la geometría de la superficie de ruptura y estimar los parámetros geomecánicos de las diferentes litologías. Las herramientas tradicionales de investigación geotécnica, como el SPT tienen muchas limitaciones respecto a la caracterización mecánica de los materiales.

Debido a la necesidad de contar con herramientas de investigación geotécnica más avanzadas y con mejores aplicaciones, en el 2006 se introdujo al país el dilatómetro de Marchetti (DMT, ASTM D6635), el cual consiste en una paleta plana que posee una membrana metálica, esta paleta se introduce en el terreno utilizando empuje hidráulico. Cada 20 cm se detiene la penetración, y se expande la membrana de la paleta con gas nitrógeno a presión, de este procedimiento se toman lecturas de deformación y presión. Esto permite generar un perfil del terreno con parámetros de deformabilidad y conocer la condición de esfuerzos tensionales del terreno para estimar la ubicación de la superficie de ruptura y modelar su geometría, además como se cuenta con parámetros de deformabilidad (módulos de elasticidad), se pueden calibrar modelos constitutivos elásticos o elasto-plásticos, con los cuales alimentar programas para el análisis con elementos finitos.

Una vez integrada la información geotécnica a los modelos de elementos finitos, es posible diseñar obras de estabilización y recuperación del terreno, que han demostrado ser eficientes desde el punto de vista financiero y de seguridad, ya que la calidad de la información con que se cuenta permite optimizar el diseño y los costos constructivos asociados.

*Autor para contacto: jcduarte@myv-sg.com



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022

TCU
 Trabajo Comunal
 Universitario



Estudio de suelos para la construcción del Museo de La Casa del Boyero, Venecia, San Carlos, Alajuela, Costa Rica: dificultades al explorar suelos compuestos de bloques en matriz fina

Rolando Mora Chinchilla^{a*}

^aTrabajo Comunal Universitario, Universidad de Costa Rica.

Abstract: A study of soils was done to determine the geotechnical conditions in depth in the site where the construction of the Museo de la Casa del Boyero is planned. For this study, six dynamic penetration soundings (DPM) were carried out to determine the stratigraphy of soils in the field and the determination of the bearing capacity, as well as two tests of saturated hydraulic conductivity of the soil. With the results obtained, the consistency of the materials and the bearing capacity were interpreted, with which conceptual geotechnical models were generated throughout the study site and the admissible bearing capacity and the optimal foundation depth were calculated. In addition, the hydraulic conductivity of the soils was established and pertinent recommendations and conclusions were issued. The study provides an interpretation of the admissible bearing capacity of soils composed of rock blocks immersed in a matrix of fine grain size, through the application of curves of minimum to the results of the calculation of the dynamic resistance of the materials.

Palabras clave: sondeos dinámicos, estratigrafía de suelos, capacidad de soporte, modelos geotécnicos, cimentaciones.

Key words: dynamic soundings, soil stratigraphy, bearing capacity, geotechnical models, foundations.

Introducción

Se ha ejecutado un estudio de suelos para determinar las condiciones geotécnicas en profundidad en el sitio donde se planea la construcción del Museo de la Casa del Boyero. Para este estudio se realizaron seis sondeos de penetración dinámica (DPM) para la determinación de la estratigrafía de suelos en el terreno y la determinación de la capacidad de soporte del medio, así como dos ensayos de conductividad hidráulica saturada del suelo.

Con los resultados obtenidos se interpretó la consistencia de los materiales y la capacidad de carga admisible, con los que se generaron modelos geotécnicos conceptuales a lo largo del sitio de estudio y se calculó la capacidad de carga admisible y la profundidad de cimentación óptima, también se determinó la conductividad hidráulica de los suelos, además de emitirse las recomendaciones y conclusiones pertinentes.

*Autor para contacto: rmorach@gmail.com

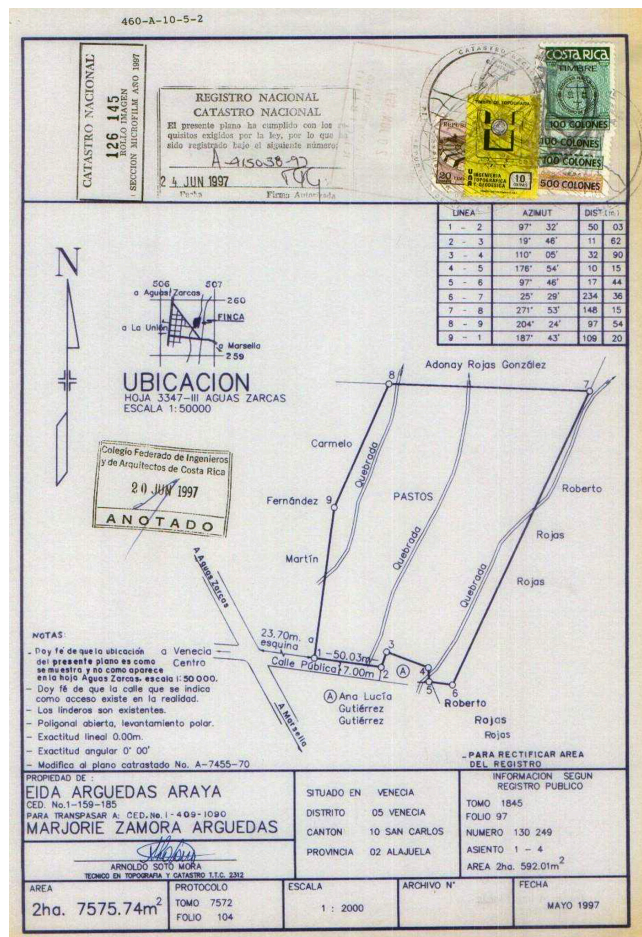


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

El terreno de estudio se ubica en el distrito Venecia, en el cantón de San Carlos de la provincia de Alajuela. Específicamente se ubica en las coordenadas métricas CRTM05 470362.68E/1144999.78N y cuenta con el Plano Catastral A-415038-97 (figura 1).

El terreno presenta una pendiente levemente inclinada hacia el N-NE y se encuentra limitado por dos quebradas en sus costados. La influencia de estas corrientes fluviales ha desarrollado los depósitos de suelos, los cuales se presentan como suelos del tipo bloques en matriz de grano fino. Esta condición establece serias dificultades para realizar perforaciones dinámicas e incluso movimientos de tierras.

El sitio fue rellenado parcialmente mediante movimientos de tierras, además, se localiza en un área de influencia aluvial, particularmente se asienta sobre depósitos sedimentarios no consolidados como aluviones, flujos de detritos y lahares de edad Holoceno, los cuales se interdigitan o son cubiertos por flujos de cenizas volcánicas. En la figura 2 se presenta la ubicación de los ensayos de campo en el área de estudio.



Figura 2. Ubicación de los ensayos de campo en el área de estudio.

Sondeos de penetración dinámica

En la figura 3 se presentan los resultados en términos de la Capacidad de Carga Admisible en kPa y en función de la profundidad para los seis ensayos de perforación dinámica ejecutados en la propiedad. En todos los sondeos se aprecia un comportamiento característico de los depósitos aluviales, donde el equipo de penetración muestra “picos” de capacidad de soporte, los cuales corresponden con bloques de roca de diferentes tamaños. Luego de atravesar los bloques la capacidad de soporte baja considerablemente, reflejando el comportamiento de la matriz fina en que están inmersos los bloques de roca.

Debido al comportamiento descrito anteriormente, se ha utilizado la metodología de ajustar una curva de capacidad de soporte de mínimos encontrados en cada perforación (línea roja) (figura 5), esto con el objetivo de evitar considerar la resistencia de los bloques y únicamente concentrarse en la capacidad de carga de las matriz que los contiene.

A partir de los resultados de los resultados de las perforaciones se identificaron los posibles límites de capa

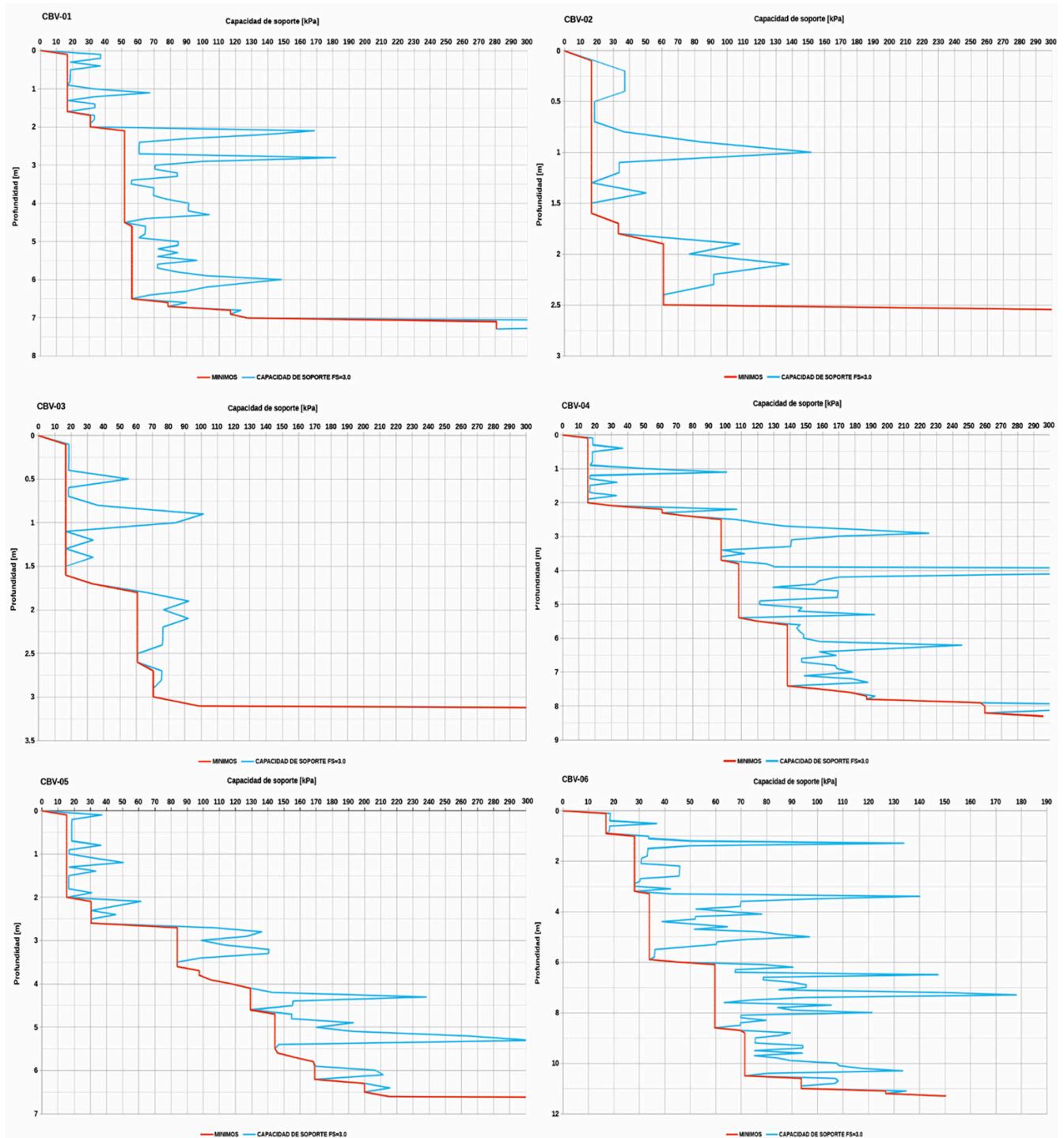


Figura 3. Resultados de los sondeos de penetración dinámica en el área de estudio.

con el método de varianzas propuesto por Mora [1]. A partir de los resultados de este método y utilizando criterio profesional, se definieron las capas de suelo tal y como se resumen en el Cuadro 1, donde se incluyen algunas propiedades geotécnicas, basadas en correlaciones empíricas a partir del valor de NSPT calculado para cada sondeo.

Utilizando los límites de capa definidos en el apartado anterior, se determina la consistencia de los materiales en profundidad de acuerdo al criterio de la Asociación Italiana de Geotecnia [2]. En la figura 4 se presenta el

Cuadro 1. Resumen de los parámetros geotécnicos de las capas de suelo.

Estrato	Espesor (m)	N _{SPT60}	Peso unitario húmedo (kN/m ³)	Peso unitario saturado (kN/m ³)	Cohesión no drenada c _u (kPa)	Módulo Young (MPa)	Velocidad ondas de corte (m/s)
1 Relleno heterogéneo sin consistencia	~ 6,0	2	15,3	18,1		< 2,0	< 95,3
2 Suelo orgánico sin consistencia	0,8-2,0	0-1	14,5-18,0	14,5-18,0	4.18	< 1,0	< 73,0
3 Arcilla poco consistente	0,2-2,9	3-4	16,0-18,3	16,0-18,3	6.2 a 9.2	2,9-3,9	98,0-124,4
4 Arcillas y arcillas limosas moderadamente consistentes	0,1-2,8	5-7	17,3-18,5	18,4-18,6	6.2 a 11.2	4,9-6,9	107,0-146,7
5 Limos y limos arcillosos consistentes	0,3-1.1	9-13	19,3-21,3	20,9-22,0	16,0 a 19.2	8,8-12,8	134,6-149,7

modelo geotécnico conceptual de consistencia de suelos de acuerdo a los resultados obtenidos en las seis perforaciones dinámicas DPM, el mismo en una perspectiva en 3D para aclarar la distribución estratigráfica de los materiales.

Los suelos orgánicos sin consistencia y el relleno heterogéneo sin consistencia, se han representado en una sola capa superior, la cual presenta propiedades no aptas para su utilización como medio soportante. Es notorio el aumento de espesor de esta capa en la perforación CBV-06, donde alcanza 6.0 m de espesor. Una vez superada la capa carente de consistencia, las condiciones geotécnicas mejoran con el incremento de la profundidad de los sondeos, los cuales no han podido atravesar la capa de bloques de roca métricos.

A partir de este modelo conceptual se interpreta una secuencia geotécnica compleja, debido a una variación de la consistencia de los materiales en profundidad, a cambios en el espesor de las capas y acñamientos de las mismas. De acuerdo con este modelo conceptual geotécnico es recomendable la remoción de la capa superficial sin consistencia, utilizar las capas más profundas como medio soportante y minimizar la transmisión de cargas en la capa poco consistente.

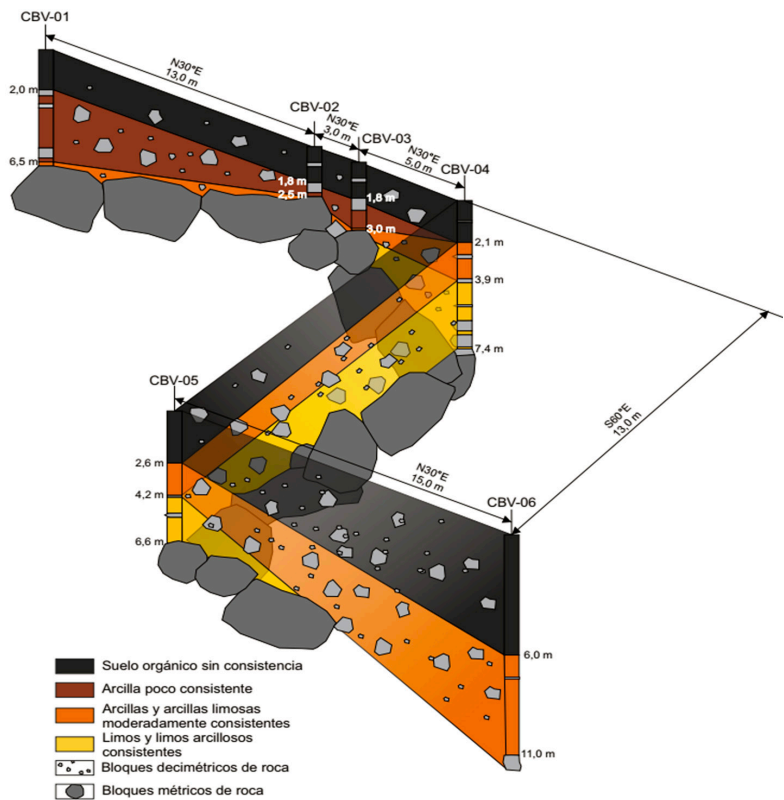


Figura 4. Modelo geotécnico conceptual 3D de consistencia de los suelos

Capacidad de soporte de los suelos

A partir de la resistencia a la penetración en los sondeos DPM, se realizó el cálculo de la capacidad de carga admisible en los estratos con un factor de seguridad de 3,0, y utilizando los postulados de L’Herminier [3] por medio del software Dynamic Probing de Geostru. Dicho calculo supone una cimentación superficial cuadrada de 1,0 m de ancho y largo, con un desplante de 1,0 m. Se han utilizado principios estratigráficos para la correlación de los resultados y así construir los perfiles geotécnicos conceptuales de capacidad de carga admisible para los suelos por debajo del sitio del proyecto (figura 5).

Adicionalmente, en la figura 5 se muestra la profundidad de remoción del material de capacidad de carga admisible baja, así como, el desplante para la ubicación de las fundaciones. En este caso se recomienda seguir esas indicaciones para contar con una capacidad de carga admisible superior a 50 kPa y reducir al máximo los asentamientos que se puedan desarrollar debido al peso de la estructura.

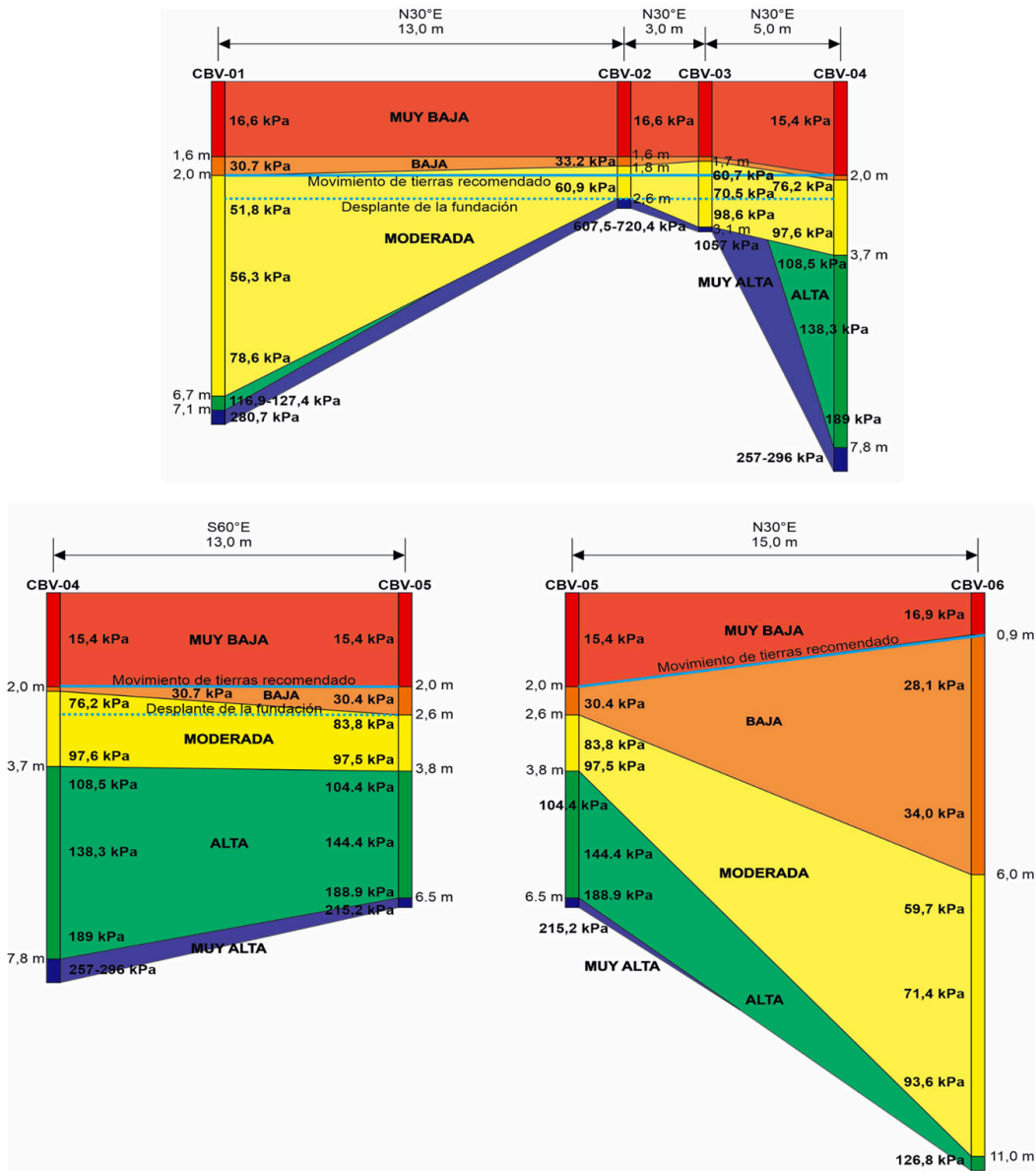


Figura 5. Resultados del cálculo de la capacidad de carga admisible con factor de seguridad de 3,0 en los tres perfiles del área de estudio.

A partir de la perforación CBV-05 y en dirección N30°E, el espesor de material con capacidad de carga admisible inferior a 50 kPa aumenta considerablemente, debido a esta situación no se recomienda la utilización de este sector de la propiedad para el desarrollo de la obra. En la figura 8 se expone el área recomendada para el desarrollo de la obra, tomando en consideración la capacidad de carga admisible de los estratos encontrados en el sector estudiado.

Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica saturada de campo para la capa superficial varía en un rango de $4,41 \cdot 10^{-5}$ m/s a $8,43 \cdot 10^{-5}$ m/s, calculado para cargas hidrostáticas de 10 a 20 cm y mediante el uso del permeámetro Guelph. Estos valores indican un suelo poco permeable, con características de drenaje pobres, lo cual es característico de su textura arcillosa. En estas condiciones una lámina de agua de 2,54 cm tardaría 2.8 a 3.0 minutos en infiltrarse.



Figura 6. Sector de la propiedad recomendado para desarrollo.

Conclusiones y recomendaciones

Debido a la influencia de las corrientes fluviales cercanas a la propiedad se han desarrollado depósitos de suelos del tipo bloques en matriz de grano fino. Esta condición establece serias dificultades para realizar perforaciones dinámicas e incluso movimientos de tierras.

En todos los sondeos dinámicos realizados se aprecia un comportamiento característico de depósitos aluviales, donde el equipo de penetración muestra “picos” de capacidad de soporte, los cuales corresponden con bloques de roca de diferentes tamaños. Luego de atravesar los bloques la capacidad de soporte baja considerablemente, reflejando el comportamiento de la matriz fina en que están inmersos los bloques de roca.

Los suelos orgánicos sin consistencia y el relleno heterogéneo sin consistencia presentan propiedades no aptas para su utilización como medio soportante y es notorio el aumento de espesor de esta capa en la perforación

CBV-06, donde alcanza 6.0 m de espesor. Una vez superada la capa carente de consistencia, las condiciones geotécnicas mejoran con el incremento de la profundidad de los sondeos, los cuales no han podido atravesar la capa de bloques de roca métricos.

De acuerdo con el modelo conceptual geotécnico es recomendable la remoción de la capa superficial sin consistencia, utilizar las capas más profundas como medio soportante y minimizar la transmisión de cargas en la capa poco consistente.

Se han construido perfiles geotécnicos conceptuales de capacidad de carga admisible para los suelos por debajo del sitio del proyecto. En estos perfiles se muestra la profundidad de remoción del material de capacidad de carga admisible baja, así como, el desplante para la ubicación de las fundaciones. En este caso se recomienda seguir esas indicaciones para contar con una capacidad de carga admisible superior a 50 kPa y reducir al máximo los asentamientos que se puedan desarrollar debido al peso de la estructura

A partir de la perforación CBV-05 y en dirección N30°E, el espesor de material con capacidad de carga admisible inferior a 50 kPa aumenta considerablemente, debido a esta situación no se recomienda la utilización de este sector de la propiedad para el desarrollo de la obra. En la figura 8 se expone el área recomendada para el desarrollo de la obra, tomando en consideración la capacidad de carga admisible de los estratos encontrados en el sector estudiado.

Se ha encontrado un suelo superficial poco permeable, con características de drenaje pobres, lo cual es característico de su textura arcillosa. En estas condiciones una lámina de agua de 2,54 cm tardaría 2.8 a 3.0 minutos en infiltrarse.

Referencias bibliográficas

1. Mora, R. (2013). Uso de métodos estadísticos para la determinación de capas homogéneas de suelos volcánicos en un sitio en las laderas del Volcán Irazú, Cartago, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 49, 101-108.
2. Associazione Geotecnica Italiana, AGI. (1977). Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche. 96 pp. Italian National Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering and for Rock Mechanics, Rome.
3. L'Herminier, R., Habib, P., Tcheng, Y. y Bernede, J. (1961). Foundations superficilles. *Proceedings Fifth international Conference in Soil Mechanics Foundation Engineering*. I: 713-717.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Monitoreo de humedad en sectores críticos del Área Metropolitana de San Salvador para mejora de comportamiento y diseño de taludes

José Alexander Chávez^a*, Mauricio Vásquez^a, Efraín Alas^a

^aOficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, San Salvador, El Salvador

Abstract: Monitoring in the Metropolitan Area of San Salvador has continue using dielectric equipment to measure moisture and its relation with rains. An experimental field of slopes has been implemented from 2016-2018 to propose improvement on slope management observing that the slopes that showed the best behavior had 20° on top of the slope and 45° and 90° on the face of slope with a capillary barrier losing humidity relatively quickly. Also, since 2020 monitoring in risky areas for mass movements and erosion has begun. It was observed the importance of the location, sun, vegetation (roots), topography, slope, percentage of moisture and rainy season with the behavior and stability of the slopes.

Palabras clave: Talud, Tierra Blanca Joven, dieléctrico, TDT, monitoreo.

Key words: Slope, Tierra Blanca Joven, dielectric, TDT, monitoring.

Introducción

Se ha continuado en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) el esfuerzo de monitoreo de Chavez et al. (2016)[1] para correlacionar lluvia con humedad y conocer el comportamiento de la humedad de los estratos superficiales con las lluvias en sectores de riesgo por movimientos de ladera y erosión, con la idea de dar criterios de mitigación, alerta temprana y diseño geotécnico.

La cobertura de tefras por ser muy reciente muestra inestabilidad y esto provoca problemas de manera recurrente. Este esfuerzo se enmarca dentro de proyecto “Gestión de Riesgos y Disminución de Vulnerabilidad Social en el AMSS” fase II, financiado por la Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AACID). El monitoreo de campo hecho en diferentes taludes con diferente cobertura e inclinación puede ayudar a tener información de diseños más adecuados de cobertura (barreras capilares) y para estabilidad de taludes entre otros. Esta información es importante para proponer métodos de diseño más adecuados y que pueden ayudar a validar los modelos de diseño. El equipo usado es un dispositivo dieléctrico instalado en los taludes, el equipo está basado en el principio de Transmisión de Dominio de Tiempo (TDT) para conocer comportamiento de las tefras ante las lluvias. Se hizo un campo experimental para comprobar como el cambio de pendiente en la corona de talud puede evitar saturación y disminuir los problemas de inestabilidad. Lo que se ha visto es que aspectos como la topografía, raíces, costras de suelo biológicas (mezcla compleja de suelo, musgos, algas, líquen, micro-hongos y otras bacterias), granulometría y succión son factores que inciden mucho en el comportamiento de los taludes.

*Autor para contacto: alex.chavez@opamss.org.sv

Materiales y Metodología

Con el fin de proponer una mitigación (diferente a la tradicional como obra gris o muro por ejemplo) desde el 2016 se inició en la Universidad de El Salvador (UES) el campo experimental de taludes con diferente cobertura e inclinación. Se instalaron dispositivos TMS3 para el monitoreo de temperatura y humedad. La idea es evitar infiltraciones dentro del cuerpo de los taludes que disminuya la estabilidad de las tefras. Para monitoreo se hizo uso de un equipo de Transmisión de Dominio de Tiempo (TDT) que mide humedad mediante el método dieléctrico, llamado TMS3 de TOMST cuyas guías de ondas electromagnéticas están confinadas en un material de moldeo epóxico que permite insertarlo en el suelo [1]. Debido a esto es necesario obtener una curva de calibración que relacione el valor que da el equipo con contenido de humedad real del suelo, en este caso, para suelos con Tierra Blanca Joven (TBJ), se usaron las curvas de calibración cf. [1]. El equipo puede recabar datos en diferentes intervalos (15, 10, 5 y 1 minutos). En este caso se programó hacerlo cada 10 minutos, debido a que corresponde con el periodo de medición de las estaciones meteorológicas usadas por la red de estaciones meteorológicas del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) (<http://www.snet.gob.sv/Geologia/pcbbase2/parametros-mapa.php>).

Los ángulos en la parte superior del campo de taludes (donde ocurre la infiltración) se fueron variando de 3° a 20° y se utilizó canalización para desviar el agua de lluvia fuera de la ladera. Para la ladera de los taludes se eligieron ángulos de 90°, 60° y 45°. Para la protección de los taludes se utilizaron diferentes coberturas: grama, vetiver, cubierta cal combinado con TB y barrera capilar (capas dobles intercaladas de arena y grava [1]).

También se ha instalado equipo de monitoreo en sectores críticos del AMSS (sector oriente con cobertura importante de TBJ), sectores de movimientos de ladera importantes en las Colinas (ladera tectónica) y Picacho (paleovolcán) donde hay bastante población expuesta.

Asimismo, la información de humedad del equipo ha sido correlacionada con información de stress por humedad de Sentinel 2 cuyo índice es $(\text{Banda}8 - \text{Banda}11) / (\text{Banda}8 + \text{Banda}11)$ para validar y comparar resultados.

Resultados y Análisis

Durante año 2016 cuando se inició el monitoreo, los taludes estuvieron saturados la mayor parte del tiempo (los equipos se instalaron al final de la temporada de lluvias). Sin embargo, el talud número 5 mantuvo un bajo contenido de humedad (corona 8° y ladera a 45°). Para el 2017 se intentó emular la característica del talud 5. Se aumentó el ángulo de la parte superior de la pendiente, además se implementó la mezcla de cal y TBJ en la parte superior, así como en la barrera capilar. A pesar de que la mayoría de los taludes se mantuvieron saturados, dos de ellos (el número 2 con una mezcla de cal y piroclástico, así como 45° en ladera y 19° en la parte superior de corona y el talud 4 con 90° de ladera, barrera capilar y 10° en corona) tuvieron un buen comportamiento disminuyendo la saturación y secándose más rápido. Para la próxima temporada de lluvias en 2018 se realizó un aumento a 20° en la parte superior de corona del talud para todos los taludes monitoreados con mezcla de cal y TBJ, así como barrera capilar. Los resultados indican una mejora en todos los taludes (en años anteriores la mayoría estaban saturados) nuevamente los taludes número 2 y 4 presentaron menos humedad y perdieron humedad más rápido luego de un periodo de lluvia. Los mejores resultados se obtuvieron en taludes con barrera capilar, 90° frente a talud y 20° encima de corona). El resto de taludes no se saturaron (excepto el talud 1). Por lo que se recomienda tomar en cuenta las modificaciones realizadas para replicarlas en otros sectores y monitorear con más equipos (figura 1). Para probar la mejora en el campo experimental de taludes, se muestra el estrés de humedad de Sentinel 2 del sitio y es posible comparar antes y después de los cambios realizados en los taludes que el sensor remoto indica también, una disminución de la humedad especialmente en el 2018 que coincide con lo medido por el equipo instalado. Después de algunos años de no intervención, la zona vuelve a su comportamiento normal (humedad moderada).

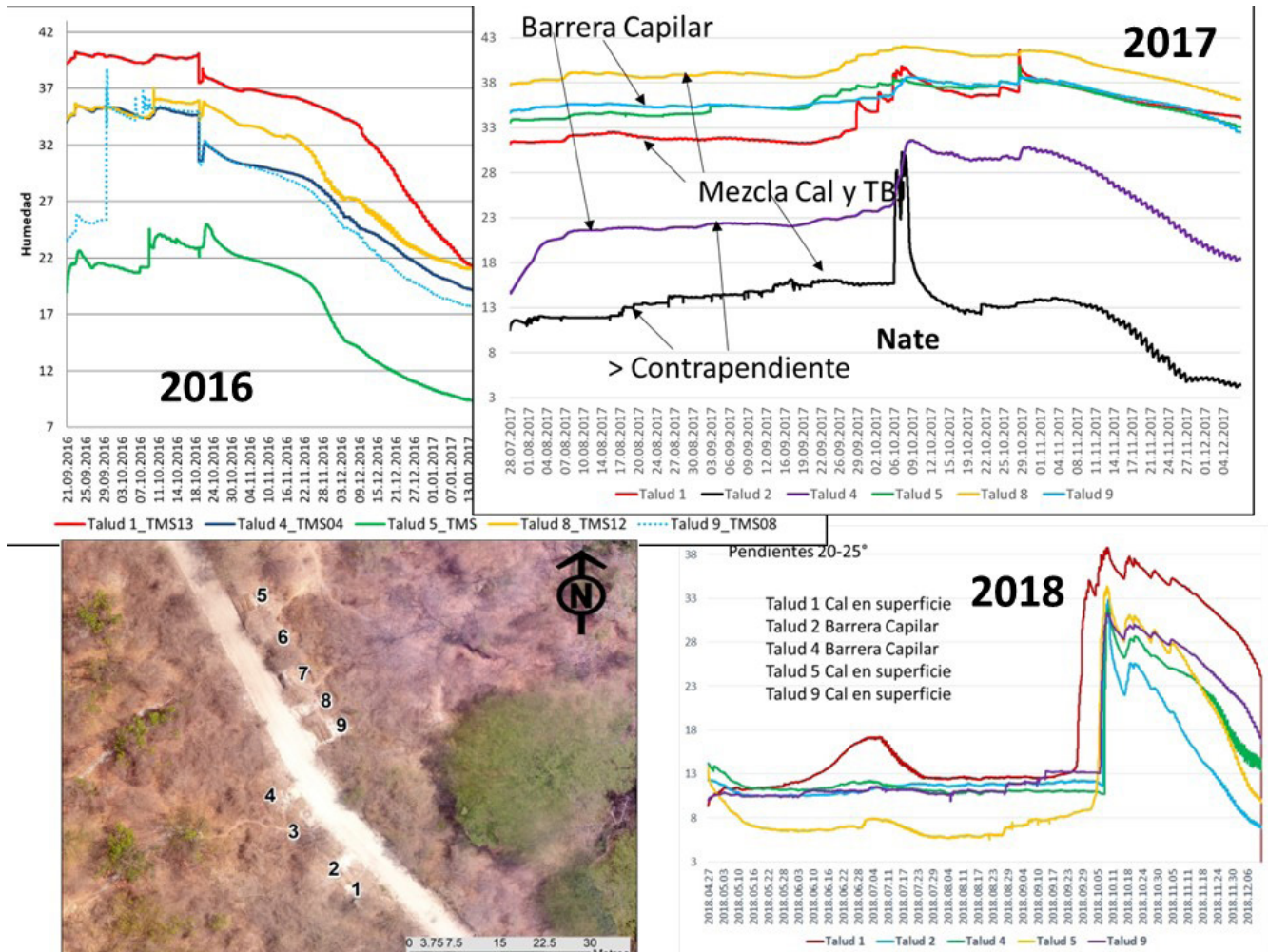


Figura 1. Mejora de comportamiento en el campo de los taludes .

En 2020 se inició a monitorear con TMS4 (versión actualizada) otras laderas y taludes del AMSS (figura 2) para identificar y entender el comportamiento de saturación. En el paleovolcán Picacho se han producido históricamente varios flujos de escombros. El equipo se instaló sobre material meteorizado y sobre suelo superficial de cobertura. Parece que cuando llueve se infiltra agua y se queda acumulada saturando la arcilla. Las lluvias en la ladera con una intensidad instantánea de más de 4 mm ayudan a que la humedad aumente al ser más pronunciada. La cima del paleovolcán permanece saturado durante el verano posiblemente relacionado a movimiento de agua infiltrada.

En el escarpe tectónico de las Colinas donde ocurrió una avalancha de escombros durante el terremoto de 2001 e históricamente hay vestigios de paleo-deslizamientos, es claro que las obras de mitigación no están evitando la infiltración y solo en el área mitigada es más seca. Esto se demuestra con el estrés por humedad de Sentinel 2 y los resultados de TMS4. Algunas áreas de la escarpa tectónica con arcilla en el área inferior están saturadas y se observan algunos signos de reptación.

En otros taludes cercanos a la caldera de Ilopango con diferentes características, pareciera que las humedades anómalas se deben a la infiltración artificial, morfología y al tipo de vegetación presente. En el talud artificial junto a un estacionamiento donde descarga una tubería de aguas lluvias de la calle con un tipo de plantas freatofitas

indicadoras de agua subterránea; el equipo registró un contenido de humedad muy alto y cuando se recolectó la información era evidente que el talud presentaba algunos signos de falla debido a saturación.

En otros taludes artificiales monitoreados en el mismo sitio con diferentes características, cobertura y vegetación, se observó un comportamiento diferente, más seco. Los Badlands en equilibrio o zonas de erosión densa con bosques naturales, tienen un equilibrio que se pierde durante la urbanización y los barrancos suelen aparecer muy rápidamente (figura 3).

En general en zonas de TBJ la humedad es alta en la superficie y lleva un tiempo para que la pluma de humedad se infiltre a niveles más bajos (con más de 300 mm de lluvia acumulada aproximadamente).

Una vez más, cuando la parte superior está saturada durante mucho tiempo, aumenta la permeabilidad e inicia infiltración. La información del stress de humedad de Sentinel 2 concuerda con los resultados del dispositivo TMS4, mostrando la misma tendencia.

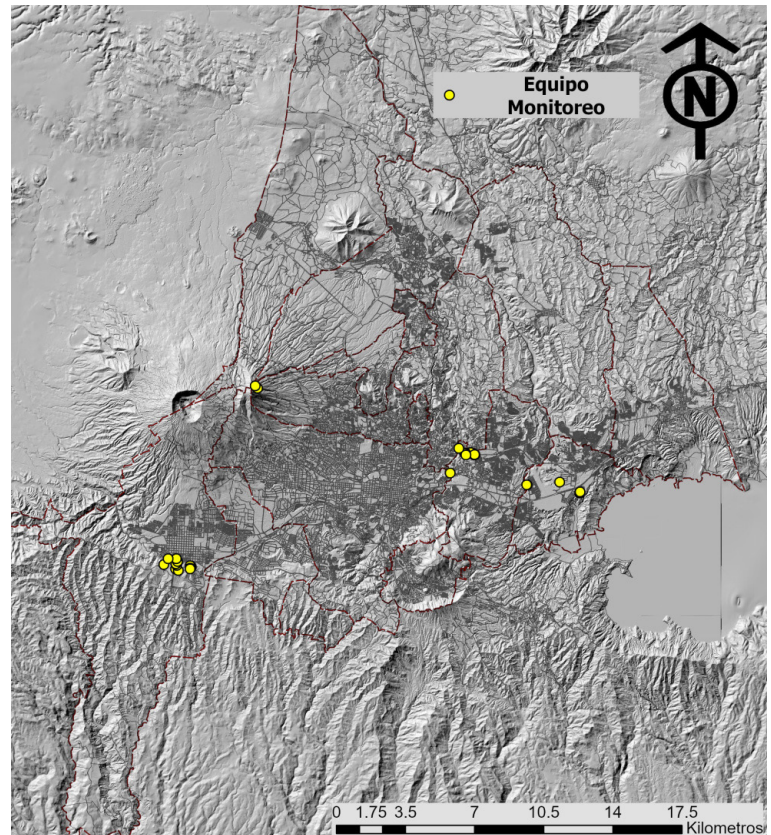


Figura 2. Puntos de monitoreo con TMS4.

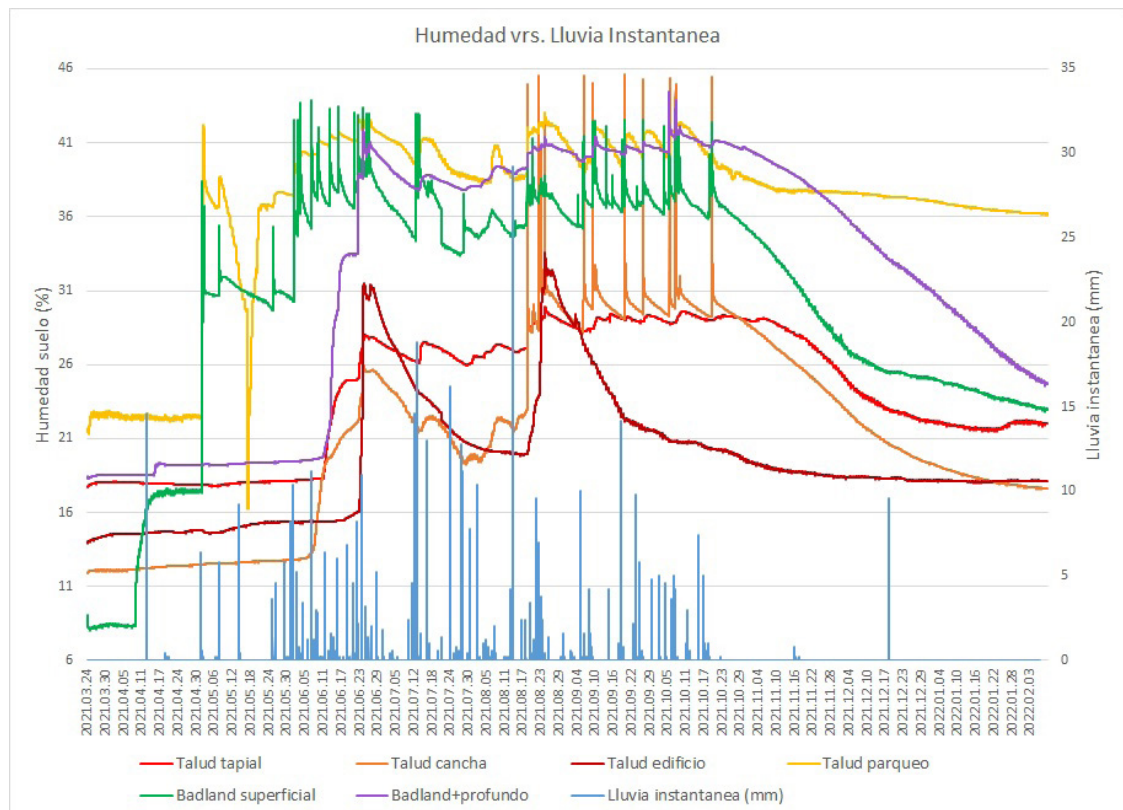


Figura 3. Monitoreo en sector de la Universidad Don Bosco.

Conclusiones

Se probó en el campo experimental con taludes de diferentes inclinaciones de coronas y laderas con el fin de determinar posibles mejoras en su conformación para disminuir la saturación en suelos problemáticos. Los taludes que presentaron mejor comportamiento fueron los de 20° en la parte superior del talud, así como 45° y 90° en ladera del talud, con una barrera capilar con pérdida de humedad relativamente rápida. Además, se inició el monitoreo de zonas de alto riesgo y poder contar con criterios de alerta temprana y mitigación. Se observó la importancia de la ubicación, el sol, la vegetación, la topografía, la protección, la inclinación, la pendiente, el porcentaje de humedad y la época de lluvias con el comportamiento y la estabilidad de los taludes. La información ha sido correlacionada, también, con la información del stress de humedad de Sentinel 2, observándose que a pesar de escala de trabajo se ve cierta correlación. Estos resultados validan también el uso de sensores remotos para monitoreo e identificación de zonas de interés.

Referencias bibliográficas

1. Chávez, J. A, Landaverde J, Mendoza L, Lopez R, Tejnecký, V. (2016). Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador. *SpringerPlus* 5(1): 1-24. doi: 10.1186/s40064-016-2149-x



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



La geología en la evaluación de zonas susceptibles a movimientos en masa

Erwin Romeo Quiroa Cugua^{a*}

^aInstituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH- Guatemala

Abstract: Geological hazards can become responsible for great loss of human lives and destruction of material goods, in this case the events of mass movement in the Republic of Guatemala are studied, being characterized for the generation of a digital inventory, in which its distribution can be observed and thus generate prediction models through geographic information systems.

The evaluation of the landslide that occurred in the Quejá village, in the municipality of San Cristóbal Verapaz, was carried out, where the lithological, geomorphological and structural characteristics of the area were determined, this allowed defining a structural influence on the landslide associated with the Culco-Chixoy-Polochic fault system in addition to being an active zone in mass movement events.

Palabras clave: movimientos en masa, pronóstico basado en impactos, falla geológica, Quejá.

Key words: mass movements, impact-based forecast, geologic fault, Quejá.

Introducción

El registro de eventos de movimientos en masa del INSIVUMEH, es una herramienta que puede ser utilizada por las entidades públicas y privadas con la finalidad de identificar zonas de incidencia que puedan poner en riesgo a la población así como también a la infraestructura; además en la Sección de Geología y Geofísica Aplicada ha estado trabajando en el desarrollo de un modelo que ayude a determinar áreas potenciales donde se pueden generar desplazamientos del suelo según sean las condiciones climáticas, esto con la finalidad de generar una perspectiva sobre las áreas que pueden ser afectadas para informar a las instituciones competentes para las tomas de decisiones.

Además del monitoreo, también se realizan evaluaciones de campo en áreas donde se generan grandes desastres a causa de eventos de movimientos en masa como el caso del deslizamiento ocurrido en noviembre del 2020 en la aldea Quejá, del municipio de San Cristóbal Verapaz, en donde se determinaron las características litológicas, estructurales y geomorfológicas que propiciaron el deslizamiento, así mismo se identificaron los factores condicionantes y desencadenantes que estuvieron involucrados, a partir de las evaluaciones de las condiciones del área se emitió una declaratoria de zona de alto riesgo.

*Autor para contacto: erquiroa@insivumeh.gob.gt

Materiales y Metodología

El método que se emplea para el análisis de movimientos en masa se basa en la recopilación de información técnica sobre los eventos a partir de los incidentes reportados por la Coordinadora Nacional de Reducción de Riesgos (CONRED) y de otras instituciones de gobierno; siendo uno de los objetivos principales, el de analizar y caracterizar a detalle cada evento ocurrido en la República de Guatemala. Para ingresar la información a la base de datos de la Sección de Geología y Geofísica Aplicada del INSIVUMEH, se analiza cada evento a partir de los acumulados de lluvia, siendo éste un factor detonante muy común en la ocurrencia de eventos y demás información de utilidad para la caracterización de estos eventos como la pendiente, uso actual del suelo, aspectos geológicos, entre otros.

La información recopilada sobre los eventos, son almacenados en una base de datos geoespacial, en donde se puede identificar fácilmente los lugares con mayor recurrencia de los diferentes eventos de movimientos en masa en la República de Guatemala (figura 1).

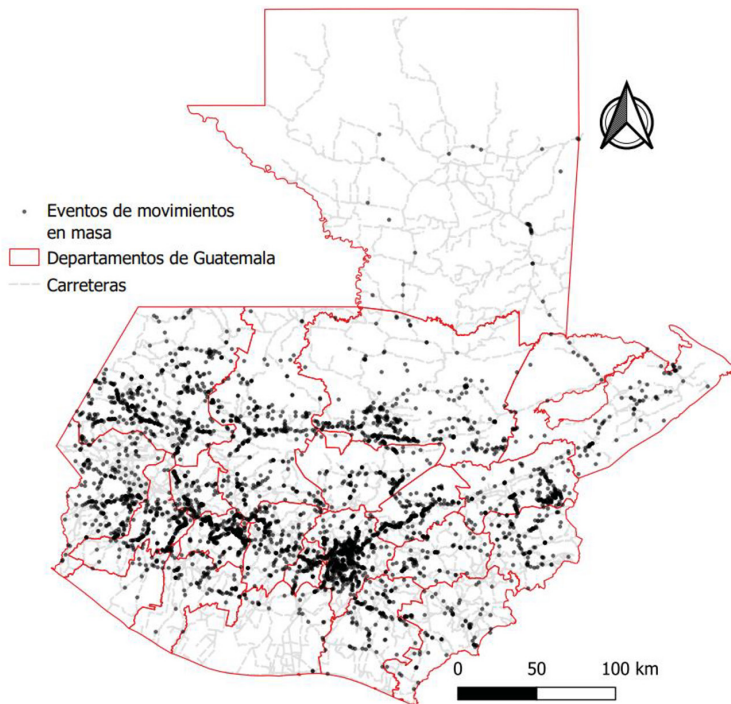


Figura 1. Mapa de distribución de los eventos recopilados en la base de datos Sección de Geología y Geofísica Aplicada del INSIVUMEH. Fuente: INSIVUMEH, 2022.

de desprendimiento en áreas de pendientes bajas a moderadas debido a su bajo grado de consolidación. Debido a las finalidades del proyecto “Pronóstico Basado en Impactos”, solo se estudian las áreas cercanas a centros poblados y vías de comunicación con pendientes por arriba de los 15° , así como áreas donde se tiene una mayor frecuencia de ocurrencia de eventos de movimientos en masa.

El modelo incorpora el factor lluvia, y eso hace que el modelo se vuelva dinámico, ya que el mapa final depende de los acumulados de lluvia, para ello, se toman 7 días de lluvia registrada y 3 días de lluvia pronosticada. Los impactos se categorizan por niveles de la siguiente manera: bajo=verde; medio=amarillo; alto=anaranjado; y muy alto=rojo, esto con

La información registrada sobre los eventos de movimientos en masas de la base de datos de la Coordinadora Nacional de Reducción de Riesgos (CONRED), permite a la Sección de Geología y Geofísica Aplicada analizar a profundidad cada evento, detallando sus parámetros para clasificarlo según su tipo de movimiento: deslizamiento, derrumbe, flujos de lodo, caída de rocas, entre otros (Figura 2).

Por medio del análisis de eventos recopilados en la base de datos, como parte del proyecto “Pronóstico Basado en Impactos” Se generan perspectivas de eventos que se pueden generar a partir de las condiciones de lluvia, entre ellas, la ocurrencia de eventos de movimientos en masa. Por lo cual se ha estructurado e implementado modelos dinámicos por medio de herramientas de Sistemas de Información Geográfica, que ayudan a la delimitación las áreas con susceptibilidad a ocurrencia de movimientos en masa. Dicho modelo solo analiza áreas con pendientes mayores de 15° , esto a partir del ángulo de reposo natural de material con textura arenosa, ya que este material se encuentra presente en depósitos volcánicos recientes y tienen la característica de tener una alta susceptibilidad a eventos

la finalidad de que la población pueda identificar con facilidad las zonas de alta susceptibilidad a movimientos en masa en el territorio guatemalteco.

Los resultados del Pronóstico Basado en Impactos han sido muy acertados en cuanto a la ocurrencia de eventos en áreas previamente identificadas, tal es el caso de los mapas generados en el año 2020 para el paso de las tormentas tropicales Eta y Iota (figura 3).

Figura 2. (a) Caída de roca en el km 214 de la CITO-180, trayecto hacia el municipio de Zunil, Quetzaltenango. Fuente: CONRED, 2020; (b) Desprendimiento de tierra en Ciudad Peronia del municipio de Villa Nueva, Guatemala. Fuente:

CONRED, 2020; (c) Flujo de lodo ocurrido en el km 281.400 de la CA-01-Occidente, trayecto hacia el municipio de San Rafael Pétzal, Huehuetenango. Fuente: Ministerio de Comunicaciones, 2021; (d) Deslizamiento ocurrido en el km 279 de la RN-7W en el caserío Buena Vista, municipio de Aguacatan, Huehuetenango. Fuente: SISMICED, 2022.



Evaluación en áreas de desastres:

Caso aldea Quejá, Alta Verapaz.

Debido a las condiciones climáticas que se registraron en el país en los últimos meses del año 2020, entre ellos, el paso de las tormentas tropicales Eta y Iota, se registró en la aldea Quejá, del municipio de San Cristóbal Verapaz, departamento de Alta Verapaz, el 5 de noviembre, un deslizamiento de gran magnitud que generó grandes pérdidas materiales y pérdidas de vidas de los habitantes. Según los registros de lluvia, de 9 días acumulados de lluvia previo a la ocurrencia del evento son de 268.43 mm, y el día en que se generó el evento se registraron 103.84 mm de lluvia, dichos datos son registros de la estación meteorológica Chixoy. Dada la comparación en la cantidad de precipitación registrada a la del día del evento, la lluvia fue un factor detonante primordial al sobresaturar el suelo y se dieran las condiciones idóneas para dicho deslizamiento.

Figura 3. Pronóstico Basado en Impactos, publicado el 04/11/2020. Fuente: INSIVUMEH.



Posterior a la ocurrencia del evento, se realizó una visita técnica al área, en donde se inspeccionaron los sitios críticos, describiendo a través de técnicas de observación, toma de datos de campo (datos estructurales importantes de la falla, descripción tipo de roca, etc.). De acuerdo a la información recabada en la visita de campo se procesó la información de las fotografías aéreas para delimitar la zona de deslizamiento y sus principales características (figura 4).

Guatemala tiene la característica de que su estratigrafía varía según su ubicación, como punto de partida es importante mencionar que presenta dos bloques; el Bloque Maya y el Bloque Chortús que están divididos por la zona de sutura del Motagua. Particularmente el deslizamiento de la aldea Quejá, se encuentra ubicado en el Bloque Maya, específicamente al norte de la zona de sutura del Motagua, en la región fisiográfica de las tierras sedimentarias, que se caracteriza por presentar cerros y lomas cársticas.

En el deslizamiento ocurrido en la Aldea Quejá se ubica en el Bloque Maya, donde predominan rocas sedimentarias de la Formación Todos Santos, observándose limolitas y areniscas principalmente, dichas

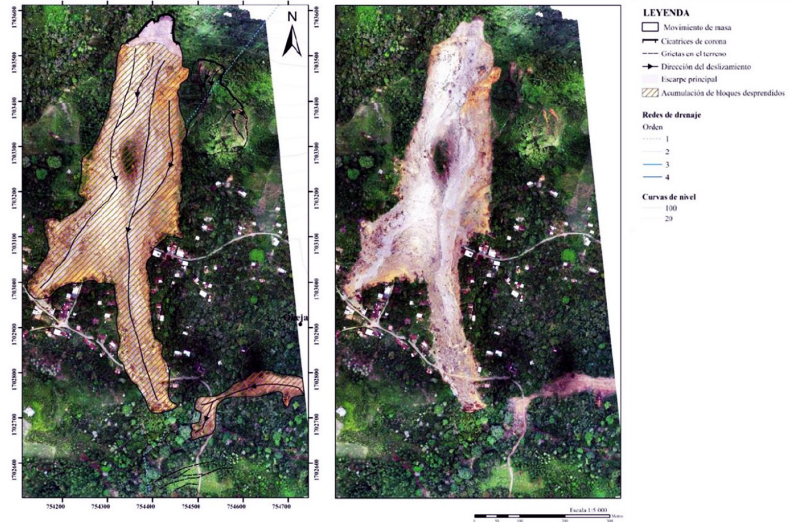


Figura 4. Ortofoto del área del deslizamiento. Fuente: CONRED-IN-SIVUMEH-CUNOR, 2021.

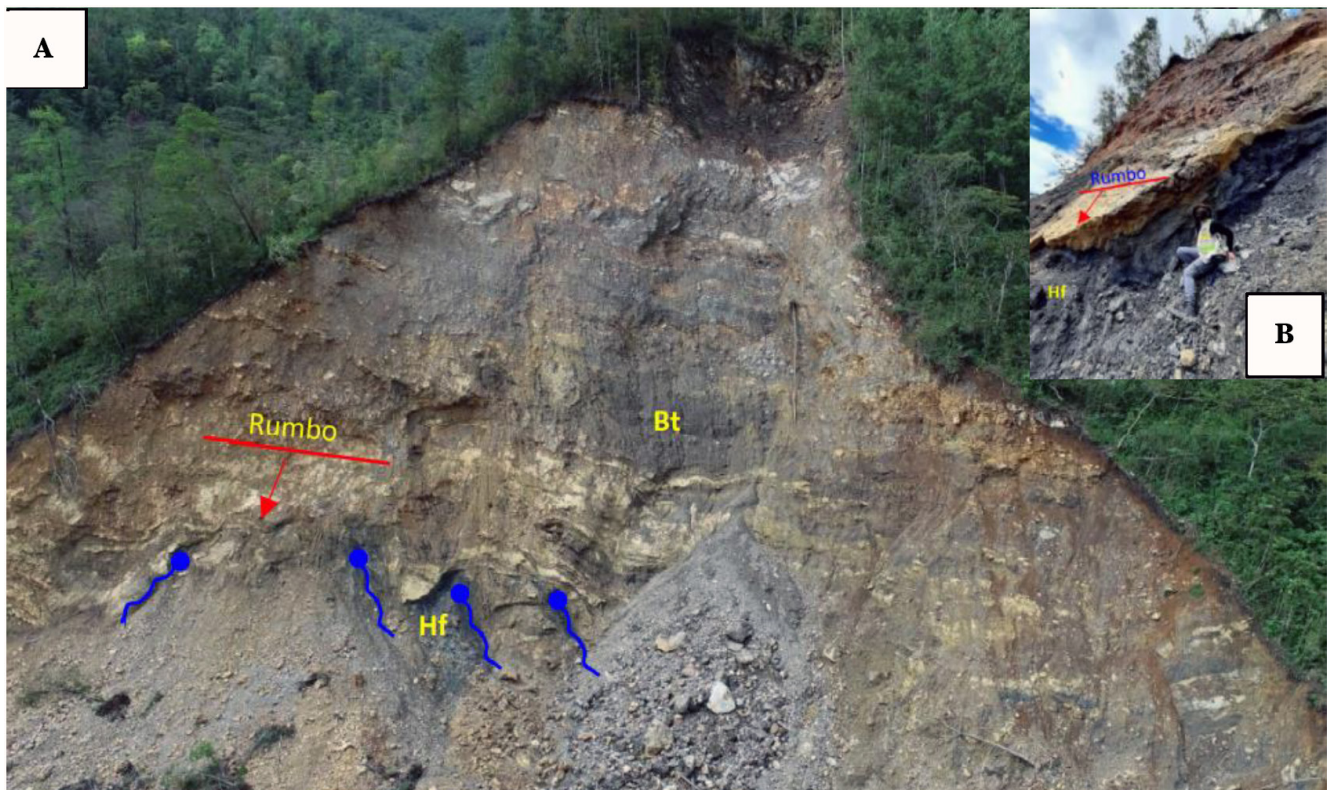


Figura 5. (a) Zona de falla Queja vista en la corona del deslizamiento principal (Bt) brecha tectónica, (Hf) harina de falla y en azul las surgencias de agua, en rojo rumbo y dirección de buzamiento de planos estructurales a favor de la pendiente. Fuente: CONRED, 2021.; y (b) Afloramiento de la falla Queja.

rocas afloran en la corona y márgenes de los deslizamientos observados. En los afloramientos del deslizamiento principal, macroscópicamente la arenisca es de grano medio, color gris con presencia de óxidos de hierro y venas rellenas de calcita; el conglomerado es homogéneo y está compuesto por líticos de caliza cristalina, caliza dolomítica, yeso nodular, lutita arenosa, texturalmente es clasto soportado, clastos subredondeados, matriz limo-arenosa.

Al sureste del deslizamiento principal, se pueden observar afloramientos de lutitas y limolitas color café, verdes y moradas que están estratificadas y buzando al sur. Bloques rodados de areniscas y areniscas conglomeráticas se pueden encontrar abundantemente en el lugar. Se puede apreciar que estas rocas se encuentran fuertemente afectadas por microfallas y fracturas.

La estructura más importante que se identificó es una falla regional (Quejá), cuya zona se encuentra aflorando en la corona del deslizamiento principal. Esta se orienta N075,55SE. La estructura presenta una banda de harina de falla (gouge) al muro, seguida de brecha tectónica con planos subparalelos al techo de la falla. Estos planos están a favor de la pendiente y también han favorecido el deslizamiento principal. Se observó circulación de agua a través de esta zona, la cual surge a la superficie por los planos de falla (figura 5). Se encontraron indicadores cinemáticos no muy claros que sugieren una falla de tipo normal con una componente dextral. Las rocas que aflora en los deslizamientos presentan un intenso fracturamiento y microfallamiento. Estas características estructurales aumentan drásticamente la porosidad secundaria de las rocas, facilitando la circulación de agua por las discontinuidades.

La geomorfología es un aspecto que tiene una relevancia en eventos de movimientos de masa, principalmente para determinar elementos que permitan definir el relieve del terreno. En el caso del deslizamiento de la aldea Quejá, desencadenó cambios significativos en el relieve del área afectada pudiendo originar geoformas de origen degradacional (originadas por procesos de erosión y meteorización), agradacional (producto de acumulación de material alóctono, podemos mencionar que esta geoforma hace referencia al cuerpo del deslizamiento de Quejá), denudacional (fallas geológicas, lineamientos, parteaguas, relieve cárstico) y antrópicos (Carreteras, taludes).

La información geológica que se recolectó del deslizamiento de la aldea Quejá, fue utilizada como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en el Consejo Científico de la Coordinadora Nacional de Reducción de Desastres (CONRED), los resultados fueron presentados ante otras instituciones que formaron parte del mismo; dado que el deslizamiento representó un impacto bastante alto en los alrededores de la aldea Quejá y para el municipio, dicho Consejo Científico decidió proponer una delimitación de un área para declararla como zona de alto riesgo (figura 6). El proceso que se tuvo por parte del Consejo Científico fue para asesorar de forma técnica a la Junta y Secretaría Ejecutiva de la Coordinadora Nacional de Reducción de Desastres (CONRED), quien tomaría la decisión final de declarar como zona de Alto Riesgo la Aldea Quejá.

Conclusiones

El inventario de movimientos en masa es una herramienta que ayuda a identificar zonas de alta incidencia sobre eventos ya ocurridos en el territorio guatemalteco.

El modelo de susceptibilidad a movimientos en masa define áreas o zonas que, según la precipitación, pendientes y accidentes culturales, delimiten la posible ocurrencia a movimientos en masa.

Tomando en cuenta que las condiciones de inestabilidad en el área continúan, como lo son las condiciones geológicas (roca cizallada, sistema estructural local, presencia de agrietamientos) y climáticas, se puede considerar como una zona crítica de alta susceptibilidad a deslizamientos ante lluvias intensas periódicas o bien extraordinarias, así como la ocurrencia de sismos.

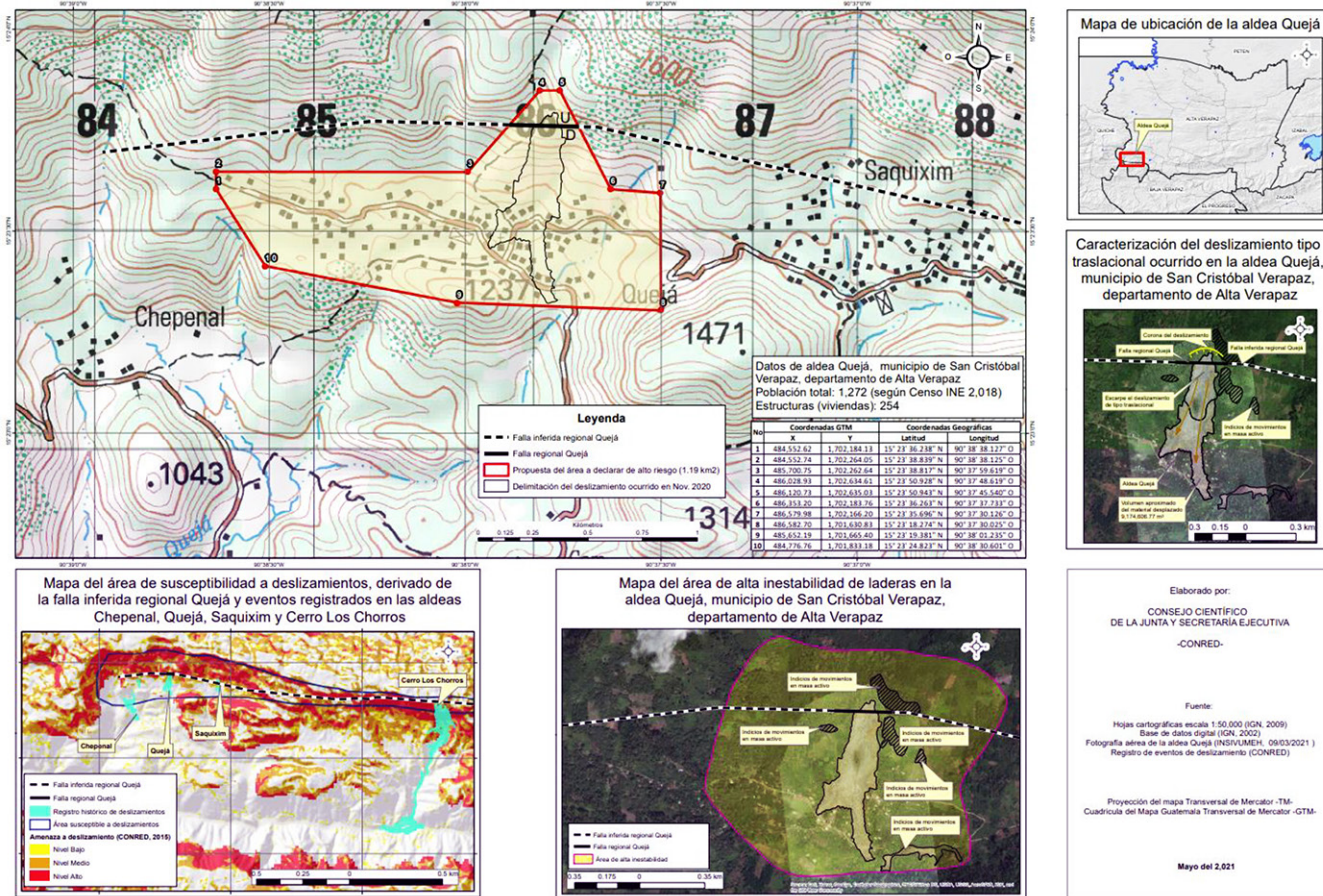


Figura 6. Mapa de la delimitación del área propuesta para declarar de Alto Riesgo en la aldea Quejá, municipio de San Cristóbal Verapaz, departamento de Alta Verapaz. Fuente: Concejo Científico de la Coordinadora Nacional de Reducción de Desastres (CONRED).

Fuentes de la imágenes tomadas de documentos e informes de las siguientes instituciones:

- Instituto Nacional de Sismología, vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH
- Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres -CONRED
- Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte -CUNOR
- Instituto Geográfico Nacional -IGN
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación -MAGA



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



La deformación en el oeste de Guatemala asociada con la triple unión de NAFCA (Norte América - Antearco de Centroamérica-Caribe): La localización del esfuerzo neotectónico en el graben de la Ciudad de Guatemala

Bridget Garnier^a, Basil Tikoff^a, Omar Flores^b, Brian Jicha^a, Charles DeMets^a,
Beatriz Cosenza-Murallas^{a,c}, Walter Hernandez^d, David Greene^e

^aUniversity of Wisconsin-Madison, Department of Geoscience, 1215 West Dayton St., Madison, WI 53706

^bCentro de Estudios Superiores de Energía y Minas, Edificio T-1, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Guatemala 01012

^cInstituto de Investigación en Ciencias Físicas y Matemáticas, Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad Universitaria, Zona 12 Guatemala, Guatemala 01012

^dRetired from Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Km. 5 1/2 carretera a Santa Tecla, colonia y calle Las Mercedes, San Salvador, El Salvador

^eDepartment of Earth and Environmental Sciences, Denison University, 100 W. College St, Granville OH 43023

Abstract: We present minor fault analysis, geochronological and geochemical analyses, and updated GPS velocities in western Guatemala to characterize the magnitude and timing of extensional deformation related to North American, Forearc, and Caribbean (NAFCA) plate movements. Elongations estimated from fault data in western Guatemala are parallel similar to active deformation observed in eastern Guatemala. Four new ⁴⁰Ar/³⁹Ar dates and correlation of tephra deposits suggest that faulting was active during the Pliocene, but ceased eastward towards the Guatemala City graben region over time. Based on this data, we propose a time-progressive strain model for plate-related deformation, whereby distributed elongation of the westernmost Caribbean plate occurred during the Pliocene but localized mostly within the Guatemala City graben and nearby faults during the Pleistocene.

Palabras clave: Guatemala, triple unión, GPS, Fallamiento, Graben de la Ciudad de Guatemala.

Key words: Guatemala, Triple junction, GPS, faulting, Guatemala City Graben.

Introducción

En América Central, los estudios han propuesto la existencia de una triple unión entre las placas de América del Norte, el Caribe y Cocos [1] [2] [3] y [4](figura 1). La introducción de la geodesia como un medio para definir el campo de velocidad de la corteza de la región permitió estudios de los ciclos sísmicos de las principales fallas activas y la deformación regional relacionada, lo que fomentó el desarrollo de los modelos tectónicos.

Trabajos recientes [5] y [6] indican que el CAFA al oeste del graben de la Ciudad de Guatemala y otras áreas del oeste de Guatemala se mueven casi con la placa de América del Norte, con la mayor parte de la deformación enfocada más al este en el centro y este de Guatemala y Honduras. Con base en datos geodésicos y estructurales de las últimas dos décadas, los modelos propuestos para las interacciones de las placas del norte de América Central deben acomodar la amplia deformación

*Autor para contacto: bridget.garnier@gmail.com

continental al norte y al sur de las fallas sinistral Polochic-Motagua de Guatemala, el papel del Antearco Centroamericano (CAFA), y la posible fijación del CAFA a la placa de América del Norte en el oeste de Guatemala.

En esta contribución (que es una versión condensada [7]) documentamos el tiempo y la deformación de los sistemas de fallas en el oeste de Guatemala, en un área al oeste del graben de la Ciudad de Guatemala, para ver cómo la deformación se compara con la propuesta previa de modelos tectónicos. Un campo de velocidad GPS regional derivado de datos de 1993-2017 [5, 6] y actualizado con datos más recientes de sitios de las campañas en el sur de Guatemala y el oeste de El Salvador; crean el marco para nuestra interpretación [8 y 9].

Debido al ambiente con mucha vegetación del oeste de Guatemala y afloramientos escasos, nuestro enfoque fue caracterizar la deformación en cortes de caminos recientemente expuestos (figura 1). Hemos concentrado nuestros esfuerzos en cuatro afloramientos dentro de la cuña del oeste de Guatemala: Sector 1 – Xenacoj, Sector 2 – Tecpán, Sector 3 - Nahuala, y Sector 4 - Ilotenango. Tres de los cuatro afloramientos (Sectores 2-4) están caracterizados por unidades sin fallas y, en consecuencia, indican que la deformación está inactiva o ocurre a velocidades de deformación muy bajas en estos sitios. 1 (Xenacoj), inmediatamente al oeste del graben de la Ciudad de Guatemala, atraviesa todos los depósitos observables. En cada afloramiento, se registraron observaciones de fallas (orientaciones, líneas de acero visibles y separaciones de fallas en la cara del afloramiento) a lo largo de un transecto de la longitud medida. También se tomaron muestras con fines de correlación de unidades y para la datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (p. e., la unidad con fallas más altas y la unidad sin fallas más bajas, por lo que la sincronización podría construirse).

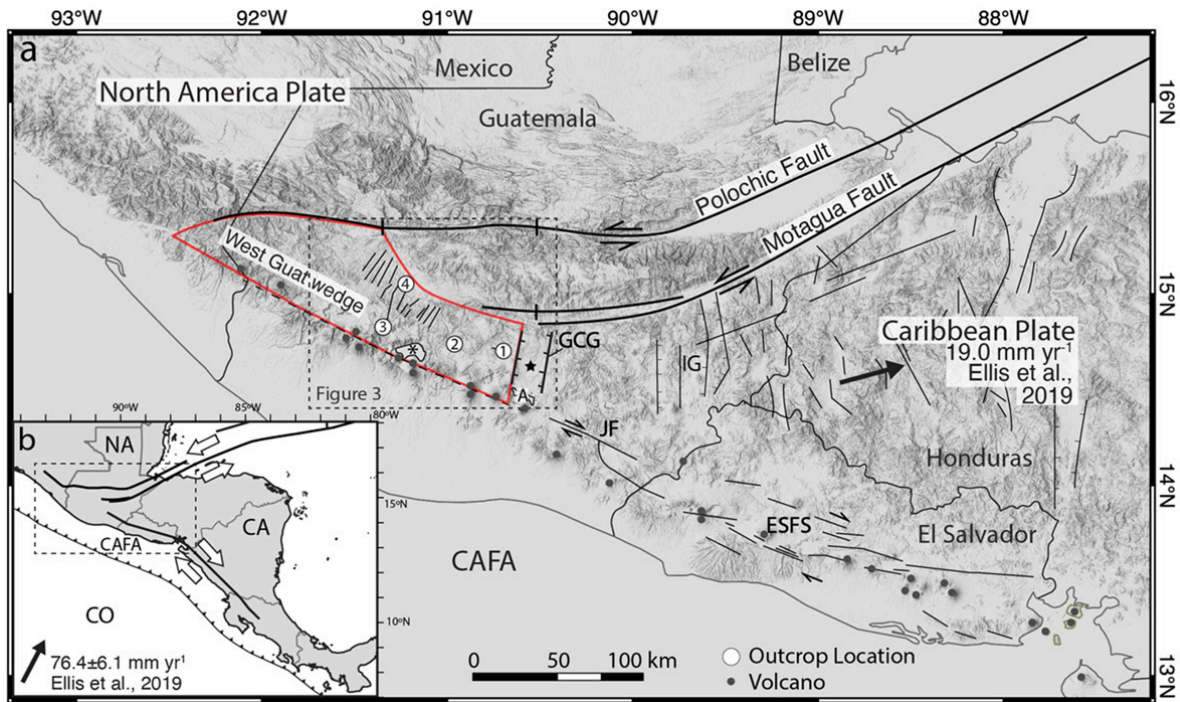


Figura 1. DEM mostrando las interacciones de las placas de América del Norte, el Caribe, el antearco centroamericano (CAFA) y Cocos en el norte de América Central. Graben de Ciudad de Guatemala (GCG), graben de Ipala (IG), falla de Jalpatagua (JF), sistema de fallas de El Salvador (ESFS), antearco centroamericano (CAFA). Los círculos blancos enumerados muestran la ubicación de las áreas de estudio: Xenacoj (1), Tecpan (2), Nahualá (3) e Ilotenango (4). Las fallas mapeadas en Honduras son de Rogers [10]. La cuña del oeste de Guatemala está delineada en rojo. B. Mapa en recuadro de los principales límites de placas y movimiento relativo en América Central. CO- Placa de Cocos; NA- placa de Norteamérica; CA- Placa del Caribe; y el CAFA- Antearco Centroamericano.

El marco geodésico para este trabajo y nuestro estudio relacionado a la falla cercana de Jalpatagua [8] se basa en un modelo de bloque elástico actualizado que asimila nuevas mediciones en 32 sitios GPS en el norte de Centroamérica en el modelo regional de [6], que se basó en datos tan recientes como a principios de 2017. De relevancia importante para este estudio son las nuevas mediciones de 17 sitios GPS continuos y de la campaña en el sur y oeste de Guatemala que extienden la serie temporal de posición en 10 sitios de campaña de al menos 5 años.

Materiales y Metodología

Análisis de fallas: Se calculó la deformación unidimensional, alargamiento, para cada uno de los cuatro afloramientos que contenían fallas normales observados en el occidente de Guatemala. El método aplicado se centra en calcular el desplazamiento real a través de las fallas, independientemente de la orientación del transecto [cf. 11, 12 y 13]. Para cada transecto, calculamos el alargamiento en función de las fallas medidas y luego revisamos el cálculo para incluir el desplazamiento colectivo de fallas pequeñas no observables [14, 15 y 16].

Correlación de unidades y datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$: Para los depósitos del Cuaternario, se utilizó evidencia de campo en combinación con datos XRF y mineralogía de fragmentos de pómez limpiados para vincular los depósitos con las principales tefras del Cuaternario. Para los depósitos del Neógeno, la evidencia de campo fue el principal método de correlación de unidades debido a la falta de datos y análisis detallados en la literatura [17]. Además, se usaron cuatro muestras para el análisis de edad de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, para correlacionar aún más con la estratigrafía conocida y/o para determinar la edad de una unidad sin fechar anteriormente. La datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ se realizó en una tefra (fragmentos de pómez de 17JF56R), una toba rica en cristales (17JF56A), un pórfido de andesita (17JF56S) y un flujo de basalto (14GM14M), todos recolectados en afloramientos fallados.

Tasa de alargamiento: Calculamos las tasas de alargamiento para cada uno de los cuatro afloramientos utilizando: 1) alargamiento estimado; y 2) edades de depósitos fallados y no fallados que delimitan el momento de la deformación.

Modelo de bloque GPS: Usamos los nuevos datos del GPS para actualizar la base de datos de [6] modelo de bloque regional, demandando un procesamiento casi idéntico al descrito en [5].

Resultados y Análisis

Fallamientos: Los cuatro afloramientos analizados contienen evidencias de fallas pasadas. La datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y la correlación de unidades muestran que el fallamiento al oeste de Guatemala estuvo activo en el Plioceno (afloramiento de Nahualá) y cesó con una tendencia hacia el este: por 75 ka en el afloramiento más occidental de Ilotenango, por 54 ka en el afloramiento central de Tecpan, y después de 51 ka en el afloramiento de Xenacoj, justo al oeste del graben de la ciudad de Guatemala, por lo que la falla principal aún puede estar activa. El análisis de fallas menores en estos afloramientos indica que ocurrió un alargamiento orientado E-W y ESE en los afloramientos de Tecpan e Ilotenango, en porcentajes de 0.64% y 15.8%, respectivamente. Adicionalmente, se estimó el alargamiento con dirección NE y NNE en los afloramientos de Nahualá y Xenacoj, en porcentajes de 4.2-4.7% y 11.5%, respectivamente.

GPS: Los resultados de nuestro nuevo modelo de bloques elásticos se parecen mucho a los de [6]. El campo de velocidad actualizado indica que el graben de Ciudad de Guatemala es la extensión occidental actual del extremo que se extiende de la placa del Caribe, ya que la cuña occidental de Guatemala está relativamente inactiva y se mueve con la placa CAFA y/o América del Norte (figura 2). La deformación extensional se centra en el graben de la ciudad de Guatemala, con una extensión más distribuida que se extiende justo al oeste del graben y a lo largo del este de Guatemala. Además, el deslizamiento a lo largo de las fallas de Motagua y Jalpatagua, que limitan al norte y al sur, respectivamente, disminuye y termina en la región del graben de la Ciudad de Guatemala.

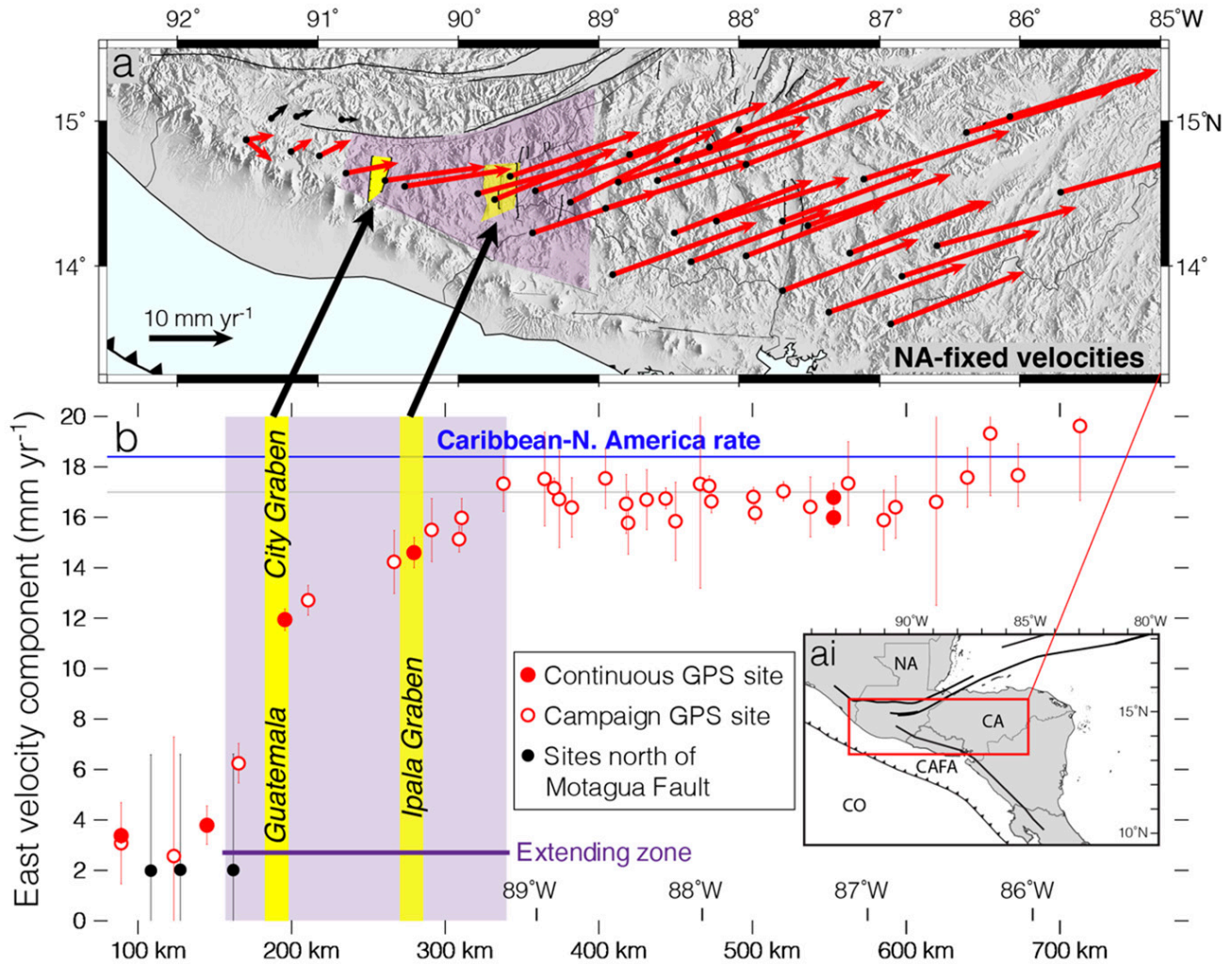


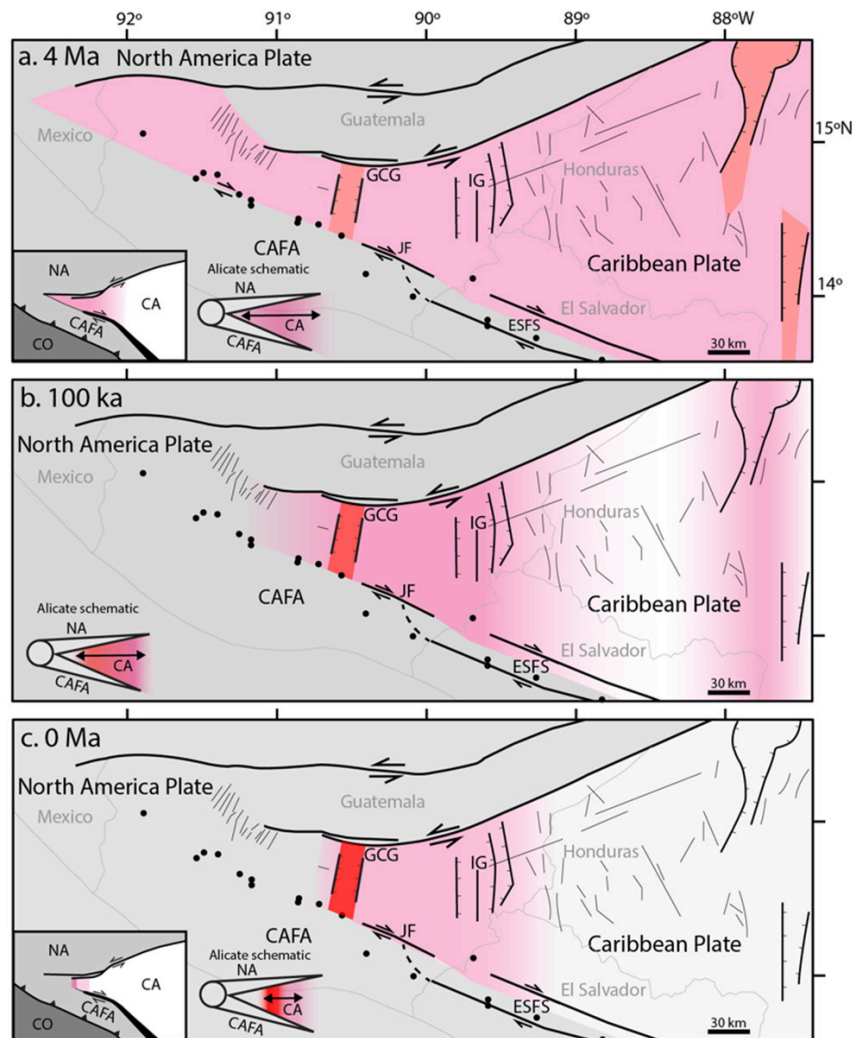
Figura 2. a) Transecto de este a oeste de las velocidades del sitio GPS medidas en relación con la placa de América del Norte. Cada velocidad medida se corrige por un componente de velocidad elástica intersísmica debido a las fallas bloqueadas en nuestro modelo de bloque elástico actualizado discutido en [7]. b) Componentes de velocidad del este para sitios del Panel a) versus distancia de oeste a este a lo largo del transecto. Los círculos rojos llenos y abiertos muestran las tasas de sitios continuos y de campaña, respectivamente. Las tasas indicadas por los círculos negros muestran las tasas de tres sitios al norte de la Falla de Motagua (indicadas por las flechas negras de velocidad en el Panel a). Todas las incertidumbres son 1-sigma. La línea azul indica el componente E-O del movimiento de las placas del Caribe y América del Norte estimado con nuestro modelo elástico a lo largo del transecto. La línea gris muestra la extensión de la zona de extensión entre la placa estable del Caribe en Honduras y las velocidades constantes de la cuña occidental de Guatemala. La región sombreada de color púrpura define la zona de mayor extensión E-W.

Conclusiones

Presumimos que durante el Plioceno y parte del Cuaternario, el extremo posterior de la placa del Caribe se extendió a través de Guatemala, entre el sistema de fallas Polochic-Motagua y el arco volcánico/CAFA. Además, esta región experimentó una alargamiento este-oeste y una transtensión dirigida al NE, de manera distribuida a lo largo de estructuras y fallas mayores y menores. El alargamiento cesó en las fallas normales en el oeste de Guatemala cuando la deformación se localizó en el graben de la ciudad de Guatemala y las estructuras circundantes. El mismo efecto ocurrió en Honduras adyacente a la falla de Motagua, ya que las fallas normales ya no acomodan

ningún movimiento geodésico en esa región [6]. Proponemos el modelo “alicato”, en el que la placa del Caribe se mueve hacia el este entre las mordazas superior e inferior de las pinzas de América del Norte/CAFA (figura 3). La localización de la tensión extensional en la fosa de la ciudad de Guatemala se transfirió progresivamente el oeste de Guatemala a la placa CAFA y/o América del Norte. Este modelo alicatado de localización de deformación progresiva en el tiempo concuerda con la deformación pasada observada en el oeste de Guatemala y el oeste de Honduras y el modelo actual de velocidad de GPS que representa un límite de placa de América del Norte-CAFA y el Caribe que termina en el graben de la ciudad de Guatemala.

Figura 3. Modelo de localización de deformaciones progresivas en el tiempo en la cuña del Caribe desde 4 Ma. El color indica esquemáticamente la intensidad de tensión relativa. NA- placa de América del Norte; CA- Placa del Caribe; CAFA- Antearco Centroamericano; CO- Plato de cocos; GCG- Graben de Ciudad de Guatemala; IG- Graben de Ipala; JF- Falla de Jalpatagua; ESFS- Sistema de fallas de El Salvador. un. 4 Ma (panel superior): Elongación distribuida de este a oeste tuvo lugar a lo largo de grandes fosas y numerosas fallas menores desde el oeste de Guatemala hasta el oeste de Honduras. B. 100 ka (panel central): tensión localizada hacia los grabens de Ciudad de Guatemala e Ipala, cesando el movimiento en estructuras menores en el oeste de Guatemala y, a su vez, transfiriendo el oeste de Guatemala a la placa de América del Norte y estabilizando el arco volcánico. C. 0 Ma (panel inferior): El alargamiento este-oeste solo se observa a través de del graben de Ciudad de Guatemala y del graben de Ipala, en menor medida. La deformación en estructuras menores ha cesado. El graben de la ciudad de Guatemala constituye el límite occidental entre las placas de América del Norte y el Caribe.



Referencias bibliográficas

1. Plafker, G. (1976). Tectonic Aspects of the Guatemala Earthquake of 4 February 1976. *Science*, 193 (4259), 1202-1208.
2. Authemayou, C., Brocard, G., Teyssier, C., Simon-Labric, T., Guittierrez, A., Chiquin, E.N., et al. (2011). The Caribbean-North America-Cocos triple junction and the dynamics of the Polochic-Motagua fault systems: Pull-up and zipper models. *Tectonics*, v. 30, p. TC3010, doi:10.1029/2010TC002814.
3. Franco, A., Lasserre, C., Lyon-Caen, H., Kostoglodov, V., Molina, E., Guzman-Speziale, M., et al. (2012). Fault kinematics in northern Central America and coupling along the subduction interface of the Cocos Plate, from GPS data in Chiapas (Mexico), Guatemala and El Salvador. *Geophysical Journal International*, 189, 1223-1236.

4. Álvarez-Gómez, J. A., Staller Vázquez, A., Martínez-Díaz, J. J., Canora, C., Alonso-Henar, J., Unsua-Arévalo, J. M., and Béjar-Pizarro, M. (2019). Push-pull driving of the Central America Forearc in the context of the Cocos-Caribbean-North America triple junction. *Nature*, 9, 11164.
5. Ellis, A., DeMets, C., Briole, P., Cosenza, B., Flores, O., Graham, S. E., et al. (2018). GPS constraints on deformation in northern Central America from 1999 to 2017, Part 1 – Time-dependent modelling of large regional earthquakes and their post-seismic effects. *Geophysical Journal International*, 214, 2177-2194.
6. Ellis, A.P., DeMets, C., Briole, P., Cosenza, B., Flores, O., Graham, S. E., et al. (2019). Deformation in northern Central America from 1999 to 2017 using GPS observations, Part 2: Block rotations, fault slip rates, fault locking, and distributed deformation. *Geophysical Journal International*, 218, 729-754.
7. Garnier, B., Tikoff, B., Flores, O., Jicha, B., DeMets, C., Cosenza-Murales, B., Hernandez, W., and Greene, D. (2022). Deformation in Western Guatemala associated with the NAFCA (North America-Central American Forearc-Caribbean) Triple Junction: Neotectonic Strain localization into the Guatemala City graben. *Tectonics*, 41, no. 2.
8. Garnier, B., Tikoff, B., Flores, O., Jicha, B., DeMets, C., Cosenza-Murales, B., Hernandez, D., Marroquin, G., Mixco, L., and Hernandez, W. (2020). An integrated structural and GPS study of the Jalpatagua Fault, southeastern Guatemala. *Geosphere*, 17, 1-25.
9. Legrand, D., Marroquín, G., DeMets, C., Mixco, L., García, A., Villalobos, M., et al. (2020). Active deformation in the San Salvador extensional stepover, El Salvador from an analysis of the April-May 2017 earthquake sequence and GPS data. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102854.
10. Rogers, R.D., Karason, H., and van der Hilst, R.D. (2002). Epeirogenic uplift above a detached slab in northern Central America. *Geology*, 30 (11) 1031-1034.
11. Titus, S. J., Housen, B., and Tikoff, B. (2007). A kinematic model for the Rinconada fault system in central California based on structural analysis of en echelon folds and paleomagnetism. *Journal of Structural Geology*: 29, 961-982.
12. Xu, S.S., Velasquillo-Martínez, L.G., Grajales-Nichimura, J.M., Murillo-Muñetón, G., and Nieto-Samaniego, A.F. (2007). Methods for quantitatively determining fault slip using fault separation. *Journal of Structural Geology*, 29, 1709-1720.
13. Xu, S.S., Nieto-Samaniego, A.F., and Alaniz-Alvarez, S.A. (2009). Quantification of true displacement using apparent displacement along an arbitrary line on a fault plane. *Tectonophysics*, 467, 107-118.
14. Marrett, R. and Allmendinger, R. W. (1992). Amount of extension on “small” faults: An example from the Viking graben. *Geology*, 20, 47-50.
15. Walsh, J., Watterson, J., and Yielding, G. (1991). The importance of small-scale faulting in regional extension. *Nature*, 351, 391-393.
16. Gross, M. R. and Engelder, T. (1999). Strain accommodated by brittle failure in adjacent units of the Monterey Formation, U.S.A.: scale effects and evidence for uniform displacement boundary conditions. *Journal of Structural Geology*, 17, 9, 1303-1318.
17. Reynolds, J. H. (1980). Late Tertiary Volcanic Stratigraphy of Northern Central America. *Bulletin of Volcanology*: 43, 3, 601-607.



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022

CICG Centro de
 Investigación en
 Ciencias Geológicas

Estado de esfuerzos tectónicos en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica: Implicaciones para la reactivación de fallas y amenaza sísmica

Allan López^{a*}

^aCentro de Investigaciones en Ciencias Geológicas [Universidad de Costa Rica] / Ingeniería Civil [Universidad Latina de Costa Rica].

Se ha reconstruido el campo de esfuerzo tectónico actual de la GAM mediante la inversión de 14 poblaciones de mecanismos focales y el paleo campo con los datos de indicadores cinemáticos mesoscópicos de falla, medidos por varios autores en 53 afloramientos de litologías Terciarias y con amplia cobertura regional, ambos grupos usando el programa Win_Tensor.

Se aplicaron las regulaciones estrictas del Mapa Mundial de Esfuerzos y se seleccionaron agrupaciones de eventos concentrados en volúmenes corticales en estrecha cercanía, con magnitudes M_w desde 3 hasta 5.5 y profundidades menores a 15 km. Parte de estos corresponden a secuencias sísmicas, bien definidas en el tiempo y espacio durante los últimos 40 años, estudiadas por la RSN y el OVSICORI. Los 67 tensores reducidos calculados para las dos poblaciones, presentan inestabilidades de su factor de forma $R = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$, que varía entre 0 y 1. Las respectivas y fuertes permutaciones de sus ejes σ_2 / σ_1 , explican la coexistencia de regímenes inversos y transpresivos, controlados por una dirección general del Esfuerzo Horizontal Máximo-EH Max al N18-55°E, aunque en varias localidades está rotado al N y NW. La transtensión y distensión se encuentran subordinadas a dichos regímenes tectónicos. La buena correlación entre los tensores de esas dos fuentes de datos con la dirección de los conos volcánicos monogenéticos Cuaternarios asociados al volcán Irazú, indican que, durante el intervalo tectónico considerado, el campo de esfuerzos se ha mantenido relativamente estable pero muy activo.

Con los tensores determinados y sus magnitudes absolutas se modelaron las tendencias al deslizamiento ($T_s = \tau / \sigma_n$) y a la dilatación ($T_d = \sigma_1 - \sigma_r / \sigma_1 - \sigma_3$). Las estructuras con mayor potencial sísmico por su longitud, historia sísmica, orientación de su plano respecto al EH Max, como las fallas Alajuela, Picagres, Garita, Jaris, Navarro, Aguacaliente, presentan valores de TS medio a altos, por lo que esta investigación en curso, contribuye con un elemento determinista adicional, al análisis de la amenaza sísmica local en el centro de Costa Rica.

*Autor para contacto: allan.lopez@geologos.or.cr



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022

CICG Centro de
 Investigación en
 Ciencias Geológicas

Morfometría tectónica del Valle Central de Costa Rica

Allan López^{a*}

^aCentro de Investigaciones en Ciencias Geológicas [Universidad de Costa Rica] / Ingeniería Civil [Universidad Latina de Costa Rica].

Se extrajeron desde Modelos de Elevación Digital con alta resolución y mediante el uso de varios programas de cómputo especializados, las huellas y marcas tectónicas en el drenaje local, regional y en las geoformas, generadas por eventos mayores deformacionales recientes en el sector NW del límite entre la Placa Caribe y la microplaca de Panamá en el centro de Costa Rica.

Específicamente, se calcularon una serie de índices morfométricos cuyos valores son proporcionales a las tasas de desplazamiento y geometría de las fallas tectónicas involucradas o señalan localidades anómalas no visibles a simple vista o por otros medios convencionales. Entre estos se aplicaron los índices de Hack, Ksn, Chi, junto a otros para detectar los quiebres del terreno-Kps y la dirección del basculamiento de cuencas. Por ejemplo, la falla de Alajuela presenta valores anómalos de su gradiente Chi, superiores a los 450, en coincidencia y en localidades al norte de su traza principal, lo cual sugiere la existencia de bifurcaciones activas que no pueden menospreciarse. Igual comportamiento se detectó en las cercanías de Río Cuarto (10.330/-84.241) en donde el río Toro corta el escarpe de San Miguel, con valores del índice de Hack (SL) superiores a los 667, pertenecientes ya al rango superior y que llegan hasta los 8825, valores ambos claramente anómalos y se interpretan como la evidencia de una falla, posiblemente rumbo-deslizante, no identificada anteriormente.

Se logró comprobar mediante la calibración, correlación regional y control de campo que la metodología es aplicable en los complicados escenarios geológicos locales y se validó su aplicación al determinarse resultados geológicamente lógicos y coherentes. Estos se presentan en una serie de mapas y perfiles temáticos acompañados de varias tablas resumen. El implementar y desarrollar la aplicación sistemática de este método analítico de tecnología de punta conlleva un salto cualitativo y cuantitativo muy novedoso en el medio geocientífico local y regional, y constituye una herramienta poderosa para el análisis de la tectónica activa, la amenaza y riesgo sísmico involucrado.

*Autor para contacto: allan.lopez@geologos.or.cr



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Estudio de la sismicidad reciente en la frontera sur entre Costa Rica y Panamá

Ronnie Quintero^{a*}, Guillermo E. Alvarado^b, Jiri Zahradník^c,
 Daniela Campos-Durán^d, Federico Güendel^e, Jaime Toral Boutet^f

^aObservatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

^bComisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). Unidad de Investigación y Análisis del Riesgo, Costa Rica

^cFaculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague, Czech Republic

^dEscuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

^eObservatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Retirado

^fInvestigador Independiente

En este trabajo, contribuimos a la comprensión del entorno tectónico de transición en el sureste de Costa Rica, que pasa de la subducción a lo largo de la Fosa Mesoamericana, a la transformada de rumbo en la Zona de Fractura de Panamá y nuevamente a la subducción a lo largo del Cinturón Deformado del Sur de Panamá. Esta estructura tectónica forma el punto triple de límite de placas de Panamá frente a la costa de la Península de Burica.

Usando una densa red sísmica local, compuesta de instrumentos de banda ancha y acelerógrafos estudiamos la sismicidad reciente en la frontera sur entre Costa Rica y Panamá, presentando resultados detallados relacionados con los sismos del 12 de mayo de 2019, Mw 6,0 (sismo de Laurel) y del 26 de junio de 2019, Mw 6,2 (sismo de Manaca Civil).

Concluimos que el hipocentro, tensor de momento, distribución de réplicas y deslizamiento del sismo de Laurel, indican una falla de cizalla lateral derecha, casi vertical y con orientación norte-sur. Esta falla rompió a profundidades entre 10 y 30 km en la corteza inferior de la Microplaca de Panamá, debajo de la falla mapeada de Canoas, la cual consideramos la originaria de este sismo y con deslizamientos máximos de 0,12 m, distribuidos hacia la superficie y al norte del hipocentro.

Para el sismo de Manaca, las réplicas se concentraron en un área con dirección NW-SE de 25 km de longitud y con profundidades entre 20 y 45 km. Uno de los planos nodales del mecanismo focal coincide con las ubicaciones de las réplicas, lo que respalda la hipótesis de que una falla de deslizamiento sinistral con buzamiento abrupto originó este evento, la distribución de deslizamientos fue uniforme a lo largo de este plano nodal alcanzando máximos de 0,2 m y con velocidad de ruptura hacia la parte superficial en los tres primeros segundos después de iniciada la nucleación. El movimiento en esta falla es una respuesta al esfuerzo causado por la subducción de la placa oceánica de Coco debajo de la Microplaca de Panamá (**MP**), en un ángulo de $\sim 30^\circ$ y a una velocidad de ~ 80 mm/año.

La sismicidad y mecanismos focales recopilados o calculados de catálogos globales y locales sugieren que el fuerte acoplamiento causado por la subducción de la Dorsal de Coco y por la subducción de la placa de Nazca debajo del **MP** es acomodado en gran medida por la migración del bloque cortical continental del arco externo en una combinación de fallas laterales izquierda con azimut NW-SE y fallas laterales derecha con rumbo norte que deforman la **MP**. El movimiento lateral izquierdo de los bloques corticales, en el lado de Costa Rica, es consistente con los movimientos observados en el sistema de fallas de Azuero-Sona en la Microplaca de Panamá y las fallas de Coiba y otras más en el Golfo de Chiriquí, Panamá.

*Autor para contacto: rquinter@una.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Dominios estructurales asociados a la subducción oblicua en la región nororiental de la placa del Caribe, Puerto Rico

Hernán Porras^{a,b*}, Víctor Huérfano^a

^aRed Sísmica de Puerto Rico, Universidad de Puerto Rico.

^bDepartamento de Ciencias Marinas, Universidad de Puerto Rico.

Abstract:

Puerto Rico has been shaken by large earthquakes that have generated several tsunamis that directly affected the coasts of the island in historical times, in 1867 and 1918 [1]. Due to this, different seismic hazard studies have been generated based mainly on instrumental and historical seismicity in Puerto Rico [2](Mercado, 1998) that have been used to define zones with tsunamigenic potential [1]. The goal is to improve knowledge about how the different fault segments with tsunamigenic potential are shared.

The northern-Bowin faults represent the structural limit of the tectonic sliver and cut the Mona canyon in the northern sector. This change in geometry during sinistral movement produces accommodation spaces, which are reflected as secondary extensional fractures such as a pull-apart basin. The south-central segment of Mona Canyon is the product of the E-W extensional event that gave rise to the N-S strike faults. Which could have originated during any phase of pre-Pliocene extension? The back arc that includes the Mayagüez graben and the Cabo Rojo graben, is an asymmetric extensional system with associated seismicity.

Palabras clave: Tectónica Puerto Rico, dominios estructurales, sismicidad, segmentos de falla, fuente tsunamigénica.

Key words: Puerto Rico tectonic, Structural domains, seismicity, fault segments, Tsunamigenic source.

Introducción

Según la base de datos global de tsunamis del, el mar Caribe ha experimentado más de 100 tsunamis históricos en los últimos 200 años. El tsunami más reciente observado en la cuenca del Caribe fue causado por el terremoto de Haití de 2010 con una Magnitud 7.0 [3]. Por su parte, Puerto Rico ha sido sacudida por grandes terremotos que han generado varios tsunamis que afectaron directamente las costas de la isla en tiempos históricos, en 1867 y 1918 [1]. Por lo que existe una alta probabilidad que un tsunami pueda afectar la costa de Puerto Rico en los próximos años.

Debido a esta potencial amenaza, se han generado diferentes estudios de amenaza sísmica basados principalmente en la sismicidad instrumental e histórica en Puerto Rico [2] que han sido utilizados para definir

*Autor para contacto: hernan.porras@upr.edu

zonas con potencial tsunamigénico [1]. Además, posterior a la última actualización de la zonificación sísmica, se han publicado numerosos estudios en zonas puntuales alrededor de la isla. Estos incluyen diferentes modelos numéricos de deformación cortical y transferencia de esfuerzos para explicar las posibles fuentes tsunamigenicas cercanas a la Isla [4][5][6][7] y [8]. Estos modelados numéricos están basados en observaciones de sismicidad y de deformación cortical e incorporan, en algunos casos, datos batimétricos y sísmicos de reflexión, lo que proporciona una visión detallada del comportamiento de la falla tanto en superficie como en profundidad.

A pesar de estos avances, actualmente no están del todo establecidos los límites de cada segmento de falla ni su estilo de deformación. Por lo que no existe un modelo que integre las variaciones en la geometría, dominios estructurales y la sismicidad de las estructuras a lo largo del rumbo y establezca una relación entre los diferentes segmentos de fallas. Por tal motivo, en el presente estudio establecemos un criterio estructural-geométrico y sísmico para delimitar la segmentación de las fallas y proporcionar parámetros sismo tectónico de cada segmento. Estos parámetros son importantes para mantener actualizada la zonificación de amenaza por tsunami.

El objetivo de este trabajo es mejorar el conocimiento sobre cómo se compartan los distintos segmentos de falla con potencial tsunamigénico. Para cumplir este objetivo, realizaremos una descripción general de los antecedentes geológicos y geofísicos previamente publicados para construir un modelo tridimensional que muestre la relación entre la profundidad de las estructuras, los cambios de volumen y el desarrollo estructuras.

Metodología

Nos enfocamos en revisar los modelos geodinámicos y sismo-tectónicos publicados anteriormente, con el fin de actualizar la geometría y la cinemática del patrón de fallas. Hemos tomado como base trabajos basados en sísmica de reflexión [6][7], sismicidad y deformación cortical mediante [4], que han contribuido sustancialmente al entendimiento de la compleja configuración tectónica del área.

Resultados y análisis

Puerto Rico ubicado en la región N-E de la placa Caribe, ha desarrollado en la región del antearco un sistema de fallas compuesto por varios segmentos principales de fallas con movimiento sinistral, producto de la subducción oblicua entre las placas Norte Americana – Caribe [4].

Nuestros resultados sugieren que las fallas conocidas como Bunce, Bowin y Septentrional ubicadas en el antearco (figura 1), están segmentadas y separadas por discontinuidades geométricas. Las fallas septentrional-Bowin representan el límite estructural del sliver tectónico y cortan el cañón de Mona en el sector norte. En ese punto, la intersección entre las estructuras principales con diferente rumbo, representa un cambio de geometría en la estructura principal. Este cambio de geometría durante el movimiento sinistral produce espacios de acomodo, que son reflejados como fracturas extensionales secundarias con geometría curva. Esta zona de transición entre la falla Bowin – septentrional, es por lo tanto, una cuenca de pull-apart. Esta característica posiblemente esté asociada a la distribución de esfuerzos normales-transtensionales. Esta distribución de esfuerzos podría ser la responsable de producir los terremotos de 1918, 1946.

En respuesta a estos cambios en la interface de subducción, el tras arco también muestra un patrón de deformación caracterizado por un régimen extensional (figura 1) durante el Holoceno tardío que incluye las áreas de plataforma al oeste y al sur de Puerto Rico [6] [7] [9] [10] y [11]. En esta zona los diferentes segmentos parecen tener una mejor correlación con la actividad sísmica en un sistema extensional asimétrico.

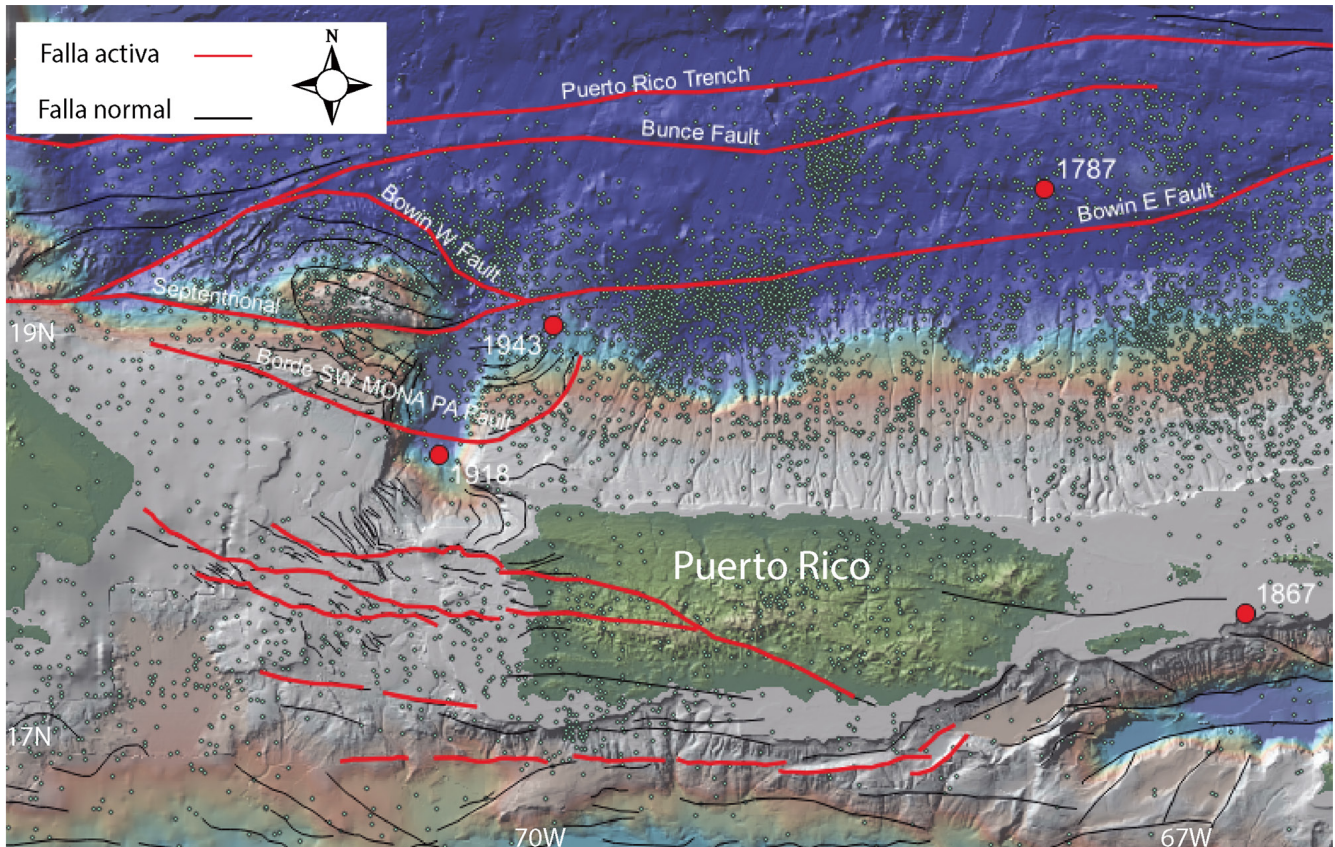


Figura 1. Modelo tectónico del sector W de Puerto Rico.

Conclusiones

El sector norte del canon de mona es un pull-apart transtensivo con las fallas activas en los bordes. Se ha formado (deformado) en respuesta a un cambio en la geometría de la falla del borde del sistema de sliver en el ante arco durante el Plioceno.

El cañón de mona en el segmento central-sur es producto del evento extensional E-W que dio origen a las fallas con strike N-S. El cual pudo ser originado durante cualquier fase de extensión pre-Pliocena. El tras arco que incluye el graben de Mayagüez y el graben de Cabo Rojo, son un sistema extensional asimétrico con sismicidad asociada.

Referencias bibliográficas

1. Huérfano, V., von Hillebrandt-Andrade, C., & Báez-Sanchez, G. (2005). Microseismic activity reveals two stress regimes in southwestern Puerto Rico. Active tectonics and seismic hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and offshore areas, 385, 81-101.
2. Mercado, A., and McCann, W.R. (1998). Numerical simulation of the 1918 Puerto Rico tsunamis. *Natural Hazards*, 18, 57-76.

3. Chacón-Barrantes, S., López-Venegas, A., Sánchez-Escobar, R., & Luque-Vergara, N. (2018). A collaborative effort between Caribbean States for tsunami numerical modeling: case study CaribeWave15. *Pure and Applied Geophysics*, 175(4), 1405-1428.
4. ten Brink, U., Lin, J., 2004. Stress interaction between subduction earthquakes and forearc strike-slip faults; modeling and application to the northern Caribbean plate boundary. *Journal of Geophysical Research* 109. doi:10.1029/2004JB003031
5. Laurencin, M., Marcaillou, B., Graindorge, D., Klingelhoefer, F., Lallemand, S., Laigle, M., & Lebrun, J. F. (2017). The polyphased tectonic evolution of the Anegada Passage in the northern Lesser Antilles subduction zone. *Tectonics*, 36(5), 945-961.
6. Mondziel, S., Grindlay, N., Mann, P., Escalona, A., & Abrams, L. (2010). Morphology, structure, and tectonic evolution of the Mona canyon (northern Mona passage) from multibeam bathymetry, side-scan sonar, and seismic reflection profiles. *Tectonics*, 29(2).
7. Chaytor, J. D., & Uri, S. (2010). Extension in mona passage, Northeast Caribbean. *Tectonophysics*, 493(1-2), 74-92.
8. Granja Bruña, J., Ten Brink, U. S., Carbó-Gorosabel, A., Muñoz-Martín, A., & Ballesteros, M. G. (2009). Morphotectonics of the central Muertos thrust belt and Muertos Trough (northeastern Caribbean). *Marine geology*, 263(1-4), 7-33.
9. Gardner, W.D., Glover, L.K., Hollister, C.D., 1980. Canyons off northwest Puerto Rico: studies of their origin and maintenance with the nuclear research submarine NR-1. *Marine Geology*, 37, 41-70.
10. Calais, E., Mazabraud, Y., Mercier de Lépinay, B., Mann, P., Mattioli, G., & Jansma, P. (2002). Strain partitioning and fault slip rates in the northeastern Caribbean from GPS measurements. *Geophysical Research Letters*, 29(18), 3-1.
11. Grindlay, N. R., Mann, P., Dolan, J. F., & van Gestel, J. P. (2005). Neotectonics and subsidence of the northern Puerto Rico-Virgin Islands margin in response to the oblique subduction of high-standing ridges. *Active Tectonics and Seismic Hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and Offshore Areas*, 385, 31-60.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022

Adaptación de un Modelo de Aprendizaje Automático aplicado a la Exploración Geotérmica

José David Cáceres^{a*}, Javier García Reynaud^b, Elisabeth Espinoza Canales^{c,b}

^a Facultad de Ciencias Espaciales, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Tegucigalpa Honduras.

^b Departamento de Ciencias Naturales, Universidad Pedagógica Nacional, Francisco Morazán, Tegucigalpa Honduras.

^c Escuela de Física, Facultad de Ciencias., Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Tegucigalpa Honduras.

Abstract: MaxEnt is a general purpose machine learning model based on probabilistic theory [14] maximizing categorical entropy in a data set. MaxEnt has been used in a variety of fields such as computational linguistics [1], although one of its greatest applications has been in species distribution [10]. In the ongoing research, the utility for cost and time efficient distribution mapping of geothermal manifestations in Honduras and other countries was evaluated. For that purpose, several data layers were chosen from different open data sources: aquifers, volcanic activity, faults and geological formations of the study area. Surface temperature was estimated using Landsat 8 images: Google Earth Engine was used to obtain a median surface temperature from monthly time series corresponding to data of 2021. FLOSS software was used to apply the model. The result shows that the method has significant overlap with known geothermal manifestations and can be used as an input in further geothermal exploration activities.

Palabras clave: energía geotérmica, MaxEnt, predicción, distribución espacial .

Key words: geothermal energy, MaxEnt, prediction, spatial distribution.

Introducción

Centroamérica es una de las regiones con potencial geotérmico. Uno de los desafíos hasta ahora son los inventarios de manifestaciones geotérmicas, que en la mayoría de los países de Centro América no son completados y creados con el objetivo de buscar campos geotérmicos para la generación eléctrica. Con los avances tecnológicos y el crecimiento del rol de Usos Directos para la región, este tipo de inventarios recibe una nueva significancia. Debido a la falta de recursos financieros y capacidad humana, aplicaciones de sensores remotos para la delimitación de áreas con potencial geotérmico y visibilidad en manifestaciones hidrotermales o fumarolas (anomalías geotérmicas) son clave.

El objetivo de este estudio es evaluar la aplicación de MaxEnt para su utilidad en la generación de mapas probabilísticas de manifestaciones geotérmicas a escala nacional/regional (resolución de 30 metros), así como recomendar la combinación de variables que brinden la mejor predicción para el modelo generado.

*Autor para contacto: jcaceres@unah.edu.hn

Materiales y Metodología

Colección y Preparación de Datos

Se seleccionaron como variables explicativas o covariables para aplicar el modelo MaxEnt: Los acuíferos, por ser reservorios de calor y comunicantes de flujos geotérmicos. Se contó con una capa de hidrogeología que proviene del Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA). Se utilizó un mapa de actividad volcánica [11], considerando que los volcanes constituyen la fuente fundamental de la energía geotérmica. Las fallas, por constituir conductos o barreras de agua geotermal; estos datos se tomaron de un catálogo global instrumental de terremotos [12],[13]. La litología, el mapa geológico de la zona de estudio [5], con una escala de 1:500,000 proporcionó datos sobre la cronología y la composición litológica, factores relevantes considerando su papel en el atrapamiento de calor en sistemas geotérmicos. Considerando su correlación con la presencia de manifestaciones geotermales, se generó un mapa de temperatura superficial estimada, correspondiente a la mediana de la serie de tiempo de 2021 generada a partir de imágenes Landsat 8, utilizando Google Earth Engine.

Modelado

Maximum Entropy es un algoritmo de aprendizaje automático de presencia única que contrasta iterativamente valores de predictores ambientales en ubicaciones de ocurrencia con los de una gran muestra de antecedentes tomada a lo largo del área de estudio [2]. Entre la gran cantidad de posibles distribuciones de probabilidad, MaxEnt selecciona la que tiene la entropía máxima (o la más uniforme) como el mejor representante de los datos [9] y asigna una probabilidad de ocurrencia a cada ubicación. La importancia de variable se cuantifica en función del aumento de la ganancia de entrenamiento regularizada mediante las iteraciones de desarrollo del modelo, donde la ganancia de entrenamiento denota el aumento en la probabilidad de ignición en los lugares de entrenamiento.

Evaluación de los modelos

Para comparar la precisión de predicción entre los tres modelos, se calculó el área bajo la curva (AUC) de la representación de la característica operativa del receptor (ROC) [4]. El gráfico ROC (figura 1) muestra la relación entre la tasa de error falso positivo (1-especificidad, donde la especificidad es la proporción de no igniciones que predijo correctamente) y la tasa verdadero-positiva (sensibilidad o la proporción de igniciones predichas correctamente) para cada umbral valor a la probabilidad de presencia predicha por el modelo. El AUC es una métrica independiente del umbral porque evalúa el rendimiento de un modelo en todos los valores umbral posibles [3]. El AUC varía de 0.5 a 1, donde 0.5 es análogo a una predicción completamente aleatoria y 1 implica una predicción perfecta.

Los valores de AUC entre 0.5 y 0.7 indican pobre, entre 0.7 y 0.9 indican moderada, y mayor que 0.9 denota un alto rendimiento del modelo [8]. Aunque el AUC ha sido criticado [6], es el método estándar para evaluar la precisión de predicción debido a su independencia de umbral y la facilidad de interpretar sus resultados.

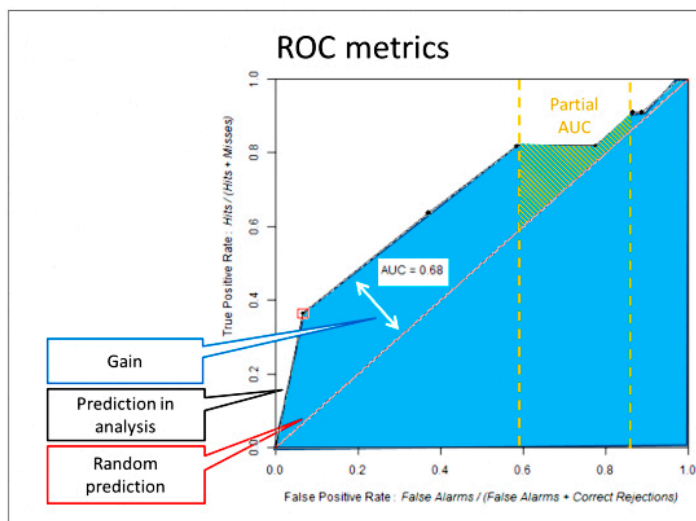


Figura 1. Curva ROC y métricas respectivas. Fuente: Tomado [7].

Resultados y Análisis

Para analizar el desempeño del modelo, se realizaron cinco corridas experimentales, para determinar la mejor combinación de variables y parámetros que brindaran el mayor poder predictivo. Estas corridas fueron parametrizadas como se muestra en la tabla 1.

Rendimiento de los enfoques de los modelos

El rendimiento predictivo basado en datos de prueba independientes fue adecuado para todas las modelaciones ejecutadas. Los resultados generados por la validación de MaxEnt y la validación independiente fueron similares.

Los modelos se calibraron con el 80% de los datos de manifestaciones repostados por la Empresa Nacional de Energía Eléctrica y la Secretaría de Energía de Honduras. El 20% restante se utilizó como datos de prueba para analizar el rendimiento predictivo de los modelos con datos no considerados por MaxEnt. Los valores de AUC obtenidos para ambos modelos y para ambos datos de prueba se presentan en la tabla 2.

El modelo R05 obtuvo el tercer mejor valor con el AUC generado dentro de MaxEnt (figura 2) y el mejor resultado con la validación realizada con los datos independientes (figura 3).

Modelo	Features	Iteraciones	Regularización	Variables
R01	Linear, Quadratic, Product	900	3	Todas
R02	Linear, Quadratic, Product, Hinge	500	1	Todas
R03	Todos	500	1	Todas
R04	Todos	900	1	Omitir pclas_faultss, prstrvlcd, prstrvlcpc, prstrvlcpc, prstrvlcfv
R05	Todos	900	1	Omitir pclas_faultss, prstrvlcd, prstrvlcpc, prstrvlcpc, prstrvlcfv, prstrvlcs

Tabla 1. Parámetros considerados para cada Modelo.

Modelo	AUC MaxEnt	AUC Independiente
R01	0.804	0.761
R02	0.834	0.765
R03	0.873	0.777
R04	0.868	0.779
R05	0.866	0.784

Tabla 2. Valores de AUC obtenidos para cada modelo.

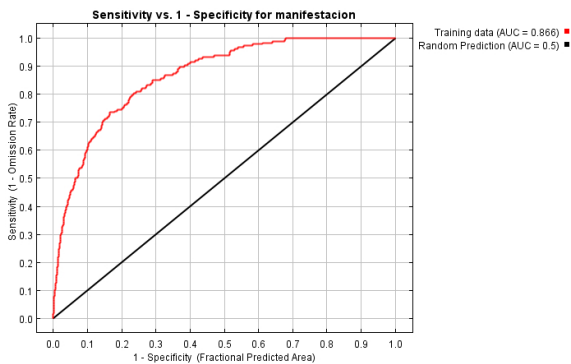


Figura 2. Curva ROC de la validación generada por MaxEnt para el R05.

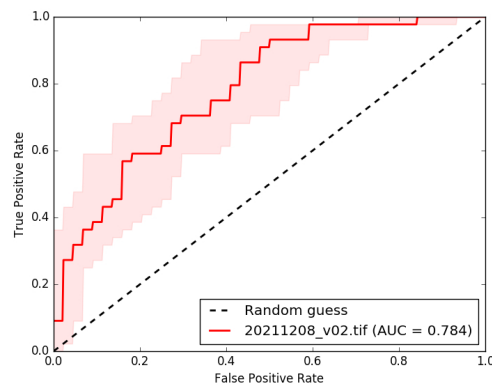


Figura 3. Curva ROC de la validación con datos independientes para el R05,

Importancia de las variables

Se realizó el análisis de medidas de importancia nativa y de jackknife de importancia. La variable ambiental con mayor ganancia cuando se usa aisladamente es la prstrvlc, que por lo tanto parece tener la información más útil por sí misma. La variable ambiental que disminuye la ganancia más cuando se omite es también la prstrvlc, que por lo tanto parece tener la mayor cantidad de información que no está presente en las otras variables. En la figura 4 las barras denotan el área bajo la curva de la curva característica del operador receptor (AUC de ROC). La barra roja representa el AUC de modelo completo, mientras que las barras azules indican el AUC de los modelos univariados para las variables correspondientes y las barras aqua indican el AUC de los modelos con todas las variables excepto la variable correspondiente.

Usando las clasificaciones promedio de las medidas de importancia de la variable ambiental, la prstrvlc fue la mejor predictora idoneidad geotermal, seguido de cerca por la prstrvlcm y prstrvlcvf para los modelos basados en MaxEnt. Dichas variables están asociadas a proximidad a estructuras de origen volcánico.

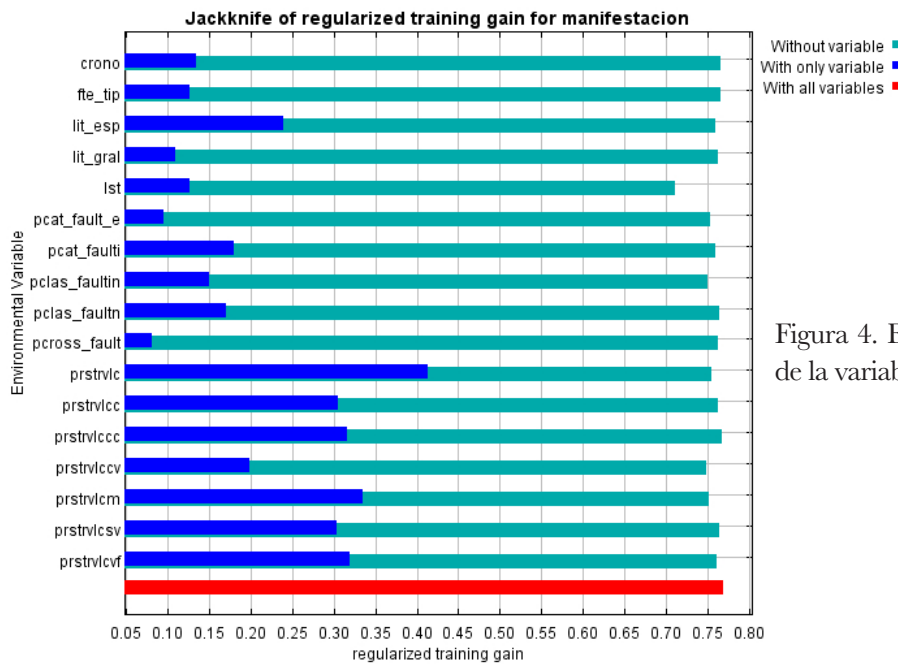


Figura 4. Estimaciones Jackknife de importancia de la variable para el modelo R05.

Conclusiones

Se analizaron las diferencias en el rendimiento y la importancia de las variables para los cinco modelos generados, encontrado que los parámetros del R05 tuvieron un desempeño ligeramente mejor que el resto de los modelos en términos de precisión de predicción. Debido a que no existe una herramienta de modelado única y perfecta, los estudios de idoneidad de alteración geotermal pueden beneficiarse del uso de enfoques múltiples, lo que arroja un rango de predicciones en lugar de un solo mapa.

Se recomienda observar en los modelos, la escala de las capas de entradas, principalmente la capa de Geología que se ha derivado del mapa nacional 1:500,000, lo cual generaliza en gran medida el resultado, pero es la única información disponible de este tipo en la zona de estudio. También se analizó el efecto de eliminar la/las variables que menos aportaron a la adecuación del modelo para analizar los cambios que podrían ocurrir en el ajuste del modelo, lo que justifica las diferencias de los cinco modelos desarrollados.

Finalmente, de acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que MaxEnt tiene un alto potencial para desarrollar los mapas de idoneidad de alteraciones geotermales para identificar la distribución espacial de las mismas.

Referencias bibliográficas

1. Berger, A. L., Pietra, S. D., and Pietra, V. J. D. (1996). A maximum entropy approach to natural language processing. *Computing Linguistics*, 22(1).
2. Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E. y Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43–57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
3. Franklin, J. (2010). Mapping species distributions: spatial inference and prediction. Ecology, Biodiversity and Conservation. Cambridge University Press.
4. Hanley, J. A. y McNeil, B. J. (1982). The Meaning and Use of the Area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve. *Radiology*, 148(1), 29–36.
5. Kozuch, M. J. (1991). Mapa Geológico de la República de Honduras, escala 1: 500,000 Instituto Geográfico Nacional. Tegucigalpa, Honduras.
6. Lobo, J. M., Jiménez-Valverde, A. y Real, R. (2008). AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2), 145–151. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00358.x>
7. Mas, J.-F., Filho, B., Pontius, R., Gutiérrez, M. y Rodrigues, H. (2013). A Suite of Tools for ROC Analysis of Spatial Models. ISPRS. *International Journal of Geo-Information*, 2(3), 869–887. <https://doi.org/10.3390/ijgi2030869>
8. McCune, B. y Grace, J. B. (2002). Analysis of Ecological Communities (Vol. 2). MJM Software Design, Gleneden Beach, OR. [https://doi.org/10.1016/s0022-0981\(03\)00091-1](https://doi.org/10.1016/s0022-0981(03)00091-1)
9. Phillips, S. J., Dudík, M., and Schapire, R. E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. In Proceedings of ICML.
10. Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire RE (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecology Model* 190: 231-259.
11. Qin, Q., Zhang, N., Nan, P., & Chai, L. (2011). Geothermal area detection using Landsat ETM+ thermal infrared data and its mechanistic analysis—A case study in Tengchong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(4), 552-559.
12. Simkin, T., Tilling, R.I., Vogt, P.R., Kirby, S.H., Kimberly, P., Stewart, D.B., (2006). This Dynamic Planet: World Map of Volcanoes, Earthquakes, Impact Craters, and Plate Tectonics. Smithsonian Institution, U.S. Geological Survey, U.S. Naval Research Laboratory, Institute of Earth Sciences Jaume Almera, Spanish National Research Council.
13. Storchak, D.A., Di Giacomo, I. Bondár, E.R. Engdahl, J. Harris, W.H.K. Lee, A. Villaseñor and P. Bormann (2013). Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009). *Seismological Research Letters*, 84, 5, 810-815, doi: 10.1785/0220130034.
14. Weinman, J. and Lidaka (2011). Large-Scale Machine Learning.GPU Computing Gems Emerald Edition. 277-291,doi: 10.1016/B978-0-12-384988-5.00019-X





MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Investigaciones geotérmicas de media-baja entalpía para usos directos en el municipio de Tipitapa, Managua, Nicaragua- Resultados geológicos y geoquímicos preliminares

Kelym Martínez^a, Lisbeth Herrera^a, Ruddy Romero^a, Fanor Narváez^a, Mayela Sánchez^a,
Marcos Delgado^a, Hermas Dávila^a, Lucrecia Cruz Gámez^{a*}

^a Dirección de Estudios Geotérmicos, Empresa Nicaragüense de Electricidad (DEG-ENEL)

Una campaña de reconocimiento geotérmico superficial se está realizando en el municipio de Tipitapa, Nicaragua en el marco del proyecto “Yacimientos II” de la Cooperación Alemana, con estudios geoquímicos, geofísicos (SP) y geológicos para evaluar el potencial de aprovechamiento del calor en proyectos de uso directo y relacionándolo con el desarrollo local.

Tipitapa se ubica entre estructuras geológicas de importancia regional (Graben de Nicaragua) y local (Falla Cofradía, Graben El Aeropuerto - El Playón) y presenta condiciones geotérmicas interesantes para la evaluación de potencial de uso. Las anomalías térmicas superficiales detectadas durante las investigaciones recientes se observan en las abundantes manifestaciones termales distribuidas en el área de interés con temperaturas hasta 80°C.

Geológicamente el área está constituida por depósitos cuaternarios; piroclastos y lavas pertenecientes al Grupo Managua originados a partir de erupciones explosivas de las Calderas de Apoyo y Masaya; ignimbritas soldadas, aglomerados y tobas pisolíticas del Grupo Las Sierras; lavas, tobas y aglomerados de la Formación Coyol que en conjunto con Las Sierras conforman el basamento del Municipio. Los piroclastos son mayoritariamente porosos y podrían ubicar un reservorio geotérmico.

Geoquímicamente prevalecen dos tipos de aguas: aguas ricas en sulfatos (SO₄), al Norte del municipio, con cationes Na-K formando aguas sulfatadas sódicas, correspondientes a aguas evolucionadas y aguas bicarbonatadas (HCO₃) con cationes Ca-Mg-Na, producto de lixiviación de las rocas por aguas meteóricas y mezcladas con acuíferos superficiales o bien por vaporización y desgasificación del fluido geotérmico y su condensación en zonas frías durante su ascenso a la superficie, detectadas al Sur del municipio. Aplicando geotermometría líquida Na-K-Ca, se estima valores de temperatura de 79-140°C.

Los fluidos calientes posiblemente provenientes de un reservorio geotérmico, circulan probablemente a través del sistema de Falla Cofradía y Graben el Aeropuerto-El Playón, ambos con orientación preferencial N-S. La falla Cofradía atraviesa todo el municipio de Tipitapa [1] y el Graben Aeropuerto – El Playón, constituido por los ramales de la Falla Cofradía y Falla El Aeropuerto [2].

Referencias

1. Frischbutter, A. (2002). Structure of the Managua graben, Nicaragua, from remote sensing images. *Geofísica Internacional*, 41(2), 87-102. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2002.41.2.279>
2. Rubí, C. (2011). Tectónica Activa en la Cuenca de Managua: Paleosismicidad de la falla Cofradía, Tesis doctoral. Barcelona, 334 pp.

*Autor para contacto: lucreciacruz@enel.gob.ni



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Petrografía de las muestras de Aramuaca y San Miguel, El Salvador y su implicación en geotermia

Elizabeth T. Henríquez^{a*}, Jennifer Aguilar^a, Adrián Mayén^b

^bConsejo Nacional de Energía, El Salvador

^aLAGEO S.A. de C.V., El Salvador.

Como parte del proyecto de Yacimiento II (2020-2023) implementado por BGR (Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania) sobre la identificación de yacimientos de energía geotérmica en Centroamérica para el desarrollo local, El Salvador está realizando estudios geocientíficos para identificar y caracterizar áreas de interés geotérmico. En una parte, se está realizando un mapeo geológico en el Municipio de San Miguel, incluyendo un área de interés en Aramuaca con toma de muestras de roca y análisis petrográficos respectivos.

Mientras que las muestras de Aramuaca pertenecen a andesita-basáltica porfírica con pocos minerales secundarios tales como los minerales de arcilla y hematita, la muestra de roca, tomada en un sitio de anomalía térmica (Apacunque) al NE de San Miguel, que fue identificado a través de la técnica de sensores remotos, demuestra un contenido de minerales secundarios de heulandita/clinoptilolita (tipos de ceolita), reemplazando casi toda la matriz de la roca.

La apariencia de minerales secundarios (ceolitas) se relaciona con alteración hidrotermal [1], que posiblemente están asociados al volcán de Chaparrastique.

En cambio, la poca presencia de minerales secundarios (arcilla y hematita) en las rocas recolectadas en Aramuaca se debe probablemente a la meteorización, que se manifiesta como meteorización esférioidal, la cual es una desintegración química y física en los componentes de la roca.

Referencias

1. Browne, P.R.L. (1978). Hydrothermal alteration in active geothermal fields. *Annual review of earth and planetary sciences*, 6 (1), 229-248.

*Autor para contacto: chenriquez@lageo.com.sv



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Conclusiones del uso de vehículos aéreos no tripulados en la exploración geotérmica en Costa Rica

Anyela Murillo Arroyo^{a*}

^aInstituto Costarricense de Electricidad

El uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en la exploración geotérmica en Costa Rica, es relativamente reciente. Sus primeras aplicaciones datan desde el año 2020, en donde se realizó el levantamiento y modelaje de la geomorfología de la zona norte del Campo Geotérmico Alfredo Mainieri Protti, así como la delimitación de la zona de manifestaciones hidrotermales del sector conocido como Las Hornillas.

Debido a que estas primeras aplicaciones arrojaron resultados muy prometedores sobre las variables que se estaban estudiando, se tomó la decisión de incluir el uso de los VANT en los estudios de la actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica, permitiendo realizar el reconocimiento de 1836 ha en los volcanes Tenorio, Platanar-Porvenir, Poás y Turrialba.

Durante la campaña de teledetección se utilizaron dos tipos de sensores aerotransportados, el primero orientado a la captura de imágenes y videos de datos térmicos-radiométricos, y el segundo a la toma de fotografías RGB para la elaboración de ortomosaicos y modelos de superficie 3D.

La metodología de esta nueva campaña de teledetección considero tres fases de trabajo, la primera relacionada a la definición de las áreas de estudio en donde a partir del criterio experto, se delimitaron las rutas y los parámetros de vuelos, la segunda etapa de investigación estuvo enfocada en el procesamiento de datos y su respectiva integración en el Sistema de Información Geográfica, y por último se trabajó en la generación de los modelos conceptuales geocientíficos.

Finalmente, el uso de los VANT permitió no solo obtener datos relevantes sobre la geomorfología de las áreas de estudio y la distribución de la temperatura en la superficie del suelo, sino que también fue posible atender a demanda los requerimientos de información geoespacial solicitados durante la campaña, evaluar zonas de interés localizadas en áreas con topografía compleja o de difícil acceso, disminuir los costos en la obtención de datos y mejorar la calidad y precisión de los mismos.

*Autor para contacto: amurilloar@ice.go.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Método de Potencial Espontáneo (SP) como alternativa de bajo costo en la exploración geotérmica de mediana y baja temperatura: experiencia de capacitación regional

Adrián Mayén^{a*}, Douglas Martí^b, Diego López^b, Alondra García^b

^aConsejo Nacional de Energía, El Salvador

^bUniversidad de El Salvador.

En el marco del proyecto de Yacimientos II, implementado por el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) de Alemania se han llevado a cabo capacitaciones geofísicas en la Prospección Geotérmica con Potencial Espontáneo (SP) para instituciones relevantes de la región, incluyendo estudios en áreas de interés geotérmico en la región del SICA.

La técnica geofísica de SP se caracteriza por ser un método geoelectrico pasivo que aprovecha el campo eléctrico natural presente en el subsuelo [1], relacionado con el flujo de agua subterráneo, siendo susceptible a los cambios de temperatura [2], por lo cual permite ser una técnica de reconocimiento y exploración en áreas con anomalías hidrotermales.

En el caso presente, el grupo de investigación de UES y CNE implementó el método SP en un área de interés al Oriente de El Salvador, conocida como Aramuaca, que se caracteriza por ser una laguna cratérica de tipo maar [3]. En su zona de influencia se distinguen cinco unidades correspondientes a diferentes miembros de las formaciones Cuscatlán y San Salvador (C1, C2, C3, S5b y Qf) [4]. Los resultados preliminares de los estudios demuestran una buena respuesta a cambios litológicos superficiales, obteniendo valores de potencial espontáneo que van desde los -18 mV a los 50 mV, observándose un cambio de los valores de SP en el límite entre la extensión que corresponde a los materiales correspondientes a la unidad litológica de conos de acumulación de la formación San Salvador y las piroclastitas ácidas de la formación Cuscatlán más al Este del área investigada. Así mismo, se obtuvo una respuesta de 22 mV en las cercanías del pozo que posee la principal anomalía termal, siendo un valor anómalo teniendo en cuenta los valores de SP en los alrededores.

Referencias

1. Barde-Cabusson, S., Finizola, A. and Grobde, N. (2021), "A practical approach for self-potential data acquisition, processing, and visualization", *Interpretation* 9: T123-T143. <https://doi.org/10.1190/INT-2020-0012.1>
2. Corwin, R.F, Hoover, D.B.(1979). The self-potential method in geothermal exploration. *Geophysics* 44 (2): 226–245. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1440964>
3. Global Volcanism Program, (2013). Laguna Aramuaca (343101) in *Volcanoes of the World*, v. 4.10.6 (24 Mar 2022). Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution. Downloaded 17 May 2022 (<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=343101>). <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>
4. Baxter, S. (1984). *Léxico estratigráfico de El Salvador*. Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Rio Lempa; Programa Exploración de Hidrocarburos de El Salvador. San Salvador, El Salvador.

*Autor para contacto: amayen@cne.gob.sv



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Geoquímica de exploración en Namasigüe y El Triunfo, Choluteca, Muestreo de época seca

Carlos Guifarro^a, Miguel García^{a*}, Florián Brueckner^b

^aEmpresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE)

^bInstituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania (BGR)

El propósito de la presente investigación es la exploración geoquímica para desarrollar un Modelo Conceptual Geoquímico para un sitio de interés geotérmico con manifestaciones termales abarcando los municipios de El Triunfo y Namasigüe en el Sur de Honduras. Base de selección del área fueron características geoquímicas previamente conocidas a través de estudios de los Laboratorios de Los Álamos en los 80s. Dentro de los objetivos de esta investigación podemos destacar los siguientes:

1. Caracterizar la naturaleza hidrogeológica y geoquímica del régimen hidrotermal, sus principales características fisicoquímicas y su influencia en las manifestaciones hidrotermales mediante isotopía y diagramas de especies químicas.
2. Aplicación de geotermómetros según [1], Cuarzo 1977 y Na-K Fournier 1979, tanto como la creación de un modelo de mezcla Sílice – Entalpia y modelos con índice de saturación de especies minerales. Utilizando el programa phreeqc de Aquachem® 4.0.
3. Proponer un Modelo Conceptual Geoquímico del sistema geotérmico.

La metodología del muestreo se realizó mediante técnicas de recolección para los análisis isotópicos (¹⁸O, ²H), metales alcalinos (Na, K, Mg, Ca y Li), metales pesados: (Fe, Pb, Cd, Zn, y Mn), análisis de nutrientes (NO₃, SO₄, NH₄, NO₂ y PO₄), así también trazadores como el Boro. Complementariamente se aplicaron técnicas de Colorimetría, Titulación Potenciométrica, Análisis de Absorción Atómica y Espectroscopia laser.

Los muestreos han demostrado una tendencia de influencia geoquímica en dirección NE-SO, lo que corresponde a la orientación de la falla Guayape que se supone tener una influencia en el área de interés. La composición química Na-Cl encontrada y la posición de las aguas en los diagramas triangulares de Aniones y Cationes, muestran que estas aguas corresponden a aguas termales casi maduras. Los Geotermómetros aplicados la temperatura del reservorio podría estimarse entre los 140 a 160 °C. Según todos los Geotermómetros mencionados anteriormente en el inciso 2.

Referencias

1. Giggenbach WF (1988) Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52:2749–2765.

*Autor para contacto: mgarciaw@enee.hn



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Aplicación de sensores remotos para el mapeo de lineamientos en la identificación de áreas de interés geotérmico en Nacaome, Departamento de Valle, Honduras

Maynor Ruíz Álvarez^a, Alina Ermertz^b

^a Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra. Departamento de Física de la Tierra. UNAH.

^b Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR).

El presente documento presenta los resultados obtenidos de un análisis de lineamientos estructurales basado en imágenes satelitales y modelos de elevación del terreno en el Municipio Nacaome al sur de Honduras. Este estudio atribuye al proyecto piloto “Clasificación del Recurso Geotérmicos en una manifestación en el Sur de Honduras” de la Secretaría de Energía de Honduras, que forma parte del proyecto regional de la Cooperación Alemana “Yacimientos II- Identificación de Recursos Geotérmicos en Centroamérica”, implementado por el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR).

Para el mapeo de lineamientos, se procesaron en QGIS imágenes satelitales multiespectrales (Sentinel-2), modelos de elevación de 12.5 m (DEM, Alos Palsar, 2019), mapas topográficos (IGN, 1970) e imágenes Google Earth de varias fechas de vuelos.

El estudio demuestra, que la mayor parte de los lineamientos mapeados son apreciables dentro de los modelos de elevación con direcciones preferenciales de NW-SE y NE-SW. Coinciden con las direcciones de las estructuras a gran escala que afectan a la zona, debido a los procesos tectónicos en el límite de las placas Cocos-Caribe y los sistemas a menor escala resultantes en el continente. También, pueden asociarse a una fase de desplazamiento del Bloque Chortís al NE, durante el Plioceno-Pleistoceno Inferior, donde ocurrió un aumento del ángulo de inclinación de la zona de subducción y una migración del vulcanismo hacia el océano Pacífico cf. deformación, propuesta por Weinberg [1].

El método se puede considerar útil donde la densidad de lineamientos no se atribuye a la estructura topográfica superficial, una situación que se da en el área de estudio. Las aguas termales encontradas en Nacaome coinciden con áreas de concentración de lineamientos, teniendo en cuenta la selección del área de estudio con característica fisiográfica homogenética.

Referencias

1. Weinberg, R.F., 1992. Neotectonic Development of Western Nicaragua. *Tectonics*, 11 (5): 1010-1017.

*Autor para contacto: mruiz@unah.edu.hn



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Movilidad de metal(oid)es en presas de lodos mineros: estudio de la velocidad de oxidación de los residuos y del aporte de As y Pb al medio hídrico

Mari Carmen Hidalgo^{a*}, Diego Rojas, Javier Rey^a, Julián Martínez^b, Rosendo Mendoza^b

^aDepartamento de Geología, Universidad de Jaén. Campus Científico -Tecnológico de Linares, Avenida de la Universidad s/n, 23700 Linares, España.

^bDepartamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad de Jaén. Campus Científico-Tecnológico de Linares, Avenida de la Universidad s/n, 23700 Linares, España.

Las escombreras de finos generadas en explotaciones mineras de sulfuros presentan un gran potencial de deterioro de la calidad de los recursos hídricos debido a la generación de drenajes con elevadas concentraciones en metal(oid)es y sulfatos. Este proceso es altamente dependiente de la disponibilidad de oxígeno y de su capacidad de entrada en el material poroso de la zona no saturada.

Con objeto de estudiar el proceso de oxidación de escombreras bajo condiciones de campo, se seleccionó una antigua balsa de lodos mineros -La Manzana- constituida por los restos de lavado de sulfuros metálicos de Pb y Ag (filón de Los Guindos, distrito minero de La Carolina, Jaén, España). En ella se perforaron dos sondeos con testigo continuo para muestreo de sedimentos no alterados a diferentes profundidades (hasta alcanzar el sustrato rocoso, a 28 m bajo la balsa), con objeto de analizar una serie de variables como materia orgánica, pH, contenido en metales y carbonatos, entre otras. También se instalaron a diferentes profundidades sensores de humedad, temperatura y conductividad eléctrica, junto con sensores de fibra óptica para registro del contenido en oxígeno. Los perfiles de oxígeno muestran un espesor oxidado de 3 m, lo que permite estimar una velocidad de avance del frente de oxidación de 10 cm/año. Ello supone que el avance de la oxidación se puede considerar más elevado que en otras balsas de climas semiáridos.

En los lodos analizados, se han obtenido concentraciones elevadas de Fe y Pb (con concentraciones medias de 17000 mg/kg y 1400 mg/kg, respectivamente), junto con contenidos también importantes para Mn (520 mg/kg) y As (160 mg/kg de media). Se aprecia una movilidad de metal(oid)es, principalmente en la zona superficial, con la localización a seis metros de profundidad de un nivel de material fino donde se han identificado las mayores concentraciones de estos elementos, junto con los valores más elevados de conductividad eléctrica. Aunque a lo largo del perfil predomina un pH alcalino y no se detecta la presencia de drenaje ácido de mina, el agua de la zona saturada de la presa presenta altos contenidos en sulfatos (>2900 mg/L), Fe (>27 mg/L) y Mn (>4 mg/L). Esto sugiere la existencia de un proceso de lixiviado de los sulfuros relacionado con las oscilaciones del nivel freático.

*Autor para contacto: chidalgo@ujaen.es



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Caracterización de fracturas mediante el uso de técnicas eléctricas y electromagnéticas en el distrito minero de Linares, España

Javier Rey^{a*}, Julián Martínez^b, Margarita Casado^a, Mari Carmen Hidalgo^a, Rosendo Mendoza^b

^aDpto. de Geología. EPS de Linares y CEACTEMA, Universidad de Jaén. Campus Científico Tecnológico, 23700 Linares, Jaén, España.

^bDpto. de Ingeniería Mecánica y Minera. EPS de Linares y CEACTEMA, Universidad de Jaén. Campus Científico Tecnológico, 23700 Linares, Jaén, España.

Abstract: The effectiveness of two geophysical methods in the investigation of geological structures with mining interest (former district of Linares, southeastern Spain) is analyzed. Specifically, the western boundary of the mining district is studied, where the mineralized veins stopped being exploited, conditioned by the presence of fractures.

Using electrical prospecting techniques (electrical resistivity tomography, ERI), the presence of several fractures that affect both the sedimentary cover and the Paleozoic basement is deduced. Time-Domain electromagnetic methods (TDEM) have also been used. In each measuring station, data has been taken with different configurations, which allow complementing the obtained information.

Palabras clave: Fallas, Tomografía Eléctrica, Técnica Electromagnética en el Dominio de los Tiempos, Distrito Minero de Linares, España.

Key words: Faults, Electrical Resistivity Tomography, Time-Domain Electromagnetic, Linares mining district, Spain.

Introducción

Las técnicas de prospección geofísica han evolucionado considerablemente en los últimos años. La llegada de sistemas automáticos de adquisición de datos, la disponibilidad de potentes ordenadores y el desarrollo de programas de modelización bi y tridimensional ha dado un gran impulso en la resolución de modelos geológicos complejos [1, 2].

Entre las ventajas asociadas a estas técnicas cabe destacar su bajo coste, la posibilidad de cubrir grandes extensiones de terreno, la enorme cantidad de datos que proporcionan y el no ser técnicas destructivas. Como inconveniente cabe señalar la posible indeterminación de los resultados debido a que son técnicas indirectas que requieren un proceso de inversión de datos [3]. Por ello, una buena práctica en la utilización de la geofísica implica el uso, al menos, de dos métodos distintos que permitan resolver la indeterminación [4, 5, 6 y 7].

En este trabajo se pretende analizar la capacidad de técnicas eléctricas (tomografía eléctrica, ERI) y

*Autor para contacto: jrey@ujaen.es

electromagnéticas (en el dominio de los tiempos, TDEM) para el estudio de estructuras geológicas con implicaciones mineras. Para ello, se ha elegido el antiguo distrito Minero de Linares (sureste de España, figura 1A), en el que se dispone de una detallada información geológica de superficie, lo que proporciona herramientas de verificación y correlación para las técnicas indirectas utilizadas en este trabajo.

Este distrito minero se caracteriza por la presencia de yacimientos filonianos, básicamente de galena (PbS), que encajan en granitoides paleozoicos [8 y 9]. El sector fue objeto de una intensa explotación minera, que se abandonó en los años ochenta del siglo pasado. El cierre estuvo condicionado por la bajada del precio de este mineral, así como por el agotamiento de las reservas.

Contexto Geológico

En la región estudiada se pueden diferenciar dos unidades geológicas: el Zócalo Paleozoico y la Cobertera Sedimentaria subhorizontal. La primera está constituida básicamente por filitas intensamente plegadas e intruidas por un stock granítico en las últimas etapas de la Orogenia Hercínica [8 y 9]. El zócalo aflora ampliamente en el distrito minero a favor de una estructura tectónica de tipo horst (figura 1A). Sobre este zócalo aparece la cobertera sedimentaria posthercínica, que se dispone de forma subhorizontal. La integran materiales triásicos y miocenos (figuras 1A y 1B). El Triásico está constituido básicamente por lutitas rojas con alguna intercalación de areniscas (más abundantes hacia la parte baja de la serie), con potencias en torno a 50-100 m. Sobre este conjunto y separados por una discontinuidad estratigráfica se deposita el Mioceno. En la base aparece un nivel de brechas calcareníticas que cambia lateral y verticalmente a margas y margo calizas con finas intercalaciones calcareníticas [8, 10, 11 y 5].

Las mineralizaciones del campo filoniano tienen un origen hidrotermal, donde la fase fluida y los metales se inyectaron a través de antiguas fracturas N35-N60E y NS-N20E en el zócalo paleozoico. Estos filones hidrotermales están constituidos principalmente por galena, esfalerita, calcopirita, pirita, cuarzo, ankerita y calcita [8 y 12].

En el sector occidental existe una falla tardihercínica que hunde el stock granítico (Fosa de Bailén) y que condiciona el límite del distrito minero [13]. El estudio de esta estructura tiene una importancia crucial para el desarrollo de las explotaciones mineras ya que su localización permitirá delimitar zonas de mayor interés para la investigación minera.

Esta estructura y otras subparalelas se han reactivado en etapas post-paleozoicas. La última manifestación de estos movimientos daría lugar a la que se conoce como Falla de Guarromán, cartografiable en superficie (figuras 1A y 1B). En este trabajo se pretende caracterizar estas estructuras mediante el uso combinado de las técnicas geofísicas anteriormente comentadas.

Materiales y Metodología

Tomografía Eléctrica (ERI)

Esta técnica de prospección geofísica consiste en determinar la distribución de resistividad aparente en el subsuelo a partir de un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno [3 y 14]. El diferente comportamiento geoelectrico permite obtener perfiles 2D, resultando ser una de las herramientas de carácter no destructivo más eficaces para el estudio y caracterización de discontinuidades en el subsuelo [14]. En los últimos años, esta técnica ha sido muy utilizada con resultados satisfactorios en estudios geológicos [15, 16, 17, 11, 5, 10, 6 y 7].

El método se basa en la implantación de numerosos electrodos metálicos en el terreno a lo largo de perfiles rectilíneos, con una separación determinada entre electrodos que viene condicionada por el grado de resolución y profundidad que se pretenda alcanzar; de tal modo que, a menor separación entre electrodos mayor resolución y a mayor

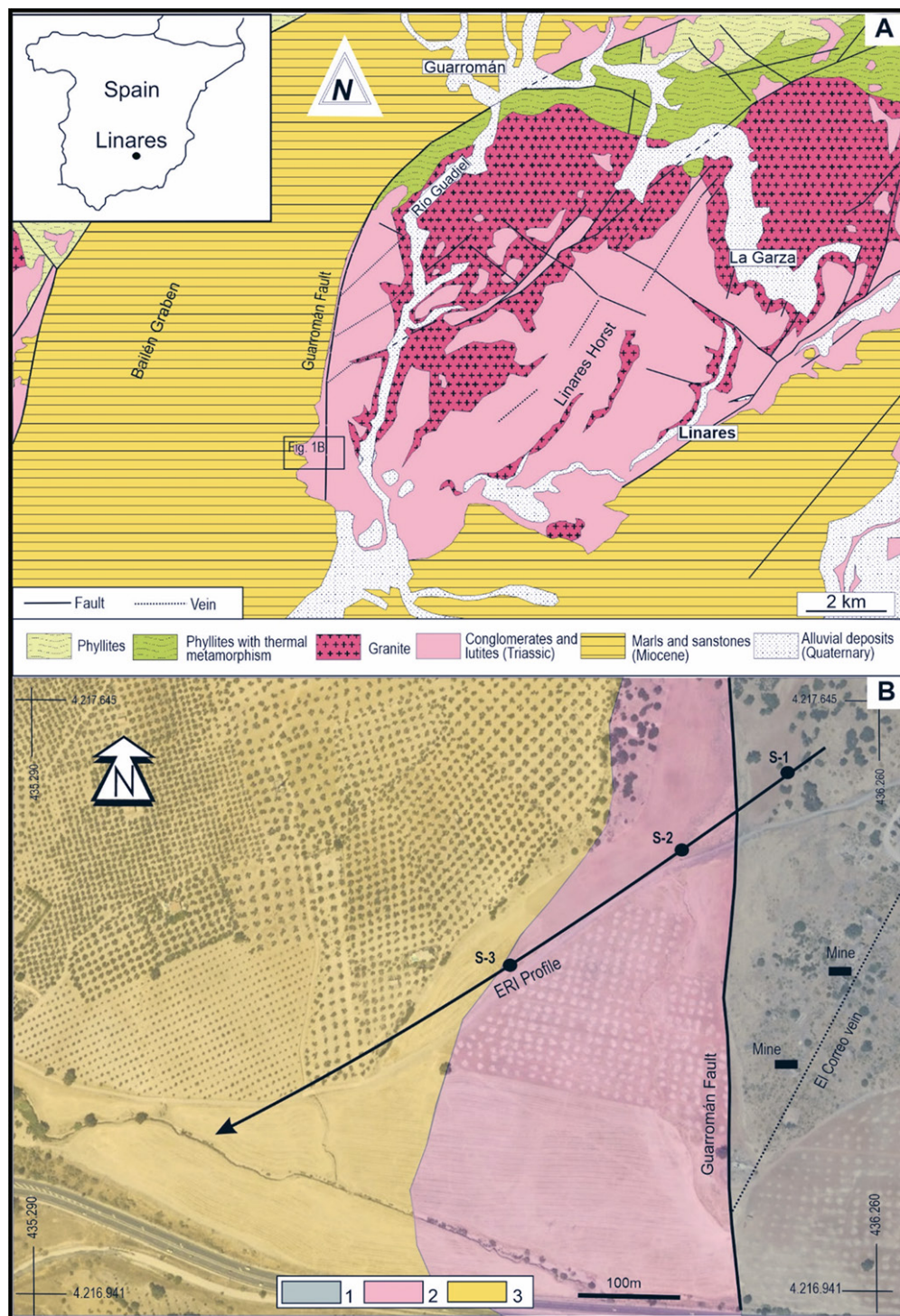


Figura 1. Mapa geológico regional, en el que se sitúa el sector estudiado (A). Cartografía de detalle del sector en el que se localiza el perfil de tomografía eléctrica (ERI) y el centro de las tres estaciones TDEM (S1, S2 y S3) (B). Filitas paleozoicas y nivel triásico basal (1), lutitas triásicas (2), margas y brechas miocenas (3).

separación mayor profundidad [18]. En este trabajo se ha utilizado una configuración electródica Wenner-Schlumberger por tener un buen comportamiento y estabilidad ante cambios de resistividades, tanto verticales como horizontales.

El equipo de tomografía eléctrica utilizado es el modelo RESECS de la marca Deutsche Montan Technologie (DMT). Las interpretaciones de los perfiles de tomografía eléctrica se han realizado a partir de las resistividades aparentes obtenidas en el trabajo de campo, tratadas por medio del software específico RES2DINV [1].

Método electromagnético en el Dominio de los Tiempos (TDEM)

El principio operativo del método electromagnético en el dominio de los tiempos (TDEM) consiste en hacer circular una corriente eléctrica por una bobina transmisora durante cortos periodos de tiempo. Cuando se interrumpe bruscamente el flujo de corriente se produce una variación del campo magnético primario, lo que induce una corriente eléctrica variable. Ésta, a su vez, genera un campo magnético secundario transitorio. Estas corrientes fluyen en trayectorias cerradas y migran en profundidad, disminuyendo su intensidad a lo largo del tiempo. Los cambios del campo magnético secundario con el tiempo inducen un voltaje transitorio en la bobina receptora. La forma del decaimiento de este voltaje aporta información sobre la distribución de la conductividad del subsuelo, lo que puede ser utilizado para su caracterización [19, 3, 20].

La técnica TDEM ha sido clásicamente utilizada en la prospección de yacimientos minerales [21, 13], en estudios hidrogeológicos [22 y 23] o en el análisis de cuencas sedimentarias [24, 6]. En los últimos tiempos, esta metodología también se emplea para la caracterización de intrusiones marinas [25].

El equipo de TDEM utilizado en este trabajo ha sido el modelo AIE-2 de la marca ELGEO Research&Production Company. Para la visualización y edición de las distintas curvas se utiliza el software TEMBIN. El proceso de modelización e inversión se realiza con el programa ZondTEM1D.

Resultados y Análisis

Tomografía eléctrica (ERI)

El perfil de tomografía eléctrica se realiza en dirección NE-SW (Fig. 2A). La longitud del perfil ha sido de 630 metros, disponiendo 64 electrodos sobre el terreno con un espaciado de 10 metros. El tiempo de inyección de corriente ha sido de 256 ms, con un delay de 128 ms. Se han realizado 861 medidas obteniéndose un RMS de 9,5% en la 4ª iteración. En la figura 1B se representa el perfil, que alcanza unos 120 m de profundidad en la zona de máxima penetración.

A partir de las características geoelectricas, se diferencian dos conjuntos: el primero de ellos se caracteriza por presentar valores medios de resistividad (entre 50 y 200 Ωm) que se asocian al zócalo paleozoico (Fig. 2A). Estas facies afloran en superficie en el extremo NE del perfil gracias a la presencia de la falla de Guarromán. A su vez, en este conjunto, las facies eléctricas pueden diferenciar las facies de filitas alteradas (valores entre 50 y 100 Ωm) y las filitas sanas (valores de 100-200 Ωm). En el perfil se deduce un hundimiento del paleozoico hacia el SW condicionado por la presencia de varias fallas. Alguna de estas fracturas parece no afectar ni a la cobertera ni al techo del zócalo paleozoico, por lo que se considera previa (tardihercínica).

Sobre el zócalo paleozoico aparece una unidad de bajas resistividades (entre 7 y 60 Ωm) que se relaciona con la cobertera sedimentaria. Esta unidad superior presenta espesores que superan los 100 m, y se asocia al bloque hundido de la falla de Guarromán (figura 2A). Básicamente está constituido por lutitas triásicas, con resistividades entre 2 y 20 Ωm . En el sector SW del perfil, aparecen margas del Mioceno. Asociada a esta última unidad aparecen niveles detríticos que se acuñan lateralmente (brechas) y que se caracterizan por un aumento de la resistividad (hasta valores de entre 40-40 Ωm).

Método electromagnético en el Dominio de los Tiempos (TDEM)

En cada una de las tres estaciones de medida se ha utilizado configuraciones de loop único (con un tamaño de 100x100 m) y de loop centrado (bucle receptor de 20x20 m). Además, se han modificado parámetros de amperaje de inyección, voltaje y tiempo de medida.

La primera estación se posiciona en el bloque levantado de la falla de Guarromán. Las estaciones 2 y 3

en el bloque hundido. En todas ellas es posible detectar el contacto entre el sustrato paleozoico y la cobertera sedimentaria gracias al aumento de la resistividad. En la Fig.2B aparecen las curvas generadas en las estaciones S1, S2 y S3. Se representan las curvas de voltaje inducido medido (línea azul), las curvas de resistividad aparente obtenidas en función del tiempo (línea roja) y el modelo de resistividades generado por el software de inversión (línea roja de trazado grueso). Para cada una de estas curvas se observa el ajuste entre la línea de campo y la del modelo del software ZONDTEM1D, con RMS error del 11,6% y 4,6 % y 4,7% (S1, S2 y S3).

En la curva de la estación S2 se detecta un aumento de la resistividad a unos 10-12 m de profundidad, lo que se correlaciona con el contacto entre las facies triásicas (areniscas y arcillas) y las filitas paleozoicas. El aumento de la resistividad es progresivo, lo que podría deberse a la presencia de filitas intensamente alteradas en el techo del zócalo paleozoico (coherente con las observaciones realizadas en los afloramientos, así como en los resultados de la tomografía eléctrica).

Las curvas obtenidas desde la estación S2 a la S3 son muy parecidas, pero difieren entre sí por el aumento de la profundidad a la que se detecta el incremento de las resistividades asociadas al zócalo. Así, en la curva de la estación S2, el contacto entre la cobertera sedimentaria (Mioceno+Triásico) y el zócalo paleozoico (fillitas) se estima a unos 25 m y en la S3 el contacto estaría a unos 100 m de profundidad (figura 2B). Esta interpretación se ajusta a la información que proporciona la tomografía eléctrica y permite deducir varias fracturas no cartografiadas asociadas a la Falla de Guarromán.

Conclusiones

En este trabajo se han utilizado dos métodos geofísicos para la modelización de estructuras geológicas con implicaciones mineras. En concreto, se ha estudiado el sector oeste del antiguo distrito minero de Linares (España), donde el límite de la explotación estaba condicionado por la presencia de fracturas.

La técnica TDEM es muy versátil y puede utilizarse con distintas configuraciones, en función de las profundidades en las que se quiera centrar la investigación. El método ha permitido detectar la profundidad del basamento paleozoico bajo la cobertera sedimentaria, así como la presencia de distintas fracturas.

A profundidades inferiores a 120 m, a partir de las variaciones en los valores de la resistividad, los perfiles de tomografía eléctrica también permiten identificar el contacto zócalo-cobertera sedimentaria, así como distintas fracturas.

El hundimiento del stock granítico ha estado condicionado por el movimiento de una falla previa al depósito triásico, reduciendo la probabilidad de que en el Paleozoico de la Fosa de Bailén se encuentren estructuras filonianas bien metalizadas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación del Proyecto I+D+i FEDER Andalucía (referencia 1380520).

Referencias bibliográficas

1. Loke, M. H., Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
2. Binley, A., Hubbard, S.S., Huisman, J.A., Revil, A., Robinson, D.A., Singha, K., Slater, L.D. (2015). The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. *Water Resources Research*, 51, 3837–3866.
3. Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, 770 p.
4. André, F., Van Leeuwen, C., Saussez, S., Van Durmen, R., Bogaert, P., Moghadas, D., de Resseguier, L., Delvaux, B., Vereecken, H., Lambot, S. (2012). High-resolution imaging of a vineyard in south of France using ground-penetrating radar, electromagnetic induction and electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 78, 113–122.
5. Martínez J., Rey J., Sandoval S., Hidalgo, M. C., Mendoza, R. (2019). Geophysical prospecting using ERI and IP techniques to locate vein deposits. *Remote Sensing* 11. doi <https://doi.org/10.3390/rs11242923>.
6. Rey, J., Martínez, J., Mendoza, R., Sandoval, S., Tarasov, V., Kaminsky, K., Hidalgo, M. C., Morales, K. (2020a). Geophysical characterization of aquifers in southeast Spain using ERT, TDEM, and vertical seismic reflection). *Applied Sciences*, 10. 7365, 10.3390/app10207365.
7. Rey, J., Martínez, J., Hidalgo, M. C., Mendoza, R., Sandoval, S. (2020b). Assessment of tailings ponds by a combination of electrical (ERT and IP) and hydrochemical techniques (Linares, southern Spain). *Mine Water and the Environment*, DOI: 10.1007/s10230-020-00709-3.
8. Azcárate, J.E. (1977). Mapa geológico y memoria explicativa de la hoja 905 (Linares), escala 1:50.000. Instituto Geológico y Minero de España.
9. Larrea, F.J., Carracedo, M., Ortega Cuesta, L., Gil Ibarra, J. I. (1994). El Plutón de Linares (Jaén): cartografía, petrología y geoquímica. *Cuaderno Lab. Xeológico de Laxe Coruña*, 19, 335-346.
10. Rey, J., Martínez, J., Hidalgo, M. C., Rojas, D. (2013). Heavy metal pollution in the Quaternary Garza basin: a multidisciplinary study of the environmental risks posed by mining (Linares, southern Spain). *Catena*, 110, 234- 242.
11. Martínez, J., Hidalgo, M. C., Rey, J., Garrido, J., Kohfahl, C., Benavente, J., Rojas, D. (2016). A Multidisciplinary Characterization of a Tailings Pond in the Linares-La Carolina Mining District, Spain. *Journal of Geochemical Exploration*, 162, 62-71.
12. Lillo, J. (1992). Geology and Geochemistry of Linares-La Carolina Pb-Ore field (Southeastern border of the Hesperian Massif). Ph. D. Thesis, Univ. Leeds.
13. Mendoza, M., Rey, J., Martínez, J., Hidalgo, M.C. Sandoval, S. (2021). Geophysical characterisation of geologic features with mining implications from ERT, TDEM and seismic reflection (Mining District of Linares-La Carolina, Spain). *Ore Geology Reviews*, 139, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104581>
14. Store, H., Storz, W., Jacobs, F. (2000). Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of earth's upper crust. *Geophysical Prospecting*, 48, 455-471.
15. Goldman, M., Rabinovich, B., Rabinovich, M., Gilad, D., Gev, I., Shirov, M. (1994). Application of the integrated NMR-TDEM method in groundwater exploration in Israel. *Journal of Applied Geophysics*, 31, 27-52.
16. Auken, E., Jørgensen, F., Sørensen, K.I. (2003). Large-scale TEM investigation for groundwater. *Exploration Geophysics*, 34, 188–194.
17. Martínez, J., Benavente, J., García-Aróstegui, J. L., Hidalgo, M. C., Rey, J. (2009). Contribution of electrical resistivity tomography to the study of detrital aquifers affected by seawater intrusion-extrusion effects: the river Vélez delta (Vélez-Málaga, southern Spain). *Engineering Geology*, 108, 161-168.

18. Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453–464.
19. Nabighian, N.M. (1988). *Electromagnetic method in Applied Geophysics*. Tulsa, Okla. Society of Exploration Geophysics, 971 p.
20. McNeill, J. D. (1994). Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding. *Technical Note TN-27*, Geonics Ltd, Ontario. <http://www.geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn27.pdf>
21. Gómez-Ortiz, D., Fernández-Remolar, D.C., Granda, A., Quesada, C., Granda, T., Prieto-Ballesteros, O., Molina, A., Amils, R. (2014). Identification of the subsurface bodies responsible for acidity in Rio Tinto source water; Spain. *Earth and Planetary Science Letters*, 391, 36-41.
22. Fitterman, D.V., Steward, M.T. (1986). Transient electromagnetic soundings for groundwater. *Geophysics*, 51, 995-1006.
23. Danielsen, J. E., Auken, E., Jorgensen, F., Sondergaard, V., Sorensen, K. (2003). The application of the transient electromagnetic method in hydrogeophysical survey. *Journal Applied Geophysics*, 53, 181-198.
24. Dennis, Z. R., Cull, J. P. (2012). Transient electromagnetic survey for the measurement of near-surface electrical anisotropy. *Journal of Applied Geophysics*, 76, 64-73.
25. Levi, E., Goldman, M., Hadad, A., Gvirtzman, H. (2008). Spatial delineation of groundwater salinity using deep time domain electromagnetic geophysical measurements: A feasibility study. *Water Resources Research*, 44, W12404 doi:10.1029/2007WR006459.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



El yacimiento epitermal aurífero de baja sulfidación de Crucitas, Costa Rica

Jorge Obando^{a*}, Maikol Rojas^a

^a Dirección de Geología y Minas (DGM), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Costa Rica.

Crucitas es un yacimiento aurífero epitermal de baja sulfidación de edad Mioceno Inferior a Medio, que se encuentra ubicado en el Arco Magmático de Sarapiquí en San Carlos, estando el prospecto mineral muy cercano al río San Juan en la región norte del país.

La mineralización aurífera epitermal con oro, plata y electrum, se dio en dos domos félsicos dacíticos riolíticos no aflorantes de la unidad litológica Crucitas de edad mínima Mioceno Medio, las cuales previamente habían intruído a las rocas de la unidad brechosa piroclástica intermedia Avispas de edad Mioceno Inferior-Medio.

Los domos poseen núcleos masivos de dacitas intruídas por riolitas, que presentan localmente zonas de autobrechamiento y de laminación por flujo, además de brechamiento hidráulico hidrotermal e interdigitación en los bordes y el techo de los domos con las rocas piroclásticas circundantes. Se presenta en los domos ácidos, un sistema de fisuras alimentadoras o vents subverticales $\leq 10 - 15$ cm de espesor y de orientación N340E en el domo Fortuna y N40E en el domo Botija, que contienen brechas hidrotermales auríferas con oro nativo grueso, o vetillas en stockwork con cuarzo-adularia- piritita con oro nativo grueso o con oro fino encapsulado en los sulfuros.

La parte superior del yacimiento esta constituida por saprolitas rojizas-anaranjadas cuyo protolito original fueron las brechas piroclásticas mineralizadas con vetas y vetillas auríferas y que exhiben un “enriquecimiento de oro supergénico”. Las saprolitas muestran en total, un espesor variable desde 10 m hasta 35 m sobreyaciendo los flancos y el techo de los domos ácidos. Esta zona saprolítica superior del yacimiento presenta “rocas caja blandas” muy arcillosas, con valores de hasta 10 ppm (gr/ton) o más de oro.

La ley promedio aurífera total en el yacimiento original de Crucitas incluyendo rocas duras y blandas, es de 1.37 ppm y la ley de corte es de 0.5 ppm.

Adicionalmente, en las lateritas-saprolitas periféricas ya sea proximales o distales a los domos Fortuna y Botija, se ha descubierto por parte de los mineros artesanales, la existencia de otros depósitos de placer superficiales y de nuevos “horizontes auríferos mineralizados supergénicamente” controlados por variaciones de los paleoniveles niveles freáticos (HAMS ?) en el subsuelo y alcanzando hasta 50 cm de espesor, con valores que oscilan de 5 a 10 ppm Au hasta un máximo de 1 a 1.5 onzas troy Au/ton (31.1 gr a 46.6 gr Au/ton) en algunas zonas muy ricas, controladas estas últimas por estructuras mineralizadas verticales a sub-verticales de alta ley.

La zona del proyecto minero Crucitas y sus alrededores ha sido invadida y secuestrada agresivamente por mineros artesanales ilegales desde el año 2017 o aun antes, los que han minado empíricamente los depósitos de oro de placer circundantes o sobreyacientes al depósito de Crucitas “sensu estricto” en su parte superficial saprolítica y de sus alrededores, hasta una distancia de 4,5 km medida desde los domos originales Botija y Fortuna.

Los recursos auríferos indicados e inferidos calculados por Infinito Gold durante el 2007 para el yacimiento Crucitas original son del orden de 2,45 millones de onzas troy de oro, y los calculados por la Dirección de Geología y Minas DGM, para el área exterior al yacimiento original y minada por los artesanales desde el 2017 hasta el 2019, son del orden de 149.243,10 onzas troy de oro.

*Autor para contacto: jobando@minae.go.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Monitoreo de la Actividad Minera Informal en Crucitas, Costa Rica Evolución de la Actividad Minera Informal para el Periodo 2017-2022

Maikol Rojas^{a*}

^a Dirección de Geología y Minas (DGM), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Costa Rica.

El yacimiento minero en el sector de Crucitas, responde a un sistema aurífero epitermal del Mioceno, caracterizado por domos dacíticos englobados en unidades piroclásticas e intrusiones riolíticas que mineralizaron epitermalmente la roca caja dacítica y piroclástica. Este prospecto minero fue concesionado y explorado entre 1992 y 1998 por la empresa PLACER DOME DE COSTA RICA S.A., quien posteriormente, para el periodo entre 1998 y el 2012 funge como INDUSTRIAS INFINITO S.A., tras su adquisición por la firma LYON LAKE MINES Ltd. El proyecto minero consideraba un área de extracción aproximada de 126,9 Ha, circunscrito en un conjunto de inmuebles denominados como Finca VIVOYET y consistía en la intervención minera principalmente de los cerros Fortuna y Botija.

Tras la paralización del proyecto minero y constando pleno conocimiento de la existencia del yacimiento minero, fue cuestión de tiempo para que el área fuera tomada por los mineros informales o coligalleros. Siendo que para marzo de 2017, se dio la primera alerta oficial, tras el hallazgo de una serie de cauces intervenidos dentro del complejo VIVOYET. A partir de esta fecha la extracción informal de oro tuvo un crecimiento acelerado, caracterizado por la intervención de los sistemas coluvio aluviales, mediante técnicas de extracción y procesamiento artesanales. Así como técnicas de recuperación de oro basadas en la aplicación in situ de mercurio. Esta actividad minera se centró, casi en su totalidad, en el complejo VIVOYET, alcanzando un aparente pico poblacional para octubre de 2017.

Para el 2018 y 2019, se da la migración de la actividad minera hacia las fincas aledañas al complejo VIVOYET, principalmente hacia el sector noroeste, donde se establecen importantes centros de actividad minera subterránea, aprovechando vetas mineralizadas en roca dura o Saprolitas. Marcando el inicio de una actividad minera subterránea y con esto la tecnificación de los procesos de recuperación de oro. Con la incorporación de los sistemas de molienda como las rastras y molinos, se trasladaron los sitios dedicados a la recuperación del oro, hacia los centros de población circundantes a Crucitas e incluso hacia sectores fuera de la Región Huetar Norte.

Durante el periodo 2020 – 2021, se dio un decrecimiento en la actividad minera, tanto en los sistemas coluvio aluviales como en los sistemas subterráneos, promoviendo la recuperación natural de los sitios previamente impactados. Situación posiblemente ligada al incremento en la presencia policial en la franja fronteriza, como parte de las medidas ante la pandemia del COVID – 19. Así como a la apertura de sitios de extracción minera en las comunidades fronterizas en territorio Nicaragüense. Sin embargo, para finales del 2021 e inicios del 2022, se da un paulatino crecimiento de la actividad minera, principalmente sobre los sistemas coluvio aluviales y la reactivación de muchos de los sitios que habían sido intervenidos durante el periodo 2017-2019.

*Autor para contacto: marojas@minae.go.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Plan Nacional de Acción para la Minería Artesanal y en Pequeña Escala en Costa Rica 2022-2030

Alejandra Fernández-Sánchez^{*1}, María del Mar Solano-Trejos^{*2}, José Alberto Rodríguez-Ledezma^{*3}, Nuria Chavarría-Campos; Claudio González-Solís, Gabriela Calvo-Vargas, Wagner Valverde-Mora, Eduardo Rojas-Solano, Virginia Reyes Gatjens, Jorge Cabrera, Jazmín Granados-Torres, Horacio Chamizo-García, Mónica Jiménez-Seas.

*Dirección de Gestión de Calidad Ambiental, MINAE

Como país signatario del Convenio de Minamata sobre el Mercurio, Costa Rica desarrolló en el 2015 la Evaluación Inicial del Convenio, donde identificó a la minería artesanal y en pequeña escala de oro como una actividad más que insignificante, por lo que según lo establece el párrafo 3 del artículo 7 del mismo convenio, el país debe elaborar un Plan Nacional de Acción (PNA) con el objetivo de disminuir el uso de mercurio en esta actividad.

La minería artesanal y en pequeña escala de oro (MAPE) es una actividad de gran significancia para la comunidad de Abangares, ubicada en la provincia de Guanacaste. La historia de su desarrollo comenzó desde el siglo XIX y continúa siendo la base de la economía local para al menos el 10% de sus habitantes. Esta actividad se desarrolla mayoritariamente mediante la explotación de galerías subterráneas, a partir de zonas que antiguamente fueron explotadas de forma industrial. Para desarrollar el PNA, se integró un comité directivo con representación de instituciones involucradas en el tema como la Dirección de Geología y Minas (DGM), la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental (DIGECA), Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA) y el Ministerio de Salud. Dicho comité tuvo la función de aprobar diferentes acciones para una correcta implementación del proyecto. El PNA consta de dos partes principales: el panorama nacional, el cual es un diagnóstico de la MAPE en el país, y el planteamiento de estrategias para cumplir con los objetivos nacional de reducción.

El diagnóstico determinó que el procesamiento del material minero se realiza a partir de la extracción manual de material de los túneles, cada persona involucrada en esta actividad extrae de 1 a 10 toneladas métricas de material por día, de zonas sin concesión autorizada por la DGM; en algunos casos no son propietarios de los terrenos donde realizan la extracción, por lo que pagan o arriendan el uso de la zona. El material extraído se muele con quebradores, molinos “chilenos” y de bolas para alimentar las “rastras”, donde se le adiciona mercurio. Una minoría de las personas involucradas en la actividad han empleado técnicas para evitar la amalgamación del material en bruto, como mesas vibratorias o concentradores. La amalgama formada se recupera del material procesado, se exprime manualmente el exceso de mercurio y se quema mediante retortas rudimentarias; esta última etapa en algunos casos la realizan en el mismo sitio de procesamiento o en sus casas de habitación. La esponja de oro obtenida se comercializa por diversos canales, de los cuales la comercialización por medio de la Unión Cantonal de Asociaciones de Desarrollo de

Autores para contacto: 1. coordinador-pna@minae.go.cr 2. msolano@minae.go.cr 3. jalberto@minae.go.cr

Abangares (UNCADA) se encuentra temporalmente autorizada por el Estado. Esta asociación facilita una segunda quema para eliminar excedentes de mercurio para pasar de esponja a doré, determina el quilataje y compra el material obtenido; sin embargo, se estima que solo compra el 20% del oro extraído de la zona.

Los relaves o lamas se almacenan en los predios de procesamiento, mediante pilas directamente cavadas en el suelo, usualmente sin ningún material aislante. Estas lamas son vendidas por los mineros a una empresa local, para la recuperación del oro restante, por medio del proceso de cianuración; se desconoce si antes de iniciar la cianuración se realiza algún tratamiento para la remoción del mercurio.

Según los estudios realizados en esta zona para el año 2020, se estima que, para una producción anual de 2 800 kg de oro al año, se liberan 34 400 kg de mercurio al ambiente, especialmente en las lamas. De las mediciones realizadas en campo, se estimó que la relación mercurio liberado al ambiente sobre el oro obtenido (Hg:Au) es de 12,3:1.

Con los estudios técnicos, se logró comprobar que se presentan en esta zona, tres de las cuatro peores prácticas en la MAPE que el Convenio de Minamata urge eliminar, a saber:

- Amalgamación del material en bruto,
- Quema de la amalgama en zonas residenciales,
- Lixiviación de cianuro en sedimentos, mineral en bruto o rocas a los que se ha agregado mercurio, sin eliminar primero el mercurio.

Los estudios socioeconómicos y de salud pública realizados indican que, pese a que la actividad es rentable para las personas involucradas, la mayoría carece de seguros médicos y laborales debido a la ilegalidad de la actividad y a los requisitos que les solicitan las instituciones respectivas, agudizado por la ausencia de un marco legal que permita formalizar las actividades MAPE en desarrollo. La obligación de organización en cooperativas mineras, impuesta por el Código Minero (CM) y sus reformas, no es respetada por la mayoría de quienes participan en la actividad.

La zona presenta tasas de incidencia de enfermedades posiblemente relacionadas a exposición a mercurio mayores a la media regional y nacional, así como indicadores de mayor aplicación de adecuaciones educativas en menores en edad escolar, lo que sugiere efectos cognitivos en la población de Abangares. Sin embargo, son necesarios más estudios para determinar una asociación causal con el uso del mercurio.

El Plan de Acción Nacional propuesto tiene como eje las siguientes metas de reducción:

- Meta de Reducción 1: Reducir la utilización de mercurio en la MAPE a un 50% del valor de referencia respecto a la estimación actual promedio anual de 131,0 Tm de mercurio/año para el año 2028 y una reducción del 100% para el 2030.
- Meta de Reducción 2: Reducir las emisiones y liberaciones de mercurio en la MAPE a un 50% del valor de referencia respecto a la estimación actual promedio anual de 34,4 Tm de mercurio/año para el año 2028 y una reducción del 100% para el 2030.

Entre las estrategias planteadas para alcanzar estas metas, se encuentran la habilitación de mecanismos para formalizar la actividad, la promoción de tecnología que permita disminuir o eliminar el uso del mercurio, así como la mejora en el acceso a la información que permita a las personas involucradas en la actividad MAPE a nivel nacional gestionar de forma más eficientes sus procesos productivos, sin perjuicio de su salud, ni el ambiente en sus comunidades.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Métodos de control de los niveles aluviales en la extracción minera de agregados en los cauces de dominio público

Esteban Bonilla Elizondo^{a*}, German E. González Marín^a

^a Dirección de Geología y Minas (DGM), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Costa Rica.

Abstract: With the growth of alluvial mining in Costa Rica, sceneries that show differences between the extraction rate and the alluvial deposits supply rate, are often observed. Sometimes, this situation shows incision-related effects and lateral erosive effects in active river channels, especially those where mitigation measures were not implemented. This situation also shows, a depleted aggregate materials source system. A depleted system is hard to reverse, expensive and requires time. This is why the mining control department of Dirección de Geología y Minas, works in develop alluvial levels control methodologies. These methodologies are proposed to generate an active bottom level control instream, alluvial deposits level control and create an easy decision-making mechanism to implement the necessary mitigation measures, and avoid depletion of reserves in river channels.

Palabras clave: Minería aluvial, control minero, cauces fluviales, minería de agregados.

Key words: Alluvial mining, mining control, fluvial channel, aggregate mining.

Introducción

La arena y la grava se utilizan para una variedad de actividades de construcción, incluidas carreteras (bases y asfalto), tuberías (camas de grava), sistemas sépticos (roca para drenaje) y concreto (mezcla de agregados) para carreteras y edificios [1]. En muchas áreas, el agregado se deriva principalmente de depósitos aluviales, especialmente de canales de ríos activos, sus llanuras aluviales y depósitos de terrazas antiguas [2].

Conforme ha crecido el desarrollo de la minera aluvial en Costa Rica, se han vuelto frecuentes los escenarios que muestran un desequilibrio entre la tasa de reposición de materiales aluviales y las tasas extractivas asignadas a concesiones mineras. Esta situación en algunas oportunidades, se manifiesta como procesos erosivos acelerados dentro del cauce y sus márgenes.

En aquellos casos donde no ha mediado la aplicación de medidas de mitigación adecuadas o no han sido aplicadas a tiempo, los cauces han enfrentado un desgaste del sistema como fuente de materiales para agregados. Este desgaste del sistema normalmente es difícil de revertir, costoso y requiere tiempos prolongados. Por esta razón el Departamento de Control Minero, de la Dirección de Geología y Minas, se ha dado a la tarea de generar contenidos teóricos para el desarrollo de métodos de control de los niveles aluviales.

Estas metodologías son propuestas con la finalidad de generar un control sobre los niveles de fondo del cauce, así como sobre su perfil de equilibrio y poder establecer los mecanismos de toma de decisiones para la implementación de las medidas de mitigación necesarias, sin que la concesión minera se vea en la necesidad de enfrentar un escenario de agotamiento de reservas y desequilibrio de la dinámica fluvial, difícil de revertir.

*Autor para contacto: ebonilla@minae.go.cr

Este trabajo aborda el desarrollo teórico de metodologías y una propuesta de categorías para tramos del cauce que sirvan para evitar los procesos erosivos acelerados producto de la minería aluvial de agregados en el territorio de Costa Rica.

Cuando la extracción se detiene las crecidas sucesivas reajustan los niveles del perfil del sistema, rellenando los agujeros profundos de extracción y reduciendo los rápidos que se forman entre estos agujeros. [3]

Si bien, las labores extractivas pueden traer beneficios relacionados con la reducción de riesgos, el confinamiento del canal de flujo puede provocar problemas de incisión de cauces.

Al realizar labores extractivas de manera regular se trata de evitar problemas de inundación, capacidad de desagüe y protección de márgenes, pero ello trae consigo un aumento de la velocidad y un incremento notable de la tensión de corte del flujo, que favorecen los procesos de erosión regresiva. [4]

Los métodos de control de niveles aluviales y el sistema de categorías para tramos del sistema fluvial propuestos en este trabajo, fueron ideados de manera colegiada por el Departamento de Control Minero de la Dirección de Geología y Minas y han sido recomendados a través de informes técnicos específicos y recomendaciones de otorgamiento establecidas en el título minero.

No obstante, el abordaje teórico se ha divulgado poco y es percibido por los administrados mineros como una obligación y un gasto adicional, cuando debería percibirse como un método efectivo para evitar el agotamiento de reservas por efectos negativos en el cauce fluvial.

Metodología

Se desarrolló un modelo teórico estandarizado de una sección hidráulica, con la finalidad de explicar los elementos básicos a considerar dentro de un sistema de control de los niveles de aluvión.

Se enumeran los elementos que se deben identificar dentro del cauce, los cuales servirán para establecer los niveles base locales dentro del cauce y así definir un posible perfil de equilibrio local.

Además, se señalan algunos elementos básicos estandarizados que deberían ser integrados al diseño de extracción propuesto. Como zonas de amortiguamiento, ángulos de ingreso de extracción y barreras enrocadas.

Se enumeran y explican los sistemas de control de niveles aluviales, los cuales, se llevan a través de un control topográfico y geológico en conjunto, con elementos gráficos para comparación con medidas realizadas anteriormente.

Se elabora un sistema de advertencia y categorización estilo semáforo con recomendaciones para activación de protocolos.

Resultados y Análisis

Los puntos de referencia para el control de secciones transversales a lo largo de la concesión tienen que proponerse como puntos fijos debidamente georreferenciados y en sitios que no se vean afectados por las crecidas; esto se hace, con la finalidad de hacer análisis de comparación directa año con año. Esto puede permitir explicar el comportamiento del sistema fluvial y observar los ciclos de movilización de bancos aluviales y ajuste de los canales de flujo.

No es necesario instalar de manera física estos puntos fijos de control, lo importante es mantenerlos invariables para cada medición y que abarquen la totalidad del ancho del cauce. Si se hace de esta manera es posible realizar los análisis comparativos todos los años o con la frecuencia que se juzgue necesaria, en

concordancia con el comportamiento del cauce.

Los principales elementos que se deben considerar como niveles base locales son los siguientes: nivel óptimo de aluvión sobre las pilas del puente (definido en el diseño del puente), nivel topográfico de ingreso de afluentes al área del cauce (confluencias), niveles topográficos de vados, nivel topográfico de los afloramientos rocosos, niveles topográficos de elementos que modifican la cuenca (represas, embalses de captación, cascadas o saltos).

Los diseños de extracción deben considerar cuatro elementos básicos: 1) una zona de amortiguamiento que se define como una franja aledaña a las márgenes de los cauces. 2) Barreras enrocadas para protección de márgenes. 3) Un ángulo de ingreso a la hora de extraer (inferior o igual al ángulo de reposo del aluvión) y 4) Un perfil de cota máxima de extracción basado en el perfil de equilibrio establecido para el cauce.

El control debe realizarse al menos una vez al año. Debe utilizarse el levantamiento topográfico actualizado. Se debe graficar a lo largo del perfil longitudinal del río o sistema fluvial, la línea que demarca el perfil de equilibrio local (definido por el Departamento de Control Minero) junto con el perfil de fondo del río. Se debe graficar también la línea que demarca los niveles superiores de los bancos aluviales.

En aquellos casos en el que sistema fluvial tenga un canal de flujo estable en el centro del cauce, con construcción de barras longitudinales muy uniformes a ambos lados del canal de flujo, se puede realizar dos perfiles topográficos siguiendo los puntos de elevación máximo del aluvión a ambos lados del canal de flujo.

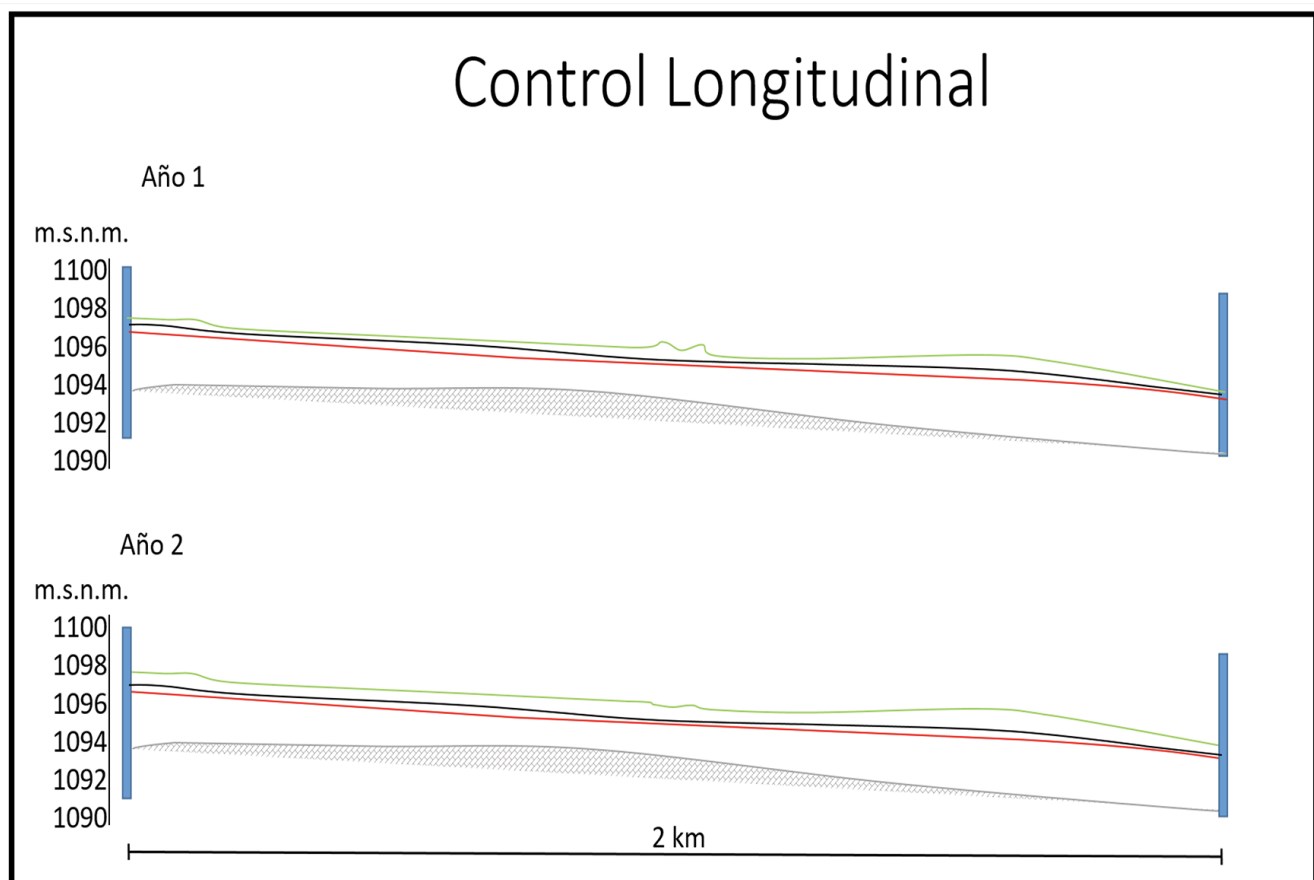


Figura 1. Ejemplo de Gráfica de Perfiles para un cauce fluvial. Se grafica en rojo el perfil de equilibrio local (Definido por el Departamento de Control Minero). En color negro el perfil de fondo del cauce. En color verde el perfil del nivel superior del aluvión.

Con el graficado de todos los perfiles sobrepuestos (perfil de equilibrio local, perfil de fondo y perfiles de niveles máximos de aluvión en los bancos), se debe demarcar aquellos sectores en categorías, poniendo especial cuidado en identificar los tramos en los que el perfil de fondo se encuentra por debajo del perfil de equilibrio local. También se puede hacer comparación con la gráfica del periodo anterior (o sea del anterior levantamiento topográfico).

Se propone cuatro categorías las cuales enmarcan una serie de recomendaciones y medidas de mitigación que se deben aplicar para cada categoría específica. Además, se debe hacer un trabajo geológico de comprobación de campo verificando la presencia de afloramientos de roca y una descripción litológica. Así como la identificación de laderas afectadas por erosión y canales de flujo con incisión de fondo.

Las cuatro categorías que se proponen son:

Categoría Verde: Esta categoría es para aquellos tramos que presenten una separación superior a un metro y medio entre el perfil de fondo y el perfil de equilibrio local. En los tramos dentro de esta categoría se puede extraer las reservas entre el perfil de fondo y los perfiles de nivel superior de aluvión. También se puede extraer reservas por debajo del nivel de fondo de acuerdo con el diseño de extracción.

Categoría Amarilla: Esta categoría es para aquellos tramos que presenten una separación entre 0 y 1.5 metros entre el perfil de fondo y el perfil de equilibrio local. En los tramos dentro de esta categoría se pueden extraer las reservas entre el perfil de fondo y los perfiles de nivel superior de aluvión según el diseño de extracción, dejando como mínimo un metro por encima del nivel de fondo sin extraer. Se deben programar periodos sin extracción en el tramo y la implementación de obras temporales para aumento de la rugosidad del cauce. El equipo técnico de la concesionaria debe monitorear la aparición de afloramientos de la roca del lecho e iniciar su documentación y medición.

Categoría Roja: Esta categoría es para aquellos tramos donde el perfil de fondo está por debajo del perfil de equilibrio local. En los tramos dentro de esta categoría se debe suspender la extracción, así como suspender la extracción en los sectores aledaños. Realizar obras en el cauce como amortiguadores de flujo, acordonamientos para redirección del flujo, protección de márgenes o espigones, todo esto con la finalidad de recuperar los niveles de aluvión. El equipo técnico de la concesionaria debe monitorear la aparición de afloramientos de la roca del lecho e iniciar su documentación y medición.

Categoría Negra: Esta categoría es para aquellas concesiones mineras que presenten tramos en categoría roja a lo largo de un trayecto superior al 60% de la longitud total de esa concesión minera. En esta categoría se debe aplicar una suspensión de la extracción en toda la concesión minera por 6 meses, con evaluaciones cada 3 meses para documentar la recuperación. Se propone la posibilidad de prorrogar por 6 meses adicionales esta suspensión si no demuestra recuperación. Se debe implementar las obras indicadas en la categoría roja bajo criterios específicos del Departamento de Control Minero.

Conclusiones

El diseño de extracción debe considerar aspectos de protección de las márgenes como barreras enrocadas, zona de amortiguamiento y ángulos de penetración de la extracción en el aluvión.

El perfil de equilibrio local del sistema se debe definir a partir de varios niveles base locales dentro del sistema o en sus cercanías siendo los más comunes: nivel óptimo de aluvión sobre las pilas de los puentes, nivel de entrada de afluentes al sistema principal (confluencias), niveles topográficos de vados y afloramientos rocosos.

Se define una metodología para control de niveles de fondo y se crea un cuadro de categorías estilo semáforo para la toma de decisiones y aplicación de medidas de mitigación.

El verde es un escenario óptimo en el que el nivel de fondo no ha interceptado ni se ha acercado al perfil de equilibrio local. Las labores mineras se pueden desarrollar de manera normal.

El color rojo es un escenario crítico en el que el nivel de fondo se encuentra por debajo del perfil de equilibrio

local. En este escenario debe prevalecer la recuperación del sistema por medio de la suspensión de los bloques afectados y otras obras.

Hay un escenario intermedio que se cataloga como amarillo en el que se deben activar las medidas de mitigación y obras para mejorar la rugosidad del cauce entre otras labores específicas.

Se dispone de un escenario negro en el que la medida debe ser la suspensión total de la concesión minera, solo para aquellos casos donde predominen tramos muy críticos catalogados de color rojo.

Referencias bibliográficas

1. Kondolf, G. M., (1994). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban planning*, 28: 225-243. Elsevier Science B. V., Amsterdam.
2. Sandecki, M., (1989). Aggregate mining in river systems. *California Geology*, 42 (4): 88-94. California.
3. Petit, F., Poinart, D., Bravard, J. P., (1996). Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhône river upstream of Lyon, France. *Catena* 26: 209-226.
4. Conesa, G. C., (1999). Cambio ambiental y equilibrio dinámico en los cauces. *Papeles de Geografía*, 30: 31-46. Universidad de Murcia.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Mapa De Flujo de Calor Radiante de El Salvador Utilizando Teledetección Satelital

Carlos Pocasangre^{a,*}, Luis Castillo^b, Carlos Martínez^a, Andrés García^a,
Douglas Rivas^a, Rubén Henríquez^a

^aEscuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de El Salvador, El Salvador.

^bEscuela de Geofísica, Universidad de El Salvador, El Salvador.

Abstract: El Salvador is in a region populated with volcanos in the Pacific Ring of Fire, this gives rise to the presence of geothermal phenomena, which are of interest for the study of the implementation of applications that make use of this geothermal resource in the country. In this research, the use of remote sensing data obtained from satellite images and other sources is implemented with the goal of obtaining information related to the Earth, like terrain emissivity, land surface temperature, ambient temperature, among various types of spectral information provided by these sources which were implemented. The heat flux map generated will be useful to identify areas that present surface geothermal manifestations that are of possible geothermal interest, the heat fluxes in these areas will be obtained for each satellite scene captured by Landsat 8 in 2019 and the average annual heat flux. Volcanic areas that present high heat fluxes will be used as a reference for surface manifestations.

Palabras clave: Landsat; imagen satelital; Temperatura Superficial Terrestre; Emisividad; Flujo de Calor; ASTER GED; EarthExplorer; Google Earth Engine.

Key words: Landsat; Satellite Image; Terrestrial Surface Temperature; Emissivity; Heat Flow; ASTER GED; Earth Explorer; Google Earth Engine.

Introducción

Desde 1953 en El Salvador se han identificado y descrito alrededor de 70 áreas de actividad geotérmica. Campos, 1988 [1] realizó la investigación que actualmente se tiene como referencia y caracterizó los recursos geotérmicos del país, basándose en el estudio de sus composiciones geoquímicas de fluidos. Los estudios de las presencias geotérmicas se relacionan a mapas que facilitan el reconocimiento, localización y representación de estos fenómenos y con ello se puede caracterizar el recurso geotérmico de la zona. Actualmente en El Salvador se aprovecha del recurso geotérmico para la generación de energía eléctrica mediante dos plantas geotérmicas, una en Berlín, Usulután y otra en la zona norte de la cordillera de Apaneca, Ahuachapán [2], [3].

Actualmente es posible realizar diversos análisis a partir de información satelital disponible por las agencias espaciales tales como NASA [4]. Alguno de ellos es referente al análisis de vegetación, temperatura

*Autor para contacto: pocasangre@ues.edu.sv

superficial de la tierra, emisividad superficial, entre otros. Estas aplicaciones o análisis son posibles dado que los satélites operan en diferentes espectros electromagnéticos denominados bandas, en las cuales se almacena información con la que la superficie terrestre refleja una señal emitida por el satélite, como en el caso de satélites activos; o se limita a reflejar la radiación del sol, como es el caso de los satélites pasivos [5], [6], [7], [8].

Emirda, 2020 [9] propone el uso de información satelital para el análisis de presencias geotérmicas, como el caso de esta investigación, que busca emplear un algoritmo que sea capaz de cuantificar la cantidad de flujo de calor terrestre y ser implementado para la representación en el territorio salvadoreño. La manipulación de esta se realizará mediante el uso de la herramienta Google Earth Engine (GEE). QGIS es usado para aplicar los algoritmos y cálculos con la finalidad de obtener la cantidad de Flujo de Calor Radiante (RHF por sus siglas en inglés) y ser representado de forma visual mediante un mapa de la región.

Información satelital

Para el análisis, se utilizó información satelital disponible del Servicio Geológico de Estados Unidos (*U.S. Geological Survey*, USGS), el cual mediante la plataforma *EarthExplorer* se tiene acceso a sus catálogos de imágenes obtenidos por sus satélites en órbita. Las imágenes seleccionadas para llevar a cabo este estudio son brindadas por USGS [10], el satélite

Tabla 1. Características del sensor Landsat 8 OLI/TIRS [10].

Bandas	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial(m)
Banda 1 – Aerosol costera	0.43 – 0.45	30
Banda 2 – Azul	0.45 – 0.51	30
Banda 3 – Verde	0.53 – 0.59	30
Banda 4 – Rojo	0.64 – 0.67	30
Banda 5 – Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85 – 0.88	30
Banda 6 – Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) 1	1.57 – 1.65	30
Banda 7 – Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) 2	2.11 – 2.29	30
Banda 8 – Pancromática	0.50 – 0.68	15
Banda 9 – Cirros	1.36 – 138	30
Banda 10 – Térmica Infrarroja (TIRS) 1	10.6 – 11.19	100
Banda 11 – Térmica Infrarroja (TIRS) 2	11.50 – 12.51	100

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) y *Thermal Infra-Red Sensor* (TRIS), seleccionado principalmente por sus sensores espectrales OLI/TIRS. En la Tabla 1 se muestran las características espectrales del Landsat 8.

Para el acceso a las imágenes satelitales de los catálogos de la USGS se empleó el uso de *Google Earth Engine* - GEE el cual proporciona una interfaz mediante lenguaje *JavaScript* realizando la solicitud, procesado y visualización

de imágenes satelitales y resultados de análisis realizados a las mismas mediante la plataforma, posteriormente su exportación al servicio de Drive de la cuenta creada previamente y además de clasificar las bandas de interés de estas para manipulación en *Geographic Information System* – GIS, como en el caso de QGIS.

Estimación del flujo de calor radiante - RHF

El Flujo de Calor Radiante (RHF – Radiative Heat Flux) representa el calor emitido por radiación desde el suelo. Está compuesto por flujo de calor de orígenes geotérmicos y los efectos de radiación solar directa o indirecta. El monitoreo terrestre de flujo de calor utilizando sensores locales puede ser difícil o inviable por los costos de instalación y mantenimiento de equipos. El hecho que cada sensor solo pueda obtener datos de su ubicación no es ideal para el monitoreo de áreas grandes debido a fluctuaciones de temperatura que puedan manifestarse en una zona, y en el caso de zonas de actividad volcánica podría ser imposible instalar sensores ya que estos podrían

ser destruidos por los potenciales riesgos ambientales tales como suelos inestables, flujos de lava o cenizas. Utilizar imágenes térmicas infrarrojas captadas por sensores remotos brinda una solución a todos estos problemas, ya que se pueden obtener datos para áreas grandes de forma remota. Particularmente la serie de satélites Landsat tiene una larga historia de estudios sobre características geotérmicas [11], [12], [13] y [14].

Estimaciones de RHF proporcionan restricciones para la calibración de modelamiento de reservas geotérmicas, y a medida que estos modelos se van refinando, se requieren evaluaciones más precisas de flujo de calor superficial. La evaluación de flujos de calor en grandes áreas de suelo calentado de forma conductiva o por vapores es una tarea difícil, debido a la variabilidad de parámetros como la sensibilidad a las condiciones atmosféricas como presión, temperatura ambiente, lluvia, y la diversidad de los procesos de transferencia de calor presentes en el área y su interacción entre estos. Debido a esto Bromle, 2011 [15] propone un sistema de reducción de incertidumbres. De acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann, el RHF teórico se estima utilizando la ecuación:

$$Q = \tau \sigma \epsilon (T_S^4 - T_{amb}^4) \quad (1)$$

En la que Q: Flujo de calor radiante en W/m^2 ; τ : Transmisividad atmosférica; σ : Constante de Stefan-Boltzmann; ϵ : Emisividad superficial; T_S : Temperatura superficial (LST) en K; T_{amb} : Temperatura ambiente en K. De esta ecuación se puede estimar la potencia total en un área A en la que el calor fluye de forma que $P=AQ$.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada – NDVI

En un esfuerzo por monitorear las fluctuaciones en la vegetación y entender como estas afectan a su entorno, desde su introducción en 1970 se comenzó a utilizar los sensores remotos instalados en satélites para medir y mapear la densidad de vegetación verde sobre la Tierra. Los científicos desarrollaron algoritmos llamados “Índices de Vegetación” para cuantificar las concentraciones de vegetación verde alrededor del planeta. [16], [17].

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$$

Donde NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada; NIR es la luz reflejada en la región de espectro infrarrojo; y Rojo corresponde a la luz reflejada en el espectro visible de la banda rojo.

Metodología

Para la estimación de RHF se tiene a disposición de un repositorio open-source en la plataforma GEE [18] llamado *landsat_smw_lst* del cual se obtienen las bandas EM, FVC, LST, y NDVI. Además, para la obtención de temperatura ambiente se ha usado la colección ERA5-Land_Hourly [19] – ECMWF climate reanalysis y para la realización de recorte de las imágenes para el área de interés se usa la colección [20]: Large Scale International Boundary Polygons, Symplified, que otorga los límites regionales de los países del mundo.

Repositorio landsat_smw_lst

Este repositorio está conformado por una serie de funciones que emplean los algoritmos para el cálculo de emisividad, EM; temperatura superficial terrestre, LST; y el índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI. Los cálculos los realiza para la especificación en sus variables de entrada: fecha de inicio y fin, región de interés (ROI), satélite *Landsat*, y una bandera para especificar si se requiere agregar o no la banda NDVI a los resultados.

Esta además genera una máscara de nubes para ser removidas de cada imagen de la colección. El repositorio hace uso del ASTER Global Emissivity Dataset, que provee mapas de emisividad; TOA BT (*Top Of Atmosphere Brightness Temperature*) que provee la temperatura de brillo de la atmosfera; y SR (*Surface Reflectance*) que provee la reflectancia superficial.

Obtenci3n de im3genes en formato GeoTIFF

A partir del c3lculo de LST con el repositorio anteriormente descrito, se ha implementado un nuevo repositorio nombrado FlujoDeCalor-SV [21] para la exportaci3n de las im3genes en formato GeoTIFF de las bandas de inter3s: NDVI, LST, EM, y Temperatura Ambiente.

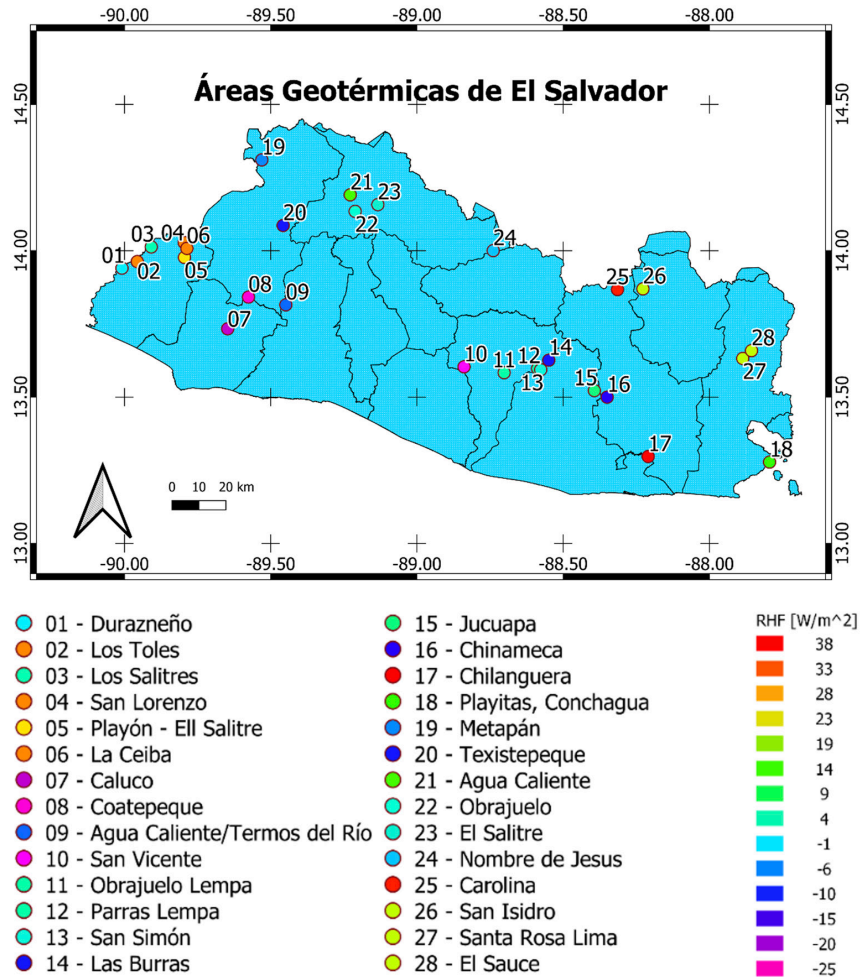
Se realizan dos funciones principales, la primera que exporta de las temperaturas ambientes del pa3s a partir del ERA5-Land Hourly en el que se hace coincidir las fechas y horas de las im3genes captadas por los sat3lites con las de la colecci3n. La segunda funci3n corresponde a la exportaci3n de las bandas de inter3s que otorga el repositorio landsat_smw_lst.

Resultados

Una vez obtenido el mapa de Flujo de Calor Radiante, analizaron puntos de inter3s geot3rmicos. Los mapas resultantes por zonas se muestran desde la Figura 2 hasta la Figura 4; cada una con su respectivo mapa de resumen; posterior a ello se muestra el resumen anual de RHF para cada zona de El Salvador, en las tres im3genes posteriores se muestran los mapas de la zona occidental, central y oriental de El Salvador y sus respectivas tablas de valores por departamento.

La Tabla 5 muestra el resumen de los resultados obtenidos para las 3reas de inter3s en las que se muestra un alto valor de flujo de calor radiante de los puntos mostrados en la Figura 1, retomados de la investigaci3n realizada por Tom3s Campos; adem3s, se toman como referencia las zonas

Figura 1. 3reas geot3rmicas de El Salvador. [1]



volc3nicas, que como es de esperarse muestran valores altos de flujo de calor, los cuales se muestran a continuaci3n.

De la investigaci3n de Tom3s Campos [1] se encontraron cuatro puntos de inter3s geotermal con valores que discrepan de lo esperado, esto es debido a su alta cobertura de vegetaci3n, por lo cual estos resultados han sido nombrados falsos negativos.

Conclusiones

Basado en los resultados obtenidos del an3lisis de RHF en las zonas de El Salvador, este tiene un flujo de calor promedio de 11.85 W/m² en toda la extensi3n del territorio. En cuanto a la potencia emitida, posee un total de 258.91 GW, de los cuales 48.64 GW corresponden a la zona Occidental, 112.42 GW a la zona Central, y 97.86 GW a la zona Oriental y se describen los puntos analizados en la Tabla 5. La zona oriental de El Salvador posee

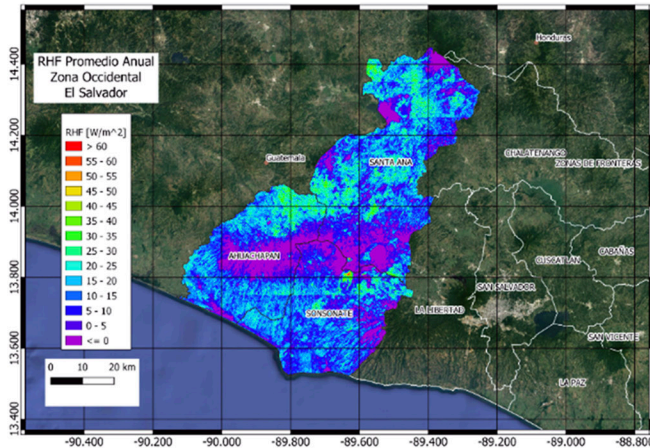


Tabla 2. Resumen anual zona Occidental.

Departamento	RHF Promedio [W/m ²]	Área [km ²]	Potencia Total [GW]
Santa Ana	11.59	2029.8	23.52
Ahuachapán	10.56	1192.7	12.59
Sonsonate	10.14	1234.6	12.52
Total		4457.2	48.64

Figura 2. RHF promedio anual zona Occidental de El Salvador.

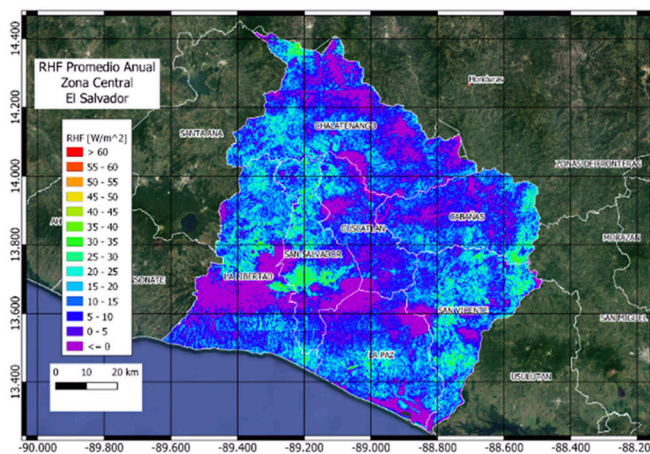


Tabla 3. Resumen anual zona Central.

Departamento	RHF Promedio [W/m ²]	Área [km ²]	Potencia Total [GW]
La Libertad	8.98	1635.53	14.68
San Salvador	11.52	901.59	10.38
Chalate	8.37	2000.47	16.75
Cuscatlán	6.80	747.36	5.08
La Paz	8.52	1225.57	10.44
Cabañas	9.68	1097.44	10.63
San Vicente	12.96	1201.36	15.57
Total		8809.32	83.53

Figura 3. RHF promedio anual zona Central de El Salvador.

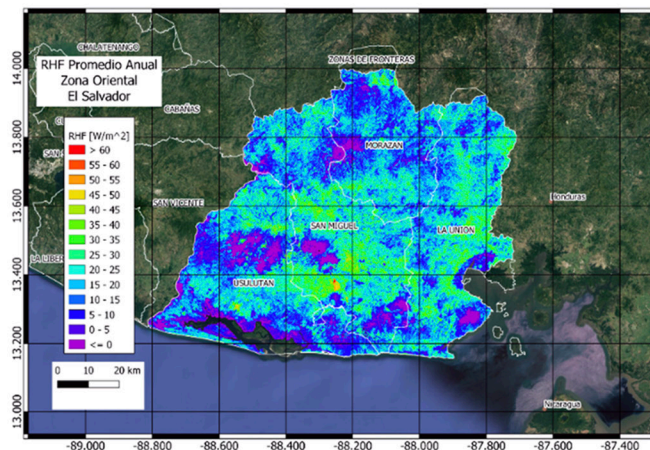


Tabla 4. Resumen anual zona Oriental.

Departamento	RHF Promedio [W/m ²]	Área [km ²]	Potencia Total [GW]
Usulután	13.69	2110.72	28.89
San Miguel	18.94	2131.09	40.35
Morazán	15.16	1315.37	19.94
La Unión	19.03	1974.13	37.57
Total		7531.31	126.75

Figura 4. RHF promedio anual zona Oriental de El Salvador.

un Flujo de Calor Radiante – RHF mayor comparativamente a los valores obtenidos en el resto del país.

Dada la metodología empleada para la estimación del Flujo de Calor Radiante – RHF, resulta factible el uso del repositorio de uso libre landsat_smw_lst en la plataforma Google Earth Engine, ya que este proporciona las bandas espectrales, el cálculo de emisividad y temperatura superficial del satélite Landsat en el rango de fechas especificadas. A falta de datos atmosféricos, el uso de la herramienta Atmospheric Parameter Calculator desarrollada por la NASA y la colección ERA5-Land Hourly – ECMWF climate reanalysis en la plataforma GEE, para la corrección de parámetros atmosféricos de puntos y horarios asignados en la plataforma y obtención de la temperatura ambiente de la región,

Tabla 5. Resumen de resultados de zonas de interés geotérmico.

Nombre	Zona	Departamento	Municipio	Elevación [msnm]	RHF [W/m ²]	Área [m ²]	Potencia [MWe]
Santa Ana	Occidente	Santa Ana	Santa Ana	2218	42.39	435486.24	18.46
Izalco	Occidente	Sonsonate	Izalco	1531	53.68	953487.79	51.18
San Marcelino	Occidente	Sonsonate	Izalco	1191	52.58	244964.23	12.87
Los Toles	Occidente	Ahuachapán	Ahuachapán	365	22.99	241809.8	5.56
Los Salitres	Occidente	Ahuachapán	Ahuachapán	340	18.32	158023.88	2.89
San Lorenzo	Occidente	Ahuachapán	San Lorenzo	538	33.39	391339.25	13.06
La Ceiba	Occidente	Ahuachapán	San Lorenzo	563	28.23	277208.9	7.83
El Salitre	Occidente	Ahuachapán	Ahuachapán	544	29.58	174387.66	5.16
Metapán	Occidente	Santa Ana	Metapán	542	24.28	430122.65	10.44
Agua Caliente	Centro	Chalatenango	Agua Caliente	396	27.84	146491.54	4.07
Nombre de Jesús	Centro	Chalatenango	Nombre de Jesús	156	16.74	185865.12	3.11
San Vicente	Centro	San Vicente	Guadalupe	835	17.47	46778.4	0.63
Obrajuelo	Centro	San Vicente	San Vicente	113	17.41	224894.23	3.91
San Miguel	Oriente	San Miguel	San Miguel	1970	31.38	344063.79	24.97
Playitas	Oriente	La Unión	La Unión	45	19.91	78370.44	1.56
El Sauce	Oriente	La Unión	El Sauce	110	23.97	46214.24	1.11
Chilanguera	Oriente	San Miguel	Chirilagua	40	25.52	221345.33	5.65
San Isidro	Oriente	Morazán	San isidro	288	20.28	160444.5	3.25
Carolina	Oriente	San Miguel	Carolina	200	36.47	82570.04	3.01
Chinameca	Oriente	San Miguel	Chinameca	738	27.91	188895.79	5.27
Jucuapa	Oriente	Usulután	Jucuapa	495	27.6	116718.61	3.22
Alegría	Oriente	Usulután	Alegría	1280	27.10	138728.57	3.76
TOTAL							190.97

respectivamente, proporciona estimaciones adecuadas para el modelado de Flujo de Calor en el software QGIS.

Para el análisis de puntos de interés del mapa RHF resultante se debe realiza una evaluación previa de selección o eliminación de zonas adecuadas para su interpretación; como en el caso de zonas urbanas en las que se percibe un alto valor RHF tomarse como una zona de interés cuando esta característica corresponde a la alta reflexión realizada por los elementos que se encuentran en estas zonas, para esto es posible realizar una visualización del color natural RGB (4,3,2) o falso RGB para zona urbana (7,6,4) como en el caso de satélites Landsat 8; además de realizar observaciones en la geología que se encuentra en la zona a analizar.

Los resultados presentados están limitados a las resoluciones de las imágenes satelitales utilizadas para su desarrollo, por lo que existirán zonas en las que el punto real de interés el flujo de calor no sea apreciable debido a la alta presencia de vegetación que obstaculice la identificación satelital de los mismos, o de la naturaleza misma de la región de interés, como en el caso del Volcán de San Salvador; Cerro Pacho, Coatepeque; Ausoles, Ahuachapán; y Agua Caliente, Termos del Río que son puntos en los que se esperaba un alto RHF y resultan ser falsos negativos dado su alta cobertura de vegetación.

Las estimaciones de flujo de calor radiante obtenidas no cuentan con respaldo de mediciones locales; además, presentan variaciones respecto a los resultados propuestos por Tomás Campos en sus evaluaciones preliminares propuestas sobre el recurso geotérmico de El Salvador, esto es debido a la naturaleza de los estudios implementados.

Los valores de flujo de calor obtenidos pueden ser de utilidad para el mapeo de rasgos superficiales de la

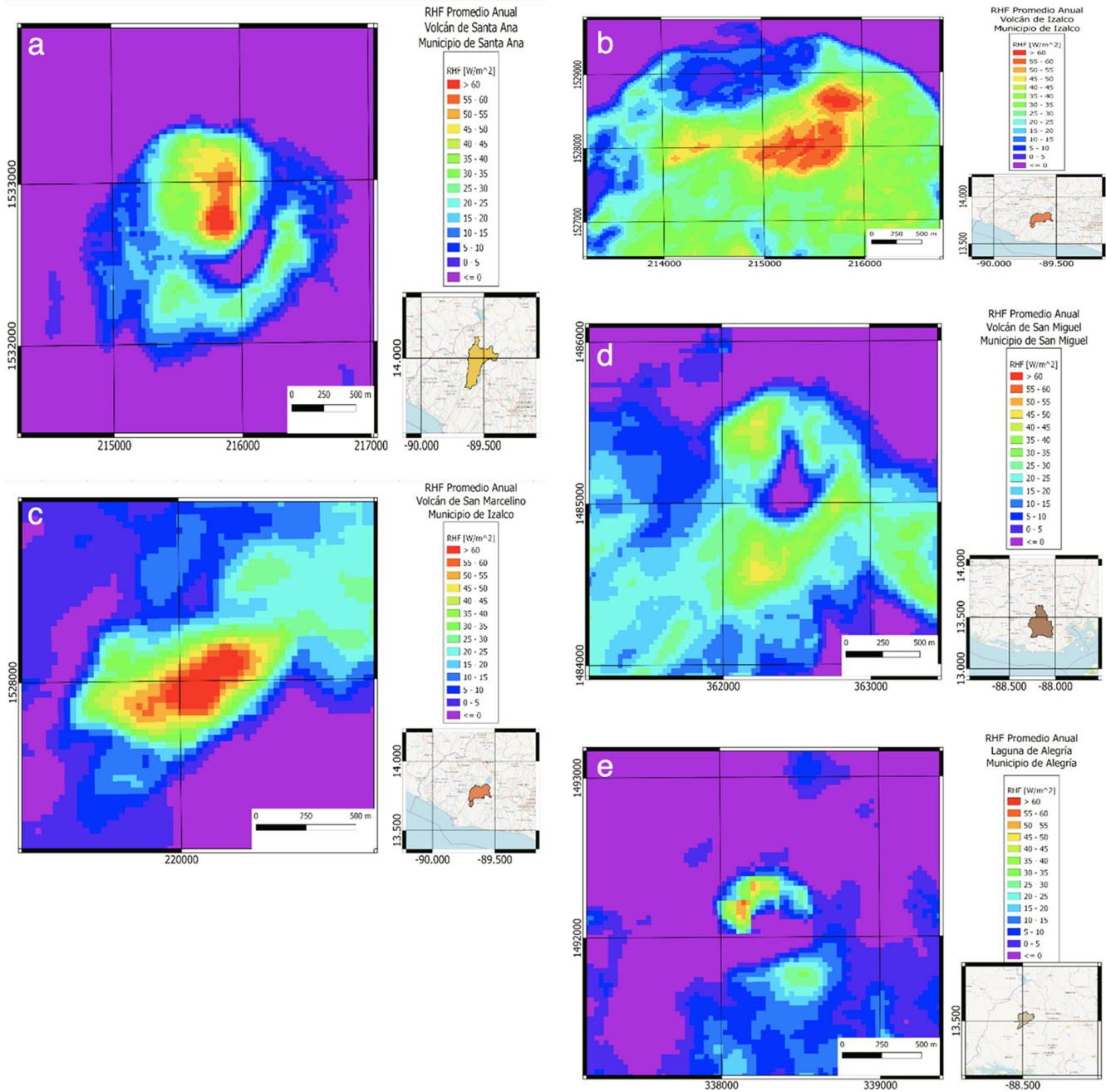


Figura 5. Imágenes referenciales de RHF promedio a) Volcán de Santa Ana, b) Volcán de Izalco, c) Volcán San Marcelino, d) Volcán de San Miguel, e) Laguna de Alegría. Imagen de RHF se muestran en coordenadas WGS 84/UTM Zone 16N (EPSG:32616); imagen referencial en coordenadas WGS 84 (EPSG:4326).

descarga de sistemas geotérmicos en El Salvador, siguiendo protocolos de exploración y evaluación de sistemas geotérmicos para la localización y caracterización de manifestaciones hidrotermales, la identificación de cambios en actividad geotérmica y verificaciones de campo y riesgos geológicos. Junto a otros análisis como geoquímica de fluidos descargados, anomalías geofísicas asociadas a sistemas geotérmicos tales como mínimos de resistividad, anomalías geomagnéticas, anomalías de gradiente geotérmico y anomalías gravimétricas, se pueden integrar todos estos datos utilizando Sistemas de Información Geográfica para generar modelos de sistemas geotérmicos más refinados.

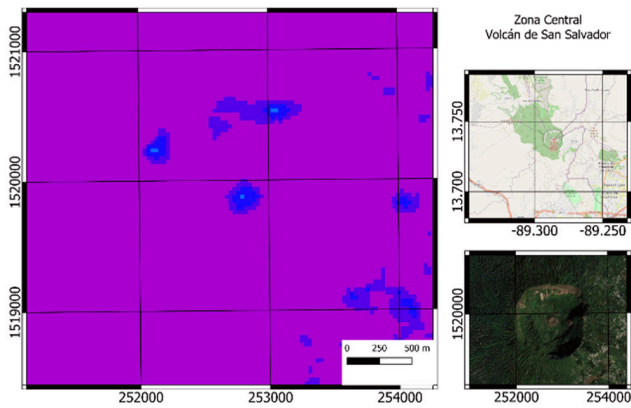


Figura 6. Volcán de San Salvador.

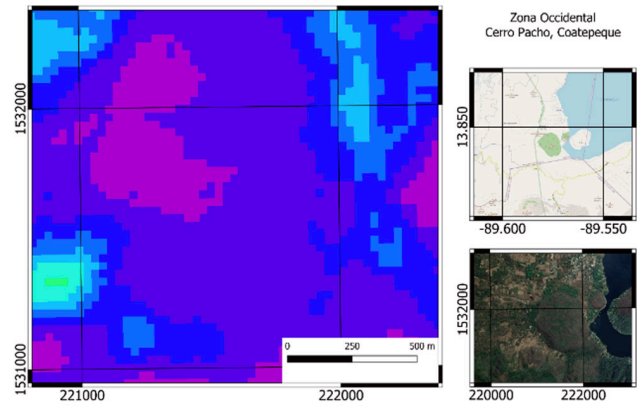


Figura 7. Cerro Pacho, Coatepeque.

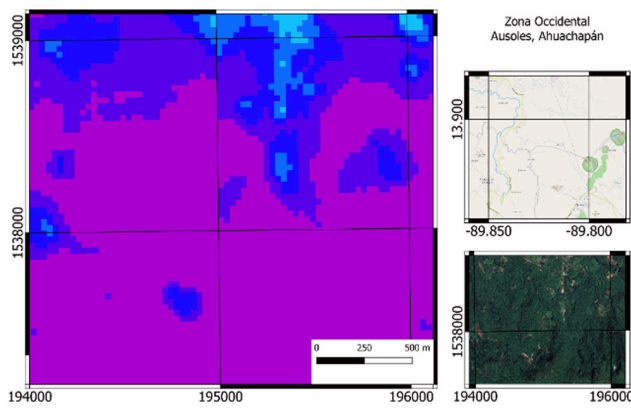


Figura 8. Agua Shuca, Ausoles.

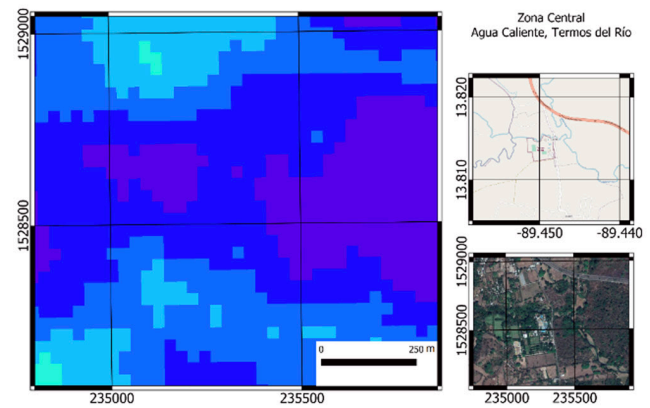


Figura 9. Agua Caliente, termos del Río.

Referencias bibliográficas

1. Campos, T. (1988). Geothermal Resources of El Salvador. Preliminary Assessment. Great Britain: Pergamon Press plc.17(2-3).
2. Alvarenga Artiga, K., Amaya Mata, J., & Sibrián Carballo, M. (2004). Evaluación y análisis de los beneficios de la ecoeficiencia en los procesos de la perforación de pozos geotérmicos. Ciudad Universitaria: Universidad de El Salvador. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1921/>
3. Prol-Ledesma, R. M., & Morán-Zenteno, D. J. (2018). Heat flow and geothermal provinces in Mexico. Cd. Universitaria: Elsevier Ltd.
4. NASA. (s.f). NASA. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
5. Lewis, F. M. (1998). Principles and applications of imaging radar.
6. Wehner, D. R. (1994). High-Resolutions Radar. 2nd.
7. Thomas, C. (2008). Synthesis of Multispectral Images to High Spatial Resolution: A Critical Review of Fusion Methods Based on Remote Sensing Physics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46.5.
8. Richards, J. A. (2012). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. (5th ed.). Springer Publishing Company, Incorporated.
9. Ermida, S. L., Soares, P., Mantas, V., Göttsche, F.-M., & Trigo, I. F. (2020). Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. *Remote Sensing*, 12(9), 1471.
10. USGS. (Noviembre de 2019). Landsat 8 Data Users Handbook. Retrieved 25 de Enero de 2021, from <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook>

11. Kaneko, T., & Wooster, M. J. (1999). Landsat infrared analysis of fumarolic activity at Unzen Volcano: time-series comparison with gas and magma fluxes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 89, 81-94.
12. Mia, M. B., & Fujimitsu, Y. (2011). Study on satellite images based spectral emissivity, land surface temperature and land-cover in and around Kuju Volcano, Central Kyushu, Japan. *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 1, 177-191.
13. Mia, M. B., Bromley, C. J., & Fujimitsu, Y. (2012). Monitoring heat flux using Landsat TM/ETM + thermal infrared data - A case study at Karapiti ('Craters of the Moon') thermal area, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 235, 1-10.
14. Mia, M. B., Nishijima, J., & Fujimitsu, Y. (2014). Exploration and monitoring geothermal activity using Landsat ETM+ images. A case study at Aso volcanic area in Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 275, 14-221.
15. Bromley, C. J., van Manen, S. M., & Mannington, W. (2011). Heat flux from steaming ground: reducing uncertainties. En *Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, California: Stanford Geothermal Program.
16. Weier, J., & Herring, D. (2000). Measuring Vegetation. Retrieved 1 de Febrero de 2021, from <https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation>
17. Weier, J., & Herring, D. (2000). Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Retrieved 1 de Febrero de 2021, from https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php
18. GEE. (s.f.). Landsat smw list. https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users/sofiaermida/landsat_smw_lst
19. ERA5-Land_Hourly. (s.f.). ECMWF climate reanalysis. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_LAND_HOURLY
20. LSIB. (2017). Large Scale International Boundaru Polygons Symplified. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USDOS_LSIB_SIMPLE_2017
21. FlujoDeCalor-SV. (s.f.). GeoTIFF de las bandas NDVI, LST, EM y Temperatura Ambiental. https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users/gml5001/FlujoDeCalor-SV
22. NASA. (s.f.). Atmospheric Parameter Calculator. <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Inversión 1D y 2D de datos magnetotelúricos del prospecto geotérmico del Volcán de Paka en la zona central del rift de Kenia

Adonnis Rodríguez^{a*}, Kelly Quintanilla^a, Carlos Pocasangre^a, Isaac Kanda^b, Jutsus Maithya^c

^a Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.

^b Geothermal Development Company, Kenia.

^c Jomo Kenyatta University, Kenia.

Abstract: One-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) inversions of magnetotelluric data were conducted to reveal the subsurface resistivity structure of Paka volcano in the central Kenya Rift zone. Forty-eight magnetotelluric sounding data spanning four investigation profiles were inverted using Occam's inversion scheme. The result just below the Paka volcano shows a surface layer of about 300 meters with a high resistivity ($>100\Omega.m$), followed by a layer of low resistivity ($<10\Omega.m$) and the possible geothermal reservoir is identified from 1.7 km Depth up 5 km with a resistivity ($>100\Omega.m$) possibly caused by high temperature resistive minerals ($230^{\circ}C$) chlorite and epidote.

Palabras clave: Exploración Geotérmica,

Key words: Geothermal exploration, Resistivity structure, Occam 1D, Occam 2D, MT inversion.

Introducción

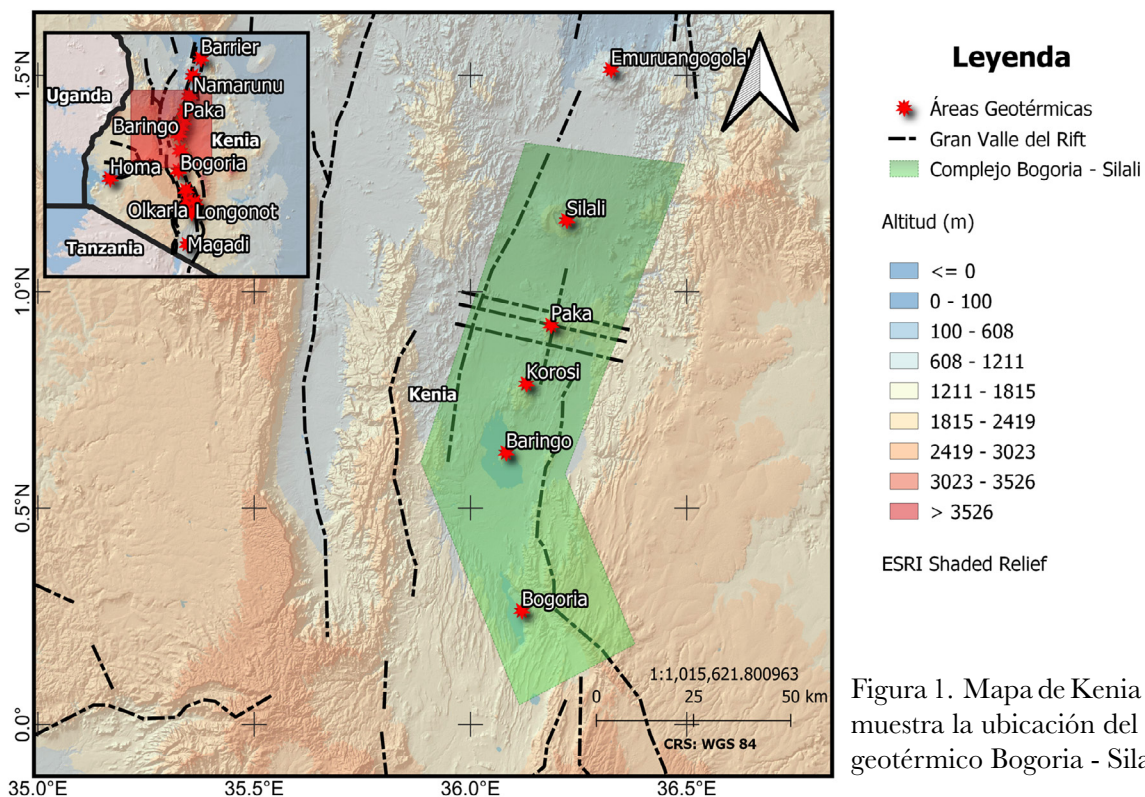
El calor es una forma de energía y la energía geotérmica es energía térmica en el interior de la Tierra que genera fenómenos geológicos a escala planetaria; el término energía geotérmica es a menudo utilizado para indicar aquella porción del calor de la Tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre [1]. La generación de energía geotérmica es más atractiva en las regiones volcánicas con fácil acceso a sistemas poco profundos de alta entalpía. Kenia tiene un alto potencial de energía geotérmica, que es apropiada para la generación de energía. Sin embargo, la mayoría de estos recursos no se han explorado ni evaluado en detalle. Este enorme potencial geotérmico sin explorar y la alta dependencia de la energía hidroeléctrica y las fuentes de energía de combustibles fósiles están estimulando los proyectos de exploración y desarrollo de energía geotérmica en Kenia [2]. Paka es una de las perspectivas geotérmicas en el Rift de Kenia. Está definido como un volcán Escudo y se caracteriza por una intensa y generalizada actividad geotérmica en la superficie que se manifiesta en forma de fumarolas, suelos calientes y rocas alteradas hidrotermalmente [3]. El volcán de Paka está situado 25 km al norte del Lago Baringo, está limitado por la latitud $00^{\circ}55'N$ y la longitud $36^{\circ}12'E$ y se eleva a una altitud de 1691 m.

El volcán de Paka se encuentra en el canal interior del Rift de Kenia. El macizo del volcán se extiende sobre un área de unos 280 km^2 y se eleva entre 600 m y 700 m sobre el nivel del Rift [4].

*Autor para contacto: adonnis@ieec.org

El proyecto geotérmico Bogoria – Silali, tiene un potencial estimado de 3000 MWe. El desarrollo de los campos geotérmicos del bloque Bogoria – Silali se realizará por fases. Teniendo 300 MWe como objetivos para la Fase I, esperando que los campos de Paka, Korosi y Silali contribuyan con 100 MWe cada uno [5].

La geología de Paka parece estar muy influenciada por el tectonismo y el vulcanismo. La historia evolutiva se puede dividir ampliamente en dos periodos de vulcanismo Traquíticos separados por actividad basáltica y fallas. La actividad volcánica comenzó por los 390 Ma y ha continuado dentro de los 10Ma. Gran parte de los escudos que forman lavas están cubiertos por depósitos piroclásticos traquíticos que cubren las áreas alrededor del volcán [4].



El método magnetotelúrico consiste en medir desde la superficie las fluctuaciones temporales de los campos electromagnéticos por los fenómenos naturales de la Tierra que se producen en la ionosfera principalmente por la actividad solar y determinar la distribución de la resistividad eléctrica en función de su frecuencia, es decir, en función de su profundidad. La profundidad a la que se realiza la investigación dependerá del tiempo en que se registre la señal electromagnética permitiendo calcular impedancias para frecuencias desde 0.0001 Hz hasta 65 kHz. El método consiste en resolver las ecuaciones de Maxwell [6] en esencia de un medio conductor con las condiciones de contorno apropiadas según lo establecido en los trabajos de Cagniard [7], Keller & Frischknecht [8] y Simpson & Bahr [9].

Inversión tipo Occam

Los datos de resistividad aparente del estudio MT se invirtieron utilizando una rutina de inversión para producir curvas unidimensionales (1-D) y secciones transversales bidimensionales (2-D) que muestran la resistividad “verdadera” en función de la profundidad. Esto se debe a que las técnicas de inversión 1-D y 2-D son muy útiles

para inferir la variación de resistividad vertical y lateral del subsuelo. Por lo tanto, se aplicaron inversiones extensas en 1-D y 2-D a los datos MT para comprender la estructura de resistividad en el área de estudio.

OCCAM1DCSEM es un paquete Fortran para generar modelos unidimensionales fluidos a partir de datos electromagnéticos y magnetotéluricos de fuente controlada. El paquete OCCAM1DCSEM se basa en un nuevo código directo CSEM 1D llamado DIPOLE1D, que se ha diseñado para manejar una cantidad diversa de escenarios de modelado CSEM 1D. Fue desarrollado por el Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de California, San Diego y es de uso libre [10]. La inversión 1D de Occam se basa en la minimización de la siguiente Función [11]:

$$U = \|\partial m\|^2 + \|P(m - m_*)\|^2 + \mu^{-1}\{W\|d - F(m)\|^2 - x_*^2\} \quad \text{Ecuación 1}$$

El primer término de la ecuación representa la norma de la rugosidad del modelo y se calcula aplicando un operador diferencial ∂ a los elementos del vector modelo m . El segundo término representa la actualización del modelo. La expresión antes del último término de la ecuación es la medida del desajuste de datos entre las respuestas observadas (d) y pronosticadas, $F(m)$. W es la función de ponderación de covarianza de datos, que es una matriz diagonal con elementos correspondientes a errores estándar de datos invertidos. La función de ponderación de covarianza de datos W pondera la contribución relativa de cada dato al desajuste en función de su incertidumbre. Por lo tanto, los datos con grandes errores se escalan para limitar su influencia, mientras que los datos con pequeños errores tendrán un mayor impacto [10]. El término μ^{-1} es el multiplicador de Lagrange que sirve para equilibrar el ajuste de los datos, la aspereza y la preferencia del modelo. El último término X_*^2 es el desajuste objetivo, que generalmente se elige para que el valor de la Raíz Media Cuadrada (RMS) sea igual a uno.

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i - F_i(m)}{S_i} \right)^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde n es el número de datos y S_i es el error estándar del i -ésimo dato.

En una inversión 2-D, se supone que la resistividad puede variar con la profundidad y una dirección lateral y que la resistividad es constante en la otra dirección horizontal (Strike eléctrico). La inversión se realiza para sondeos en perfiles aproximadamente perpendiculares al Strike Eléctrico. Si el sistema de coordenadas de configuración del campo no es perpendicular al Strike Eléctrico, los datos del Tensor de impedancia MT se rotan matemáticamente con un eje perpendicular al Strike Eléctrico y otro eje paralelo a él. Luego se realiza la inversión para ajustar la resistividad aparente y los datos de fase calculados a partir de los elementos de impedancia con el campo eléctrico perpendicular al Strike (llamado modo TM) o el modo con el campo paralelo al Strike (llamado modo TE), o ambos simultáneamente [2].

Para la inversión 2-D de los datos de Paka MT, se utilizó el código de inversión 2-D de Occam en su versión 3.0 desarrollado por Scripps Institution of Oceanography [9]. La inversión 2-D de Occam se basa en la reducción a sus valores mínimos de la siguiente expresión.

$$U = \|\partial_y m\|^2 + \|\partial_z m\|^2 + \mu^{-1}\{\|W(d - F(m))\|^2 - X_*^2\} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde la expresión, $\|\partial_y m\|^2 + \|\partial_z m\|^2$ es una norma de la rugosidad del modelo, μ^{-1} es el multiplicador de Lagrange, el tercer término de la ecuación representa el desajuste de los datos, W es la matriz de ponderación diagonal $M \times M$, d representa el vector de observación, y $F(m)$ representa la respuesta del modelo.

Resultados

Al realizar la inversión 2-D, se consideraron cuatro perfiles; tres de ellos de Este a Oeste, perpendiculares a los lineamientos, (perfil 1, 2 y 3) y el otro (perfil 4) de Sur a Norte paralelo a los lineamientos, como se observa en la figura siguiente:

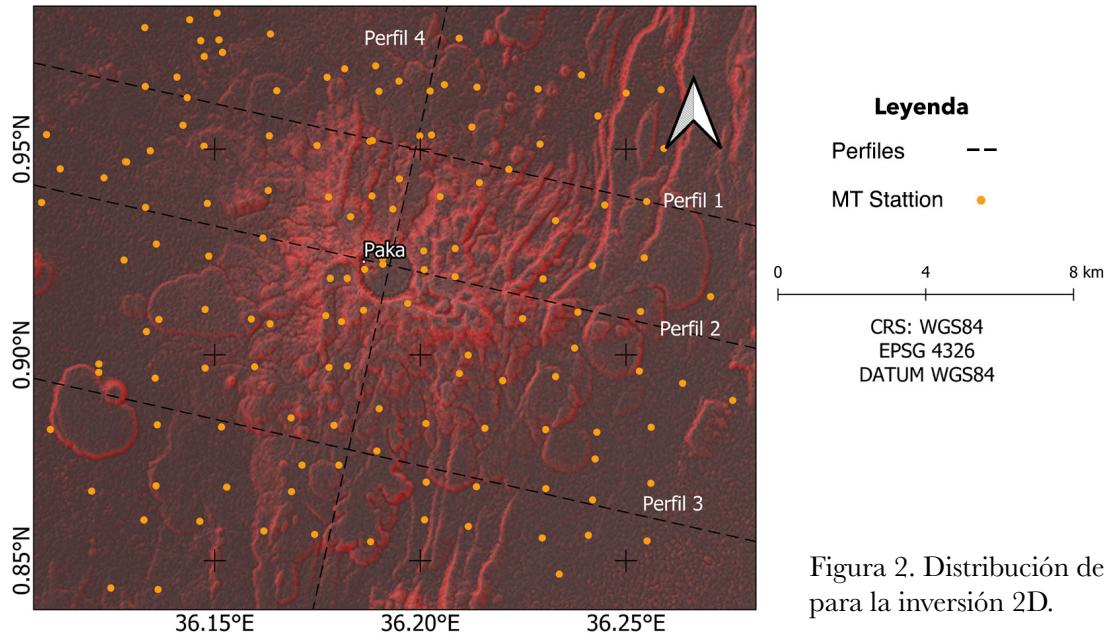


Figura 2. Distribución de perfiles para la inversión 2D.

Conclusiones

La inversión unidimensional de los datos MT, pertenecientes al campo geotérmico de Paka, indica la geometría de los sistemas geotérmicos asociados al volcán de Paka. Una capa poco profunda de alta resistividad cerca de la superficie ($>100\Omega$) que es una capa de formaciones inalteradas de unos 300 m de espesor; el mecanismo de conducción podría ser por material poroso. La siguiente capa es de baja resistividad ($<10\Omega$) de unos 800 m de espesor que consiste en minerales de alteración como esmectitas y zeolitas, formadas por alteraciones hidrotermales; la conducción mineral domina esta capa. Sigue una anomalía de alta resistividad ($>100\Omega$) donde la resistividad está dominada por los minerales resistivos de alteración a alta temperatura clorita y epidota. A través de esta capa se define el sistema geotérmico en el intervalo de 1.5 km a 6 km de profundidad a partir de la superficie. Más profundo aparece una anomalía de baja resistividad, representa un conductor profundo posiblemente esté relacionado con la fuente de calor.

La inversión bidimensional de los datos MT, pertenecientes al campo geotérmico de Paka, confirma la geometría obtenida en los modelos unidimensionales de los sistemas geotérmicos asociados al volcán de Paka. Para el perfil 2 que se encuentra justo bajo el volcán de Paka se puede observar una capa superficial de unos 300 metros con una alta resistividad ($>100\Omega$), se logran identificar la capa de sello con baja resistividad ($<10\Omega$) y una falla justamente bajo el volcán con una resistividad entre los (50Ω - 100Ω) y se identifica el posible reservorio geotérmico a partir de 1.7 km de profundidad con una resistividad ($>100\Omega$) hasta los 5 km de profundidad, de unos 4 km de ancho. Provocado como se explicó anteriormente por los minerales resistivos de alteración a alta temperatura (230°C) clorita y epidota.

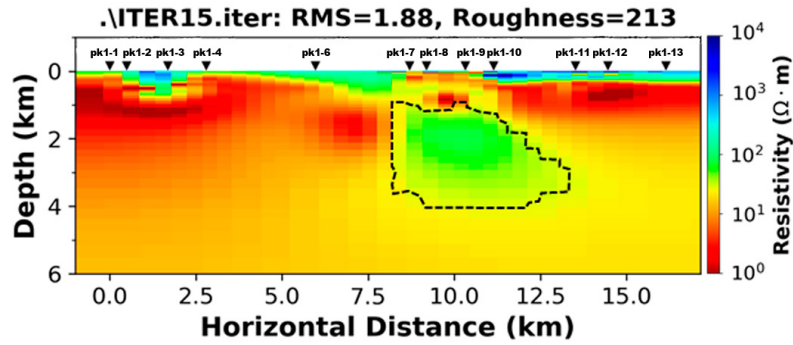


Figura 3. Inversión 2D para el perfil 1 con una profundidad de 6 km. El polígono muestra el lugar posible del reservorio geotérmico a una profundidad de 1 a 4 km y diámetro de 5 km aproximadamente.

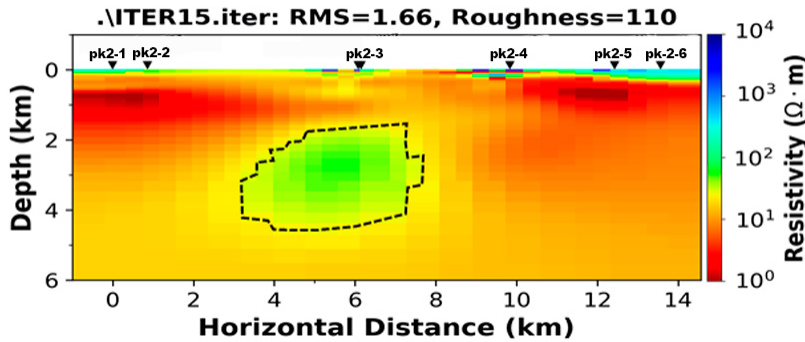


Figura 4. Inversión 2D para el perfil 2 con una profundidad de 6 km. El polígono muestra el lugar posible del reservorio geotérmico a una profundidad de 1 a 4.5 km y diámetro de 5 km aproximadamente.

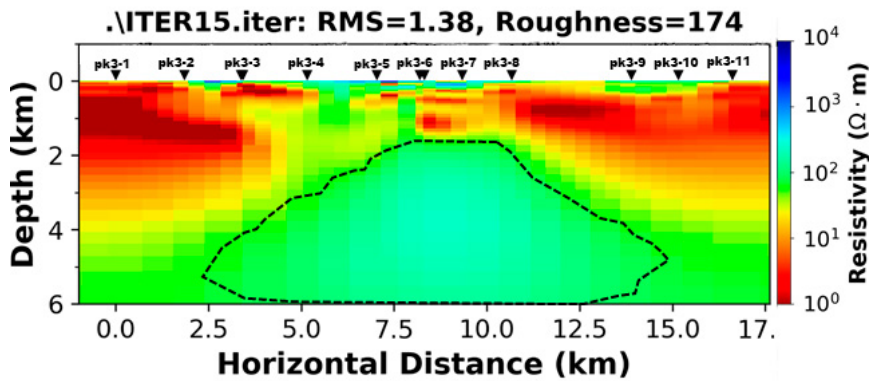


Figura 5. Inversión 2D para el perfil 3 con una profundidad de 6 km. El polígono muestra el lugar posible del reservorio geotérmico a una profundidad de 1 a 6 km y diámetro de 12.5 km aproximadamente.

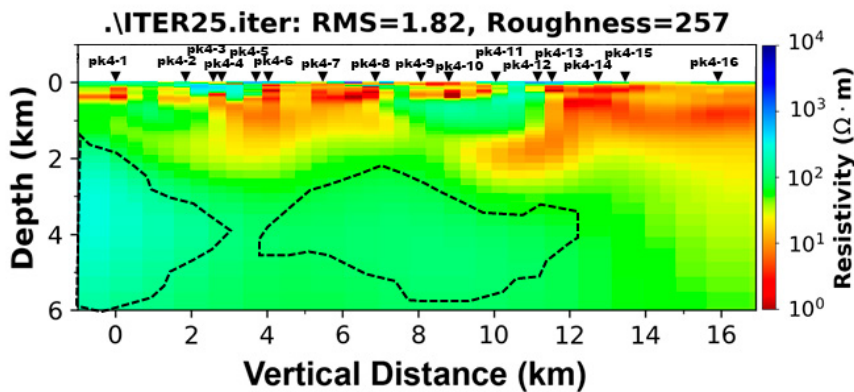


Figura 6. Inversión 2D para el perfil 4 con una profundidad de 6 km. Los polígonos muestran el ancho de los posibles reservorios geotérmicos identificados en los perfiles de inversión 1, 2 y 3.

Para el perfil 1 se obtuvo un error RMS de 1.88 después de 15 iteraciones.

Referencias bibliográficas

1. Dickson, M. H. y Fanelli, M. (2013). Geothermal energy: utilization and technology. Routledge. 224 pp.
2. Maithya, J., Fujimitsu, Y. y Nishijima, J. (2020). Analysis of gravity data to delineate structural features controlling the Eburru geothermal system in Kenya. *Geothermics*, 85, 101795.
3. Dunkley, P. N., Smith, M., Allen, D. J., y Darling, W. G. (1993). "The geothermal activity and geology of the northern sector of the Kenya Rift Valley," *British Geological Survey research report*, vol. SC93/1.
4. Achieng, J., Mutua, J., Mibei, G., Olaka, L. y Wawa, K. A. (2017). Mapping of Hydrothermal Minerals Related to Geothermal Activities Using Remote Sensing and GIS: Case Study of Paka Volcano in Kenyan Rift Valley. *International Journal of Geosciences*, 8(5), 711-725.
5. Geothermal Development Company. (2019). GDC Annual Report 2019. 153 pp.
6. Maxwell, J. C. (1865). A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 459-512.
7. Cagniard, L. (1953). Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18(3), 605-635.
8. Keller, G. V. y Frischknecht, F. C. (1966). Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press, Oxford.
9. Simpson, F. y Bahr, K. (2005). Practical magnetotellurics. Cambridge University Press. 272 pp.
10. Key, K. (2011). OCCAM1DCSEM: An Open-Source Inversion Program for Generating Smooth 1D Models from Controlled-Source Electromagnetic and Magnetotelluric Data. OCCAM1DCSEM instruction manual, Scripps Institution of Oceanography University of California.
11. Constable, S. C., Parker, R. L. y Constable, C. G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), 289-300.
12. deGroot-Hedlin, C. y Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55(12), 1613-1624.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022

Cálculo automático diario de la evapotranspiración en Costa Rica según FAO-56

José Brenes-André^{a*}, Santiago Núñez-Corrales^a

^aInvestigadores independientes

Abstract: An efficient and precise water balance is a must in today's world. Although reasonable rain values are increasingly available, evapotranspiration values are hard to calculate usually due to lack of needed data. Here we present an automatic way to fetch the needed values to calculate it using FAO-56 formula .

Palabras clave: FAO-56, evapotranspiración, NOAA.

Key words: FAO-56, evapotranspiration, NOAA.

Introducción

El cálculo de perfiles longitudinales de evapotranspiración es una tarea de intenso procesamiento de datos. Por ello, depende de la disponibilidad de bases de datos integrados y validados a diferentes escalas para poder utilizarlos en modelaje, toma de decisiones y planificación a largo plazo. Es común, sobre todo en el hemisferio sur global, que los datos provistos por los sensores muestren limitaciones fundamentales que previenen formar un cuadro espacial y temporal completo.

Por añadidura, tienden a ser los mismos países y regiones en las que las estimaciones de evapotranspiración son cada vez más urgentes por enfrentar el impacto creciente de los efectos de cambio climático, y por qué las incertidumbres en los datos y modelos se acumulan [1-2], aumentando la necesidad de mayores integraciones entre los códigos científicos y los datos de ciclos cada vez más cortos.

Los estudios existentes tienden a enfocarse en ciertos lugares y períodos temporales, con un énfasis en la dinámica de los bosques lluviosos [3-6]. Uno de esos estudios mejoró los estimados de los flujos E y T basándose en un modelo de balance acoplado de masa de isótopos [7] en una base mensual. Cooley et al [3] también analizaron los posibles efectos por sequías y, consecuentemente, en actividades agrícolas. Sin embargo, a pesar de del importante esfuerzo para obtener resultados exactos, la integración de los estimados de evapotranspiración en los ciclos de toma de decisiones a escala nacional requiere un proceso de cálculo diferente que, aunque más aproximado, utilice bases de datos cuya calidad provenga de procesos de recolección e integración bien establecidos. Recordamos que la mayoría de los estimados de evapotranspiración de Costa Rica tienen una resolución temporal mensual.

*Autor para contacto: jbres54@gmail.com

Nuestro trabajo se centra en el uso de código científico abierto y de bases de datos validadas para cerrar las brechas en las cantidades estimadas de evapotranspiración en Costa Rica, con el propósito de encontrar correlaciones significativas con algunos de los hitos de cambio climático. Hacemos uso de instrumentos y bases de datos sintéticas producidas y validadas por NOAA bajo estrictos estándares de manejo de datos [8], que contienen datos a intervalos de 1-hora, 1,5-horas y 3-horas para computar los parámetros requeridos en la ecuación de Penman-Monteith (modelo FAO-56 [9]). Para lograrlo implementamos códigos en Python para extraer la información paramétrica a través de fronteras geográficas descritas por cajas cerradas o localizaciones individuales, valores de presión con datos reanalizados o parámetros con características específicas. Estos códigos también computan o estiman parámetros adicionales cuando la información no está directamente disponible..

Metodología

Proceso de cálculo. Las bases de datos son seleccionadas de acuerdo con la granularidad y atributos requeridos para computar el modelo FAO 56. Esta selección se incorpora en un código que genera la solicitud a los servicios de NOAA, y obtener así todos los datos relevantes para un lapso de tiempo definido. Nuestro código puede extenderse para procesar bases de datos con otros formatos y fuentes. Una serie de datos intermedios, representantes de cortes de la geografía de interés, puede ser almacenada a conveniencia en formato CSV.

Nosotros seleccionamos datos entre 6 am y 6 pm, correspondientes al lapso de mayor impacto diario en los procesos de evapotranspiración. Para este rango obtenemos datos con la mayor granularidad temporal posible. Como ejemplo, Costa Rica puede ser cubierta por 254 puntos usando datos del GEOS5 a intervalos de 3-horas que cubre el rango temporal indicado arriba para 10 cantidades relevantes. Así un análisis del 1 Enero 1980 hasta el 31 Diciembre, 2020 (o sea 14 609 días) implica la búsqueda de $10 \times 254 \times 4 \times 14609 \approx 1.48 \times 10^8$ datos independientes. Estos 148 millones de datos iniciales son luego utilizados para calcular la evolución temporal y espacial de la FAO-56.

Con esta base de datos, computamos para cada una de las 256 áreas de la grilla el valor respectivo de FAO-56. Luego de computar la serie temporal para cada una de las locaciones, calculamos las distancias Frechet entre ellas y la descomposición de ondeleta con ventanas de varios tamaños relevantes a los ciclos humanos y naturales.

Análisis

Posible aplicación. La comparación de los resultados obtenidos con un Tanque evaporímetro tipo A con los obtenidos con el modelo FAO-56 con promedios mensuales, en 6 áreas geográficas llevó a la conclusión de que: La aplicación de este modelo (FAO 56) en Costa Rica requiere aún más calibración, ya que como pudo notarse algunas regiones como el Pacífico Sur y el Caribe, muestran una gran diferencia en cuanto al rango, entre el método FAO-56 y el Tanque evaporímetro tipo A. El método FAO-56 utilizado para reconstruir los registros de evaporación, es robusto estadísticamente y por lo tanto su aplicación se torna difícil en aquellos casos en los que se carece de las series de tiempo que este modelo requiere para su cálculo [10].

Creemos que el software desarrollado por los autores permitiría a los investigadores rehacer esa comparación en 256 áreas más pequeñas en lugar de solo 6 más grandes y con mayor variabilidad dentro de cada una de ellas, con una serie temporal de 14 609 días al utilizarse valores diarios teniéndose entonces una mejor granularidad.

Así mismo puede resultar de utilidad en cálculos de recarga de acuíferos, por ejemplo, donde la evapotranspiración es uno de los elementos que intervienen en el cálculo [11].

Referencias bibliográficas

1. Kingston, D.G., Todd, M.C., Taylor, R.G., Thompson, J.R. and Arnell, N.W. (2009). Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change. *Geophysical Research Letters*, 36(20), p.120403
2. McKenney, M.S. and Rosenberg, N.J. (1993). Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64(1-2), 81-110.
3. Cooley, S.S., Williams, C.A., Fisher, J.B., Halverson, G.H., Perret, J. and Lee, C.M., 2019. Assessing regional drought impacts on vegetation and evapotranspiration: a case study in Guanacaste, Costa Rica. *Ecological Applications*, 29(2), p.e01834.
4. Loescher, H.W., Gholz, H.L., Jacobs, J.M. and Oberbauer, S.F. (2005). Energy dynamics and modeled evapotranspiration from a wet tropical forest in Costa Rica. *Journal of Hydrology*, 315(1-4), pp.274-294.
5. Bigelow, S. (2001). Evapotranspiration modelled from stands of three broad-leaved tropical trees in Costa Rica. *Hydrological Processes*, 15(14), pp.2779-2796.
6. Cadol, D., Kampf, S. and Wohl, E. (2012). Effects of evapotranspiration on baseflow in a tropical headwater catchment. *Journal of Hydrology*, 462, 4-14.
7. Iraheta, A., Birkel, C., Benegas, L., Ríos, N., Sánchez-Murillo, R. and Beyer, M. (2021). A preliminary isotope-based evapotranspiration partitioning approach for tropical Costa Rica. *Ecohydrology*, 14(5), p.e2297.
8. Beaujardière, J.D.L. (2016). NOAA environmental data management. *Journal of Map & Geography Libraries*, 12(1), 5-27.
9. Zotarelli, L., Dukes, M.D., Romero, C.C., Migliaccio, K.W. and Morgan, K.T. (2010). Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida, p.28.
10. Hernandez, K. (2014). Cálculo de la evaporación en Costa Rica mediante el método FAO-56. *Tópicos meteorológicos y oceanográficos*, 13, 43-49.
11. Schosinski, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34, 13-30.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Ingeniería Geológica en el Área Metropolitana de San Salvador

José Alexander Chávez^{a*}, Tomáš Hroch^b, Jan Valenta^c, Jiří Šebesta^b, Mauricio Vásquez^a

^aOficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, San Salvador, El Salvador.

^bServicio Geológico Checo, Praga, República Checa.

^cTEXGEO, Praga, República Checa.

Abstract: Engineering geological mapping in the Metropolitan Area of San Salvador has been carried on since 2008 in order to improve the decision making and knowledge of risky areas prone to developing pressure. A 1:50,000 scale map of the whole area and in some areas scale 1:10,000 are available. Most problematic areas are related to young tephra on erosion/tectonic hillsides, areas of scarps, flood plains. The maps provide areas with the same lithological, geomorphological and risk characteristics. This information gives zoning and geotechnical recommendations for planning and construction actors in the city for decreasing problems related to mass movements, erosion, floods and earthquakes.

Palabras clave: ingeniería geológica, litología, geomorfología, riesgos.

Key words: Engineering geology, lithology, geomorphology, hazards.

Introducción

El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) está expuesta recurrentemente a procesos geológicos endógenos y exógenos que tienen un impacto importante en las pérdidas ambientales y socio-económicas. Debido a esto, se ha continuado el mapeo de ingeniería geológica iniciado por [1]. Este esfuerzo se enmarca dentro del proyecto “Gestión de Riesgos y Disminución de Vulnerabilidad Social en el AMSS” fase II, financiado por la Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AACID), ya que las geociencias aportan en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Nueva Agenda Urbana, que buscan ciudades sostenibles y resilientes. Los estudios y cartografía geológica, geomorfológica, así como de ingeniería geológica son un instrumento para comprender cómo y dónde los riesgos geológicos pueden afectar a los habitantes de determinada zona, siendo importante conocer dónde están las mejores condiciones para el desarrollo de la ciudad, permitiendo encontrar un equilibrio entre el uso de los recursos naturales para desarrollar las áreas con criterios más adecuados.

Debido a esto se ha trabajado en ingeniería geológica a escala 1:50,000 para toda el AMSS y 1:10,000 en algunas zonas dentro del AMSS, priorizando zonas críticas o de presión urbanística en sectores de volcán Boquerón, el Carmen (la Escalón), Santa Tecla (carretera a la Libertad y cordillera Bálsamo), Apopa, cuenca de río las Cañas y Chagüite.

*Autor para contacto: alex.chavez@opamss.org.sv

Materiales y Metodología

La Ingeniería Geológica puede apoyar en la planificación por medio de mapas e identificación de áreas de amenaza natural, pero también puede ayudar solucionando problemas e investigación in situ, obtención de datos para diseño y aprovechamiento de los materiales para la construcción. El mapa de ingeniería geológica es un producto que se elabora en base al mapeo de campo, donde se evalúan durante la campaña de campo algunos parámetros como la estructura geológica, aspectos hidrogeológicos, zonas de depósito en quebradas, geomorfología y predisposición a movimientos de ladera/erosión, inundación, así como parámetros geotécnicos (estimados) e inclinación. La cartografía de ingeniería geológica agrupa unidades geológicas que tienen un comportamiento parecido, además usa algunas formas o unidades geomorfológicas, que no tiene el mapa geológico, como las laderas tectónicas y caldéricas, donde las rocas están más fracturadas.

Como primer paso para el mapeo es la recopilación de información disponible de la zona de estudio como topografía, modelo de elevación, problemas de denudación, geología, geomorfología y sus derivados, hidrogeología, pozos existentes y manantiales, recarga acuífera, sensores remotos incluyendo fotografías aéreas antiguas, información geotécnica entre otros, siguiendo la metodología explicada en [1]. Siendo necesario las visitas de campo a detalle en búsqueda de afloramientos naturales o artificiales y corroborar información compilada (en mapa se puede colocar espesor de capas superficiales). En el presente caso se ha usado la geología de [2] como referencia y mapas geomorfológicos/peligrosidad e InSAR [3]. Pudiéndose evaluar también amenazas como el vulcanismo y la sismicidad si se tiene información. Para el mapeo se usaron curvas topográficas a 10, 5 y 1 m (estas últimas de LIDAR) lo cual ayudo a actualización de mapas a mejor detalle, especialmente en sector de quebradas para modelo de elevación sin cubierta de vegetación.

Los mapas de ingeniería geológica en el AMSS contienen información litológica, aguas superficiales y peligrosidad geológica principalmente, definiéndose cada unidad con sus características y facilitando algunas

recomendaciones de aspectos a considerar. También se generaron mapas tipo semáforo indicando zonas menos problemáticas, de mediana y de alta/muy alta problemática. Además, en la cuenca de las Cañas y Chagüite se usaron los modelos de elevación de los años 80, 2014 y 2020 para observar el cambio de perfil/secciones de ríos y quebradas para interpretar zonas de cambios y sectores de erosión retrograda, así como de depositación.

Resultados y Análisis

Las zonas mapeadas se muestran en figura 1, observándose la importancia de las tefras recientes que cubren la superficie y que es donde se producen los movimientos de denudación (erosión y movimientos de ladera). Siendo las zonas más críticas las laderas de erosión, laderas o vertientes tectónicas,

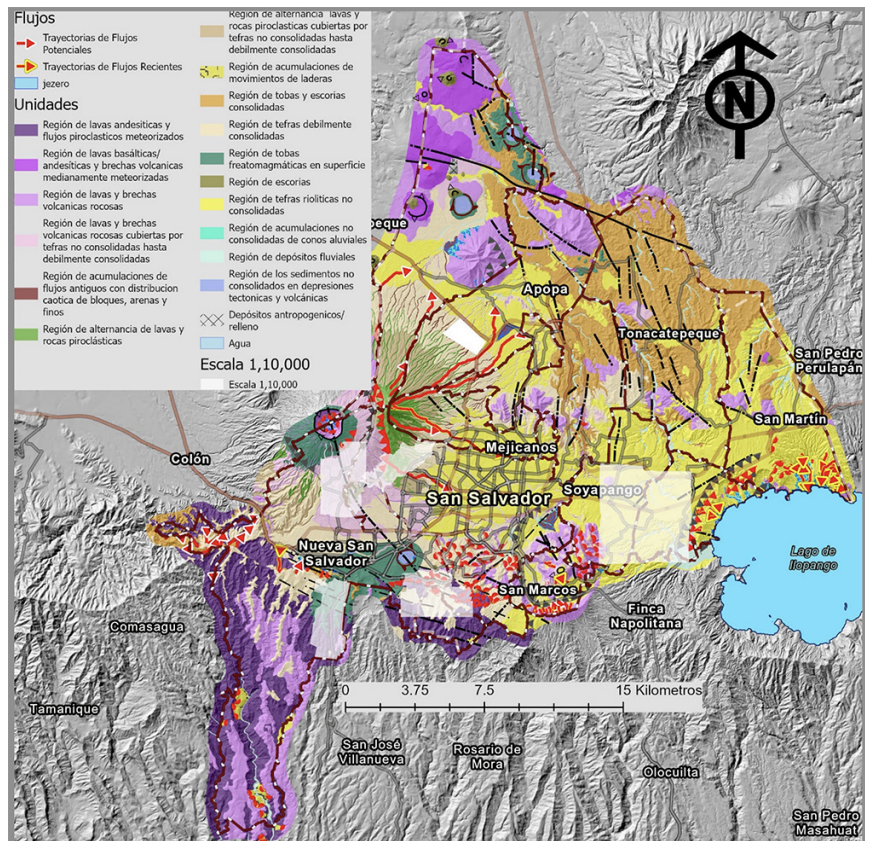


Figura 1. Mapa de Ingeniería Geológica del AMSS, las zonas en blanco indican corresponden a áreas mapeadas en escala 1:10,000.

escarpes volcánicos, badlands (erosión intensa), llanuras de inundación y zonas de fracturamiento/fallamiento principalmente. En cuanto a los estratos más problemáticos resaltan la Tierra Blanca Joven y sectores meteorizados. Iniciándose también la compilación de una base de datos geotécnicos que en tres municipios del AMSS sirvió de base para la obtención de mapas geotécnicos con información de SPT y perforaciones.

En los drenajes relacionados al complejo volcánico de San Salvador, se identificó durante etapa de campo, si dentro de las quebradas hay material acumulado que se podría movilizar y por tanto ser más susceptible a que un posible flujo de escombros aumente su volumen y que pueda afectar aguas abajo, si no se observaba acumulación de materiales en las quebradas, pues el nivel de susceptibilidad es menor. Las Zonas de acumulación o de depresiones sin drenaje son también zonas importantes a identificarlas como zonas de cuidado.

En la figura 2 se muestra un mapa de ingeniería geológica basado en cambios de drenaje fluvial y denudación de la zona oriental (cuenca las Cañas/Chagüite). Los cambios en la dinámica fluvial están relacionados a cambios del nivel base (sectores embovedados), tectónica (movimientos tectónicos recientes), clima (eventos climáticos fuertes) y urbanización (aumento de escorrentía). En la figura 3 se muestra mapa de ingeniería geológica típico del sector al pie de complejo volcánico de San Salvador en el Carmen, la Escalón, con litología, zonas de interés y coberturas de tefras.

Conclusiones

El conocimiento de las condiciones geológicas aporta los criterios para el uso de tecnologías de construcción adecuadas, para así, evitar pérdidas humanas y económicas cada vez que un evento natural afecta el país. Toda esta problemática podría ser reducida drásticamente si se conociera las características del territorio y se realizaran los estudios correspondientes cuando se proyecta una intervención antrópica; de manera que se pueda conocer de antemano la tecnología adecuada y las áreas en donde hay que tomar consideraciones puntuales. Los mapas de ingeniería geológica ayudan a conocer de manera preliminar el tipo de investigación necesaria y el uso de suelo más recomendado. Además, apoya la toma de decisiones, ya que ahorra dinero al evitar reparaciones constantes, así como, pérdidas económicas y de vidas humanas por lluvias y terremotos.

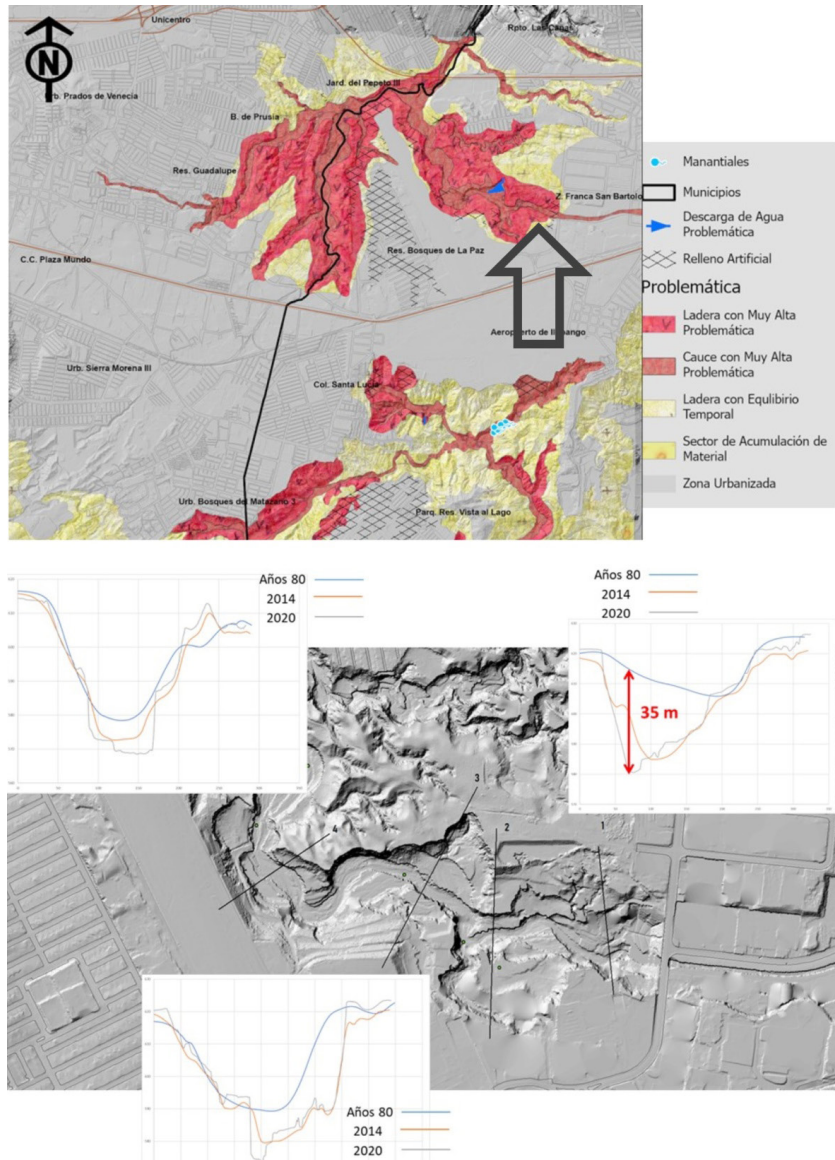


Figura 2. Mapa de Ingeniería Geológica basado en cambios de drenaje fluvial y denudación. Sector Cañas/Chagüite.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Diseño e implementación de una comunicación inalámbrica entre un móvil celular y el Sensor LI-830 para transmitir datos de CO₂ vía Bluetooth

Omar Aguilar^{a*}, Carlos Arriaza^a, Diego Hernández^a, Luis Herrera^a,
Lizardo Arias^a, Benancio Henríquez Miranda^b, Carlos Pocasangre^a

^aEscuela de Ingeniería Eléctrica y Arquitectura, Universidad de El Salvador, El Salvador.

^bDepartamento de Física, Facultad Multidisciplinaria de Occidente, Universidad de El Salvador, El Salvador.

Abstract: The monitoring of volcanoes has turned out to be one of the most difficult of collecting information from them due to their terrestrial conditions. Professionals who study volcanoes have had enormous success in collecting data of volcanoes. The CO₂ sensor, this allows professionals to monitor the variation of CO₂ over time as well as the flow of CO₂ that the volcano is emitting, this is a strong indication that the volcano has probability of eruption, this device allows the constant monitoring of CO₂ in the volcanic zone but with the detail that it must be connected to a computer to obtain the data, in this project was a way to facilitate volcano scholars the task of collecting the CO₂ data.

Introducción

El Salvador se ubica en el conocido cinturón de fuego, ha poseído una fuerte actividad volcánica desde muchos años atrás, entre las más recientes podemos mencionar la erupción del volcán de Santa Ana en el 2005, en la zona occidental y la erupción del volcán de San Miguel en el 2013, en la zona de Oriente, dos de los volcanes más activos que posee El Salvador.

Debido a ello, el realizar un constante monitoreo de los volcanes del país, se ha vuelto una tarea relevante para los estudiosos de los suelos, geólogos, químicos, físicos, y hasta ingenieros. Es aquí, donde entra el LI-COR LI-830, un sensor especializado en la recolección de datos o mediciones para CO₂ (dióxido de carbono). Sin embargo, el uso de este sensor resulta ser complicado en el monitoreo de los volcanes, debido que es necesario tomar mediciones en muchos puntos alrededor del cráter, siendo que el diseño original del sensor es estar instalando en una estación fija, conectado a la red eléctrica para alimentación y a una PC por medio de un cable USB, con una cámara de acumulación para calcular el flujo de CO₂. Para esto se propuso como objetivo, la alternativa de realizar una conexión inalámbrica entre el LI-COR LI-830 y un teléfono móvil, alimentado con baterías; de esta forma se podría transportar el sensor en una mochila y mantenerse monitoreando los niveles de concentración y el flujo de CO₂ con un teléfono móvil por medio de una aplicación en Android [1]. Logrando monitorear cualquier punto de interés. Obteniendo así un sistema adaptado más económico, comparado con los que se encuentran en el mercado [2].

*Autor para contacto: av17005@ues.edu.sv

Materiales y Metodología

El diseño original del sensor LI-COR LI 830 es para uso fijo, conectado de forma alámbrica a una PC con un software proporcionado por el fabricante [3]. Esto evita que su uso sea móvil, lo que también limita su uso para la obtención de mediciones de la concentración de CO₂ en las diferentes regiones de los volcanes. Para facilitar y ampliar el uso de este sensor, se tomó la idea de incorporar el sensor a un sistema móvil y la transferencia de datos utilizando una conexión de bluetooth con un teléfono móvil mediante una aplicación. La construcción del sistema cuenta con una micro computadora Raspberry pi3A+ con la incorporación de botones programados para encender, apagar y arrancar el código con el cual se accede a trabajar y se comienza el proceso de medición y recolección de datos [4, 5, 6, 7, 8 y 9]. La descripción breve de los materiales utilizados para construir este sistema de medición es enlistada en la tabla 1.

Cant	Artículo
1	Batería 5V para la Raspberry pi 3A+
1	Micro sd 16gb
1	Raspberry pi 3a+
1	Batería 12V 7Ah
1	Gabinete plástico gris
1	Ventilador
1	Switch t/push de retención c/luz verde
1	Switch push metálico 5a
1	Caja de transporte grande
1	Aplicación móvil para Android
1	Sensor LI-COR LI830

Tabla 1. Lista de materiales principales utilizados para la construcción del sistema de medición de flujo de CO₂.

Resultados y Análisis

La toma de datos de emisión de flujo de CO₂ se realizó el día martes 29 de marzo de 2022, alrededor de las 11:30 de la mañana en el *rín* u orilla del cráter del volcán de Santa Ana, el cual forma parte del complejo Los Volcanes en la cordillera de Apaneca, a unos 65km al oeste de la capital San Salvador. La metodología para la toma de datos consistió en tomar muestras de flujo de emisión de CO₂ en determinados puntos marcados anteriormente por los vulcanólogos de la Universidad de El Salvador, dichos puntos están distanciados a 1m, pero se decidió tomar muestras cada 5 puntos, es decir, cada 5 m con el fin de obtener 20 muestras y observar como el flujo aumentaba a medida que nos acercábamos a una de las zonas anómalas en el área de estudio. Se inició con la toma de muestras de concentración de CO₂ en el aire del ambiente, en dirección externa del cráter, para poder testear la respuesta del equipo y tener un punto de partida, esto se hizo como primer paso en cada punto de estudio en cuestión. De seguido se procedió a tomar muestras de concentración de CO₂ del suelo del volcán,



Figura 1. Toma de datos aproximadamente a unos 5 metros de distancia de la fumarola.



Figura 2. Captura de datos de concentración de CO₂ del aire del ambiente.

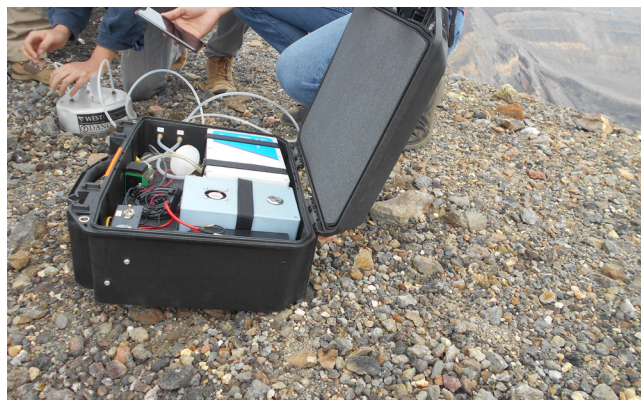


Figura 3. Toma de flujo de emisión de CO₂ en el suelo en uno de los puntos del rin del volcán de Santa Ana.

cada minuto y medio, aproximadamente, lo cual nos permitía obtener suficientes datos, entre 80 y 100 muestras de concentración, para poder visualizar la tendencia y de esa manera obtener la pendiente de la gráfica que nos determinaría el flujo de emisión de CO₂ en dichos puntos.

Las primeras muestras de flujo de emisión de CO₂ rondaban entre 0.20 y 1.70 (μmol/mol)/s a 15 m del punto inicial, pero en el punto 15 podíamos ver un considerable aumento en el flujo y el cual a medida que íbamos avanzando en distancia el flujo iba aumentando, ya que nos acercábamos a la zona anómala.

También se tomaron datos de la geolocalización, latitud y longitud en los puntos en estudio haciendo uso de un geonavegador portátil. Todos los datos obtenidos se resumen en la tabla 2.

Punto	ID	CO ₂ -Flujo (μmol/mol)/s	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)	Temperatura (°C)
0	81	0.3	13.846617	-89.627437	2292	22
1	82	0.3	13.846599	-89.627416	2292	23
5	83	0.7	13.846631	-89.627395	2293	
10	84	1.6	13.846669	-89.627349	2293	
15	85	3.9	13.846695	-89.62732	2294	
20	86	4.3	13.84673	-89.627283	2295	
25	87	7.3	13.846767	-89.627241	2294	
30	88	9.1	13.846798	-89.62723	2296	
35	89	8.2	13.846819	-89.627202	2297	
40	90	5.1	13.846863	-89.627145	2296	
45	91	57.2	13.846886	-89.62712	2298	16
50	92	10.1	13.846918	-89.627087	2298	19
55	93	9.8	13.846944	-89.627064	2299	20
60	94	6.9	13.846992	-89.627024	2299	18
65	95	4.1	13.847021	-89.626979	2301	17
70	96	2.3	13.847033	-89.62693	2300	18
75	97	1.3	13.847042	-89.626901	2300	19
80	98	0.7	13.847037	-89.626852	2299	20
85	99	1.0	13.847063	-89.626796	2298	20
90	100	0.9	13.847061	-89.626746	2299	19
95	101	1.3	13.847064	-89.626711	2298	19
100	102	0.4	13.847075	-89.626663	2298	21

Tabla 2. Resumen de datos obtenidos en el volcán de Santa Ana el día martes 29/03/22 entre las 11:30 am y 1:00 pm.

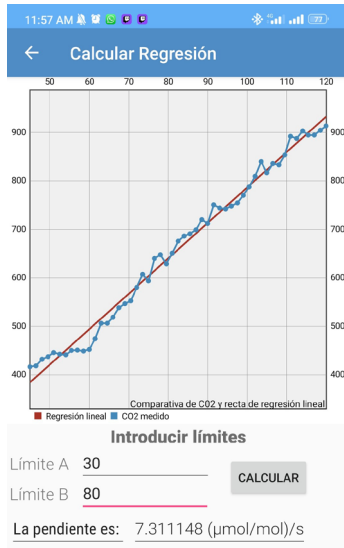


Figura 4. Flujo de emisión de CO₂ en el punto 25.

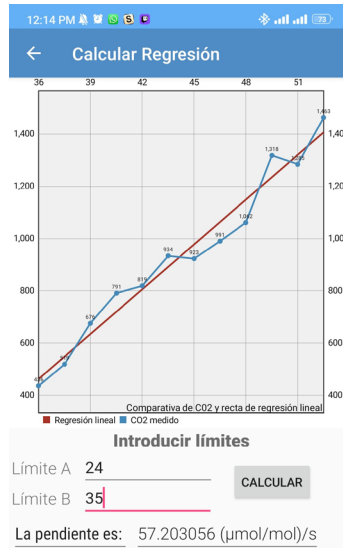


Figura 5. Flujo de emisión de CO₂ en punto 45.

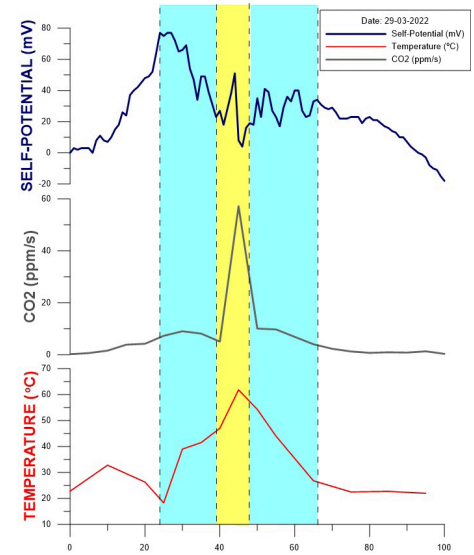


Figura 6. Gráfica de presentación de anomalía en Volcán de Santa Ana.

Vemos de la tabla 2 de resumen y en la pendiente obtenida por medio de la aplicación, que en el punto 45 se ubica la zona anómala debido al alto valor de flujo de emisión de CO₂ obtenido de aproximadamente 57.2 (µmol/mol)/s. También se observa la tendencia de incremento en el flujo a medida que nos acercábamos a la zona anómala y el decremento de este a medida continuamos tomando datos después de esta zona, dando una tendencia en forma de campana.

De forma de apoyo, se tomaron unas mediciones de SP (Potencial Espontáneo) y de temperatura del suelo, para poder expresar los datos tomados y detectar la ubicación de la fractura ubicada en el volcán, la anomalía se encuentra donde se tiene un valor máximo de flujo de CO₂ y temperatura, coincidente con un valor mínimo de potencial espontáneo.

Conclusiones

Ahora en la Universidad de El Salvador se ha creado un enlace benéfico entre ramas de estudio y aplicaciones diferentes. El área encargada de la vulcanología junto con el área de ingeniería, para juntos trabajar con equipos de monitoreo volcánico. El diseño de este equipo es una aplicación de ambas ramas, donde se unen conocimientos teóricos y prácticos para la ejecución de este proyecto. Este equipo cuenta con la oportunidad de mejora conforme sea necesario en el transcurso del tiempo. Mejoras inclinadas al desarrollo de la aplicación móvil, incorporación de nuevos módulos, sensores y más. Este trabajo nos deja la posibilidad de seguir desarrollando proyectos en esta área y sienta una base con la cual permitir al país tener herramientas desarrolladas en el país y ser productores de estas.

Con la implementación de este equipo de medición se sientan las bases para la construcción de más equipos de medición similares al construido en este proyecto, tomando como principal objetivo la mejora continua de estos.

Con la finalización de este proyecto se lograron cumplir los objetivos esperados, adaptar el mecanismo de funcionamiento de un sensor de CO₂ para su uso portátil e inalámbrico a través del diseño de una red inalámbrica para transferencia de datos entre el dispositivo sensor y una aplicación móvil para el almacenamiento y recopilación en tiempo real y el funcionamiento de todo el equipo por medio del uso de baterías recargables

Referencias bibliográficas

1. O'Hanlon, M. (s.f.). Blue Dot. Obtenido de <https://bluedot.readthedocs.io/en/latest/>
2. WestSystems. (2012). Portable diffuse flux meter with LI-COR CO2 detector.
3. LI-COR. (2021). Using the LI-830 and LI-850 Gas Analyzers. Manual del Fabricante LI-COR.
4. Cawley, C. (2019). 4 Raspberry Pi Battery Packs for Portable Projects. Obtenido de MUO: <https://www.makeuseof.com/tag/pi-go-x-ways-powering-raspberry-pi-portable-projects/>
5. Cawley, C. (27 de Mayo de 2019). How to Add a Power Button to Your Raspberry Pi. Obtenido de MUO: <https://www.makeuseof.com/tag/add-power-button-raspberry-pi/>
6. Cook, J. S. (28 de Mayo de 2020). Raspberry Pi Power-Up and Shutdown with a Physical Button. Obtenido de Embedded computing design: <https://www.embeddedcomputing.com/technology/open-source/development-kits/raspberry-pi-power-up-and-shutdown-with-a-physical-button>
7. Hochoow. (25 de Noviembre de 2020). How to Add a Power Button to Your Raspberry Pi. Obtenido de <https://howchoo.com/g/mwnlytk3zmm/how-to-add-a-power-button-to-your-raspberry-pi>
8. Holtmann, M. (2 de Marzo de 2019). Bluetooth pairing and trusting automatically. Obtenido de <https://forums.raspberrypi.com/viewtopic.php?t=234826>
9. Mariah S. Carbone, B. S. (2019). Agricultural and Forest Meteorology. ELSEVIER, 1-3.



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Análisis del fracturamiento y hundimiento superficial y su correlación con estudios de Tomografía Eléctrica 2D, al noreste de la Ciudad de México

David J. Zamudio Ángeles^{a*}, René Chávez Segura^a, Gerardo Cifuentes Nava^a, Esteban Hernández Quintero^a, Andrés Tejero Andrade^b, Alejandro García Serrano^b

^aInstituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

^bFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

En el área de estudio se identificaron dos diferentes sistemas de fracturamiento, uno SW25°NE (nueve fracturas) y otro SW40°NE (2 fracturas), así mismo, hundimientos puntuales que generalmente se presentan sobre los alineamientos de las fracturas y son del orden de 2 a 4 m² aproximadamente, formando diferentes polígonos, alargados, de media luna y en ocasiones formando oquedades de más de un metro de diámetro y profundidad, lo que ha afectado las vialidades y casas habitación. La zona de estudio forma parte de la zona denominada de lago y está constituida por sedimentos lacustres arcillosos en su mayoría, blandos y compresibles con altos contenidos de agua. De acuerdo a la información basada en dos sondeos geotécnicos que reportan una columna estratigráfica que consiste en alternancias de sedimentos arcillosos a arcillo limosos y arenosos, de unos cuantos centímetros hasta varios metros de espesor desde una profundidad de 2 metros hasta los 31.5 m, donde se presenta un manto rígido que consiste en un horizonte limo arcilloso cementado conocido como capa dura con un espesor de 4 m. Los estudios de Tomografía de Resistividad Eléctrica, reconocen en el subsuelo resistividades que muestran un horizonte altamente saturado cuya parte superior se encuentra entre 2 m a 3 m de profundidad, así como, anomalías de altos resistivos que se encuentran a una profundidad no mayor a 10 m, con valores del orden de 50 Ohm-m, que se interpretan como oquedades producidas por procesos erosivos de tubificación y que coinciden con hundimientos superficiales. Así mismo, se interpretan diversas fracturas que concuerdan también con el sistema de fracturas regionales.

*Autor para contacto: dzamudio@igeofisica.unam.mx



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Sistema experimental para la diseminación de la Alerta Temprana de Terremotos (ATT) por medio de la TV digital en Managua, Nicaragua

Wilfried Strauch^{a*}, Jacqueline Sánchez^a, Emilio Talavera^a, Guillermo Valdivia^b, Sheyla Gadea^b, Lisbette Larios^b, César Cruz^b, Mariano Flores^c, Bismarck Salinas^d, Alberto Funes^d, Yasuji Sakaguchi^e, Takuya Iritani^e, Frank Coloma^f, John Clinton^g, Frederick Massin^g, Billy Burgoa^h

^aINETER

^bTELCOR

^cSINAPRED

^dCanal 6 TV – Nicaragua

^eFundación JTEC, Tokyo, Japón TABANIKI Co., Ltd

^fFETECH, Lima, Perú

^gSED/ETHZ, Suiza

^hConsultor para SED/ETHZ, La Paz, Bolivia

A partir de 2020, JTEC y TABANIKI Co. del Japón en colaboración con INETER/Nicaragua y el proyecto EARNICA de la Colaboración Técnica Suiza (COSUDE) con Nicaragua y otros países de Centroamérica, habían puesto en marcha un esfuerzo regional para desarrollar métodos para la entrega muy rápida de mensajes de alerta temprana de terremotos. Se aprovechó de la estructura EWBS (Early Warning Broadcasting System) como parte de la TV digital (estándar japonés) establecido desde 2018, en Nicaragua, El Salvador, y Costa Rica. El gobierno de Nicaragua y las instituciones pertinentes mostraron mucho interés en esta iniciativa. Por eso y para ampliar la red de receptores de EWBS en Nicaragua, se ha realizado una coordinación con la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) y se acordó ejecutar el “Proyecto piloto de asistencia técnica para ampliar la recepción del Sistema de Alerta de Emergencia (EWBS) en Nicaragua”. Para este fin, el Gobierno de Japón a través del Ministerio de Asuntos de Interior y Comunicaciones, ha donado a Nicaragua una serie de equipos de inserción, monitorización y recepción del EWBS. Además, se incluyen en el proyecto 10 equipos EWBS ya existentes en Nicaragua, desde 2018, el software de los cuales se actualizó. SED/ETHZ desarrolló un interface de software que conecta el sistema sismológico de alerta temprana de Sismología/INETER con el sistema EWBS por medio de un Gateway en el canal 6 de TV (gubernamental) en Managua. TELCOR, INETER, SINAPRED, Canal 6 de TV cooperaron para instalar terminales finales de EWBS en 70 instituciones en Managua, capital de Nicaragua, como ministerios, instituciones estatales, hospitales, universidades, escuelas, centros comerciales, y otros. Desde diciembre de 2021, INETER envía mensajes sobre la ocurrencia de todos los sismos detectados por medio del EWBS. Las instituciones en Managua reciben estos mensajes en los terminales de EWBS o en televisores conectados con los setup boxes. Estos equipos se instalaron en lugares o oficinas donde existe presencia de personal 24x7 y la posibilidad de encender el sistema propio de alarma de la institución (sirenas, altoparlantes, timbres). De esta forma el mensaje puede ser retransmitido dentro de la institución a varios cientos e incluso a miles de personas que se encuentran en la institución. También, se probaron equipos gateway que retransmiten los mensajes que entran por EWBS en la red local de la institución a todas las computadoras y teléfonos celulares que tienen una determinada aplicación instalada. La transmisión desde la central sismológica a los terminales de EWBS dilata menos de 2 segundos. En el proceso se apoyará a las instituciones para que adapten sus procedimientos de emergencia a las posibilidades de la alerta temprana de terremoto. En varios sismos fuertes ocurridos en 2022 el sistema probó su funcionalidad y en una encuesta realizada en mayo de 2022 las personas a cargo de la recepción de los mensajes se expresaron positivamente sobre los beneficios del sistema.

*Autor para contacto: wilfried.strauch@yahoo.com



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Magnetometría con RPAs

Francisco Javier San Martín Vergara^{a*}

^aUAVLATAM Costa Rica.

Nuestra investigación parte como principio mejorar la eficiencia y exactitud de nuestros datos en el ámbito de la magnetometría, Pero como poder realizar nuestra toma de datos, ¿cómo mejorar nuestro rendimiento?, ¿cómo obtener las exactitudes? ¿Como minimizar el impacto ambiental?, ante estas interrogantes surge la idea de poder incorporar un magnetómetro en nuestros RPAs.

Para dicha investigación realizamos una prueba con un RPAs colgando un magnetómetro y determinamos una zona extrema (bastante vegetación, relieves abruptos, difíciles accesos etc.), el proceso de toma de datos para esta zona nos tomó aproximadamente 7 horas, el procesamiento de la data obtenida se realizó en 3 días, con exactitudes excelentes y con un escaneo de información que era lo esperado.

Nuestras pruebas realizadas nos permitieron mejorar ampliamente nuestro rendimiento en la toma de datos, disminuir el impacto ambiental y lo mejor de esta tecnología que podemos entregar productos de calidad, que esto es fundamental para la toma de decisiones de los profesionales de las ciencias de la tierra.

*Autor para contacto: fsanmartin@uavlatam.com



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Evolución del flujo de lava activo en el flanco suroeste del domo Caliente, Complejo Volcánico Santa María-Santiago

Roberto Mérida Boogher^{a*}, Gustavo Chigna^a, Kevin Chun^a, Julio Cornejo^a,
Álvaro Rojas^a, Peter Argueta^a, Wendell Paxtor^a, Amilcar Roca^a, Adriana Oliva^a

^aInstituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH-, Guatemala.

El Complejo Santa María-Santiago es un complejo volcánico que forma parte del segmento más occidental del Arco Volcánico a su paso por Guatemala, ubicado a 115 kilómetros al oeste de la ciudad de Guatemala en el borde sur de la caldera de Xela, y está compuesto por el estratovolcán Santa María y el complejo de domos de Santiago. En actividad constante desde su formación en 1922, la actividad en el complejo de domos de composición dacítica se ha concentrado exclusivamente en el domo Caliente desde el año 1986 hasta la actualidad; de estilo vulcaniano a peleano, esta se manifiesta en forma de explosiones, colapsos parciales, flujos de lava, avalanchas, corrientes de densidad piroclástica, lahares y caída de ceniza.

Actualmente ocupa el primer lugar en la clasificación de peligrosidad relativa de los volcanes activos y potencialmente activos de Guatemala, elaborada recientemente por INSIVUMEH. A mediados de diciembre de 2021, luego de un enjambre de sismos vulcano-tectónicos alrededor del complejo de domos, la extrusión de lava en bloques desde la cúpula del domo Caliente se incrementó notablemente, formando un flujo de lava que empezó a descender por el flanco oeste del mismo.

A través del monitoreo sísmico, imágenes satelitales (para la detección de incandescencia y de presencia de SO₂), visitas de campo y los reportes rutinarios de los observadores vulcanológicos, se le ha dado un seguimiento a la evolución de este flujo de lava. En los meses siguientes, el avance de este flujo de lava ha causado importantes cambios en el terreno a su alrededor, principalmente su canalización en el cauce San Isidro, la cual ha cambiado la dinámica de las redes de drenaje del complejo de domos. La actividad extrusiva se ha manifestado principalmente a través de las avalanchas producidas tanto a lo largo del flujo de lava como en el frente del mismo, aunque también se ha acompañado de colapsos parciales del flujo que produjeron el descenso de corrientes de densidad piroclástica y caída de ceniza sobre regiones aledañas. Esta actividad asociada al flujo de lava ha creado otros depósitos que, junto a la modificación en la red de drenaje, han cambiado las condiciones para la generación de lahares y los posibles alcances e impactos de los mismos. Considerando lo anteriormente mencionado, el seguimiento a la evolución de este flujo de lava es de suma importancia para la evaluación de la amenaza volcánica en este complejo, para identificar aquellos patrones de actividad y señales instrumentales y así comprender mejor el anticipo y desenvolvimiento de este fenómeno volcánico.

*Autor para contacto: ermerida@insivumeh.gob.gt



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022

Efecto de la erupción volcánica ocurrida en el 2015 en la Central Geotérmica de Momotombo

Magdalena Pérez^{a*}

^aConsultora independiente-, Nicaragua.

La Central Geotérmica de Momotombo se localiza a 80 km de Managua al sur del Volcán Momotombo y opera desde el año 1983. Cuenta con dos Unidades de Generación de Condensación de Vapor Franco Tossi con una capacidad de 35 MW cada una y una Planta Binaria ORMAT Energy Converter (OEC) con una capacidad de 7.2 MW. Posee actualmente 10 pozos productores, 5 inyectores y 3 pozos de monitoreo de presión de reservorio.

Los pozos que monitorean la presión del yacimiento desde el año 2001, el MT11, MT13 están ubicados en la parte Noroeste y Suroeste del campo y han mostrado tener una buena conexión con la zona de producción, y el pozo MT7 ubicado en el lado este, ha mostrado no tener ninguna conexión con la zona de producción. La profundidad de las cámaras de nitrógeno se encuentran en el MT7 a 275 mbnm, en el MT11 a 238 mbnm y en MT13 a 251 mbnm y están conectadas a través de un tubo capilar a un equipo Madgetech Datalogger, que registra los datos de presión cada 5 minutos.

A finales del 2003 e inicios del 2004 se realizaron dos pruebas de trazadores de reservorio que mostraron la posible existencia de una falla radial existente en el lado este del campo.

En Abril del 2014 en la zona del Lago de Managua y al este del Volcán Momotombo, se ubicaron varios epicentros de terremotos de magnitudes entre 5.0 a 6.2 y a profundidades entre 1.1 a 6.4 km y en el período de 1 Dic 2015 a Marzo 2016 ocurrió la erupción del volcán Momotombo, con presencia de flujos piroclásticos, lava y caída de cenizas.

En el período de julio a noviembre de 2015, los pozos de monitoreo del reservorio mostraron un aumento gradual en la presión del reservorio, siendo más notorio a partir del 15 de septiembre hasta el 1 de diciembre, día en que inició la erupción del volcán con una producción constante de flujo de lava que se prolongó hasta el 4 de diciembre, observándose en estos 4 días, un aumento de la presión de reservorio entre 1.09 a 1.22 bares en los pozos MT11 y MT13, mientras que en el pozo MT7 se observó una disminución en 0.57 bares. La erupción del volcán continuó hasta marzo-abril manteniendo los pozos siempre una presión de fondo arriba de su parámetro normal observado antes de junio del 2015.

Estas variaciones de presiones de julio al 1 diciembre de 2015, se ha interpretado como el inicio del proceso de alimentación/intrusión de magma nuevo hacia el volcán, que hizo “inflar, aumentar” su estructura, provocando un poco la apertura de las fallas conductoras de fluido geotérmico hacia el reservorio, lo que permitió la entrada de más fase líquida al sistema del reservorio y aumentando por ende la columna de agua y la presión en los pozos productores y en los pozos MT11 y MT13, sucediendo lo contrario en el pozo MT7. El análisis de este comportamiento, permitió reafirmar la presencia de una estructura geológica circular tipo caldérica en la zona este del campo, detectada en las pruebas de trazadores del 2003 y enriquecer por ende el conocimiento estructural del área de la Central Geotérmica de Momotombo.

*Autor para contacto: magdaperez22@yahoo.com



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES

Nuevos datos: avalancha de escombros de Acajutla, volcán Santa Ana

Ángela V. García^{a*}, Christopher J. Harpel^b, Walter Hernández^c, Demetrio Escobar^a, Luis E. Mixco^a,
Charles Lewis^{b, d}, Linda Scott Cummings^e

^aObservatorio de Amenazas y Recursos Naturales-Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, San Salvador.

^bU.S. Geological Survey Volcano Disaster Assistance Program, Cascades Volcano Observatory, Vancouver, Washington, EE.UU.

^cUniversidad de El Salvador, Ciudad Universitaria, San Salvador.

^dCollege of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences, Oregon State University, Corvallis, Oregon, EE.UU.

^ePaleoResearch Institute, Golden, Colorado, EE.UU.

Abstract: The Acajutla debris-avalanche deposit is dated to about 40,000 cal BP. The dating is based on two ¹⁴C dates on pieces of wood from the debris-avalanche deposit recovered from a core at the Santa Águeda School Center. The debris-avalanche deposit overlies a 1.2-m-thick paleosol and four ash layers. One of these ash layers is geochemically correlated to the Los Chocoyos ash from Atitlán Caldera, while the others are possibly from eruptions of Coatepeque and Ilopango Calderas. The new data, collected in well reports from the years 1966 to 2019, include deposit thicknesses identified in 25 wells for water monitoring, bathymetric data from nautical charts, GEBCO's grids, updated topographic data from LIDAR, and a reassessment of the deposit's lateral limits. This new data will allow us to better constrain the volume of the Acajutla debris-avalanche deposit.

Palabras clave: Avalancha de escombros, Acajutla, volcán Santa Ana, ¹⁴C datación, amenazas volcánicas.

Key words: Debris avalanche, Acajutla, Santa Ana volcano, ¹⁴C dating, volcanic hazards.

Introducción

La avalancha de escombros, generada por el colapso del sector sur del antiguo volcán de Santa Ana formó la península de Acajutla (también Punta Remedios, figura. 1), transportando grandes bloques de rocas hasta 45 km al sur del volcán Santa Ana, cubriendo un área de aproximadamente 300 km², con un volumen estimado de 16 ± 5 km³ [1]. La existencia de un paisaje montañoso, varios afloramientos de la avalancha de escombros y una serie de montículos distribuidos hasta el mar indican que provienen del colapso del ancestral volcán de Santa Ana [1; 3]. El ancestral volcán pudo haber tenido una elevación algo similar al actual volcán de Santa Ana (2381 m).

Partes de la cicatriz de la avalancha y la estructura pre-colapso del ancestral volcán Santa Ana son aún visibles y es posible que una parte al noreste del volcán moderno sea más antigua que la estructura construida adentro del cráter hecho por la avalancha. El colapso del volcán Santa Ana ocurrió después de la última erupción pliniana de la caldera de Coatepeque [3] (53.000 ¹⁴C años Ap [5];[6] o 57.000 ¹⁴C añosAp [3]) también considerando el suelo desarrollado encima del depósito la avalancha de escombros como mayor a Holoceno.

*Autor para contacto: angela.garcia@marn.gob.sv

Este estudio contribuye a delimitar mejor la edad de ocurrencia de la avalancha de escombros, debido a los estudios de ^{14}C realizados a dos muestras de leña que se encontraron dentro del núcleo de perforación del depósito, y el análisis tefroestratigráfico de depósitos de ceniza encontradas debajo del depósito de la avalancha de escombros en un núcleo del sondeo Centro Escolar Santa Águeda, Acajutla, Sonsonate.

Materiales y Metodología

Se recopiló información litológica de pozos para monitoreo de agua que se encuentran dentro del área de depósito de la avalancha de escombros [1]. En total se revisaron más de 25 sondeos (figura 1) en donde se prestó atención en marcadores del contacto inferior del depósito de la avalancha de escombros como podrían ser sedimentos marinos, lacustres, presencia de fragmentos de conchas. Algunos de los sondeos tienen profundidades menores de 50 metros sin registrar el base del depósito de la avalancha de escombros encontrando valores desde 27–79 m, definiendo como un espesor mínimo del depósito en el rango de 30–40 metros.

En el sondeo Centro Escolar Santa Águeda se realizó una descripción litológica que incluye características físicas: color, textura, estructuras, grado de consistencia, presencia de vesículas y fracturas y el muestreo de las capas de ceniza. El vidrio de las cenizas ha sido analizado en el laboratorio de *Oregon State University* usando un Cameca SX-100 microsonda electrónica con un voltaje de aceleración de 15 keV, un corriente del rayo a 10 nA y diámetro del rayo de 10 μm .

Dos muestras de leña muestreadas a profundidades de 23.95 m y 38.40 m fueron datadas por ^{14}C usando el método de espectrometría de masas con acelerador en los laboratorios del *U.S. Geological Survey Radiocarbon Laboratory* en Denver, Colorado, y el *National Ocean Sciences Accelerator Mass Spectrometry Radiocarbon Facility* en Woods Hole, Massachusetts. Las dataciones fueron convertidas a edades calibradas usando el programa OxCal 4.4.4 [8] con la curva de calibración de IntCal20 [9]. También un pedazo de cada muestra de leña fue carbonizado para facilitar rompiéndolo para enseñar una sección cruzada para identificación. Las muestras fueron examinadas por un microscopio binocular con magnificación hasta 50x.

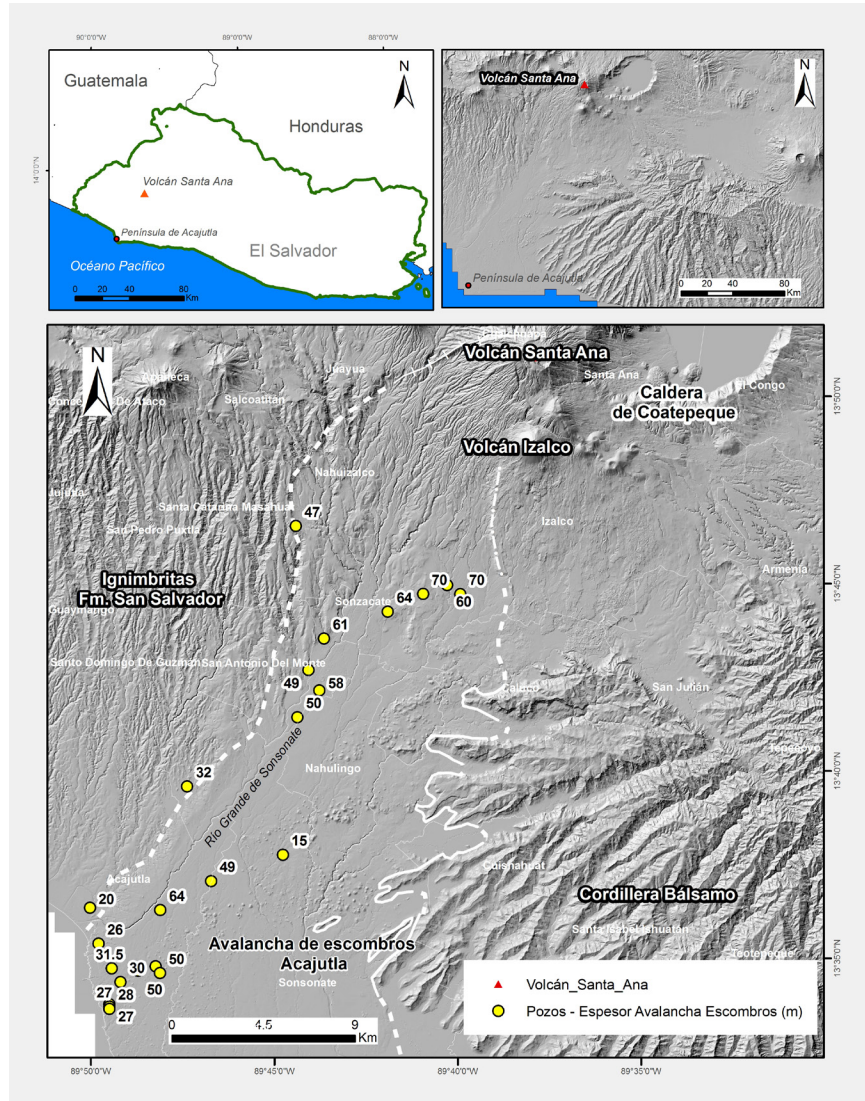


Figura 1. Mapa de localización península de Acajutla. Los puntos amarillos son pozos y los números son el espesor estimado de la avalancha de escombros. Las líneas blancas indican la extensión inferida del depósito [1].

Ambiente y Recursos Naturales, batimetría de cartas náuticas existentes en el Centro Nacional de Registro específicamente los números SAL-CH-100 y SAL-CH-7 y cuadrículas de *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) se utilizaron conjunto con una nueva evaluación de los límites del depósito para refinar el volumen estimado por [1] usando un sistema de información geográfica.

Resultados y Análisis

La península de Acajutla está formada por la facie distal de la avalancha de escombros con predominancia de matriz que contiene bloques y lavas dispersos con un espesor en el rango de 27–91 metros, teniendo en cuenta las descripciones litológicas de las perforaciones y el sondeo del Centro Escolar Águeda, Acajutla, Sonsonate. Las dataciones realizadas en trozos de madera localizados en las profundidades de 23.95 m y 38.40 m registraron edades en el rango de 43.030–36.981 cal Ap y 41.745–38.345 cal Ap. Las edades son igual en consideración de su precisión, y representan la edad de la avalancha de escombros. Las dos muestras de leña tienen una morfología difusa porosa en sección cruzada. Hemos comparado la leña carbonizada de las dos muestras con nuestra colección de referencia de las familias o generos de árboles que actualmente crecen en El Salvador y ahora estamos expandiendo la búsqueda a áreas cercanas.

Los depósitos de ceniza debajo del depósito de la avalancha de escombros que fueron analizados tienen vidrio riolítico con 75–78 wt.% SiO₂. Dos depósitos justo debajo del depósito de la avalancha de escombros están preliminarmente identificadas como los depósitos del Congo (56.000–56.900 ¹⁴C yr BP) [5; 6] y Arce (72 ± 3 ka) [4, 5] de la caldera de Coatepeque. La ceniza a una profundidad entre 55.72–55.81 m esta correlacionada por la composición de su vidrio al depósito Los Chocoyos de la caldera de Atitlán en Guatemala con una edad de 75 ± 2 ka [10]. Tales edades son estratigráficamente consistentes con las nuevas dataciones de ¹⁴C en el depósito de la avalancha de escombros de Acajutla. Además, una ceniza abajo del depósito de Los Chocoyos todavía no está correlacionada, pero es alta en K₂O y similar a depósitos de la Caldera de Ilopango.

Conclusiones

El colapso del ancestral volcán Santa Ana y la avalancha de escombros de Acajutla se restringe ahora en el rango de los 43.000–36.000 cal Ap, en acuerdo con las dataciones con ¹⁴C realizadas en muestras de leña del pozo Centro Escolar Águeda, Acajutla, Sonsonate esta edad es más reciente que la estimada a partir de correlaciones cronoestratigráficas con las últimas erupciones de Coatepeque de 57.000 Ap.

El nuevo volcán Santa Ana se formó en el cráter dejado por el colapso del edificio volcánico anterior siendo la mayor parte del volcán más reciente en edad que la avalancha de escombros de Acajutla. Esta información se correlaciona también con el análisis de composición de vidrio de los depósitos de cenizas bajo el material de la avalancha; uno de los cuales se correlaciona con el depósito de Los Chocoyos de la caldera de Atitlán en Guatemala.

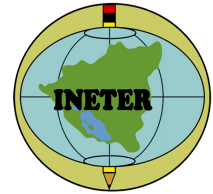
Referencias

1. Siebert, L., Kimberly, P., Pullinger, C. (2004). The voluminous Acajutla debris avalanche from Santa Ana volcano, western El Salvador, and comparison with other Central American edifice-failure events, *Geological Society of America Special Paper* 375, 10.1130/0-8137-2375-2.5.
2. Bosse, R.H., Lorenz, W., Merino, A., Minhm, A., Rode, K., Schmitd-Thomé, M., Webber, H.S., Wiesemann, G., (1978). *Mapa Geológico de la República de El Salvador, escala 1: 100,000*. Misión Geológica Alemana. Hannover, República Federal de Alemania.
3. Pullinger, C. (1998). Evolution of the Santa Ana volcanic complex, El Salvador [M.S. thesis]: Houghton, Michigan Technological University, 151 p.
4. Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Rio Lempa CEL (1992). Desarrollo de los Recursos Geotérmicos del Área Centro-Occidental de El Salvador. Prefactibilidad Geotérmica del Área de Coatepeque. Reconocimiento Geotérmico. Informe Final. Geotérmica Italiana. [Informe Interno no publicado]

5. Rose, W.I.; Conway, F.M.; Pullinger, C.R.; Deino, A., McIntosh, W.C. (1999). “An improved age framework for late Quaternary silicic eruptions in northern Central America”: *Bulletin of Volcanology*, V. 61, pp. 106 –120.
6. Kutterolf, S.; Freundt, A.; Pérez, W. (2008). “Pacific offshore record of Plinian arc volcanism in Central America: 2. Tephra volumes and erupted masses”. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9 (2) 1 –19. Q02S02 doi: 10.1029/2007GC001791
7. Hernández, W. (2019). Informe análisis geológico del sondeo con recuperación de núcleo de perforación de Acajutla, Proyecto Plan de Acción para la Implementación del Índice de Gobernabilidad y Política Pública para la Gestión de Riesgo de Desastre. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [Informe Interno no publicado]
8. Bronk Ramsey, C. (2009) Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51(1), 337–360.
9. Reimer, P., Austin, W., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P., Bronk Ramsey, C., . Talamo, S. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725 –757. doi:10. 1017/RDC.2020.41
10. Cisneros de León, A., Schindlbeck-Belo, J., Kutterolf, S., Danišik, M., Schmitt, A., Freundt, A., Pérez, W., Harvey, J., Wang, K.-L., Lee, H.-Y. (2021) A history of violence: magma incubation, timing and tephra distribution of the Los Chocoyos supereruption (Atitlán Caldera, Guatemala). *Journal of Quaternary Science* 36(2), 169–179.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Preparación de la red sísmica del INETER en Nicaragua para los requerimientos de la alerta temprana de terremotos

Fernando García^{a*}, Wilfried Strauch^a, Miguel Flores^a, Emilio Talavera^a, Martha Herrera^a,
Domingo Ñamendi^a, Ulbert Grillo^a, Allan Morales^a, José Acosta^a

^a Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), Dirección de Sismología, Managua, Nicaragua

Informamos sobre el avance de la red sísmica en Nicaragua relacionado con la implementación de la alerta temprana de terremotos (ATT) en el país. En 2016, la Dirección de Sismología del INETER inició un programa de cooperación con el Servicio Sismológico Suizo (SED/ETHZ) para desarrollar un sistema de ATT. La primera fase del programa, sirvió para investigar la factibilidad de la Alerta Temprana de Terremotos (ATT) y de los posibles obstáculos para su aprovechamiento en Nicaragua. Resultaba que básicamente estaban dadas las condiciones en cuanto la red de estaciones sísmicas con digitalización de 24 bit y comunicación digital bidireccional entre el centro de registro y procesamiento y el centro de datos en INETER para registro y procesamiento con el paquete SeisComP. No obstante, se identificaron problemas en la confiabilidad de las estaciones en cuanto a sincronización del tiempo, alto ruido sísmico y otros. Era demasiado baja la cantidad de estaciones completamente adecuadas a la ATT en cuanto a máxima amplitud de aceleración a registrarse sin saturación (2g), tardanza mínima en la transmisión de los paquetes de datos (1-2s). En la segunda fase del programa, 2019-2021, se mejoró el mantenimiento de las estaciones. Aumentamos notablemente la cantidad de las estaciones densificando drásticamente la red sísmica en la zona de mayor amenaza sísmica en el Pacífico de Nicaragua. Los sensores más adecuados para la ATT son acelerómetros que sirven para la detección de los terremotos, la medición de aceleraciones fuertes y la rápida determinación de su magnitud. Estaciones de banda ancha y de período corto se saturan para terremotos fuertes pero aportan el tiempo de arribo de la onda P para la localización del evento. A partir de 2019, instalamos 30 equipos Raspberry Shake 4D de bajo costo que combinan un sismómetro de período corto con un acelerómetro MEMS de 3 componentes. En enero-abril de 2021, instalamos 25 acelerógrafos provenientes de una donación de Suiza. Adicionalmente 8 acelerómetros en el marco del desarrollo del Centro de Asesoramiento de Tsunami para América Central (CATAC) establecido en INETER. También, establecimos comunicación digital en tiempo real con unos 25 equipos GPS/GNSS del INETER en el Pacífico de Nicaragua para utilizar los datos (muestreo 1 Hz) para la alerta de terremotos y tsunamis. La mayoría de las nuevas estaciones se ubican en facilidades (subestaciones) de la Empresa de la Transmisión Eléctrica de Nicaragua (ENATREL) que prestan seguridad y una confiable y rápida comunicación de datos con fibra óptica instalada en sus cables de alta tensión. Instalamos otras estaciones en instituciones, empresas u hogares particulares utilizando el Internet de los anfitriones. También se usan datos de muchas estaciones sísmicas de los países vecinos. Los registros sísmicos en los últimos meses demostraron que la red sísmica mejorada provee los datos adecuados para poder iniciar la ATT pública en 2022. Compartimos nuestras experiencias con los demás países de Centroamérica que se integraron a partir de 2021, en nuestro programa de desarrollo con el SED/ETHZ, al que agradecemos su gran apoyo y la cooperación.

*Autor para contacto: fernando.garcia@ineter.gob.ni



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Evolución geodinámica del deslizamiento en el flanco Suroeste del Volcán Irazú y su relación con los procesos de subducción en Costa Rica

Esteban J. Chaves^{a*}, Javier F. Pacheco^a, Cyril Müller^a, Nathalie Chavarría^a, Carlos Sánchez Víquez^a

^aObservatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

La caracterización completa en la evolución espacio-temporal de los procesos de carga y descarga litostática asociados con deslizamientos activos en regiones densamente pobladas, es imprescindible para crear mejores planes de gestión del riesgo y ordenamiento territorial, así como para el avance en la comprensión de los procesos de ruptura de este tipo de eventos, particularmente, de la fase de nucleación o inicio, que además de compartir semejanzas con los megacorrimientos en las zonas de subducción, permitiría el desarrollo de mejores sistemas de alerta temprana.

En una secuencia multi-episódica que inició en el año 2011, más de 53 millones de metros cúbicos de material han sido desplazados a lo largo del flanco Suroeste del volcán Irazú, elevando la alerta sobre una posible afectación directa al sistema volcánico.

Las observaciones geodésicas y sismológicas de la red de monitoreo geodinámico del OVSICORI-UNA, en conjunto con métodos modernos de procesamiento de señales, han permitido caracterizar estos procesos de deslizamiento en 3 fases principales: I) la nucleación o inicio, II) el rompimiento inestable y caída gravitacional y III) el depósito y estabilización del material.

Nuestros resultados demuestran como la fase de nucleación, que antecede al deslizamiento inestable del centro de masa, está dominada por deslizamiento lento o estable inducido por la carga gravitacional sobre el plano de falla. El deslizamiento lento observado corresponde de manera sincrónica con la generación de sismos repetidos y tremor tectónico, tal y como se observa en zonas de subducción. En este trabajo demostramos, además, como mediante la inversión por fuerza puntual de los registros sismológicos del deslizamiento del 26 de agosto de 2020, se logró determinar su duración, función temporal de fuerza, trayectoria y masa desplazada. Los cambios geomorfológicos y de atenuación en el medio, inducidos por este gran evento, generaron una reducción de 0.6% en la velocidad de las ondas sísmicas superficiales, calculada mediante la correlación de ruido sísmico ambiental.

*Autor para contacto: esteban.j.chaves@una.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Mega-deslizamiento del 2022 en el volcán Irazú (Costa Rica): un caso de alerta temprana acertada basada en mediciones geodésicas

Cyril Müller^{a*}, Mathilde Cluzan^a, Mario Angarita^{a,b}, Guillermo E. Alvarado^c, Geoffroy Avard^a

^aObservatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

^bUniversity of Alaska Fairbanks, 505 South Chandalar Drive, Fairbanks, AK 99775, USA.

^cÁrea de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica, ICE, San José, Costa Rica.

Los deslizamientos son unos de los procesos geológicos que causan más víctimas cada año. Por lo tanto, anticipar estos eventos es crucial para las poblaciones cercanas. Desde 2015, el OVSICORI-UNA ha desarrollado un sistema de monitoreo geodésico en el flanco oeste del Irazú donde está presente con sector muy inestable con frecuentes mega-deslizamientos, justo donde se ubica el jardín de antenas de comunicaciones del Irazú. El monitoreo consiste en mediciones continuas haciendo uso del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS por sus siglas en inglés) y de campañas geodésicas, así que mediciones fotogramétricas aéreas.

Estas técnicas son complementarias y juntas permiten tener una perspectiva completa de los movimientos superficiales del mega-deslizamiento (tipo avalancha de escombros volcánicos). Las mediciones GNSS permiten seguir en tiempo real la velocidad de un sitio con gran precisión, mientras que las campañas GNSS permiten determinar periódicamente los movimientos de varios sitios en el bloque. La fotogrametría permite, por su lado, detectar grandes movimientos en zonas inaccesibles. Al final de julio 2020, estas observaciones permitieron alertar las autoridades sobre un colapso inminente en las próximas semanas y informar que una parte del bloque en movimiento podría colapsarse en el sector de Prusia.

Efectivamente, el 26 de agosto del 2020, unos 25 millones de metros cúbicos colapsaron en la cuenca del río Sucio y pequeños deslizamientos en el sector de Prusia, afortunadamente sin víctimas que lamentar. Este deslizamiento generó acantilado de unos 250 m de altura en rocas volcánicas pobremente compactadas, que desestabilizaron el macizo generando grietas tensionales hasta unos 260 m atrás de la corona del bloque deslizado. La caída de bloques menores se ha mantenido desde ese entonces y se zonificaron dos sectores del parque de antenas ante el peligro a corto y mediano plazo, para lo cual se ha recomendado el traslado de la infraestructura bajo peligro.

*Autor para contacto: cyril.muller@una.cr



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



**CZECH
 GEOLOGICAL
 SURVEY**

Geomorfología y geología aplicada para evaluar los riesgos naturales de la capital San Salvador en El Salvador

Jiří Šebesta^{a*}, José Alex Chavez Hernández^b

^a Servicio Geológico Checo (SGC).

^b Oficina de Planificación de Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS).

La ciudad de San Salvador está expuesta a un alto grado de amenazas naturales ocasionadas por procesos geodinámicos internos y externos, de origen natural. La ciudad se ubica entre dos volcanes activos, el Volcán San Salvador con el cráter llamado El Boquerón y la Caldera de Ilopango, los cuales forman parte de la depresión tectónica denominada Fosa Central y donde se registra una gran cantidad de sismos locales relacionados directamente con la convergencia de las placas Coco y Caribe.

De los procesos exógenos, los más activos son aquellos originados por los diferentes tipos de erosión fluvial de escurrimiento superficial y subsuperficial, deslizamientos y depósitos aluviales, fluviales y coluviales. Para ello, se realizaron dos mapas básicos para evaluar los riesgos naturales de San Salvador; uno geomorfológico y otro geológico, que a su vez sirvió para construir un mapa de tipo ingeniero-geológico y otro de morfoestructuras.

Con la información generada y datos de susceptibilidad a los procesos de riesgo, se elaboró un mapa de peligrosidad, zonificado en 5 grados - muy alta, alta, media, baja y sin peligro. También se utilizaron datos topográficos, fotografías aéreas e imágenes satelitales LIDAR del año 2020 de una zona del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS).

La escala original de los mapas fue 1:50 000, los datos de LIDAR y los datos de fotogrametría satelital permitió mapear a una escala de 1: 10 000. Los resultados obtenidos fueron mapas de mayor detalle de tipo geomorfológico e ingeniero -geológicos de las zonas seleccionadas, principalmente aquellas con un mayor grado de riesgo natural. Al mismo tiempo, se generó datos adicionales de interferometría satelital y monitoreo de humedad local en TBJ.

Los datos de riesgos naturales resultantes se utilizaran luego para compilar planes de uso de suelo y Ordenamiento Territorial.

*Autor para contacto: jiri.sebesta@geology.cz



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Tsunami causado por la erupción del volcán Hunga Tonga - Hunga Ha'apai: registros en Costa Rica y lecciones aprendidas

Silvia Chacón Barrantes^a, Fabio Rivera Cerdas^{a*}, Anthony Murillo Gutiérrez^a

^aPrograma SINAMOT, Universidad Nacional

El tsunami causado por la erupción del volcán Hunga Tonga - Hunga Ha'apai fue el primer tsunami de origen volcánico registrado en Costa Rica y el número 41 del que se tiene registro. Fue ampliamente observado por muchas personas al haber arribado al mediodía de un sábado de enero durante las vacaciones escolares y en plena temporada seca. Fue reportado como variaciones de nivel del mar, corrientes fuertes y erosión costera.

Las redes sociales y los contactos en comunidades costeras permitieron al SINAMOT registrar estas observaciones con testimonios, fotos y videos. La mayoría de ellas se dieron en comunidades en las cuales se ha realizado algún tipo de trabajo en preparación ante tsunamis por parte de SINAMOT y la CNE, o en comunidades aledañas a estas.

Algunos de los lugares en los que se registró este tsunami cuentan con varios registros anteriores, lo que sugiere que son lugares propensos a amplificar los tsunamis. Adicionalmente, este tsunami se registró en los tres mareógrafos del país, incluyendo el de Limón en el Caribe, que registró variaciones de nivel del mar correspondientes a las horas estimadas de llegada de las ondas de choque provenientes del este. Costa Rica recibió la comunicación del tsunami con varias horas de retraso y por un canal no oficial. Sin embargo, gracias a la existencia de protocolos y su correcta ejecución, a SINAMOT le fue posible caracterizar la amenaza adecuadamente como Amenaza Menor y a la CNE emitir la alerta respectiva.

En algunas playas, personal de instituciones de primera respuesta, guardavidas y otros notificaron a las personas que salieran del agua, pero en muchas otras las personas no se enteraron del tsunami hasta horas después. Entonces, una de las lecciones aprendidas de este tsunami es la necesidad de mejorar los mecanismos y procedimientos de diseminación de alertas de tsunami. Adicionalmente, para alertas que sólo están relacionadas a corrientes fuertes, resulta necesario especificar en las recomendaciones de SINAMOT los lugares que serán más afectados (como marinas, esteros, desembocaduras de ríos, etc.) y que estas corrientes pueden mantenerse por más de 24 horas, como sucedió en este caso.

*Autor para contacto: fabio.rivera.cerdas@una.ac.cr



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Deslizamiento de Santiago de Puriscal: evolución de 2017 a 2021 a partir del procesamiento de imágenes InSAR

Mathilde Cluzan^{a*}, Cyril Müller^a, Mario Angarita^{a, b}

^aObservatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

^bUniversity of Alaska Fairbanks, 505 South Chandalar Drive, Fairbanks, AK 99775, USA.

Miles de personas fallecen cada año a causa de deslizamientos en el mundo. Para evitar estas consecuencias, el monitoreo es de primera importancia. El deslizamiento de Santiago de Puriscal (provincia de San José, Costa Rica) ha estado activo por más de un siglo. Su desarrollo es particularmente crítico, ya que se ubica en el centro de una ciudad de alrededor de 13 000 habitantes. El OVSICORI estudia su evolución de 2017 a 2021 con base de imágenes InSAR en la constelación de satélites Sentinel-1.

Estos datos provienen del sistema LiCSAR, operado por el grupo COMET. Se procesan estas imágenes con el software LiCSBAS, diseñado por Yu Morishita. De manera concordante con los estudios anteriores, se observa que el deslizamiento se mueve lentamente hacia el oeste, a 25 mm/año en su zona más activa.

Se evidencia una relación con la ciclicidad estacional de la lluvia y la actividad sísmica. Especialmente, se identifica una aceleración de Mayo a Octubre de 2020, durante la estación lluviosa, y además se asocia con varios sismos que tenían el potencial de afectar el deslizamiento.

*Autor para contacto: mathilde.cluzan@una.cr



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Historia eruptiva del volcán Barva en los últimos 11 000 años

Yemerith Alpízar^{a,b*}, Guillermo E. Alvarado^c, Paulo Hidalgo^b, Deina Arroyo^b

^aUniversidad Técnica Nacional

^bUniversidad de Costa Rica

^cInstituto Costarricense de Electricidad

En la cumbre del volcán Barva, localizada 23 km al norte del centro de San José, se lograron reconocer al menos siete eventos explosivos en los últimos 11 000 años, separados por periodos de quietud aparentemente prolongados. Los depósitos de las erupciones se han denominado alfabéticamente, nombrando “A” al nivel más antiguo y “H”, a la unidad más reciente, que corresponde con el último evento explosivo de este volcán.

Para la unidad A, aún no se tiene edad, pero subyace a la unidad B que ha sido datada en aproximadamente 8700 años a. P. Los lapsos de inactividad varían entre 800 y 2800 años; en este momento han pasado aproximadamente 680 años de inactividad desde la última erupción, ubicada en el año ~1340 A. D.

Se ha registrado al menos una erupción subpliniana y una estromboliana durante el Holoceno, ambas con depósitos restringidos a la cima, predominando la actividad vulcaniana en el resto de las erupciones. Si se considera que durante estos últimos 11 000 años el Barva no ha mostrado erupciones grandes o relevantes en términos de afectación a nivel regional, sino que sus depósitos han quedado restringidos a un radio de aproximadamente 5 km alrededor del cono donde se aloja el lago cratérico del Barva, es posible afirmar que no representa un peligro importante en el corto o mediano plazo, a menos que se evolucione hacia un magma dacítico con un volumen grande. En la actualidad se están procesando las muestras de piroclastos para realizar la caracterización geoquímica, granulométrica y morfológica por medio de microscopía electrónica (SEM-EDS). Aún está pendiente establecer la secuencia cronológica de la decena de focos eruptivos presentes en la cima del Barva. Lo anterior es una base fundamental para la evaluación del peligro volcánico.

*Autor para contacto: y.alpizar.s@gmail.com



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022

Aplicación del modelo fractal a una erupción freática

José Brenes-André*

Geólogo e Investigador independiente, San José - Costa Rica.

Abstract: Several very well defined processes are found when applying fragmentation/transport theory (SFT) to phreatic granulometries. Fractal model of an eruption, developed by the author, enables to find linear relations associated to of magmatic, phreatomagmatic, effusive and secondary fragmentation processes.

Palabras clave: SFT, fragmentación secuencial, erupción freática, modelo fractal.

Key words: SFT, sequential fragmentation, phreatic eruption, fractal model

Introducción

[1] y [2] aplicaron el término freática a aquellas erupciones en las que el fluido hidrotermal no está incluido. [3] lo usó para describir una erupción resultado de la reducción súbita de la carga litostática sobre el sistema hidrotermal, debido a pulsos sísmicos que llevan a una fractura del material. [4] lo usa como sinónimo de una erupción no juvenil de vapor. [5] lo usan cuando el tapón encima del sistema hidrotermal se fractura súbitamente causando a su vez una súbita descompresión del fluido hidrotermal.

Sequential Fragmentation / Transport (SFT). Considera cada granulometría como la suma de varias distribuciones de Weibull definidas por su moda en unidades Φ y la dispersión γ , resultado de una fragmentación continuada. Muestran que experimentalmente hay una relación lineal entre el coeficiente de fragmentación (Φ / γ) y la moda Φ . [6]. *Modelo fractal de una erupción volcánica*. En lo fundamental se propone un coeficiente de Hurst $H = 1 - |\gamma|$ lo que implica que las distribuciones con $-1 < \gamma < -0,5$ fueron generadas por procesos magmáticos, las que cumplan $-0,5 < \gamma < 0$ se asocian a procesos freatomagmáticas; aquellas con γ cercanas a 0,02 son efusivas. Las dispersiones positivas se asocian a fragmentaciones secundarias tales que $0,02 < \gamma < 0,5$ están relacionadas con procesos freatomagmático, en tanto que $0,5 < \gamma < 1$ son magmáticas [7], [8].

Materiales y metodología

Las muestras BKB02, BKB03, BKB 04 y BKB05 [9] son cilindros de 24 mm de diámetro, y 50 a 60 mm de largo, con porosidad conectada entre 45% y 49% de rocas volcánicas del volcán Unzen Japón. Los experimentos con el tubo de choque se llevaron a cabo a temperatura ambiente en un autoclave transparente y monitoreados con una cámara de video de alta velocidad, con presiones de 2,5 MPa, 5 MPa, 6 MPa o 10 MPa según se indica en el Cuadro 1. En ese cuadro también se muestran los resultados de la deconvolución de cada una de las granulometrías (utilizando los valores de % en masa por cada 0,5 PHI, incluidos como material suplementario) haciendo uso del software SFT.

*Autor para contacto: jbreses54@gmail.com

Cuadro 1

BKB02		Res = 4,11%	Pres= 6 MPa	Porosi =	47,6%
PHI	-2,53	-1,06	1,14	2,92	3,62
Dispersión	-0,34	-0,67	-0,82	0,01	0,69
% en masa	52	27	17	3	1
BKB03		Res = 3,86%	Pres = 5 MPa	Porosi =	45,4%
PHI	-2,9	-1,72	-0,83	1,0	3,26
Dispersión	-0,56	0,47	-0,47	-0,82	-0,42
% en masa	69	5	9	13	4
BKB04	-	Res = 4,11%	Pres = 10 MPa	Porosi =	48,7%
PHI	-2,13	-0,53	0,97	1,87	3,08
Dispersión	-0,64	-0,62	-0,38	0,02	-0,5
% en masa	53	20	10	5	12
BKB05		Res = 3,36%	Pres = 2,5 MPa	Porosi =	48,2%
PHI	-3,7	-2,81	-1,72	-0,24	1,64
Dispersión	0,21	0,14	-0,39	-0,65	-0,86
% en masa	67	15	10	4	4

Resultados y Análisis

Las dispersiones de 0,02, asociados a procesos efusivos, representan el 3% de la BKB02 y el 5% de la BKB04. Las dispersiones mayores a 0,02, asociadas a fragmentaciones secundarias representan el 15% de -2,81 PHI y el 67% de -3,7 PHI, ambas de la BKB05, sometida a una presión externa de 2,5 MPa, el 5% de los fragmentos de -1,72 PHI de la muestra BKB03 sometida a una presión de 5 MPa, y el 1 % de 3,62 PHI de la muestra BKB02, con una presión inicial de 6 MPa. Las dispersiones positivas se muestran en la figura 2.

Efecto de la temperatura. La presión interna en las vesículas también se puede lograr aumentando la temperatura del sistema. Utilizando las granulometrías de las capas 1, 2 y 3 del cráter 3, y las muestras de las capas 2, 3 y 4 del cráter 2 reportadas en [10] así como la reportada en fig. 1 en [11] obtenidas en campo.

Las 5 dispersiones positivas cercanas a cero se encuentran, asociadas a procesos efusivos, generan la figura 4. Las dispersiones positivas asociadas a fragmentación secundaria se muestran en la figura 5.

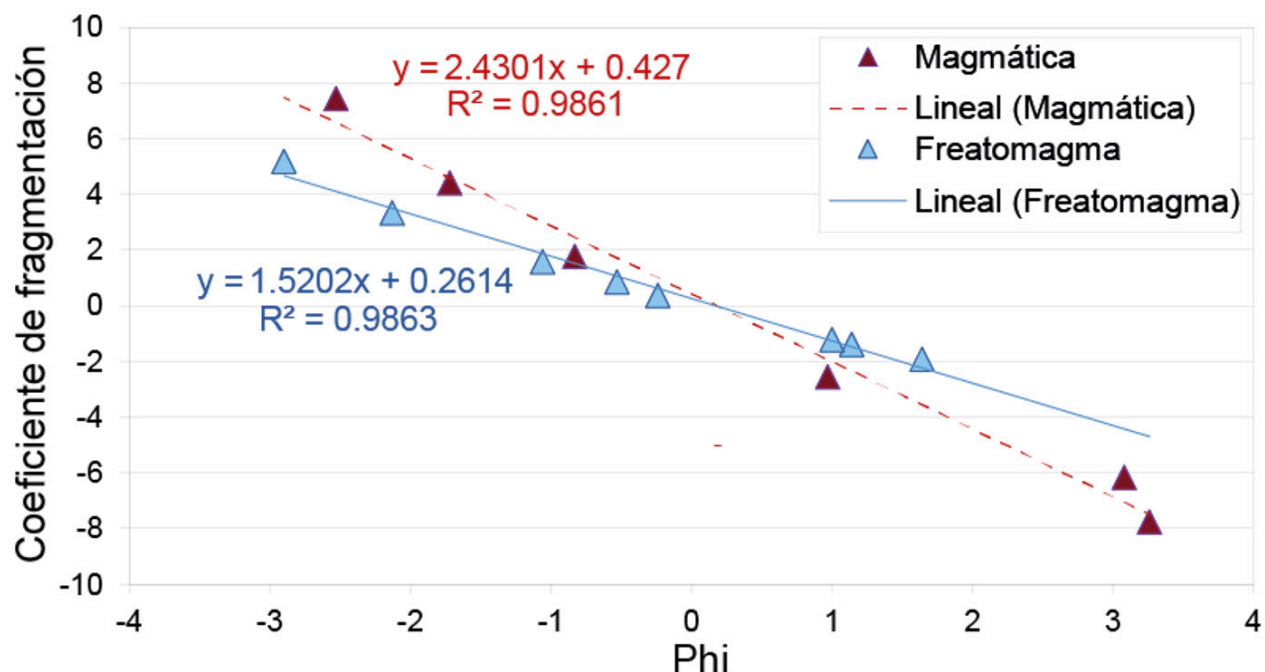


Figura 1. Gráfico del coeficiente de fragmentación (Moda/Dispersión) en función de la moda, en la que se evidencian dos claras relaciones lineales, una asociada a procesos magmáticos [$f(x) = -2,43X + 0,427$, $R^2 = 0,986$] y la otra a freatomafmáticos [$f(x) = -1,52X + 0,261$, $R^2 = 0,986$].

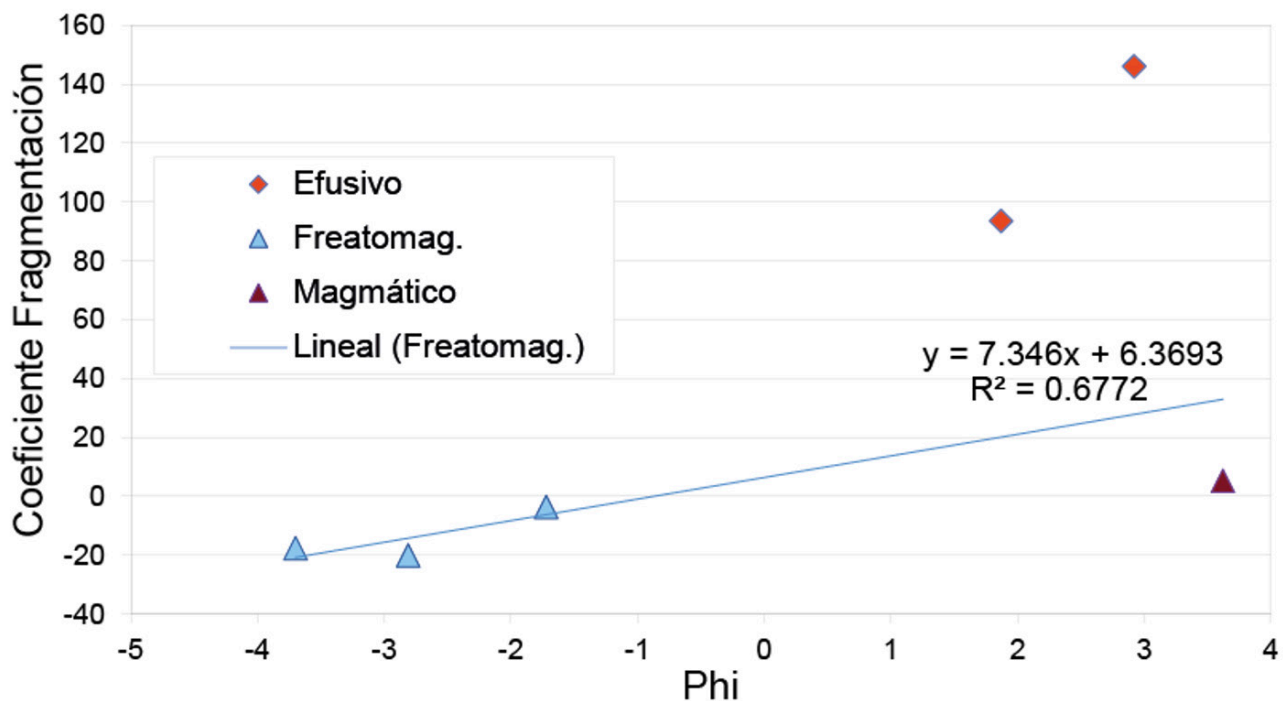


Figura 2. Gráfico del coeficiente de fragmentación versus la moda, para las distribuciones de Weibull con dispersiones positivas. Solo es posible asociar una relación lineal a las fragmentaciones secundarias asociadas a procesos persistentes. Su asociación con procesos freatomagmáticos es razonable con las modas mayores a -1 Phi. Las granulometrías reportadas en [10] y [11] genera, para el caso de las dispersiones negativas, los resultados mostrados en la fig. 3.

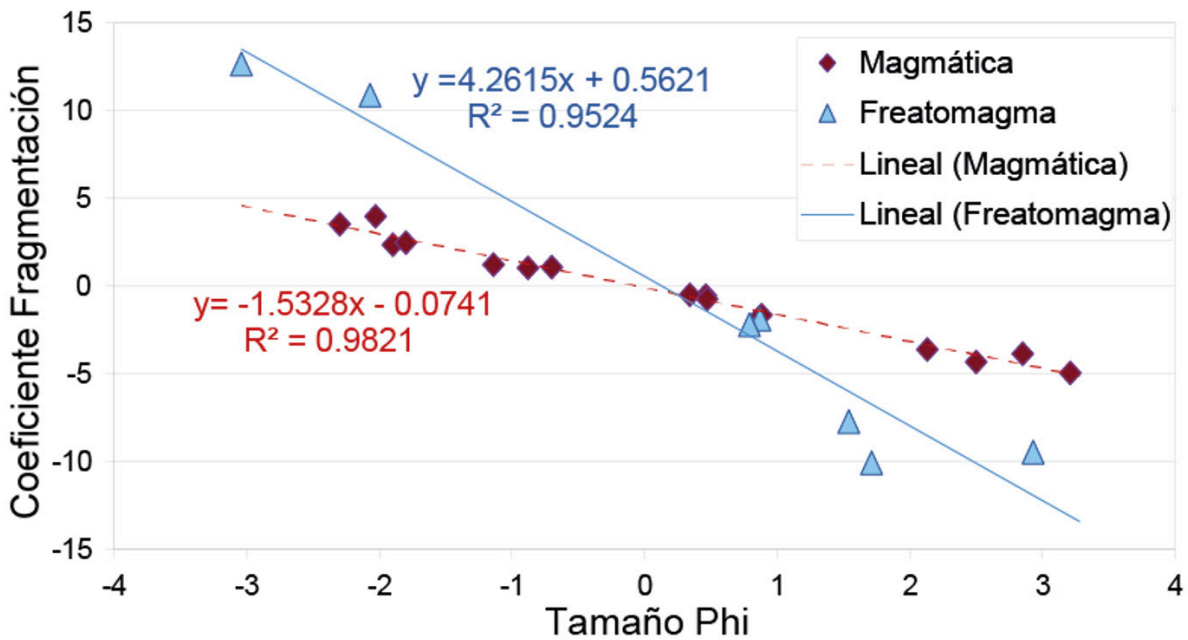


Figura 3. El gran número de datos a disposición permite discriminar fácilmente las dos relaciones lineales, una de fragmentaciones con carácter magmático [$f(x) = -1,53x - 0,07$, $R^2 = 0,98$] y otra con carácter freatomagmática [$f(x) = -4,26x + 0,56$, $R^2 = 0,95$].

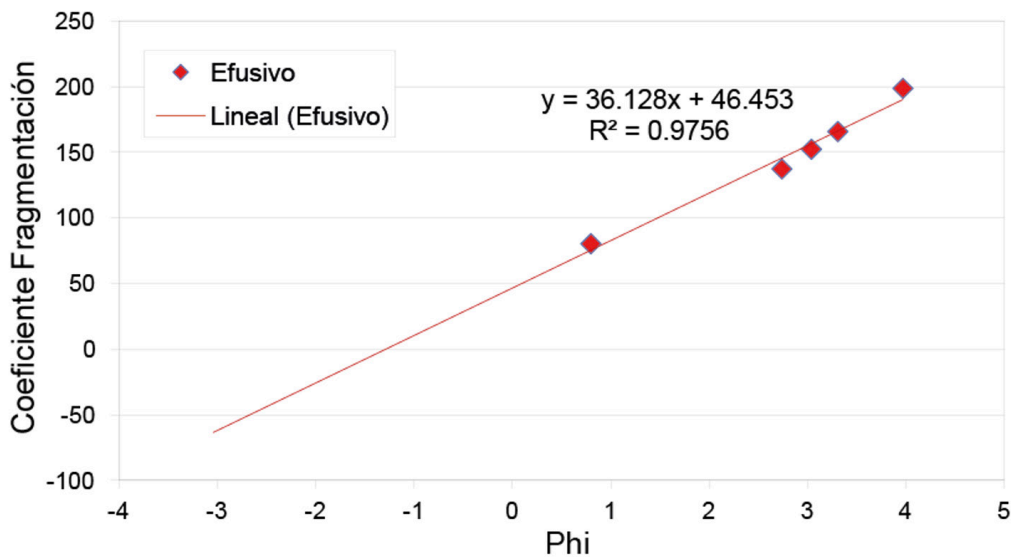


Figura 4. Clara relación lineal para las distribuciones de Weibull asociadas a procesos efusivos.

Conclusiones.

Con granulometrías obtenidas de varias capas de dos cráteres, así como las obtenidas de análisis de laboratorio se obtuvieron claramente las relaciones lineales propuestas en el modelo fractal, validando así la propuesta presentada en [7] y [8], y ampliada posteriormente en otros trabajos del autor.

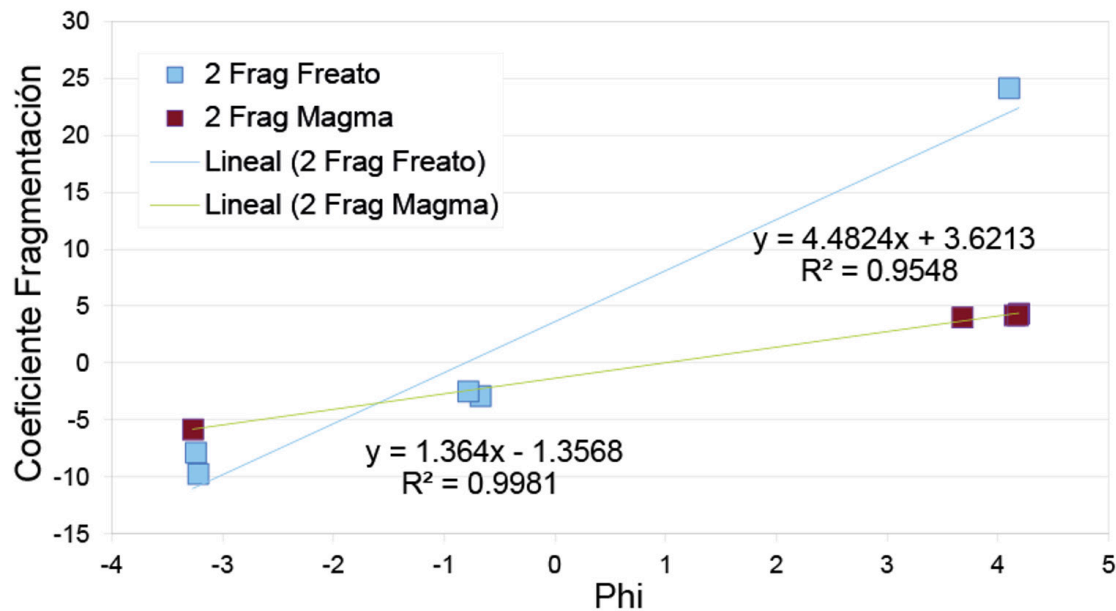


Figura 5. Relaciones lineales para la fragmentaciones secundarias con carácter magmático y freatomagmático.

Referencias bibliográficas

1. Wohletz, K., Heiken, G., 1992. *Volcanology and Geothermal Energy*. University of California Press, 432 pp.
2. Sparks, R. S. J., Bursik, M.I., Camey, S.N., Gilbert, J. S., Glaze, L. S., Sigurdsson, H., Woods, A.W., 1997. *Volcanic Plumes*. John Wiley and sons, 574 pp.
3. Yamamoto, T., Nakamura, Y., Glicken, H., 1999. Pyroclastic density current from the 1888 phreatic eruption of Bandai volcano, NE Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 90, pp.191-207.
4. Fujinawa, A., Ban, M., Ohba, T., Kontani, K., Miura, K., 2008. Characterization of low-temperature pyroclastic surges that occurred in the northeastern Japan arc during the late 19th century. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, pp.113-130 Doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.07.004.
5. Ohba, T., Taniguchi, H., Miyamoto, T., Hayashi, S., Hasenaka, T., 2007. Mud plumbing system of an isolated phreatic eruption at Akita Yakeyama volcano, northern Honshu, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161, pp. 35-46.
6. Brown, W.K. and Wohletz, K.H., 1995. A derivation of the Weibull distribution based on physical principles and its connection to the Rosin-Rammler and the lognormal distribution. *Journal of Applied Physics*, 78, pp.2758-2763.
7. Brenes, J., 2013. Aplicación de la teoría de fragmentación/transporte secuencial a los depósitos de las erupciones de 1723 y 1963-65 del volcán Irazú, Costa Rica. Caso dispersión negativa. *Revista Geológica de América Central*, 48, pp. 63-85.
8. Brenes, J. Y Alvarado, G.E., 2013. Aplicación de la teoría de fragmentación/transporte secuencial a los depósitos de las erupciones de 1723 y 1963-65 del volcán Irazú, Costa Rica. Caso dispersión positiva. *Revista Geológica de América Central*, 48, pp.87-98.
9. Fowler AC, Scheu B., 2016. A theoretical explanation of grain size distributions in explosive rock fragmentation. *Proceedings of the Royal Society*, A 472, pp.20150843. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2015.0843>
10. Montanaro, C., Scheu, B., Gudmundsson, M.T., Vojtjörd, K., Reynolds, H.J., Dürig, T., Strehlow, K., Rott, S., Reuschlé, T., Dingwell, D.B., 2016. Multidisciplinary constraints of hydrothermal explosions based on the 2013 Gengissig lake events, Kverkfjöll volcano, Iceland. *Earth and Planetary Science Letters*, 434, pp.308-319.
11. Mayer K, Scheu B., Gilg H.A., Heap M.J., Kennedy B, Lavalley Y, Lethan-Brake M, Dingwell D., 2015. Experimental constraints on phreatic eruption processes at Whakaari (White Island volcano). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 302, pp. 150-162.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022

BALISTICA: una serie de programas para analizar balísticos volcánicos

José Brenes-André^{a*}, Santiago Núñez-Corrales^a

^aInvestigadores independientes

Abstract: Models of ballistic motion abound in literature, spanning from the simple to the complex. However, articulating these models incrementally into a data-driven workflow is challenging for the practicing research scientist outside this specialized field. This appears to be more so in the case of geophysics, where the complexity involved in interpreting observations and the multitude of possible explanations for clast deposits translates to the need for a protocol to select a model ballistic motion as efficiently as possible. Therefore, going from field data to the model that best explains data requires additional tools designed for such a purpose. BALISTICA aims to be such a needed tool.

Palabras clave: Balísticos, software, arrastre de Stockes, arrastre Newtoniano.

Key words: Ballistics, software, Stockes drag, Newtonian drag.

Introducción

Desarrollamos BALISTICA como un conjunto de programas ordenados de manera que cada uno se base en un modelo de dificultad conceptual creciente que incorpore un mayor número de características, con el objetivo de modelar las trayectorias observadas en campo con parámetros que se acerquen lo más posible a los datos experimentales medidos en campo (figura 1).

Esta rampa conceptual se evidencia por el creciente número de parámetros iniciales requeridos para la computación. A pesar de estas diferencias, la interfaz gráfica de cada uno de los programas se ha mantenido casi invariable, para hacer amigable al usuario.

Metodología

La pantalla se dividió en 4 paneles: (a) el panel superior izquierdo permite introducir los parámetros iniciales vía controles; (b) el inferior izquierdo permite al usuario ejecutar diversos comandos tales como ejecutar el modelo en cuestión, cambiar el tipo de visualización según diversas variables de salida y guardar los resultados como imagen o como archivo CSV; (c) en el panel superior derecho se despliegan los gráficos relevantes; y (d) en el panel derecho

*Autor para contacto: jrbrenes54@gmail.com

inferior se muestran resultados útiles para la investigación geofísica como lo son: el alcance, la altura máxima y el tiempo para alcanzarla, tiempo de vuelo, velocidad y ángulo de impacto. Además, en algunos casos es posible incluir la posición inicial y final en 3D usando coordenadas que usen metros, tales como la Lambert. Para ayudar al usuario en la optimización de los resultados es posible desplegar la posición final donde se recolectó el clasto. BALISTICA fue escrito en Python bajo la licencia Apache 2.0 y está disponible vía un repositorio GitHub.

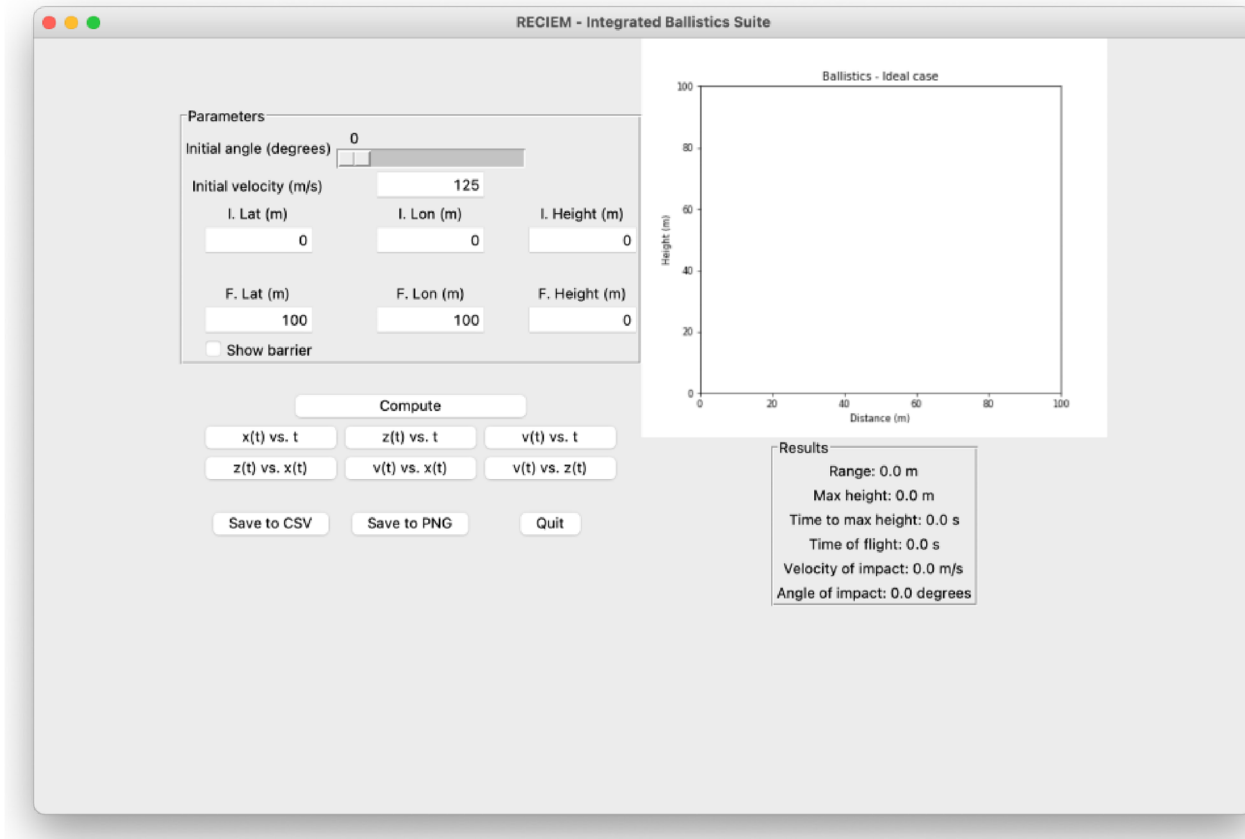


Figura 1. Modelo ideal (Newtoniano) tal como se despliega en BALISTICA.

Resultados y Análisis

Al momento de la preparación de esta ponencia ya se han implementado 8 modelos, y estamos avanzados en la inclusión de dos modelos generados en Nueva Zelanda. Otro modelo originado en Japón está siendo estudiado.

El primer modelo es el clásico balístico ideal Newtoniano- sin ningún arrastre, el cual es resuelto tanto por medios analíticos como por métodos numéricos. El segundo modelo, también analítico, es el de Stokes, con un arrastre proporcional a la velocidad. Por el incremento en complejidad, todos los otros modelos son resueltos por integración numérica. Así el tercer modelo nuevamente involucra arrastre proporcional a la velocidad en tanto que el cuarto incluye el caso de arrastre proporcional a la velocidad al cuadrado.

Se continúa con el quinto y sexto modelos que además incluyen el efecto de viento con un azimut y velocidad constante. El séptimo modelo es aún más complejo pues también toma en cuenta el clasto por medio de su densidad y forma vía la esfericidad asociada en conjunción con un cálculo más exacto del arrastre asociado. El octavo modelo es aún más realista pues toma en cuenta la temperatura y densidad del aire en la fuente, para calcular un

número de Reynolds cambiante durante la trayectoria, tomando así en cuenta un arrastre variable durante la trayectoria (figura 2). Los dos modelos pronto a ser incluidos incorporarán la forma del clasto de manera más exacta, mejorando el cálculo de la influencia del viento en la trayectoria en 3D.

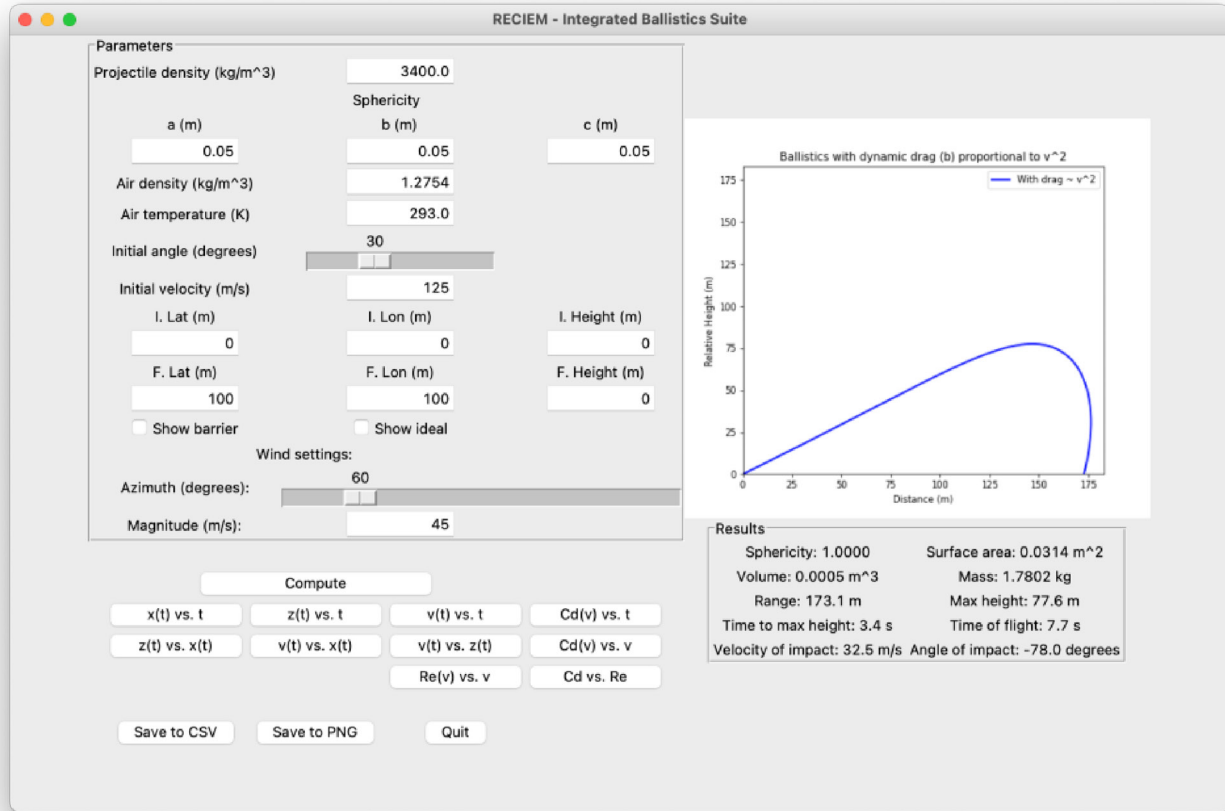


Figura 2. Muestra de la corrida del modelo ocho, que incluye datos atmosféricos para calcular el correspondiente número de Reynold y el arrastre asociado. En este modelaje, un clasto de 3400 kg/m^3 con un lado uniforme de $0,5 \text{ m}$ se mueve en una trayectoria en un aire con densidad de 1.2745 kg/m^3 y temperatura a la salida de la fuente de 293° K , afectado por un viento con velocidad de 45 m/s y un azimut de 60° . El gráfico en el panel superior derecho muestra la relación entre la distancia recorrida y la altura.

Audiencias meta. Nuestro código se enfoca en tres audiencias:

Primera, los estudiantes de geofísicas y ciencias de la tierra que necesitan desarrollar progresivamente su intuición sobre el movimiento balístico e identificar los parámetros fundamentales a identificar en el campo para incluirlos luego en los reportes. Este tipo de actividades pueden fácilmente suplementarse con datos de campo preparados para desarrollar habilidades en esa dirección.

La segunda población corresponde a estudiantes graduados y postdocs que deben analizar los datos para efectos de investigación: nuestro objetivo es reducir el tiempo desde la recolección de la muestra a la formulación de la hipótesis al facilitar la selección del modelo adecuado según los datos con que se cuenta.

Finalmente, esta herramienta apunta a investigadores que requieran efectuar cálculos de nuevo o necesitan verificar los cálculos ya hechos para clastos. Nuestra herramienta facilita corregir las hipótesis planteadas o bien desarrollar nuevas de una manera eficiente intelectualmente.

Conclusiones

El programa BALISTICA es la maduración de esfuerzos previos, tales como el análisis de balísticos del volcán Poás utilizando las esfericidades de los clastos [1], los resultados de la aplicación de BALISTICA a un clasto del volcán Turrialba citados como comunicación escrita en [2], un análisis más amplio publicado en [3], y recientemente una aplicación muy amplia a los clastos del volcán Irazú [4] en la que Brenes-André pudo asociar los clastos a diversos episodios eruptivos.

Referencias bibliográficas

1. Brenes-André, J., Alvarado, G.E., Chavarría, N., Sánchez, B., Avaró, G., Barrantes, M., Quesada, C. (2020). Análisis de la dinámica y productos balísticos durante la erupción del Poás (Costa Rica) en el 2017. *Revista Geológica de América Central*, 62, 74-101.
2. Alvarado, G., Esquivel, D., Sánchez, B., Matamoros, G. 2020. Peligro volcánico del Turrialba, Costa Rica. Comisión Nacional de Emergencias, 129 pp.
3. Alvarado, G.E., Brenes-André, J., Avaró, G., Pereira, R., Galve, J.P., Campos, D., Maarten de Moor, J., Sánchez, R. (2021). La actividad eruptiva del volcán Turrialba (Costa Rica) en el siglo XIX: reinterpretación de los documentos históricos y de los depósitos. *Revista Geológica de América Central*, 64, 1-41
4. Alvarado, G.E., Campos-Durán, D., Brenes-André, J., Alpízar, Y., Núñez, S., Esquivel, D., Sibaja, J., Fallas, B. (2021). Peligros volcánicos del Irazú, Costa Rica. Comisión Nacional de Emergencias, 417 pp.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022

Aplicación del modelo fractal a la subpliniana (3800 a.P.) del volcán Rincón de la Vieja

José Brenes-André^{a*}

^aInvestigador independiente

Abstract: The sub-plinian eruption of Rincon de la Vieja volcano, Costa Rica, that took place some 3800 years ago [1], [2] has been chosen to validate the fractal model [3], [4] initially developed for the 1723 and 1963-65 Irazu volcano episodes. The analysis show that the fractal model results fully agree with the conclusions of [2] proving to be a new and robust way to obtain new information.

Palabras clave: Rincón de la Vieja, Sub-pliniana, Teoría SFT.

Key words: Rincón de la Vieja, sub-plinian, SFT theory.

Introducción

[1] Presentan 3 granulometrías tomadas a tres diferentes distancias de la fuente para analizar el proceso de elutriación, y aunque hacen la distinción entre líticos y pómez no mencionan ningún porcentaje relativo entre ellos. [2] es más específico y presentan las granulometrías de 7 capas (denominadas II-inf, II-sup, III, IV-inf, IV-med, IV-sup y VI) correspondientes a muestras recolectadas en el sitio Borinquen Adentro (309,80N -381,82E). A pesar de estar a 8,7 kilómetros de la fuente, se le consideró Proximal media pues [1] las granulometrías no muestran una elutriación muy marcada. Los gráficos de log(espesor) versus distancia tanto de los líticos como los pumices [1] muestran que no hay ningún cambio luego del cambio brusco de pendiente a distancias de $4 \pm 0,8$ km de la fuente.

Metodología

Teoría SFT. Cada granulometría se considera como la suma de varias distribuciones de Weibull, cada una con su moda y dispersión γ , que definen una sub-población [3]. Una fragmentación primaria será aquella subpoblación con una dispersión negativa entre -1 y 0. Una fragmentación secundaria tendrá asociada una dispersión positiva entre 0 y 1.

Modelo fractal. En [4] y [5] se propone el modelo fractal de una erupción volcánica basado en la definición del coeficiente de Hurst $H = 1 - |\gamma|$, lo que permite definir 4 procesos globales correspondientes a: primario volcánico o anti-persistente (dispersión entre -1 y -0,5), primario freatomagmático o persistente (dispersión entre -0,5 y 0); secundario freatomagmático persistente (dispersión entre 0 y 0,5) y secundario magmático anti persistente (dispersión entre 0,5 y 1), y un 5 asociado a procesos efusivos con una dispersión alrededor de 0,02.

*Autor para contacto: jrbrenes54@gmail.com

Resultados y Análisis

En la figura 1 se muestra el coeficiente de fragmentación para las dispersiones negativas. Claramente se observa que la gran mayoría de las subpoblaciones tiene dispersiones menores a 0,5, en total acuerdo con la propuesta de que la subpliniana fue originada por la mezcla de 2 magmas, específicamente la intrusión de magma andesítico en una cámara magmática que contenía magma dacítico. [2] Se nota igualmente que los puntos deducidos de la capa IV inf ($f(x) = -1,370 x + 0,464$) son paralelos a los obtenidos a partir del resto de subpoblaciones con dispersiones menores a -0,5 ($f(x) = -1,375 x - 0,429$), pero desplazada hacia arriba, lo que implica que ambos procesos son el mismo, solo que el de la IV inf fue más explosivo, un poco diferente a la propuesta de que las capas IV med y IV sup fueron la fase más explosiva [2].

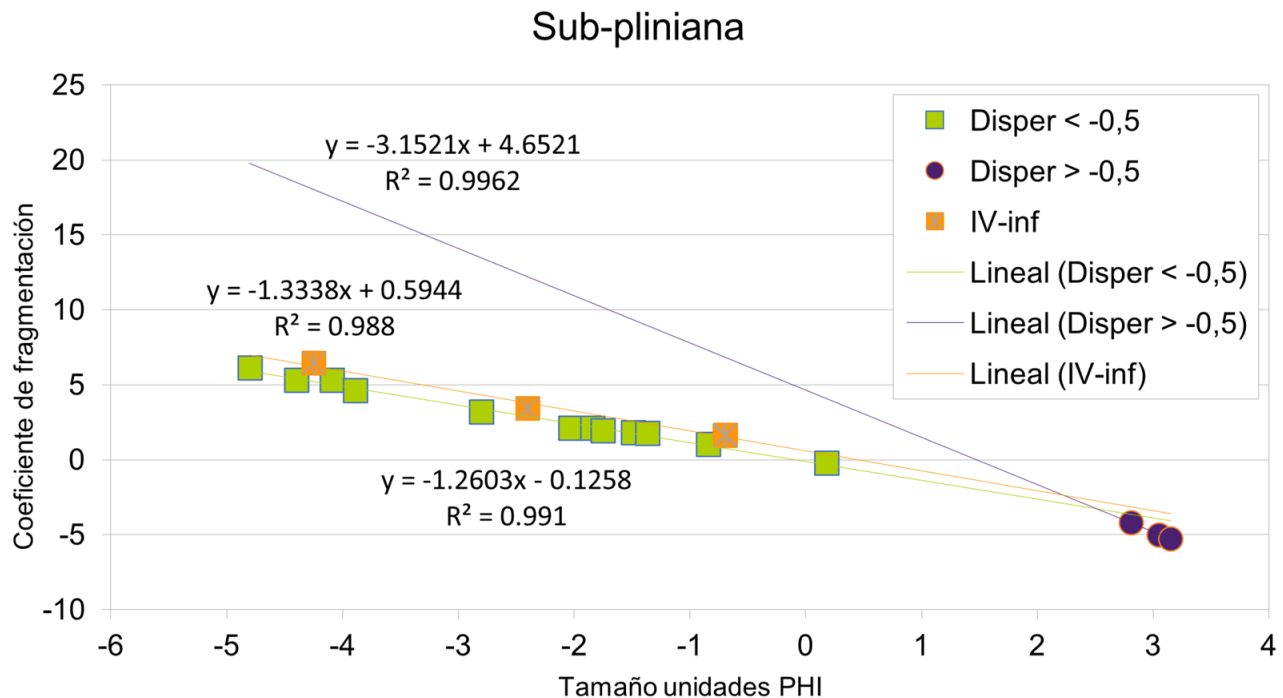


Figura 1: Gráfico del coeficiente de fragmentación en función del tamaño. Las subpoblaciones con dispersiones mayores a -0,5 (procesos persistentes) se agrupan alrededor de 3 PHI. Las subpoblaciones con dispersiones menores a 0,5 (procesos anti-persistentes) se distribuyen linealmente ($f(x) = -1,260 x - 0,126$) en un rango de -5PHI a 3 PHI, paralela a las asociadas a la capa IV inf ($f(x) = -1,334 x + 0,594$).

Las subpoblaciones cuyas dispersiones indican procesos persistentes tienen modas alrededor de 3 PHI, comúnmente asociadas a procesos freatomagmáticos.

Los gráficos de la dispersión en función del tamaño (fig. 2a, 2b y 2c) son muy reveladores. Solo 3 subpoblaciones presentan dispersiones positivas (fig. 2b), dos asociadas a procesos efusivos (Capas III y VI). Si se acepta que la fragmentación secundaria liberó parte del gas de las vesículas en el magma, la dispersión de 0,08 asociada a una fragmentación secundaria sería indicación de que la capa IV sup sería la más explosiva, en acuerdo a lo propuesto en [2].

La distribución de las dispersiones en función del tamaño, según cada capa, permite obtener información sobre la evolución en el tiempo de la erupción (figura 2c).

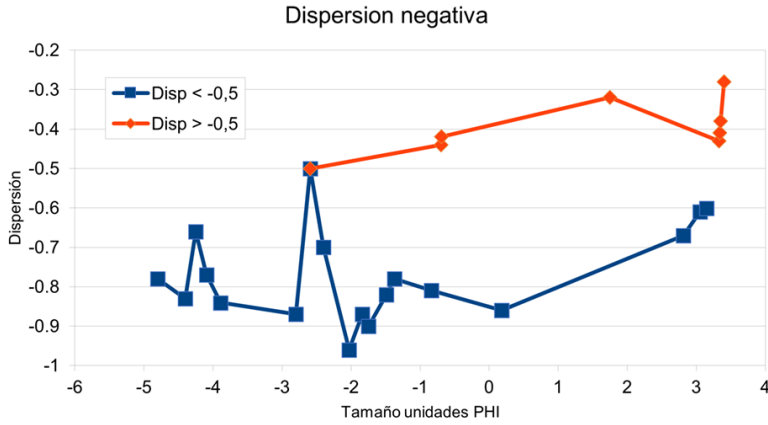


Figura 2a. Distribución por tamaño de las dispersiones persistente y anti-persistente, según la dispersión negativa.

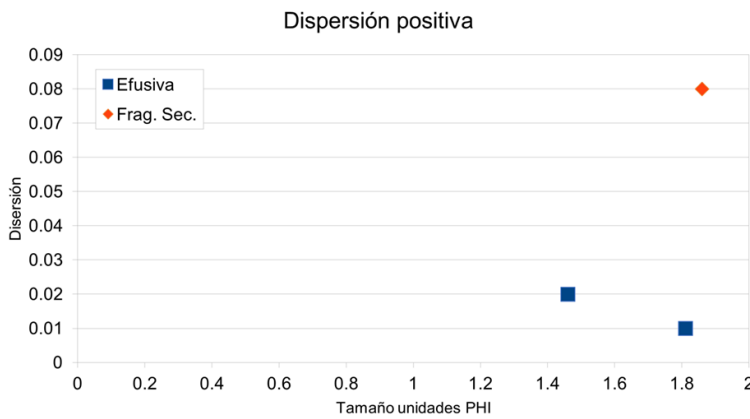


Figura 2b. Distribución por tamaño de las 3 subpoblaciones con dispersión positiva.

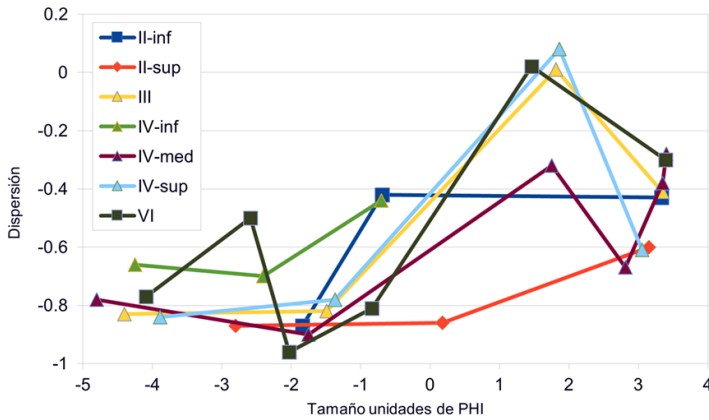


Figura 2c: Distribución de la dispersión de las subpoblaciones, según la capa en que se recolectó la muestra. Nótese que para los finos (tamaños de 0 PHI y menores) hay una marcada similitud entre las capas III, IV sup y VI, y un poco menor con la IV med.

Según [3] entre menos secuencias de fragmentación haya estado sometida una subpoblación con una dispersión negativa, tanto más se acercará su dispersión a -1. Por tanto, las dispersiones de -0,4 sugieren que los procesos que generaron la capa II inf fueron violentos debido a la interacción con agua. Las dispersiones cercanas a -0,9 de la capa II sup apuntan a que fueron expulsados de manera que los clastos casi no colisionaron entre sí. Las curvas tan parecidas de la capa II, IV sup y VII, con dispersiones alrededor de -0,8 en el rango de -5PHI a 1 PHI, y con dispersiones positivas para una moda alrededor de +2PHI (0,02, o sea efusivas para la II y la VI, y de 0,08 o sea fragmentación secundaria para la IVsup) sugieren un proceso pulsante que generó los gruesos y los finos, que se repitió varias veces en el tiempo. La distribución asociada a la capa IV med es parecida, pero menos explosiva.

Conclusiones

Los resultados de la aplicación del modelo fractal [4], [5] a la subpliniana del volcán Rincón de la Vieja sucedida en el 3800 a A.P. coinciden plenamente con resultados [2] deducidos con otras técnicas geológicas tradicionales, lo que valida la aplicación del modelo a una erupción tan explosiva.

Erupciones plinianas comúnmente se transforman en erupciones que forman ignimbritas conforme la fuente somera se ensancha; alternativamente, si la diferencia de presión que genera la erupción decrece rápidamente, la erupción puede volverse efusiva [6], cómo se evidenció para las capas III y IV sup.

También se han encontrado modulaciones en erupciones que fluctúan en el tiempo entre efusivas y explosivas, debido a cambios en esfuerzos durante el proceso eruptivo como, por ejemplo, cuando se alcanzan cuerpos magmáticos más profundos [7].

En sus etapas iniciales, las erupciones reolíticas del volcán Cordon Caulle, Chile, fueron seguidas por flujos efusivos de lava acompañados por una actividad medianamente explosiva [8], como sería el caso de la capa IV sup en donde se evidenciaron fragmentaciones secundarias.

En conclusión, el modelo fractal permitió obtener a partir de la granulometría y de una manera fácil información valiosa sobre los procesos volcánicos bajo análisis con una buena resolución.

Referencias bibliográficas

1. Kempter, K., Benner, S.G. & Williams, S.N. (1996). Rincón de la Vieja volcano, Guanacaste province, Costa Rica: geology of the southwestern flank and hazard implications. *Journal of Volcanology Geothermal Research*, 71: 109-127.
2. Soto, G., Alvarado, G.E. & Goold, S. (2003). Erupciones <3800 a.P. del volcán Rincón de la Vieja, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 29: 67-86
3. Wohletz, K.H., Sheridan, M.F. and Brown, K. (1989). Particle size distribution and the sequential fragmentation/transport theory applied to volcanic ash. *Journal of Geophysical Research*, 94: 15703-15721.
4. Brenes-André, J. (2013). Aplicación de la teoría de fragmentación/transporte secuencial a los depósitos de las erupciones 1723 y 1963-65 del Irazú, Costa Rica. Caso dispersión negativa. *Revista Geológica de América Central*, 48: 63-85.
5. Brenes-André, J. (2014). Aplicación del modelo de fractura fractal de Balankin al modelo fractal de la actividad volcánica. *Revista Geológica de América Central*, 50: 83-98.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022

Modelación de los balísticos volcánicos en un régimen de Stockes

José Brenes-André*

Geólogo e Investigador independiente, San José - Costa Rica.

Abstract: A simple model to analyze possible ballistic trajectories of clasts inside the crater, considering the interaction of clast with volcanic jet is under Stockes regime. A simple differential equation is solved. Mathematical results can easily be plotted using EXCELL.

Palabras clave: Régimen de Stockes, balísticos, interacciones jet.

Key words: Regimen Stockes, balistics, jet interaction.

Introducción

En este trabajo se analizará la posible trayectoria de un balístico que inicia su movimiento sin velocidad relativa al fluido circundante, para un corto tiempo después desacoplarse del fluido circundante y moverse en un flujo laminar (régimen de Stockes), y acelerar hasta moverse en un flujo turbulento.

[1] sistematizó estos modelos desarrollando el primer algoritmo matemático, en coordenadas cartesianas, que incluía el efecto de la gravedad, el arrastre (asimilando los clastos a cilindros en lugar de esferas) así como las variaciones de las propiedades atmosféricas con la altura.

[2] propusieron que el gas que rodea al clasto es desplazado en masa por el balístico causando que ambos se muevan a la misma velocidad inicial, por lo que el clasto no es afectado por una fuerza de arrastre, y el clasto y el gas paulatinamente se desacoplan.

Metodología

En [3] la trayectoria del clasto es dividida en dos partes: una definida desde el punto de lanzamiento hasta algún punto a la altura del cráter, en la que el clasto se analiza como un proyectil ideal. La segunda está comprendida desde ese punto a la altura del cráter hasta el punto de llegada al suelo, considerando un régimen Newtoniano. Una visión más realista es considerar que el clasto pasa primero por un régimen de Stockes, en que el fluido es laminar y el arrastre es proporcional al módulo de la velocidad relativa, hasta llegar a un régimen Newtoniano en que el fluido se transforma en turbulento y el arrastre es proporcional a la velocidad relativa al cuadrado.

Modelo vulcanológico: se ha adoptado el modelo dependiente de la tasa de subida del magma según el cual las burbujas en el magma ascienden más rápidamente que el magma que las contiene, por lo que tienen tiempo para crecer y coalescer y así generar un tapón [4], [5], [6]. Según ese modelo el magma es de baja viscosidad y asciende de manera uniforme reológicamente, por lo que el tapón puede explotar limpiamente en la superficie del magma. Esa explosión impulsa hacia arriba la mezcla de gas caliente y de fragmentos, que se desplaza por un conducto en esencia vacío hasta salir por el cráter [7], [8].

*Autor para contacto: jbres54@gmail.com

Modelo físico: Al arrastrar la ceniza fluidizada con él la velocidad relativa entre ambos es nula, moviéndose como un proyectil ideal. Al seguir aumentando la velocidad respecto el suelo en algún momento el clasto empieza a desacoplarse de la ceniza, la velocidad relativa deja de ser nula, y el clasto se mueve en un régimen de Stokes. Como el chorro de ceniza fluidizada se mueve respecto al suelo con una velocidad promedio u al mismo tiempo que el clasto se mueve respecto al suelo con una velocidad w , y el clasto va aumentando su velocidad respecto al suelo llegará el momento en que se desacopla totalmente del gas circundante, y empezará a moverse en un régimen Newtoniano. El modelo matemático siguiente permite analizar ese proceso.

Sea w la componente vertical de la velocidad instantánea respecto al suelo de un balístico esférico que se mueve con una velocidad u respecto al suelo en un fluido de viscosidad dinámica η . En la vertical el clasto está sometido a dos fuerzas; la gravedad, y el arrastre de Stokes, ambos en dirección hacia abajo, Por la segunda ley de Newton.

$$m \frac{dw}{dt} = -mg - 6 \pi \eta r (w - u) \quad \text{o sea} \quad \frac{dw}{dt} = -g + u/\tau - w/\tau = -g_c - w/\tau$$

donde $\tau = 6 \pi \eta r / m$ define un tiempo característico.

Integrando se obtienen las ecuaciones para la velocidad y la componente vertical z .

$$w = (-\tau g_c) (1 - \exp(-t/\tau)) + w_0 \exp(-t/\tau) \quad z = (-\tau g_c)t + (\tau^2 g_c + \tau w_0) (1 - \exp(-t/\tau))$$

En la dirección x el clasto solo sufre un arrastre proporcional a la velocidad h en esa dirección

$$\frac{dh}{dt} = -h/\tau \quad \text{por lo que} \quad h = h_0 \exp(-t/\tau) \quad \text{y} \quad x = (v_0 \tau) (1 - \exp(-t/\tau))$$

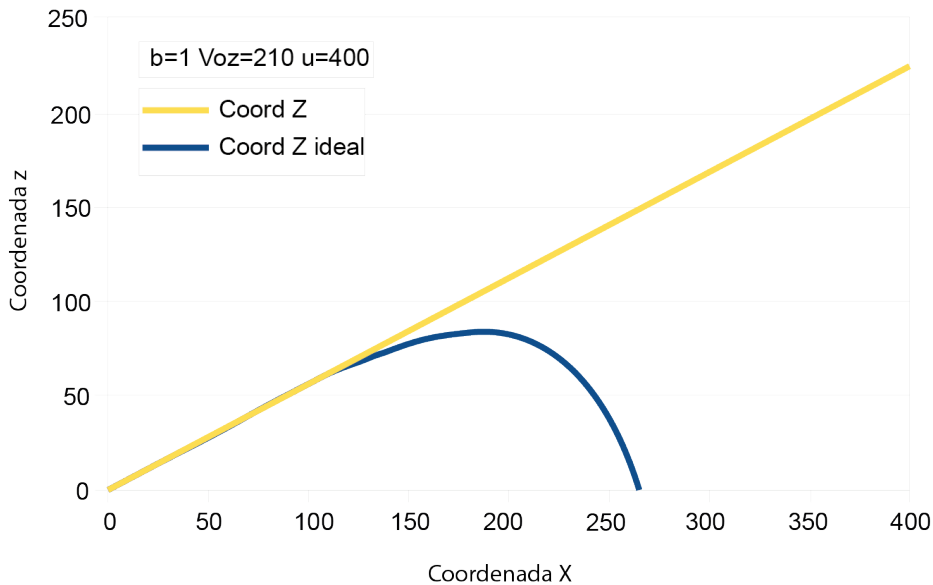


Figura 1. Trayectoria calculada para un balístico con componente vertical inicial de 210 m/s lanzado dentro de un chorro de gas a velocidad constante de 400 m/s. Por comparación, para la erupción del volcán Aso [9] se observaron velocidades de clastos entre 5,1 y 35,5 m/s con chorros de gas de 25 a 52 m/s.

Solo después de $\tau = 1/b = 1$ segundo de vuelo el arrastre empieza a tener un efecto apreciable en la trayectoria, lo que se interpreta como que el clasto se va desacoplando del gas. Las observaciones térmicas, en el visible y el ultravioleta reportadas por [10] sugieren que los cambios en la densidad del gas se dan en décimas de segundo, por lo que algunas partículas pueden estar completamente acopladas al gas mientras otras lo serán en menor grado.

Resultados reportados en [11] permiten validar los argumentados aquí presentados. Por ejemplo, en el Stromboli se detectaron consistentemente que las erupciones empiezan con una fase transiente de 1 a 1,5 segundos de, para luego

equilibrarse. Esa es justamente la posición sostenida en este trabajo: la transiente es el régimen laminar de Stokes, cuando la velocidad relativa es baja, para volverse eventualmente turbulenta (régimen Newtoniano) al aumentar la velocidad relativa.

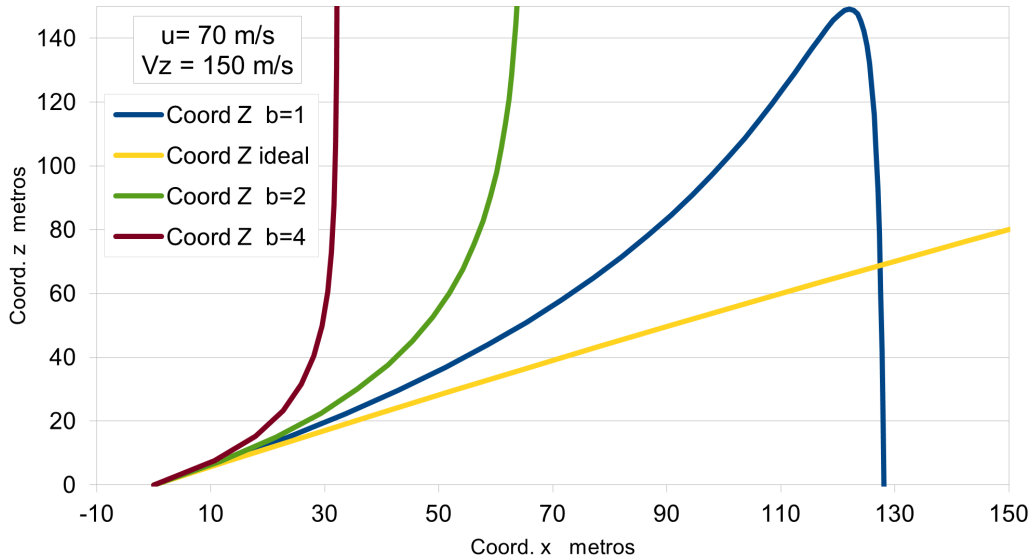


Figura 2. Trayectoria del clasto para 3 diferentes valores de $b = 1/\tau = 9\eta / (2r^2 \sigma)$ con una velocidad inicial en z de 150 m/s, en un chorro vertical de velocidad 70 m/s.

[12] analizaron un chorro oblicuo, pero también observaron chorros verticales claramente visibles en la noche como destellos azules con pocas partículas, y que, aunque invisibles durante el día eran detectables por el sonido que hacían, sonido que ha sido asociado a erupciones tipo 0. De esta manera, aunque en las erupciones se observa que la mayoría de los clastos son expulsados verticalmente, los resultados aquí presentados muestran que bien pueden ser clastos que inician su recorrido a ángulos cercanos a la horizontal, pero que la influencia del arrastre de Stokes rápidamente se dirigen verticalmente hacia arriba.

En la fig. 3 se analizan 3 posibles trayectorias que puede seguir el clasto después de 0,25 seg de haber sido lanzado a 30° sobre la horizontal con una velocidad de 150 m/s dentro de un jet de 2 m/s, al cambiar las condiciones locales, que denominaremos Región A. Al moverse el clasto puede entrar a la Región B en la que la velocidad del jet puede haber disminuido a 1 m/s al ampliarse el conducto, o bien aumentar a 10 m/s o bien 11 m/s al reducirse la apertura o aumentar la presión local. El tiempo característico T ($\tau = (2r^2 \sigma) / 9\eta$) asociado al clasto puede variar si la viscosidad η efectiva del pseudofluido cambia, o bien el clasto varía su radio r por fractura o agregación o su densidad σ varia.

En la figura 3 se muestra el caso de un clasto en un cráter de 51,59 m de profundidad lleno de una mezcla de ceniza y gas que generan la región A ($b = 4$). La región B puede ser la zona del borde del cráter hacia arriba. Según el modelo aquí desarrollado un valor de $b=4$ implica que la desviación debida al arrastre de Stokes empieza a ser apreciable después de un tiempo de 0,25 s. Consideremos un clasto lanzado a 30° sobre la horizontal con una velocidad de 103 m/s, en un chorro vertical con la velocidad constante de 2 m/s.

De las ecuaciones se deduce que el clasto se desplazará (curva azul) horizontalmente una distancia de 56,16 m, una distancia vertical de 51,59 m (la profundidad del cráter) alcanzando el borde con una velocidad de 86,203 m/s y un ángulo de 65,92°. Por comparación, para la erupción del volcán Aso [9] se observaron velocidades de clastos entre 5,1 y 35,5 m/s con chorros de gas de 25 a 52 m/s. Si al borde del cráter la velocidad del jet baja ($u = 1$ m/s) o bien sube ($u = 10$ m/s) pero su forma cambia el clasto cae de nuevo al cráter. Si la forma cambia, pero la velocidad del jet aumenta a 10 m/s el clasto es lanzado casi verticalmente.

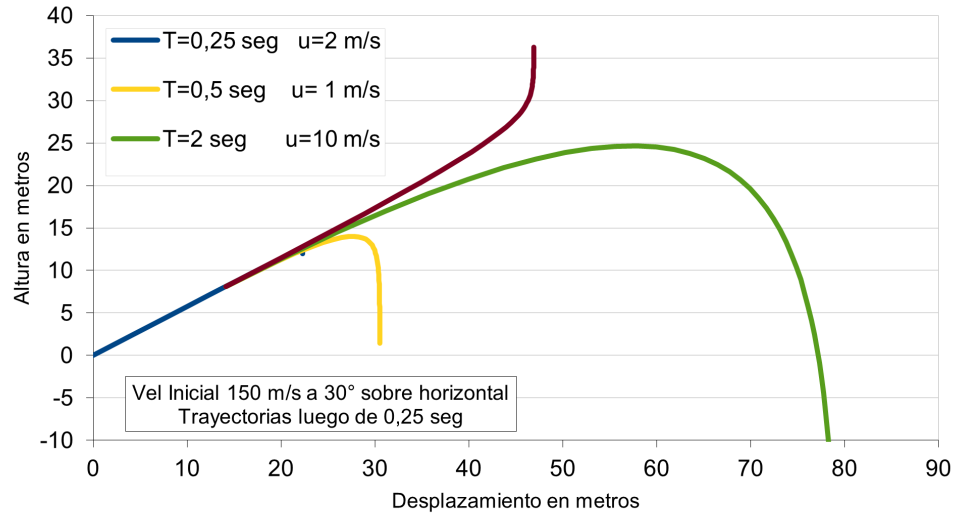


Figura 3. Cuatro posibles trayectorias de un clasto producto de las rápidas variaciones de las condiciones termodinámicas dentro del conducto, y en la zona inmediata sobre el cráter.

Conclusiones

Este simple modelo incorpora por primera vez las posibles trayectorias de un clasto en un régimen de Stockes, explicando las diversas trayectorias resultantes, tal y como se observan a la salida de un cráter durante una erupción.

Referencias bibliográficas

1. Wilson, L. (1972). Explosive volcanic eruptions II. The atmospheric trajectories of pyroclasts. *Geophys. Journal of the Royal Astronomical Society*, 30(4), 381-392.
2. Fagents, S.A., Wilson, L. (1993). Explosive volcanic eruptions _ VII. The ranges of pyroclasts ejected in transient volcanic explosions. *Geophysical Journal International*, 113, 359-370.
3. Brenes-André, J. (2022). Uso del software BALÍSTICA para analizar un caso del volcán Turrialba (Costa Rica). Aceptado para su publicación en *Revista Geológica de América Central*.
4. Wilson, L. (1980). Relationships between pressure, volatile content and ejecta in three types of volcanic explosions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8, 97-313
5. Wilson, L., Head, J.W. (1981). Ascent and eruption of basaltic magma on the earth and moon. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 86(B4), 2971-3001
6. Parfitt, E. A., Wilson, L. (1995). Explosive volcanic eruptions IX. The transition between Hawaiian style lava fountaining and Stroboliian explosive activity. *Geophysical Journal International*, 121, 226-232.
7. Ripepe, M., Ciliberto, S., Della Schiava M. (2001) Time constraints for modeling source dynamics of volcanic explosions at Stromboli. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106, 8713-8727.
8. Ripepe, M, Harris, A.J.L., Carmiel, R. (2002). Thermal seismic and infrasonic evidence of variable degassing rates at Stromboli volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 118, 285-297.
9. Tsunematsu, K., Ishi, K., Yokoo, A. (2019). Transport of ballistic projectiles during the 2005 Aso Strombolian eruptions. *Earth, Planets and space*, 71, 49.
10. Bombrun, M., Harris, A., Gurioli, L., Battaglia, J., Barra, V. (2015). Anatomy of a Strombolian eruption: Inferences from particle data recorded with thermal video. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 2367-2387 doi:10.1002/2014JB011556.
11. Pioli, L., Harris, A. J. L. (2019). Real-Time Geophysical Monitoring of Particle Size Distribution During Volcanic Explosions at Stromboli Volcano (Italy). *Frontiers in Earth Science*, 7, 52. doi: 10.3389/feart.2019.00052.
12. Leduc, L., Gurioli, L., Harris, A., Colo, L., Rose-Koga, E. F. (2015). Types and mechanisms of strombolian explosions: characterization of a gas-dominated explosion at Stromboli. *Bulletin of Volcanology*, 77, 8.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Sistema de alerta temprana ante erupciones volcánicas en Guatemala y Centroamérica

Luis Iván Girón Melgar^{a*}, José Girón^b, Francisco Juárez^c

^aAsociación Vivamos Mejor, Guatemala y Cooperación Suiza en América Central, Programa de Gestión del Riesgo y Cambio Climático

^bDirección de Coordinación, SE-CONRED

^cVulcanología INSIVUMEH

El proyecto “Sistema de alerta temprana ante erupciones volcánicas en Guatemala y Centroamérica” conocido como “SAM Volcanes” es un proyecto auspiciado por la Cooperación Suiza al Desarrollo en América Central y ejecutada por la Asociación Vivamos Mejor Guatemala en conjunto y como beneficiarios la secretaria ejecutiva de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Riesgos a Desastres SE-CONRED y el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH.

Esta iniciativa es un proyecto piloto vinculado a la gestión de riesgos volcánicos, priorizando el fortalecimiento de las capacidades institucionales para el monitoreo científico de las amenazas volcánicas y capacidad de respuesta comunitaria, validando el enfoque de los componentes de un Sistema de Alerta y Vigilancia Volcánica. Se trabaja en al menos dos volcanes en Guatemala, Santiaguito y Atilán y que dicho proyecto contempla al menos los siguientes componentes a) Conocimiento del riesgo, b) Servicio de seguimiento y alerta, c) Difusión y comunicación; y d) Capacidad de respuesta. Y el fin último de la propuesta es salvar vidas.

La ponencia tiene como objetivo difundir los avances en este proyecto que, de cuatro años, se lleva ejecutando 2.5 años, además de difundir las lecciones aprendidas, los retos y dificultades, así como el seguimiento a proyectos vinculados a los volcanes activos en Guatemala.

Este proyecto cuenta con tres grandes efectos los cuales son: 1. INSIVUMEH y CONRED operan de forma coordinada y eficiente un sistema de monitoreo y alerta volcánica según estándares de calidad internacionales, y son capaces de comunicar oportunamente las alertas a la población. 2. Comunidades vulnerables y gobiernos locales sensibilizados cuentan con capacidades mejoradas de respuesta ante riesgos volcánicos y 3. Instituciones científicas y de protección civil de la región comparten experiencias, y aprenden y mejoran mutuamente sus conocimientos, instrumentos y buenas prácticas para el monitoreo, vigilancia y alerta volcánica.

Este proyecto pretende ser un parteaguas en el monitoreo volcánico y que el resultado de este, la coordinación entre INSIVUMEH y SE-CONRED sea efectiva en beneficio de la población que vive en las cercanías de estos volcanes.

*Autor para contacto: ivan@vivamosmejor.org.gt



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



UNIVERSIDAD
 NACIONAL
 AUTÓNOMA DE
 NICARAGUA,
 MANAGUA
 UNAN-MANAGUA

Evaluación de la amenaza volcánica por flujos de lava en el volcán Cerro Negro del Complejo Volcánico Las Pilas - El Hoyo

Stheysing Virginia Reyes Muñoz^{a*}

^aUniversidad Nacional Autónoma de Nicaragua – Managua (UNAN).

Cerro Negro, el volcán más joven y uno de los más activos de Nicaragua hizo su primera erupción en abril de 1850 y hasta la actualidad se registran alrededor de 23 erupciones, pertenece al complejo volcánico Las Pilas – El Hoyo, y es la estructura volcánica más joven del complejo.

El objetivo principal de la investigación es la evaluación de amenaza por flujos de lavas del volcán Cerro Negro, tomando como referencia los flujos de lava más voluminosos emitidos por las estructuras del complejo. A partir de datos de campo, complementados con interpretación fotogeológica e imágenes satelitales, se determinaron los volúmenes de los flujos de lava más grandes, los que fueron utilizados para simular numéricamente una erupción efusiva del volcán Cerro Negro y así evaluar la amenaza por flujos de lava.

Con el propósito de lograr estimaciones de las posibles trayectorias de un flujo de lava de forma rápida, eficiente y que se rija por las leyes de la física, se seleccionó el modelo numérico DOWNFLOW para realizar simulaciones (35) en tres diferentes puntos de emisión del volcán.

Con los resultados obtenidos, se realizó un cálculo de sensibilidad con los flujos levantados en campo y los digitalizados por medio de imágenes satelitales y fotografías aéreas. Esto nos permitió definir los flujos mejores proyectados en el área de estudio. Fue necesaria la confección de mapas temáticos ocupados como base científica para esta investigación, entre ellos: geológico, estructural, geomorfológico y de pendientes, así como la interpretación de siete líneas de fotografías aéreas para la realización del mapa final.

El cálculo de sensibilidad nos permitió identificar y definir las proyecciones óptimas de flujos de lava para hacer una zonificación de amenazas en la zona, definiéndose entonces tres, clasificadas en Alta, Media y Baja. Aunque la zona en cuestión no se encuentre poblada de manera sobre extendida, existe cierta población nómada que crece cada año en los municipios principales de la zona, tales como Malpaisillo, Rota y Telica y estaría sujeta a riesgo por erupción volcánica.

*Autor para contacto: virginiageo5260@gmail.com



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Modelo numérico de los acuíferos Herradura y Jacó, cantón de Garabito, Provincia de Puntarenas, Costa Rica

Alonso Alfaro Martínez^{a*}

^a Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento

Abstract:

In the coastal sector of Herradura and Jacó embayments, located in the Central Pacific Coast of Costa Rica, the conceptual hydrogeological model was built for the volcanic rocks of the Nicoya Complex, sedimentary rocks of the Punta Carballo formation and for the fluvial deposits in the flat sectors of Herradura and Jacó (alluvium). Two static numerical models were created by the finite difference methodology for the Herradura and Jacó alluvial aquifers, using the MODFLOW code and the ModelMuse graphical interface; also in both aquifers, climate change scenarios were carried out in the years 2080 and 2099, affecting the recharge and increasing the extraction of water in the drilled wells, with the aim of making a comparison with the situation of the year 2019.

Palabras clave: acuíferos, recarga, modelo numérico, MODFLOW, ModelMuse.

Key words: acuífers, recharge, numerical model, MODFLOW, ModelMuse

Introducción

El área de estudio se sitúa en el cantón de Garabito en el sector costero de las localidades de Herradura-Jacó en el Pacífico Central de Costa Rica, entre las coordenadas 427190-437215 E y 1061000-1072805 N de la proyección CRTM05, la misma abarca un área total de 70,9 km² (Figura 1). La escala de trabajo es 1:25000.

Objetivo general

- Evaluar por medio de un modelo numérico la respuesta del acuífero aluvial Herradura-Jacó por la extracción de agua y ante distintos escenarios de cambio climático.

Objetivos específicos

- Construir el modelo hidrogeológico conceptual de los acuíferos Herradura y Jacó como insumo principal para desarrollar un modelo numérico.
- Calcular por medio de un balance hídrico de suelos, la recarga potencial de los acuíferos para estimar su variación ante diferentes escenarios climáticos.
- Evaluar por medio de un modelo numérico la respuesta del acuífero afectando la recarga del acuífero aluvial Herradura-Jacó por la extracción de agua y ante distintos escenarios de cambio climático.

*Autor para contacto: alonsoalfarom@gmail.com

Metodología

Se procedió a la definición de la geología, la geomorfología local y las estructuras geológicas, y mediante el trabajo de campo y la observación y descripción de los afloramientos, se definieron unidades locales geológicas y geomorfológicas.

Para el análisis de las bases datos de pozos y concesiones

Se estudiaron los informes finales de perforación y se hizo una selección de los pozos con litología, niveles del agua y armado de la tubería ciega, así como la rejilla de las bases de datos institucionales.

Compilación y análisis de la información hidrológica

Se recopiló la información hidro-meteorológica disponible para la zona de precipitación, temperatura, aforos en ríos y quebradas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), SENARA, AyA, el MINAE y las ASADAS.

Red de monitoreo de pozos

A partir del mes de enero del año 2020 se realizaron mediciones mensuales del nivel del agua subterránea, así como de la conductividad eléctrica en la columna de agua de los pozos por espacio de 12 meses.

Definición de las unidades para el balance hídrico subterráneo

Con base en los mapas geológico y geomorfológico se definieron las unidades para calcular el balance hídrico y la recarga potencial hacia los acuíferos utilizando la metodología de Schosinsky (2006).

Construcción del modelo numérico de los acuíferos y evaluación de diferentes escenarios climáticos

Se desarrollaron dos modelos numéricos con la técnica de diferencias finitas, se empleó el programa de cómputo ModelMuse que utiliza el código del MODFLOW. Una vez construidos los modelos se calibraron con los datos de niveles de la red de monitoreo de pozos y también se desarrollarán los análisis de los escenarios con los valores de recarga potencial calculados para los escenarios de la precipitación y evapotranspiración para los años 2080 y 2099.

Resultados y análisis

Para el acuífero Herradura (capa inferior de Aluvión) las celdas todas están saturadas para la configuración actual de los parámetros hidráulicos definidos, el modelo numérico para las cargas hidráulicas del agua subterránea muestra un resultado de un gradiente de promedio de 0,01 - 0,03 con dirección sur y suroeste para descargar en la zona de la playa Herradura (figura 2). Para la zona cercana a la playa de Herradura el gradiente del agua subterránea es muy bajo, con valores entre 0,0003 a 0,0005 esto por ser la zona más plana cercana a la zona de descarga al océano y la influencia de la dinámica con las mareas, la profundidad del agua subterránea oscila entre 1,50 y 2,50 metros bajo el nivel del suelo. Con respecto los valores de las cargas hidráulicas simuladas y observadas en los pozos del sector de Herradura, el valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés) es de 2,92 lo que indica un ajuste muy bueno de la predicción del modelo numérico con respecto a los valores de las

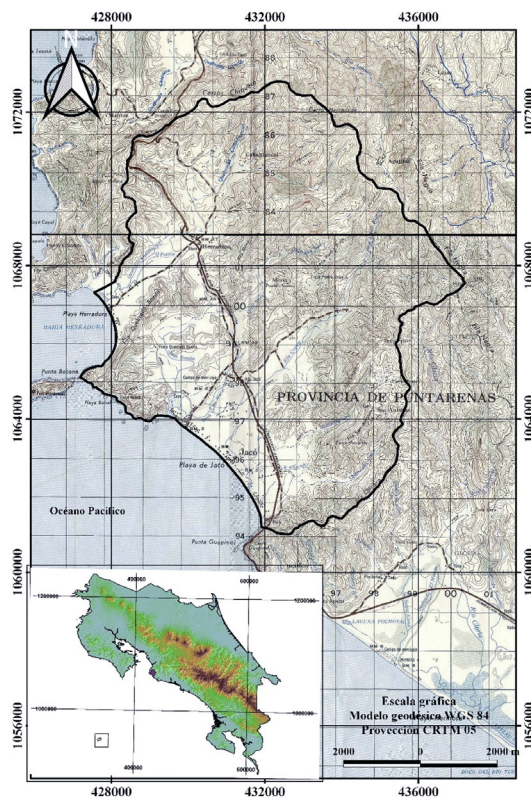


Figura 1. Mapa de ubicación.

están en el intervalo de confianza del 95 % de (6,99 – 14,11 msnm), esto con base en el análisis para la media de población con distribución T de Student de los cuatro pozos analizados. El valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) es de 4,21 lo que indica un ajuste bueno de la predicción del modelo numérico con respecto a los valores de las cargas hidráulicas simuladas, así mismo el coeficiente de correlación de Pearson r tiene un valor de 0,058 por lo que se concluye que no hay una buena correlación en la regresión lineal obtenida entre los valores observados y los valores simulados ($r^2 = 0,0034$). Para los escenarios de Cambio Climático en los años 2080 y 2099 la dirección del flujo del agua subterránea se mantiene prácticamente sin ninguna variación para los años 2080 y 2099 ya que se conserva el gradiente muy bajo y la dirección hacia el sur y el suroeste. Con un 50% más de extracción en los pozos en el año 2080 y un aumento del 100 % para el año 2099 los abatimientos proyectados para los escenarios de cambio climático son de aproximadamente 1,50 m y 3,50 m respectivamente.

Conclusiones

Se construyeron dos modelos numéricos para los acuíferos Herradura y Jacó, utilizando el código MODFLOW, con la metodología de diferencias finitas y en estado estacionario, en donde se obtuvo un balance de agua para las dos capas que conforman cada acuífero (Arenas finas y). Los modelos numéricos que se proponen en esta investigación son sujetos a una constante calibración conforme se genere más información en el campo como son los niveles de agua subterránea, pruebas de bombeo en pozos perforados o excavados, para afinar las características hidráulicas de los acuíferos como la conductividad hidráulica y la transmisividad. Los modelos numéricos que se generaron en esta investigación deben ser validados y son la

base para desarrollar un modelo de extracción sostenible del recurso hídrico subterráneo; pueden ser utilizados como base para continuar modelando y validando el comportamiento hidráulico conforme se generen nuevos datos de escenarios con respecto al cambio climático en el sector del Pacífico de Costa Rica.

Referencias

1. Harbaugh, A.W., Langevin, C.D., Hughes, J.D., Niswonger, R.N., y Konikow, L. F. (2017). MODFLOW-2005 version 1.12.00, the U.S. Geological Survey modular groundwater model: U.S. Geological Survey Software Release, 03 February 2017, <http://dx.doi.org/10.5066/F7RF5S7G>.
2. Schosinsky N. G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*. 34-35, 13-30.
3. Winston, Richard B. (2009). ModelMuse: a graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST. Reston, Va.:U.S. Geological Survey.

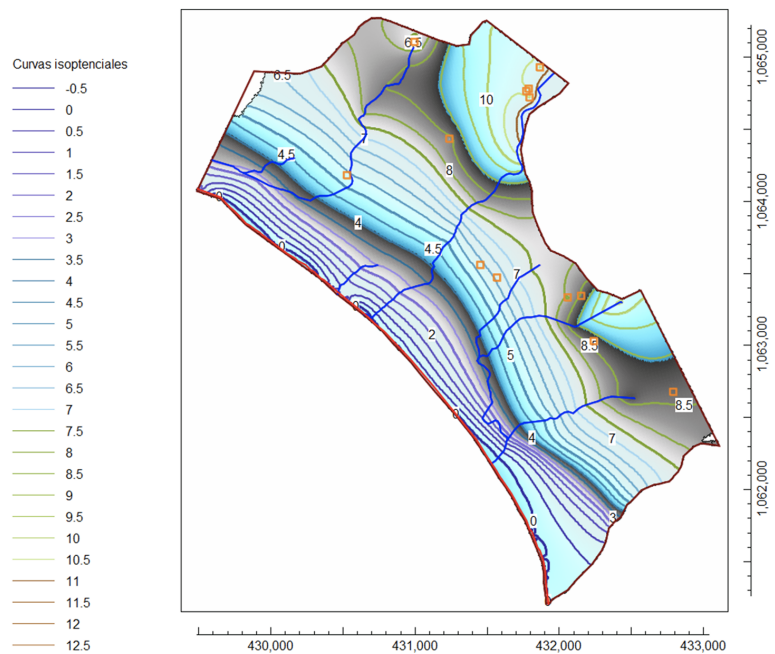


Figura 3. Mapa de las curvas equipotenciales y la dirección de flujo en la capa inferior de Aluvión en el acuífero Jacó.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Cartografía Hidrogeológica de Vulnerabilidad y Peligrosidad a la Contaminación en el Área Metropolitana de San Salvador

José Alexander Chávez^{a*}, Laura Gil^b, Ricardo Mata^b, Jorge García^c,
Marcia Barrera-de-Calderón^d, Ingrid Alfaro^a, Efraín Alas^a, Sara Cornejo^a

^aOficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, San Salvador, El Salvador.

^bMinisterio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, San Salvador, El Salvador.

^cConsultor, Buenos Aires, Argentina.

^dEscuela de Posgrado y Educación Continua, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador, El Salvador.

Se han elaborado mapas de hidrogeológicos, de vulnerabilidad y de peligrosidad a contaminación acuífera en escala 1:50,000 para el Área Metropolitana de San Salvador. Estos mapas han usado nuevo mapa geológico de Lexa et al. [1]. Además, para definir límites de unidades hidrogeológicas se han construido perfiles litológicos, con información disponible, incluyendo transmisividad, capacidad específica y coeficiente de almacenamiento. Identificándose acuíferos fracturados y porosos con sus zonas de recarga, además se demarco algunas zonas con cubierta de piroclastos para evidenciar la presencia de acuíferos con potencial aparentemente reducido. Evidenciándose que existe un flujo principal que proviene de complejo volcánicos de San Salvador mostrando bastante coincidencia con flujo de agua superficial. En cuanto a la vulnerabilidad esta se hizo con el método GOD, aparte de información hidrogeológica, se tomó en cuenta los usos de suelos y actividades contaminantes (consultas en bases de datos públicas o de instituciones complementándose con información a partir de imágenes satelitales y otras fuentes secundarias como bases de datos de permisos ambientales entre otros. Se identificaron (POSH) gasolineras, cobertura de alcantarillado sanitario, hospitales, cementerios, vías de transporte, actividad industrial, actividad agrícola, botaderos, ríos y quebradas (muy pocas plantas de tratamiento funcionan).

La vulnerabilidad alta y extrema se presenta en los cauces y márgenes de ríos principales y secundarios. El mapa de peligro a la contaminación, indica que la zona con mayor peligro corresponde al sector noreste de la región, influenciado por la mayor vulnerabilidad acuífera del acuífero poroso. En esta zona, los máximos valores de peligro son presentados en los cauces de ríos principales, que transportan las aguas residuales casi sin tratamiento generadas en el AMSS hacia el río Lempa. Destaca también el aumento del peligro de contaminación por efecto del cultivo intensivo. La cartografía generada ha servido como insumo para propuesta de gestión de protección de recursos hídricos.

Referencia bibliográfica

1. Lexa, J., Sebesta, J., Chávez, J. A., Hernández, W., y Pecsckay, Z. (2011). Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area. *Journal of Geosciences*, 56(1), 106-140. doi: 10.3190/jgeosci.088

*Autor para contacto: alex.chavez@opamss.org.sv



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Balance hídrico del Área Metropolitana de San Salvador con escenarios de cambio climático

José Alexander Chávez^a *, Ingrid Alfaro^b, Marcia Barrera-de-Calderón^b, César Alvarado^c,
Efraín Alas^a, Sara Cornejo^a, Mauricio Vásquez^a

^aOficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, San Salvador, El Salvador

^bEscuela de Posgrado y Educación Continua, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador, El Salvador.

^cEscuela de Física, Facultad de Matemáticas y Ciencias Naturales, Universidad de El Salvador, El Salvador.

Abstract: Groundwater recharge is vital for hydrologic cycle management, mainly in urban areas. In order to contribute to sustainable water management in the Metropolitan Area of San Salvador, spatial and temporal annual groundwater recharge was estimated using a modified Thornthwaite- Matter daily soil water balance for a ten-year period (2009-2018). Furthermore, four Climate Change Scenarios: RCP4.5 and RCP8.5, periods 2030-2059 and 2070-2099 were adopted to predict probable changes in the future. Results show the high spatial and temporal variability in the study zone with an average of 366 mm/a for the period. Moreover, due climate change a reduction in recharge from 20-60% is expected for the worst scenario (RCP8.5 2070-2099).

Palabras clave: recarga agua subterránea, SWB 2.0, ciclo hidrológico, infiltración, permeabilidad

Key words: groundwater recharge, SWB 2.0, hydrologic cycle, infiltration, permeability.

Introducción

Considerando la importancia del agua como elemento fundamental para la vida y el desarrollo de la población, se ha elaborado en el marco del programa EUROCLIMA+ un balance hídrico con enfoque de cambio climático para el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) como parte del proyecto “Incidiendo en gestión de ciclo hidrológico con enfoque en aguas subterráneas para adaptación al cambio climático en Área Metropolitana de San Salvador”. El ciclo hidrológico es considerado un continuo intercambio de agua entre la litósfera, la atmósfera y la biósfera.

De particular importancia se vuelve el estudio del balance de agua en cuencas urbanas, donde el abastecimiento de agua depende de la ocurrencia de este recurso en la misma cuenca. El fundamento del balance hídrico está en la ley de conservación de la masa [1]. Consiste en la contabilización de las entradas y salidas, cuya diferencia iguala el cambio en el almacenamiento de un sistema hidrológico para un período de tiempo determinado [2], como, por ejemplo, un acuífero, una cuenca o una subcuenca, e incluso un área de estudio como el AMSS.

El Balance Hídrico del AMSS ha sido desarrollado a partir de datos históricos de clima diario que comprende el período entre los años 2009 y 2018 y ha tomado en cuenta los mapas de uso de suelo, tipos y texturas de suelos,

*Autor para contacto: alex.chavez@opamss.org.sv

geología, hidrogeología y pendientes más actualizados de que se dispone, su análisis se considera representativo de las condiciones actuales. Asimismo, se ha elaborado el balance hídrico tomando en cuenta escenarios de cambio climático que incluyen las trayectorias de concentración representativas RCP4.5 y RCP8.5.

Uno de los términos del balance hídrico más complejos de estimar es la recarga de agua subterránea [1], especialmente cuando el conocimiento del funcionamiento del acuífero es limitado o incierto y se requiere cuantificar su variabilidad espacial y temporal. Con frecuencia los modeladores, planificadores y diseñadores de políticas para el manejo de acuíferos, obvian la variabilidad de la recarga y asumen un valor promedio para toda la cuenca, la cual es estimada como una fracción de la precipitación o es ajustada como parámetro de calibración en un modelo de simulación numérica [3]. Este tipo de estimaciones son útiles, sin embargo, cuando el fin es la planificación urbana, es de suma importancia que se conozca, además, la variabilidad espacial y temporal de dicho parámetro.

Materiales y Metodología

En climas húmedos como el del AMSS y en general, El Salvador, se utiliza con frecuencia el Balance de Humedad de Suelo para determinar la recarga hídrica potencial, debido a su amplio espectro de aplicación temporal y espacial [1]. En el AMSS, los antecedentes de estudios de Balances Hídricos indican que el método ha sido utilizado en distintas ocasiones, en general en una base de cálculo de lluvia mensual multianual. Con el objetivo de tomar en cuenta la variabilidad espacial y temporal de la recarga de agua subterránea, se usó el Software desarrollado por la USGS para el cálculo de la recarga hídrica potencial SWB 2.0 [4]. El SWB 2.0 es un modelo determinístico, quasi tridimensional basado en datos físicos del suelo y climáticos para la zona de estudio [3], el cual utiliza el método de Thornthwaite – Matter modificado para tener en cuenta el cambio en la humedad de suelo en una base diaria [5]. El SWB está integrado por tres reservorios que almacenan agua: nieve, intercepción y suelo. Para el caso de climas tropicales, el reservorio de nieve no es considerado; mientras que el reservorio de intercepción acumula agua interceptada diariamente por el dosel de los árboles y la vegetación, previo a su contacto con el suelo. Luego de extraer el agua interceptada del total de lluvia, se procede al cálculo de la escorrentía superficial, la cual se calcula mediante el método del Número de Curva del Natural Resources Conservation Service (CN).

La variación diaria en la humedad del suelo es modelada en el reservorio de suelo para el dominio del modelo discretizado mediante celdas de 20 m de lado de un ráster con profundidad igual a la zona radicular utilizando la ecuación de entradas (lluvias, mm), sumándole humedad del suelo en el día previo a la simulación en mm, menos la intercepción de la vegetación (mm), escorrentía superficial (mm), evapotranspiración real (mm). En esta ecuación se consideran los ingresos y salidas de humedad al reservorio, asimismo, es considerada la humedad del día antecedente mencionada anteriormente como una condición inicial para el día de simulación. Para el modelo de balance hídrico del AMSS se consideró el método de la Cubeta que asume que antes de que la precipitación alcance el suelo, un porcentaje constante de ella es atrapada en el dosel del árbol o en la vegetación, dejando ver que, para lluvias de baja intensidad, si el porcentaje necesario para alcanzar el suelo no es superado, toda la lluvia será interceptada.

En el SWB es posible utilizar los cuatro grupos hidrológicos de suelo estandarizados y utilizados en el medio salvadoreño (A, B, C y D) en un rango continuo que va de suelos que parte del grupo A, (suelos porosos de alta capacidad de infiltración), al grupo D (suelos de textura fina de baja capacidad de infiltración). El cálculo de la humedad del suelo para cada día de simulación en cada celda del modelo requiere de un conjunto de ráster diarios de lluvia, ráster diarios de temperatura máxima y mínima, dirección de drenaje superficial, así como uso y textura del suelo para los módulos de escorrentía, evapotranspiración e intercepción, según el caso. Asimismo, se requiere el ráster de textura y uso de suelo, los cuales se utilizan para el cálculo de la capacidad total de agua disponible. Para la evapotranspiración potencial o de referencia se usó el método de Hargreaves-Samani, por ser un método anteriormente utilizado en estudios previos del país para la determinación de la evapotranspiración de referencia.

Para la elaboración del balance hídrico tomando en cuenta las proyecciones de desarrollo urbano en el AMSS y escenarios de cambio climático que evaluó las trayectorias de concentración representativas RCP4.5 y RCP8.5 para 2 períodos, uno de mediano plazo 2030-2059 y otro de largo plazo 2070-2099, cuyos datos climáticos corresponden a las proyecciones reportadas en la Tercera Comunicación de Cambio Climático de El Salvador [6].

Resultados y Análisis

Los resultados del SWB permitieron la obtención del mapa de recarga hídrica potencial en el AMSS, que se presenta en la Figura 1 como un promedio del período comprendido entre los años 2009-2018. La variabilidad espacial de la recarga hídrica potencial muestra, por un lado, la importante contribución que tienen el volcán de San Salvador y el Cerro de San Jacinto a la recarga de agua subterránea en acuífero de San Salvador, del cual depende gran parte de la población. Por otro lado, destaca la baja recarga de las zonas urbanas, siendo contrario a la escorrentía, que resultó mucho mayor en este sector.

En promedio, para el período 2009-2018 la recarga potencial media de agua subterránea fue de 366 mm/a, los cuales representan el 19.1% de la precipitación. Por su parte la evapotranspiración real contabiliza en promedio 882 mm/a (46.4% de la precipitación) y la escorrentía superficial totaliza 435 mm/a (22.9%), los cuales junto a la interceptación de 194 mm/a (10.2% de la precipitación), suman 629 mm/a (33.1%). Las mayores precipitaciones se presentan en el volcán de San Salvador, superando en general los 2000 mm. Las mayores tasas de evapotranspiración real ocurren al norte y al sur de la cuenca, siendo coincidentes con las zonas más calientes, con más precipitación y de mayor evapotranspiración potencial. Adicionalmente, la variabilidad espacial de la escorrentía mostró la clara diferencia entre la zona urbana densamente desarrollada y la zona sin desarrollar o con nivel de desarrollo bajo. La recarga de agua subterránea es fuertemente sensible a la precipitación, este comportamiento es observable a partir de los resultados obtenidos para el período 2009-2018, en el cual ocurrieron una serie de años extremos hidrológicos: secos y lluviosos.

Figura 2. Recarga Acuífera más desfavorable, escenario RCP8.5 (2070-209) para el Área Metropolitana de San Salvador.

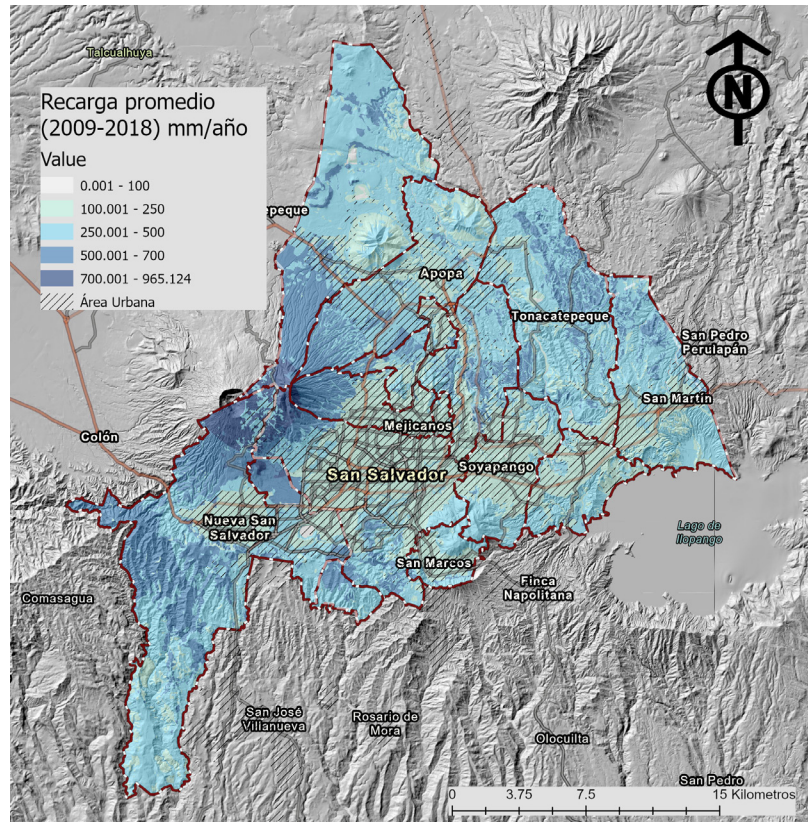
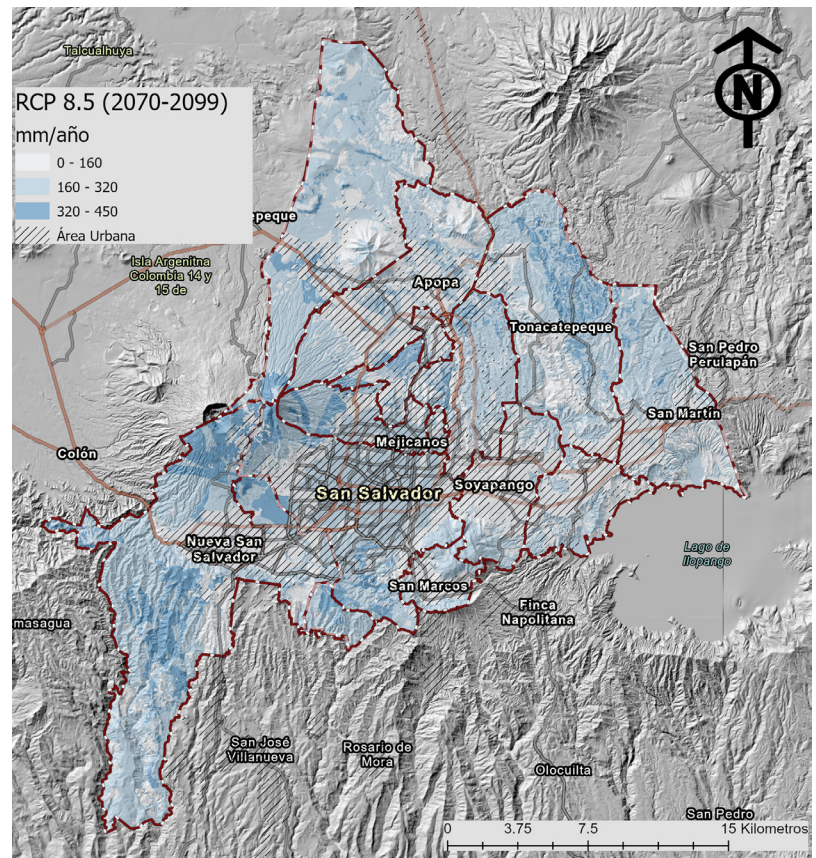


Figura 1. Recarga Acuífera promedio (2009-2018) para el AMSS, mostrando el área urbana (achurado).



Conclusiones

La variabilidad temporal y espacial que presentó la recarga de agua subterránea en el AMSS osciló entre 238 y 555 mm/a, mostrando su fuerte dependencia de la precipitación. Así, en los años más húmedos como 2010 y 2011, la recarga presentó valores máximos, lo cual a su vez se reflejó en ascensos en el nivel piezométrico de los pozos de monitoreo del AMSS. Mientras que en años secos como 2015, 2016 y 2017 (una de las mayores sequías de los últimos tiempos), la recarga resultó en valores mínimos, coincidiendo con los descensos en los niveles piezométricos de los mencionados pozos. Esta fuerte variabilidad de la recarga de agua subterránea, expone el gran valor que posee este recurso para enfrentar la variabilidad climática del AMSS, tal y como es reconocido a nivel mundial.

Los resultados de las proyecciones climáticas del balance hídrico del AMSS, indican reducción en todos sus componentes, lo cual es razonable considerando que se prevén reducciones de la precipitación que varían entre 14% bajo el escenario RCP4.5 para 2030-2059 y de 23% en el escenario RCP8.5 para el período 2070-2099. Los resultados indican que para el RCP4.5 en ambos períodos y para el RCP8.5 en el período 2070-2099, en la zona urbana, se tendrán las mayores variaciones, predominando los rangos de reducción de recarga entre 20% y 40%, mientras que en el volcán de San Salvador y zonas vegetadas perimetrales al AMSS, las reducciones podrían oscilar entre 20% y 60% dependiendo de la distribución de la lluvia en el año.

Referencias bibliográficas

1. Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 18-39.
2. Alley, W. M., La Baugh, J. W., & Reilly, T. E. (2005). Groundwater as an Element in the Hydrological Cycle. En M. G. Anderson & J. J. McDonnell (Eds.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences* (p. hsa153). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa153>
3. Dripps, W. R., & Bradbury, K. R. (2009). The spatial and temporal variability of groundwater recharge in a forested basin in northern Wisconsin. *Hydrological Processes*, 24(4), 383-392. <https://doi.org/10.1002/hyp.7497>
4. Westenbroek, S. M., Engott, J. A., Kelson, V. A., & Hunt, R. J. (2018). SWB Version 2.0—A soil-water-balance code for estimating net infiltration and other water-budget components (Report N.o 6-A59; Techniques and Methods). *USGS Publications Warehouse*. <https://doi.org/10.3133/tm6A59>
5. Barrera-de-Calderón, M., Garfias, J., Martel, R., & Salas-García, J. (2021). Estimación de la distribución espacio temporal de la recarga de agua subterránea en regiones húmedas con clima tropical. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-02-07>
6. MARN. (2018). Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (p. 203) San Salvador, El Salvador. Gobierno de El Salvador.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Estudio hidrogeológico de la sub-cuenca del Río Teocinte para determinar las áreas principales de recarga hídrica

Tomás Antonio Padilla Cámara^{a*}, Pedro Alejandro Soto Reyes^a, Jorge Luis Azzari Domínguez^a

^a Instituto de Investigaciones de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Abstract: In the volcanic region, research is important for water recharge to perform an analysis on the calculation of recharge in these areas. The research was carried out in the Teocinte river basin and covers an area of 72.3 km². In this research, the estimation of the potential recharge by means of the soil water balance has been considered. The meteorological records, which was integrated into a geographic information system and compared with the geomorphological map with this has designed the maps of sampling units, which we can compare in the field, the basic infiltration by means of the Porchet methodology, which we make comparisons of data that allows us to visualize and classify the areas of water recharge.

Palabras clave: Balance, suelo, lluvia, evapotranspiración, infiltración.

Key words: Balance, soil, rain, evapotranspiration, infiltration.

Introducción

A pesar de que el desarrollo y factores de la recarga a los acuíferos son concernientemente conocidos y avistados, la obtención de una estimación de manera certera hacia la magnitud de la recarga natural presenta aún enormes retos. Ellas radican en las características y secularidad de las condiciones climáticas, sobre todo en la presencia de lluvia y especialmente de la inestabilidad en función del tiempo, de los factores de zona carentes de saturación, materiales en medio poroso o figurado, tipo de cobertura vegetal, inclinación del terreno, humedad relativa y uso actual del suelo, esto con la finalidad del análisis del medio y la presencia geo estructural del terreno que viabiliza al proceso natural del agua, en relación a su escurrimiento y las propiedades físico químicas del medio subterráneo vinculado a su capacidad para la contribución a un acuífero con agua facultativa para los diferentes usos que promueven el desarrollo de una región.

La evaluación hidrogeológica de la subcuenca del río Teocinte, identifica un acuífero volcánico en tobas fracturadas, cuyo espesor es superior a los 200 metros [1]. El acuífero es semiconfinado, con permeabilidad media y abastece de agua potable a zonas importantes de la ciudad de Guatemala, así como a los municipios de San José Pinula y Palencia, por lo que es fundamental definir de forma correcta las áreas de recarga hídrica para su protección y manejo de parte de una gobernanza involucrada.

La subcuenca tiene un área de 72.3 km² y se localiza en las coordenadas geográficas de 14° 36'00" de latitud Norte y 90° 24'30" de longitud Oeste, comprendiendo municipios mayoritariamente de Palencia y San José Pinula del departamento de Guatemala.

*Autor para contacto: pasr717@gmail.com

Materiales y Metodología

La metodología en la cual se ha basado fue la propuesta por [2], separando las pérdidas por escurrimiento superficial y retención en bosques y cultivos, el cálculo de recarga potencial al acuífero (R_p) se determina como: $R_p = P_i + H_{s(i)} + H_{s(f)} + ETR$.

Donde P_i es la precipitación mensual que infiltra, H_s es la humedad del suelo, que es inicial (i) y final (f) y ETR es la evapotranspiración real [3].

Para la subcuenca del río Teocinte, el mapa geomorfológico se ha elaborado mediante la hoja geológica a detalle 1:50,000, elaboración de perfiles geológicos. La geomorfología tiene como fin la clasificación de las unidades geológicas, el análisis de la topografía en función de la pendiente y las características físicas del suelo: textura y profundidad efectiva. El mapa final se ha elaborado a una escala 1:55,000.

La cobertura vegetal fue determinada con ortofotos a escala 1:10,000 del año 2006, junto con el soporte de fotografías aéreas

mediante el software Google Earth Pro con la posterior comprobación de campo. La consideración de unidad mínima de mapeo considerada fue 6.25 ha.

Los resultados de las unidades de recarga hídrica natural, se ha establecido por medio de la sobreposición de las capas temáticas a semidetalle de geomorfología y uso actual de la tierra. Con base en estas unidades se realizaron las pruebas de infiltración con el método de Porchet [4] y el muestreo de suelos a nivel de campo, con el posterior análisis de laboratorio de la capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente.

Resultados y Análisis

Geomorfología

En la subcuenca del río Teocinte se distinguen cinco unidades geomorfológicas: Laderas volcánicas, Mantos piroclásticos, Graben de Pinula, Horst de Pinula y Valle del río Teocinte.

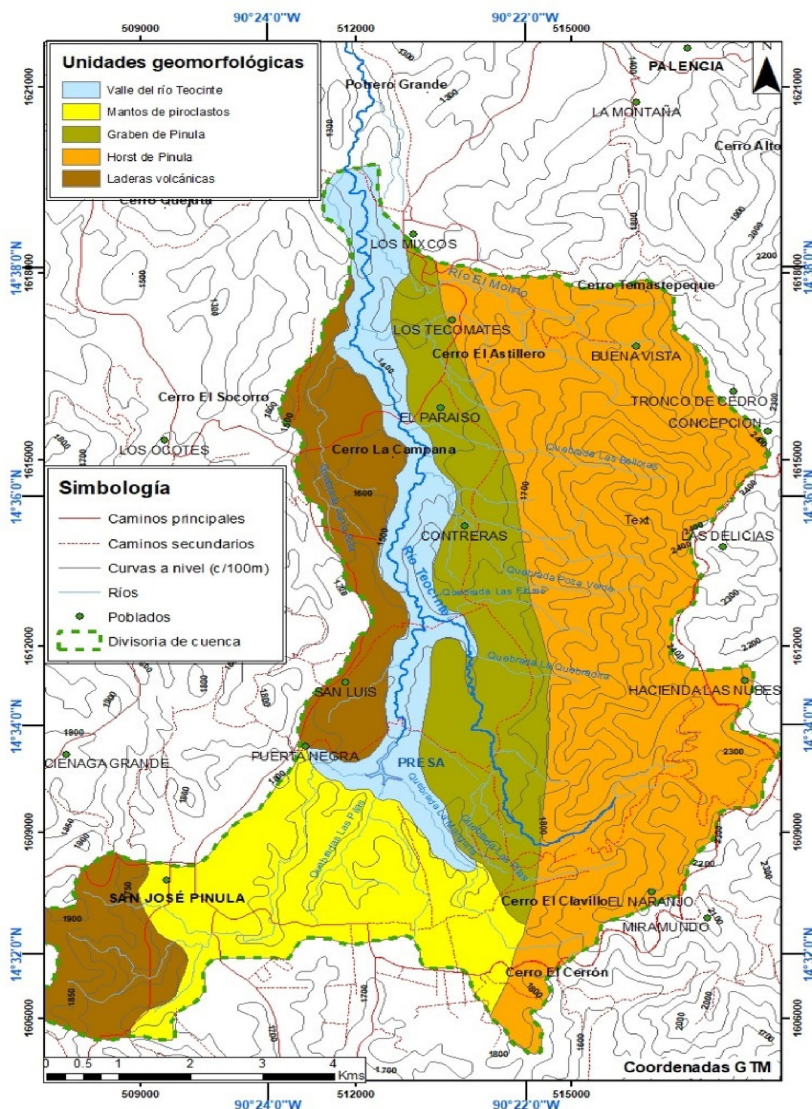


Figura 1. Mapa geomorfológico de la subcuenca del río Teocinte.

La unidad de laderas volcánicas se localiza en el parte Oeste de la subcuenca y representa el 14.4 % del área.

Se encuentra constituida por rocas volcánicas terciarias como tobas, basaltos y andesitas. La geomorfología típica corresponde a colinas y laderas, con pendientes entre 25 a 60%. Las elevaciones varían de los 1,400 a 1,900 msnm.

La unidad de mantos piroclásticos se ubica en la parte central de la subcuenca, caracterizándose por presentar suelos de la serie Guatemala, francos arcillosos, profundos, moderadamente drenados y desarrollados a partir de ceniza volcánica débilmente cementada sobre piroclastos de pómez. Las pendientes van de 0 a 12 % en las partes onduladas. Las elevaciones son por lo general de 1,400 a 1,500 msnm.

La tercera unidad corresponde a un graben o depresión Tectónica de Pinula, limitado por los pilares Santa Catarina Pinula al este, constituyendo el valle geotectónico de la ciudad de Guatemala (figura 1). Los sistemas de fallas de Mixco y Santa Catarina Pinula, son fallas normales y con orientación de Norte a Sur, fácilmente te identificables por sus escarpes de falla. Esta unidad está constituida por piroclastos de pómez, con suelos de la serie Guatemala, francos arcillosos y profundos. Las pendientes van de 18 a 50 % y las elevaciones de 1,400 a 1,600 msnm.

Dentro de la explicación local el sistema de fallas baja el piso de bloque en la parte Oeste y al Este la parte del techo que sube, formando respectivamente el Graben y el Horst de Pinula. En este ultimo las elevaciones van desde 1900 a 2400 msnm, siendo la parte más alta de la zona de estudio. Por otro lado, observar que las pendientes se mantienen de 50-75% de escarpe (figura 2).

Parte de los anteriores conceptos, se forma una porción de la misma en las cuales influye mucho la geo-estructura, juntamente con el transporte hídrico, precisamente del valle del río Teocinte, puesto que se encuentra a inmediaciones de dos relieves escarpados, que influyen dentro de la escorrentía y de las fallas geológicas, a una zona de drenaje, que por efecto de arrastre estas forman planicies y desencadena un relieve característico.

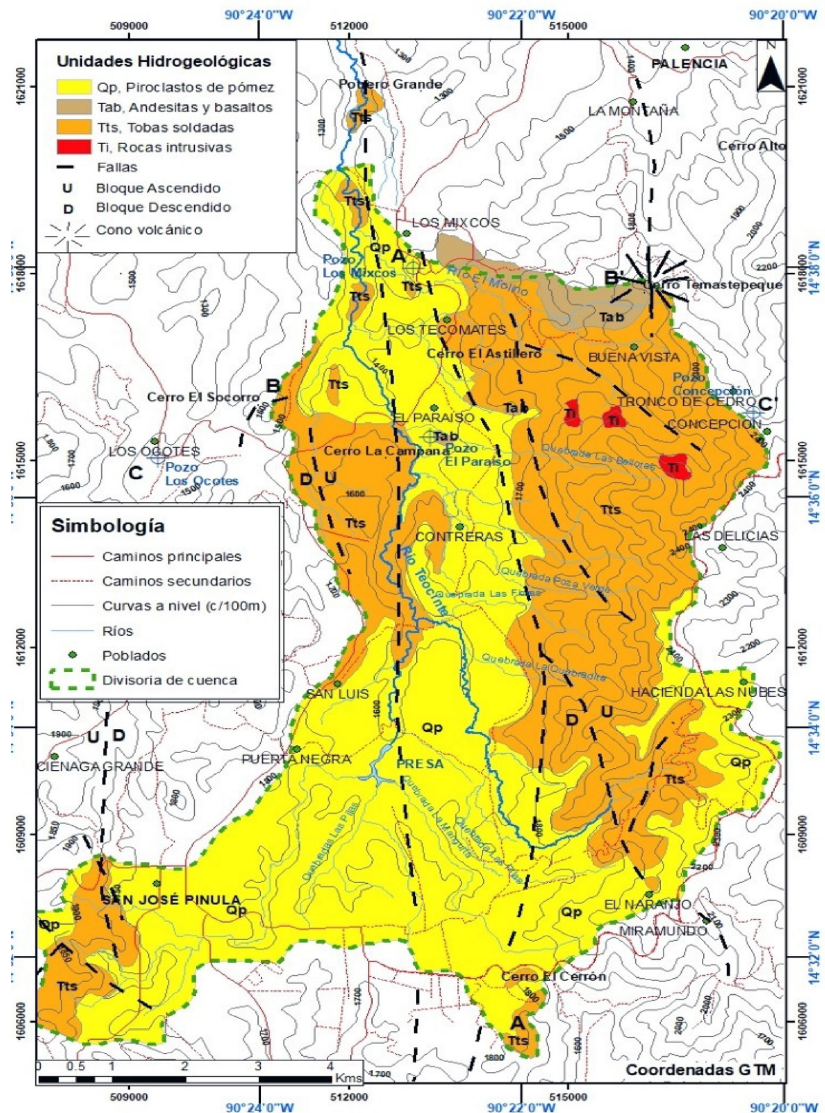


Figura 2. Mapa geológico/hidrogeológico de la subcuenca del río Teocinte.

Uso de la tierra

En la subcuenca del río Teocinte, predomina la cobertura de bosque de coníferas y encino (bosque mixto), con un área de 38.4 km² que corresponde a un 53.11%, seguido por el área con cultivos anuales de maíz y hortalizas, con una extensión de aproximadamente de 16.83 km², que equivale a un porcentaje de 23.38% así como, áreas de pasto que representan 11.21 km², con una extensión de 15.50%, aunado esto el uso actual de la tierra de la subcuenca del río Teocinte se encuentra zonas urbanas con un área de 4.66 km², equivalentes a 6.44%. El resto de la superficie de la subcuenca es de 1.20 km² equivalentes a 1.66 %, donde se ubica en la aldea de San Luis Letrán Comprendiendo el municipio de San José Pinula.

Clima

Los valores de lluvia de la parte alta de la subcuenca son de 1318 mm, representados por la estación climática Concepción Pinula (Cuadro 1), mientras que en la parte media se presentan aproximadamente de 1588 mm por año en la estación San José Pinula (Cuadro 2) y por otro lado, los valores de precipitación en la parte baja de la subcuenca muestran comportamientos de 996,2 mm, representados por la estación climática de Palencia (Cuadro 3).

Recarga hídrica

Con la sobreposición de las unidades de los mapas de geomorfología y uso actual del suelo, se han generado 19 unidades de recarga hídrica, a las cuales se les realizó su respectivo cálculo de lámina de recarga potencial y se ha estimado un volumen de recarga en la subcuenca de 7,17 millones m³/año.

Cuadro 1. Datos meteorológicos de la estación climática Concepción Pinula

2019-2021	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Lluvia (mm)	0.8	0	0	68.3	210	287	173	309	174	20	38.5	39.1	1318
T (°C)	22.2	23.5	24	23.5	24.3	23.8	24	23.1	23.8	23	22.5	22.9	23.4
HR (%)	41.2	46	40	35.6	46.4	48	48.3	49.6	48	43	42.6	39.6	44
ETP (mm)	152	151	191	198	202	191	198	192	187	184	163	152	2160

Cuadro 2. Datos meteorológicos de la estación climática San José Pinula

2019-2021	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Lluvia (mm)	2	1	3	50	248	255	262	191	334	180	63	0	1588
T (°C)	15.51	17.71	17.1	18.39	18.06	18.14	17.95	18.06	17.84	17.18	16.57	16.01	17.37
HR (%)	81.12	74.06	76.24	78.31	84.76	86.74	83.27	89.84	94.08	95.2	92.6	91.34	85.63
ETP(mm)	87.1	102.2	123.2	131.7	128.0	120.9	131.2	112.4	89.7	76.9	71.4	70.0	1244.64

Cuadro 3. Datos meteorológicos de la estación climática Palencia

2019-2021	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Lluvia (mm)	1.8	1.0	0.0	41.4	159.0	159.0	43.4	52.1	216.5	308.5	9.6	3.9	996.2
T (°C)	19.4	20.6	18.7	20.6	19.9	21.5	22.1	21.1	20.9	20.8	18.3	19.1	20.2
HR (%)	78.9	75.8	72.2	73.1	82.5	85.5	81.3	82.9	86.5	89.7	84.0	81.9	81.2
ETP (mm)	99.9	108.6	138.4	150.9	147.3	137.3	145.8	241.1	205.0	102.6	90.9	91.8	1659.7

De acuerdo a la metodología desarrollada por [5], se obtuvo la categorización de los resultados de recarga hídrica específica anual de cada unidad. Las unidades se clasifican como: altas áreas de recarga hídrica, con volúmenes de recarga hídrica entre 150,000 a 300,000 m³/km², medias oscilan entre 50,000 a 150,000 m³/km², las bajas áreas de recarga, presentan volúmenes menores de 50 000 m³/km² (figura3).

Conclusiones

La recarga total anual de las aguas subterráneas que se produce en la subcuenca de 72.3 km², es mayor de siete millones de metros cúbicos por año y tiene lugar principalmente en las partes altas de recarga hídrica lo cual representa el 83% de área de la subcuenca.

Los parámetros hidrogeológicos presentan valores de transmisividad y conductividad hidráulica bajos, con un coeficiente de almacenamiento típico de un acuífero semiconfinado.

La geología del área de estudio consiste principalmente de rocas volcánicas. La unidad volcánica está formada por rocas fracturadas de tobas soldadas que forman la saturación del área y forman el acuífero local. Así mismo de una capa superficial de piroclastos de pómez de aproximadamente 80 metros.

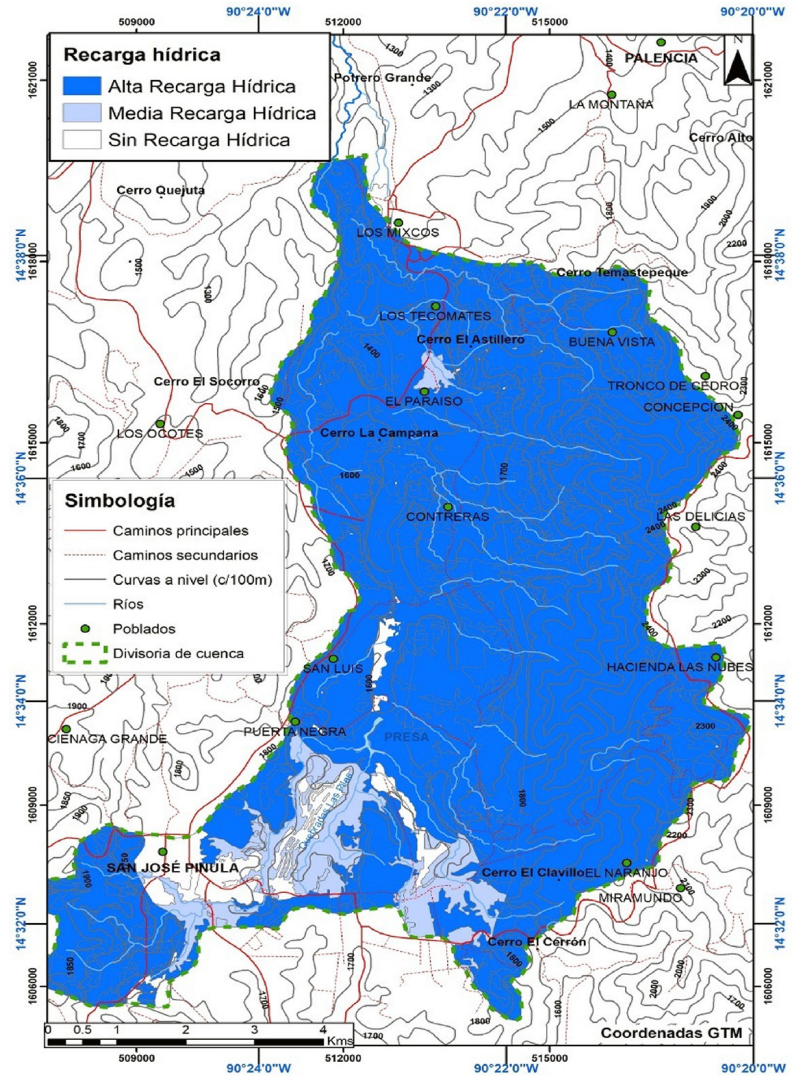


Figura 3. Mapa de áreas de recarga hídrica de la subcuenca del río Teocinte.

Referencias bibliográficas

- Herrera, I. (2012). Estudio hidrogeológico de la sub-cuenca del río Los Ocotes, para determinar las áreas principales de recarga hídrica e identificación de las áreas vulnerables a deslizamientos e inundaciones para proponer alternativas de prevención de la parte noreste de la ciudad de Guatemala. (FODECYT No. 2009.35). Guatemala: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía.
- Herrera, I., & Brown, O. (2011). Propuesta de una metodología para la estimación de áreas de recarga hídrica en Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(4) 48-52.
- Schosinsky, G. (2006): Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central* (34-35),13-30.
- Sanders, L. (1998). A Manual of Field Hydrogeology. Northeastern Illinois University. Prentice-Hall.
- Herrera, I. (2005). Estudio hidrogeológico de la parte norte de la caldera del lago de Atitlán, Guatemala. Trabajo presentado en el Congreso Internacional de Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos. Managua, Nicaragua.



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022

ECG Escuela Centroamericana
 de Geología

Arsénico en aguas subterráneas en cuatro sitios seleccionados de Costa Rica

Ingrid Vargas-Azofeifa^{a*}, Melvin Alpízar Marín^b, Nancy Mollinedo García^c, Marco Araya Oviedo^c,
 Viviana Ramos Sánchez^d, Darner Mora Alvarado^e, Azucena Urbina Campos^e

^aEscuela Centroamericana de Geología

^bCentro de Investigación en Contaminación Ambiental, Universidad de Costa Rica

^cProfesional independiente,

^dUEN Gestión Ambiental

^eLaboratorio Nacional de Aguas, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA)

El arsénico es un metaloide que puede presentarse en el agua subterránea en condiciones geológicas e hidrogeoquímicas particulares. El estudio del origen del arsénico y los mecanismos por los cuales se disuelve en el agua subterránea es muy importante, debido a que el consumo prolongado de agua con concentraciones superiores al valor máximo admisible (VMA) para el consumo humano, 10 $\mu\text{m/L}$, afecta la salud de las personas debido a la toxicidad del elemento. Por lo tanto, es necesario realizar investigaciones que contribuyan a la búsqueda de soluciones y la prevención de la salud.

Se estudiaron las zonas de Aguas Zarcas, San Carlos, el Amparo en Los Chiles de Alajuela, Cañas-Bagaces y La Cruz en Guanacaste, debido a que en algunos pozos y manantiales ubicados en estas regiones, se reportaron concentraciones de arsénico en agua subterránea superiores al VMA. Es importante indicar que en los sitios de interés todos los sistemas de abastecimiento ya fueron atendidos oportunamente.

El estudio incluyó una planificación previa y selección de sitios para el muestreo de aguas subterráneas, la recolección de muestras de agua, rocas, suelos y su respectivo análisis de laboratorio. En el campo se midieron los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura, alcalinidad y potencial redox (Eh); posteriormente, las muestras se preservaron y enfriaron para el traslado a los laboratorios donde se determinaron las concentraciones de los iones mayores (cloruro, bicarbonato, sulfato, calcio, magnesio, sodio, potasio), además de nitrato, nitrito, fosfato, fluoruro, bromuro, metales pesados (cobre y aluminio) y elementos traza incluyendo al arsénico total. Además, se realizó una filtración en el campo usando dispositivos descartables para retener el arsénico (V), y calcular la especiación del elemento.

El objetivo de este trabajo es identificar las semejanzas de los sitios en donde se ha detectado arsénico en el agua subterránea para establecer rasgos característicos que ayuden a entender las condiciones geológicas e hidrogeológicas que favorecen la presencia de especies químicas que afectan la calidad del agua subterránea. En los cuatro sitios estudiados se determinó que el origen del arsénico en el agua subterránea es geogénico, asociado con las condiciones geológicas existentes, las cuales se caracterizan por la presencia de rocas volcánicas, zonas de fallamiento activo donde con frecuencia hay mezcla de aguas meteóricas con aguas termales. Estos resultados son parte del proyecto “Caracterización hidrogeoquímica y determinación del origen de arsénico en aguas de consumo humano en sitios seleccionados de Costa Rica”, 802-B3-515, de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica y se realizó en el marco del Convenio específico de cooperación técnica entre la Universidad de Costa Rica y el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.

*Autor para contacto: ingrid.vargas@ucr.ac.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Gestión de zonas prioritarias de protección del recurso hídrico

José Alexander Chávez^{a*}, Ingrid Alfaro^b, Marcia Barrera-de-Calderón^b

^aOficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, San Salvador, El Salvador.

^bEscuela de Posgrado y Educación Continua, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador, El Salvador.

Abstract: Engineering geological mapping in the Metropolitan Area of San Salvador has been carried on since 2008 in order to improve the decision making and knowledge of risky areas prone to developing pressure. A 1:50,000 scale map of the whole area and in some areas scale 1:10,000 are available. Most problematic areas are related to young tephra on erosion/tectonic hillsides, areas of scarps, flood plains. The maps provide areas with the same lithological, geomorphological and risk characteristics. This information gives zoning and geotechnical recommendations for planning and construction actors in the city for decreasing problems related to mass movements, erosion, floods and earthquakes.

Palabras clave: recarga, vulnerabilidad, hidrogeología, gestión, zonificación.

Key words: recharge, vulnerability, hydrogeology, management, zoning.

Introducción

Se ha realizado un levantamiento de información hidrogeológica para realizar mapeo y propuesta del plan de gestión de zonas prioritarias de protección de recarga y vulnerabilidad a la contaminación en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), esto en el marco del programa EUROCLIMA+ “Inciendiando en gestión de ciclo hidrológico con enfoque en aguas subterráneas para adaptación al cambio climático en Área Metropolitana de San Salvador”. Para construir la propuesta se combinó información hidrogeológica como nivel piezométrico, tipos de acuíferos y litología; así como el mapa de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea elaborado mediante el método GOD [1]. Además, se tomó en cuenta los usos de suelos, así como balance hídrico de suelos mediante un paso de tiempo diario para un período de 10 años y con una resolución de celdas de 20 m y su mapa de recarga acuífera, que sirve de fundamento para elaborar el plan de gestión de zonas de recarga hídrica. Dentro AMSS hay acuíferos volcánicos porosos y fracturados con productividades que varían entre mínima y alta. Los materiales porosos corresponden a piroclastos y tobas pleistocénicas, mientras que los materiales fracturados corresponden a flujos de lavas del cuaternario y rocas pliocenas constituidas por aglomerados, tobas densas y lavas del terciario. En los puntos de contacto geológico afloran importantes manantiales que son utilizados para el abastecimiento de la población desde los años 60. Los acuíferos más productivos corresponden a los fracturados, que suelen consistir en una serie de materiales porosos y fracturados intercalados que se extienden casi siempre, desde el volcán de San Salvador hasta la margen izquierda del río Acelhuate y río Tomayate, el primero se alinea con fallas geológicas previamente identificadas y asociadas con barreras de flujo, aunque también algunas fallas con orientación noroeste sureste actúan como conductos de flujo (M. Barrera-de-Calderón et al., 2021)[1].

*Autor para contacto: alex.chavez@opamss.org.sv

Materiales y Metodología

Entre la información que se ha utilizado para la propuesta está el mapa de recarga de agua subterránea del AMSS, que fue elaborado como parte del Balance Hídrico con escenarios de cambio climático [2]. La recarga hídrica potencial fue determinada utilizando el método de Thornthwaite -Matter modificado, utilizando el modelo Soil Water Balance - SWB versión 2.0 [3] en un paso de tiempo diario, para un período de 10 años (2009-2018). Para la determinación del balance se consideró el mapa actualizado de usos de suelo del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), adicionalmente se tuvo resultados de 86 ensayos de permeabilidad distribuidos en todo el AMSS con el Permeámetro de Guelph. Este mapa de recarga, es la base para la delimitación de zonas prioritarias de protección de agua subterránea en el AMSS. Para los resultados de la vulnerabilidad intrínseca del AMSS se utilizó el método GOD (Groundwater occurrence, Overall aquifer class and Depth of water) [1] la vulnerabilidad alta y extrema se presenta en los cauces y márgenes de ríos principales/ secundarios, así como en la margen del lago de Ilopango. El resto del AMSS refleja que la vulnerabilidad a la contaminación es moderada. El mapa hidrogeológico del AMSS [4], contiene información actualizada sobre los niveles piezométricos y dirección de flujo en la zona. Siendo muy variables con profundidades de más de 100 m en las zonas de recarga e intermedia, hasta un par de metros e incluso aflorar a la superficie en las zonas de descarga. Además, ayuda a clasificar el material del estrato suprayacente para la evaluación de la vulnerabilidad acuífera (figura 1).

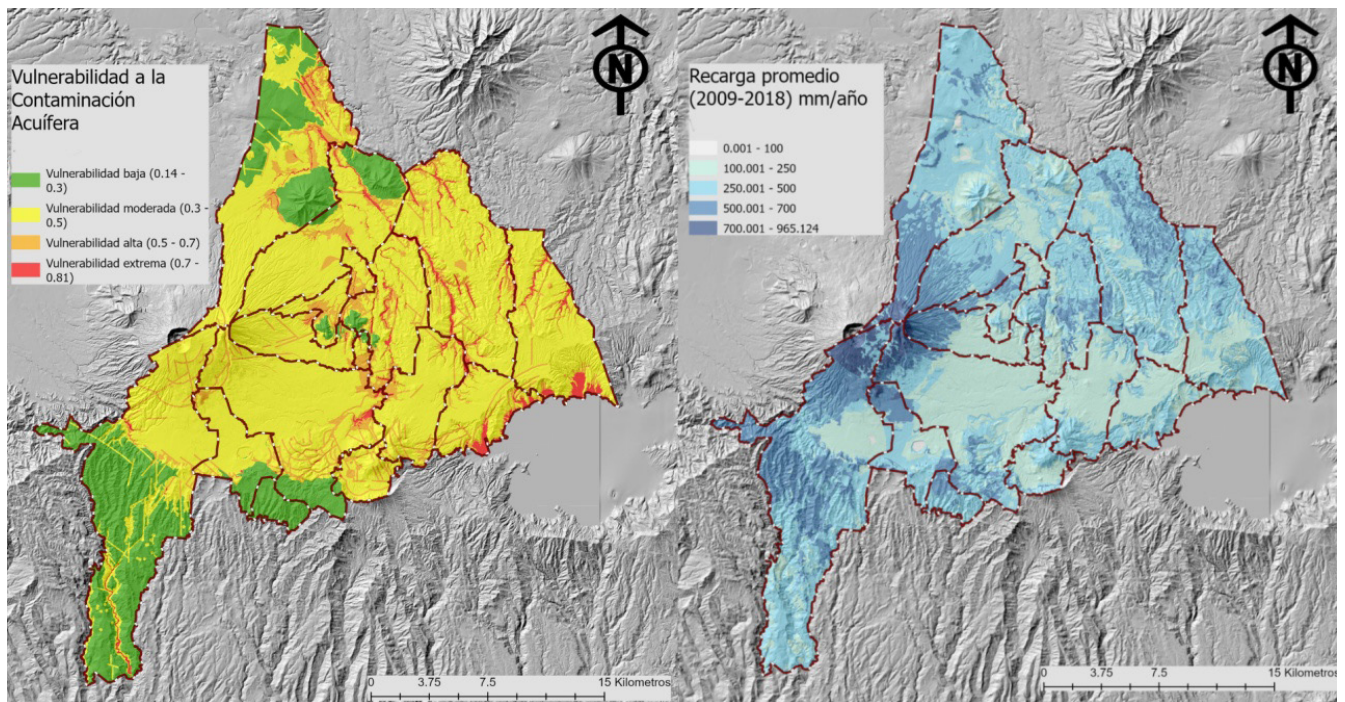


Figura 1. Mapa de vulnerabilidad acuífera y de recarga promedio, insumos para gestión hídrica

Resultados y Análisis

Para zonificar se seleccionó un total de cuatro criterios de protección de zonas de recarga, los cuales tienen viabilidad de ser medidos en la zona y representan condiciones que influyen en la protección de recurso hídrico (Cuadro 1). Estos se encuentran fundamentados en la cantidad de recarga respecto al promedio de la cuenca (366.42 mm/año), la conexión del área de recarga a fuentes de abastecimiento, el uso del suelo y la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.

Estos criterios fueron integrados en el Índice de Protección de Recurso hídrico (IPR), que se puede calcular a partir de la Ecuación 1. En el Cuadro 1 se presenta el detalle de cada factor ponderado por criterio, así como el peso asignado a cada nivel de influencia en la recarga.

$$IPR = FRRA + FC FCO + US FUS + VCA FVCA \quad \text{Ec. 1}$$

- IPR* = Índice de zona de protección de recurso hídrico
FR = Factor del porcentaje de recarga respecto al promedio del AMSS
RA = Peso del nivel de influencia de porcentaje de recarga media
FC = Factor de influencia de la conexión a masas de agua en la recarga
Fco = Peso del nivel de influencia de la conexión a masas de agua
US = Factor de influencia del uso de suelo en la recarga
FUS = Peso del uso de suelo en la recarga
VCA = Factor de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea
FVCA = Peso del grado de vulnerabilidad a la contaminación en la recarga

Cuadro I

Factores de ponderación y valoración del nivel de influencia por criterio para la determinar el índice de protección de recarga IPR.

Criterio	Factor de ponderación	Elevado	Medio	Bajo	Sin influencia significativa	FZP máximo	FZP mínimo
Peso del nivel		1	0.67	0.33	0		
Valor de la recarga media anual (FR)	0.3	> 50% de Rprom (RA)	Entre el 26%-50% mayor a Rprom (RA)	Supera hasta en 25% la recarga promedio (RA)	Menor a la recarga media de la cuenca (RA)	0.3	0
Área de recarga con conexión a cuerpos de agua superficial, acuíferos o humedales que sirven como fuente de abastecimiento a las poblaciones (FC)	0.25	Posee descarga a un gran número de fuentes de agua utilizadas por la población su abastecimiento y/o descarga como caudal base a ríos. Renueva el agua a un acuífero de alta productividad (Fco)	Posee descarga a algunas fuentes de agua utilizadas por la población para su abastecimiento y/o descarga a manantiales que aportan al caudal base de ríos. Renueva el agua a un acuífero de productividad media (Fco)	Posee descarga a pocas fuentes de agua utilizadas por la población para su abastecimiento. Puede presentar algunos manantiales que aportan al caudal base de ríos Renueva el agua a un acuífero de productividad media a baja (Fco)	Sin fuentes de abastecimiento de agua que dependan del área (Fco), no corresponden a cabeceras de cuenca	0.25	0
Ocupación actual del suelo (US)	0.25	Bosque primario, secundario, cultivo de café o pasto natural que promueve la infiltración y reduce la escorrentía reduciendo el riesgo por inundación (FUS)	Posee vegetación permanente que promueve la infiltración y reduce la escorrentía reduciendo el riesgo por inundación (FUS)	Posee vegetación estacional principalmente agrícola (FUS)	Zonas urbanas e impermeabilizadas (FUS)	0.25	0
Localización en áreas vulnerables a la contaminación (VCA)	0.2	El área de recarga se localiza en una zona con vulnerabilidad alta a extrema y la contaminación del agua subterránea (FCA)	El área de recarga se localiza en una zona con vulnerabilidad media a la contaminación del agua subterránea (FCA)	El área de recarga se localiza en una zona con vulnerabilidad baja a la contaminación del agua subterránea (FCA)	No hay valor asignado a esta categoría	0.2	0.07
Suma	1					1	0.07

Resultados y Análisis

El rango del IPR se encuentra entre 0.07 y 1.0 y se clasifica en cuatro niveles de protección de zonas de recarga (figura 2): Las zonas de protección máxima por sus características físicas y climáticas, contribuyen mayoritariamente a la recarga de agua subterránea en el acuífero. Principalmente, corresponden a bosques primarios y secundarios o

bosques de café localizados en la parte alta de las microcuencas que renuevan el agua subterránea aprovechada en pozos y manantiales localizados en las zonas de descarga o zonas de flujo intermedio del acuífero. Algunas zonas coinciden con fallas o estructuras geológicas por las que podrían ingresar contaminantes al acuífero, afectando su calidad. En el proceso de desarrollo urbano sostenible estas áreas deberían conservarse al máximo, o de intervenirse, debería procurarse el desarrollo de actividades con potencial contaminante reducido y que continúen aportando igual o mayor recarga media que sin intervención.

Las zonas de protección media contribuyen a la recarga de agua subterránea en el acuífero, pero en menor medida que las de protección máxima. Son zonas con vegetación permanente que favorece la infiltración y reduce la escorrentía. Están localizadas en la parte alta de las microcuencas que renuevan el agua subterránea aprovechada en algunos pozos y manantiales en las zonas de descarga o zonas de flujo intermedio del acuífero o solo contribuir a la renovación del flujo de agua subterránea en zonas aún sin desarrollo avanzado de recursos hídricos. Además, pueden corresponder con zonas de vulnerabilidad media a la contaminación del agua subterránea. Estas áreas deberían protegerse para mantener su aporte a la recarga hídrica, y protegerse del ingreso de contaminantes para la sostenibilidad del abastecimiento de los usuarios.

Las zonas de protección baja contribuyen a la recarga de agua subterránea en el acuífero, pero en menor medida que las de protección media. Son zonas

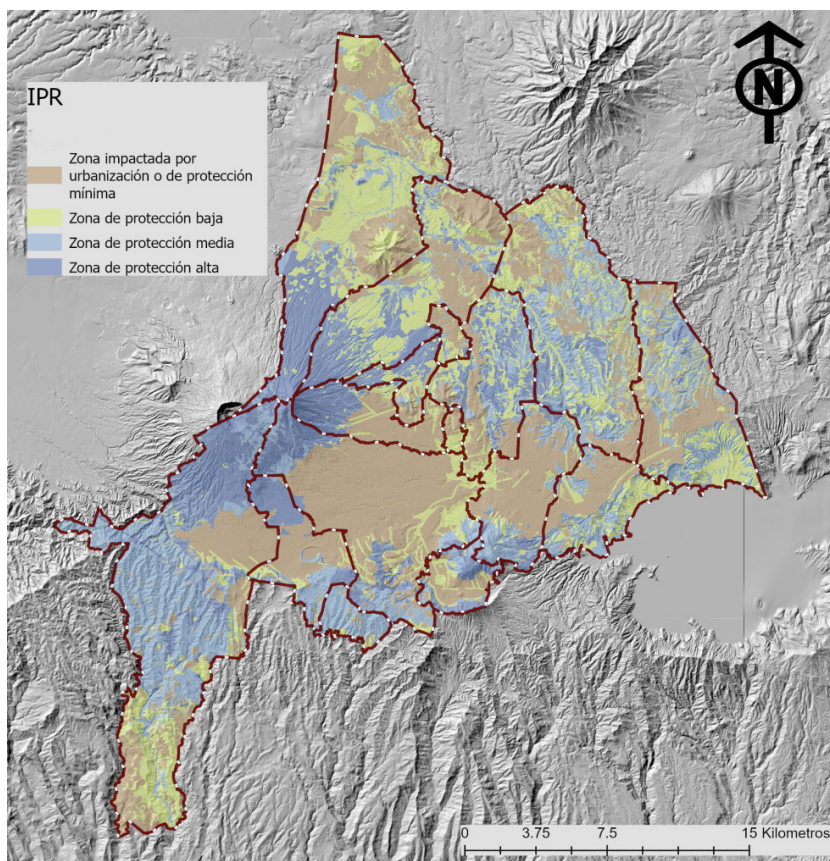


Figura 2. Mapa de protección de recurso hídrico.

con cultivos estacionales. Esta zona contribuye a la recarga de agua subterránea aprovechada por pocos pozos y manantiales para beneficio de los usuarios del agua. Algunas de estas zonas coinciden con estructuras geológicas localizadas en zonas urbanas, donde la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea puede ser de media a extrema. Estas áreas deberían protegerse del ingreso de cargas contaminantes que puedan afectar la sostenibilidad del acuífero y procurar el ingreso equivalente de la recarga generada por el espacio.

Las zonas impactadas por urbanización o de protección mínima son las zonas urbanizadas del AMSS, que con sus espacios verdes contribuyen en menor porcentaje a la recarga de agua subterránea, sin embargo, en esta zona debe evitarse el vertido de contaminantes al acuífero ya que representan un peligro de suma importancia que puede afectar la calidad del agua subterránea y por consiguiente el abastecimiento de los usuarios.

Conclusiones

Gracias al cruce de información de recarga acuífera y vulnerabilidad a la contaminación se ha podido priorizar zonas de interés para la gestión de los recursos hídricos. El desarrollo de criterios para la delimitación de zonas de protección hídrica requiere de un análisis integral del marco normativo y las acciones de protección ambiental de

las instituciones. Además, se necesita un esfuerzo tanto de las entidades privadas como públicas y posiblemente la creación de mecanismos económicos para incentivar la protección por medio de los propietarios de los territorios a conservar. En las áreas de mayor importancia deberían conservarse al máximo, o de intervenir, debería procurarse el desarrollo de actividades con potencial de generación de carga contaminante reducida que continúen aportando igual o mayor recarga media que sin intervención. En zonas de protección alta y media, como compensación por nuevos desarrollos, podrían implementarse medidas de recuperación utilizando técnicas de manejo de suelos y agua para aumentar la recarga, lo cual a su vez podría tener impacto positivo en la reducción de la escorrentía. Estas medidas no deberían implementarse en áreas con riesgo de flujo de escombros, licuefacción o asentamiento a menos que se cuente con estudios técnicos- científicos que demuestren su viabilidad. La efectividad de las acciones de protección que se deriven de esta propuesta deberían monitorearse en cuanto a su efectividad en la disponibilidad de agua del AMSS.

Referencias bibliográficas

1. Foster, S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. n: Van Duijvenbooden, W. and Van Waegeningh, H.G., Eds., *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*, Committee on Hydrological Research, The Hague, 69-86.
2. Barrera-de-Calderón, M. L. (2021). Balance Hídrico del AMSS Elaboración de balance hídrico con enfoque de cambio climático., p. 86). Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador.
3. Westenbroek, S. M., Engott, J. A., Kelson, V. A., & Hunt, R. J. (2018). SWB Version 2.0—A soil-water-balance code for estimating net infiltration and other water-budget components (Report N.o 6-A59; Techniques and Methods). USGS Publications Warehouse. <https://doi.org/10.3133/tm6A59>
4. OPAMSS. (2021). Mapa Hidrogeológico del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS) [Mapa].



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Estudio hidrogeológico y de recarga en la cuenca del lago de Atitlán (Guatemala)

Luis Iván Girón Melgar^{a*}, Miguel Ángel Hernández^b, Laura Núñez Álvarez^b,
Ricardo Gutiérrez López^b, José Ismael Ordoñez^a, Berta Morales^b, Josefina Muñoz^b

^aAsociación Vivamos Mejor, Guatemala

^bGeólogos del Mundo, Cataluña

El Estudio y mapa hidrogeológico de la cuenca del Lago de Atitlán a escala 1:25.000 muestra una síntesis de las características hidrogeológicas de los materiales presentes en la cuenca y, por otro lado, el mapa de recarga acuífera identifica las zonas de mayor infiltración o recarga de los acuíferos existentes en la cuenca del lago Atitlán. Por lo tanto, la realización de estos mapas constituye un avance en el conocimiento del recurso hídrico subterráneo en la cuenca del lago de Atitlán.

El proyecto GARICLA III fortaleció el conocimiento técnico de las entidades locales, instituciones, mancomunidades y alcaldías, en el marco de la gestión hídrica subterránea. Este fortalecimiento se establece mediante las herramientas (mapas hidrogeológicos y de recarga) que permiten la elaboración de estudios técnicos que conformen instrumentos para su aplicación en las políticas de gestión de recurso hídrico subterráneo.

Los mapas hidrogeológicos en la cuenca del lago Atitlán se enmarcan en un contexto geológico volcánico y, en menor medida, en un contexto de cuenca sedimentaria. Debido a la diversidad de tipos litológicos y génesis de las formaciones volcánicas y sedimentarias en la cuenca del lago de Atitlán, ésta presenta características hidrogeológicas muy variables. Los principales factores que van a determinar las características hidrogeológicas de la cuenca son el tipo de volcanismo, la distancia desde el centro de emisión, la tectónica, los efectos de la edad y la presencia de materiales no volcánicos interestratificados (Custodio, 1986).

La cartografía sistemática de los mapas hidrogeológicos de la Cuenca del Lago Atitlán a escala 1:25.000, precisa, como base fundamental, los mapas geológicos y geomorfológicos elaborados durante la primera fase del proyecto GARICLA. La aportación de dichos mapas es fundamental para la elaboración de un mapa hidrogeológico.

La información previa relativa a las aguas subterráneas en la cuenca del lago de Atitlán es escasa, y por lo tanto, existen pocos datos hidrogeológicos, incluyendo estudios, sondeos de perforación, ensayos de bombeo y monitoreo de las aguas subterráneas y de precipitación, que aporten datos y favorezcan el conocimiento hidrogeológico en la cuenca.

En base a la información obtenida durante el proyecto (inventario de puntos de agua, SEV, análisis físico-químicos, etc), se concluye que la heterogeneidad hidrogeológica en la cuenca del lago de Atitlán es muy alta, alcanzando una secuencia de acuíferos multicapas, en ocasiones conectados y en otras totalmente aislados y colgados.

*Autor para contacto: ivan@vivamosmejor.org.gt



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos utilizando los sistemas de información geográfica, Pacífico Central de Costa Rica, provincias de Puntarenas y San José

Alonso Alfaro Martínez^{a*}, Marita Alvarado^a, Michelle Arias^a,
Katherine Briones^a, Jonathan Chinchilla^a, Magdalena Monge^a

^a Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento

Abstract: For an area of 1750 km² in the Pacific of Costa Rica, five sectors were divided to apply the methodology of potential aquifer recharge through a soil water balance, where the calculation units were the geological units, which were characterized with the parameters field capacity, wilting point and bulk density. Based on the climatic information, the annual average precipitation and the annual average potential evapotranspiration were estimated, with the use of the soil as a fundamental input and using the geographic information system, it is carried out in map algebra and a distribution of the potential recharge is obtained annual average in the study area categorized into five ranges (very low, low, medium, high and very high).

Palabras clave: acuíferos, recarga potencial, balance hídrico, sistemas de información geográfica.

Key words: aquifers, potential recharge, hydric balance, geographic information systems.

Introducción

La zona de estudio se extiende desde el sector de Herradura al NW de Herradura (cantón de Garabito); hasta la franja de Punta Mala al NE de Ojochal-Tortuga (cantón de Osa) en la zona sur de la costa Pacífica de Costa Rica en un área de 1749,5 km², con una longitud de 135 km de NW a SE y la elevación máxima de la zona de estudio es de 2116 m.s.n.m. en el Cerro San Jerónimo y la elevación mínima es de 0 m.s.n.m. en la costa de toda el área. Geográficamente se sitúa entre las coordenadas 1000740-1078350N y 425300-545950W de la cuadrícula CRTM05 (figura 1). La escala de trabajo es 1:100000.

Objetivo general

- Determinar el potencial hídrico de los acuíferos existentes en las partes bajas de las cuencas Herradura-Jacó, Hermosa-Esterillos, Parrita, Damas-Quepos, Naranjo-Savegre-Matapalo y Dominical-Ballena, con miras en la protección del recurso y la gestión adecuada para el abastecimiento de poblaciones en la zona.

*Autor para contacto: alonsoalfarom@gmail.com

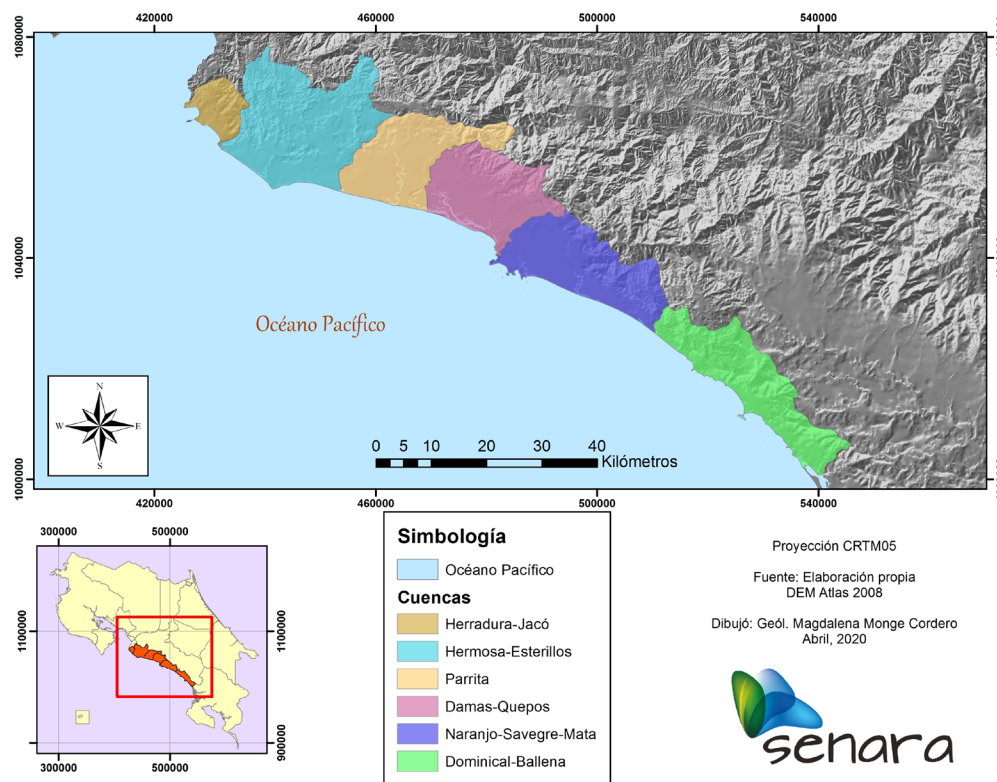


Figura 1.
Mapa de ubicación.

Objetivos específicos

- Elaborar el modelo hidrogeológico conceptual para las partes bajas de las cuencas Herradura-Jacó, Hermosa-Esterillos, Parrita, Damas-Quepos, Naranjo-Savegre-Matapalo y Dominical-Ballena y establecer las características hidráulicas de los acuíferos.
- Estimar la recarga potencial de agua a los acuíferos y la disponibilidad hídrica para el abastecimiento poblacional.

Metodología

La metodología de trabajo es la siguiente:

Definición de la geología y las estructuras geológicas.

Se hizo un trabajo de campo para levantar afloramientos y se definieron unidades locales geológicas y las estructuras regionales.

Recopilación y análisis de la información hidrológica.

Se recopiló del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), SENARA, AyA, el MINAE y las ASADAS la información hidro-meteorológica disponible para la zona de precipitación promedio mensual y la temperatura media mensual.

Mapa de uso del suelo.

Con base en las imágenes de satélite y el trabajo de campo se construyó el mapa de uso de suelo, insumo fundamental en la metodología de recarga.

Definición de las unidades para el balance hídrico subterráneo y cálculo de la recarga potencial.

Con base en los mapas geológico se definieron las unidades para calcular el balance hídrico; la recarga potencial a los acuíferos fue determinada mediante la metodología desarrollada por Schosinsky [1] que consiste en un balance de humedad en suelos por medio de un álgebra de mapas utilizando el sistema de información geográfica.

Elaboración de los mapas base

El trabajo se desarrolló construyendo los insumos necesarios que solicita la metodología propuesta por [1], por lo que se tienen los mapas a nivel mensual de precipitación, evapotranspiración potencial. De forma general el mapa uso del suelo, capacidad de campo, punto de marchitez, densidad aparente los cuales se rasterizaron con una tamaño del celda de 100 x 100 metros, dimensiones que fue definidas con base en el área de estudio y las dimensiones mínimas de que contienen información geológica.

Cuadro 1
Precipitaciones promedio anuales y cálculos de la recarga potencial para la zona de estudio en un sector del Pacífico de Costa Rica

SECTOR	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL (mm)	RANGO DE RECARGA POTENCIAL ANUAL (mm)	PORCENTAJE DE RECARGA POTENCIAL ANUAL RESPECTO A LA PRECIPITACIÓN
Herradura y Jacó	2625	0 - 879	0 – 33,49
Hermosa y Esterillos	3054	0 - 1239	0 – 40,57
Parrita- Damas, Quepos	3750	0 - 1812	0 – 48,32
Naranjo, Savegre y Matapalo	4080	0 - 2121	0 – 51,99
Dominical y Ballena	4411	0 - 2121	0 – 48,08

Resultados y Análisis

La geología de la zona de estudio está conformada por las por rocas de los complejos de Nicoya y Básico de Quepos, así como por las formaciones Golfito, Tulín, Punta Serrucho, Caótica de Quepos, Fila de Cal, Terraba, Puerto Nuevo, Punta Carballo, Punta Judas y los Depósitos Recientes del Cuaternario, como mapa base se utilizó del Mapa Geológico de Costa Rica [2].

A nivel general para toda la zona de estudio y de acuerdo con el balance hídrico de suelos elaborado para el periodo 1981-2017, se determina una recarga potencial anual de 45 503,53 l/s que corresponde con un 33-52% de la precipitación promedio anual para el sector examinado en el Pacífico Central de Costa Rica. A partir del análisis de rendimiento sostenible se determina que con la extracción actual de pozos perforados que es 2 259,63 l/s, aún se cuenta con un caudal disponible de

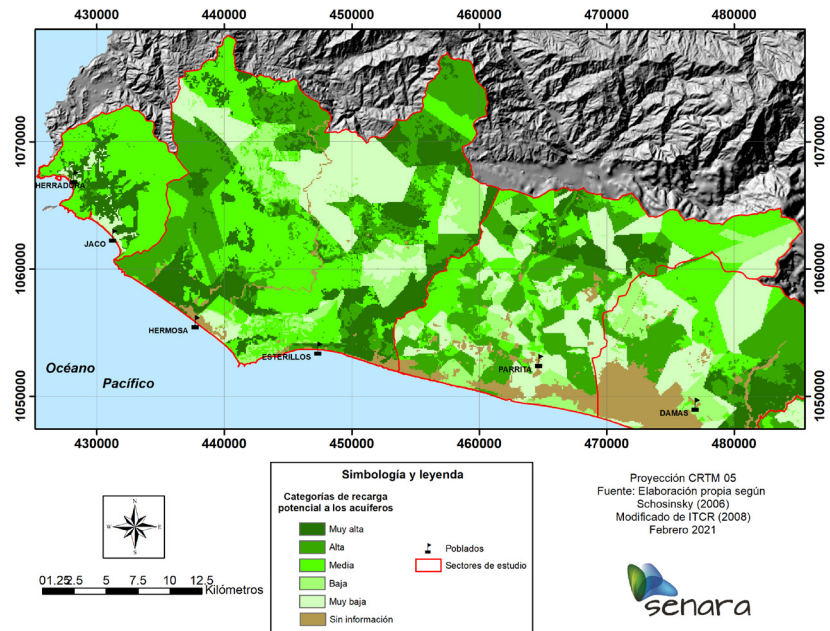


Figura 2. Mapa de recarga potencial, sectores de Herradura, Jacó, Hermosa, Esterillos y Parrita.

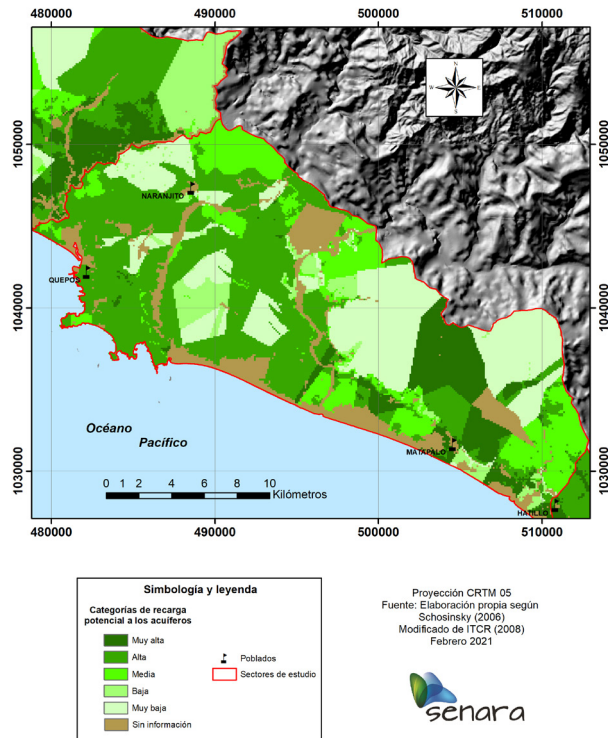


Figura 3. Mapa de las curvas equipotenciales y la dirección de flujo en la capa inferior de Aluvión en el acuífero Jacó.

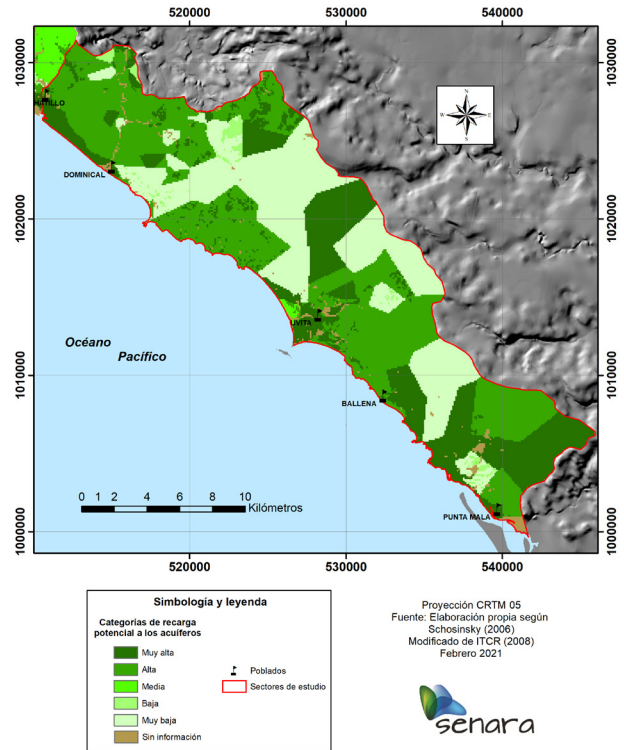


Figura 4. Mapa de recarga potencial, sector Dominical-Ballena.

23 993,98 l/s en la zona. El siguiente cuadro contiene los datos para los cinco sectores analizados de la precipitación promedio anual y los rangos de recarga potencial calculados.

Las figuras de la 2 a la 4 muestran la distribución de la recarga potencial anual en los cinco sectores de la zona de estudio, desde la zona de Herradura hasta la zona de Ballena y Ojochal en el Pacífico Sur. Los rangos obtenidos de recarga potencial en los mapas (figuras 2-4) son el resultado del análisis de la recarga potencial con respecto la distribución de las precipitación y la caracterización de las unidades de balance con respecto a la capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente, como un supuesto en la aplicación de la metodología de definición que para los cauces de ríos, los humedales y las zonas urbanas la recarga potencial es de 0 mm. Se determina que la recarga potencial de agua hacia los acuíferos aumenta hacia la zona el Pacífico Sur de Costa Rica, en donde las precipitaciones promedio anuales son significativamente mayores con respecto al Pacífico Central.

Conclusiones

A nivel general para toda la zona de estudio y de acuerdo con el balance hídrico de suelos elaborado para el periodo 1981-2017, se determina una recarga potencial anual de 45 503,53 l/s que corresponde con un 33-52%, con el sistema de información geográfica se logró obtener una distribución de la recarga potencial anual procesando la información climática, el uso del suelo y la caracterización de los datos agronómicos y hidráulicos para cada unidad de balance en donde la recarga potencial dividió en cinco rangos desde las zonas con recarga muy baja hasta las áreas que tienen recarga muy alta. Se determina que la recarga potencial de agua hacia los acuíferos aumenta hacia la zona el Pacífico Sur de Costa Rica, en donde las precipitaciones promedio anuales son significativamente mayores con respecto al Pacífico Central.

Referencias

1. Schosinsky N. G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*. 34-35, 13-30.
2. Denyer, P. y Alvarado, G.E. (2007). Mapa geológico de Costa Rica. Escala 1:400.000. San José, Costa Rica: Librería Francesa.
3. Alfaro, A; Alvarado, M; Arias, M; Briones, K; Chinchilla, J y Monge, M. (2021). Estudio hidrogeológico de los acuíferos del Pacífico Central, provincias de Puntarenas y San José, Costa Rica, América Central. SENARA. San José. Informe Interno.



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Riesgo químico debido a la exposición a compuestos azufrados en el Parque Nacional Volcán Poás

José David Morales Alpízar^a, José Pablo Sibaja Brenes^a, José Carlos Mora Barrantes^a,
 Rosa Alfaro Solís, María Martínez Cruz^b

^aLaboratorio de Química de la Atmósfera, LAQAT-UNA, Escuela de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

^bObservatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Ovsicori, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

El Parque Nacional Volcán Poás es uno de los lugares turísticos más visitados dentro de la Gran Área Metropolitana (GAM), pero, los guardaparques están expuestos a la ceniza y los gases volcánicos emitidos por el volcán (como el dióxido de azufre, SO₂, y el sulfuro de hidrogeno, H₂S), en donde la exposición depende de la concentración, el tiempo y la frecuencia, y por tal motivo, se podrían generar consecuencias en la salud de los trabajadores del parque a corto o a largo plazo.

El SO₂ y el H₂S son los compuestos evaluados en el estudio del riesgo químico en el Parque Nacional volcán Poás debido a que los guardaparques han presentado problemas con su salud, por lo que fue de relevancia estudiar las tendencias en el tiempo de estos gases y el cumplimiento de los niveles de exposición con respecto a la norma internacional de la OSHA. Se estudió la concentración del SO₂ de setiembre del 2018 hasta el 31 de diciembre 2019, y para el H₂S de febrero del 2019 hasta el 31 de diciembre del 2019.

El análisis se realizó por medio de 4 equipos portátiles Multi RAE, los cuales hacen lectura de las concentraciones de los gases cada minuto. El valor más alto de SO₂ fue en el centro de visitantes, con 16,0 ppm, y en cuanto al H₂S, el valor más alto fue en la casa de guardaparques con 45 ppm. Con respecto al promedio de los datos, la tendencia es cercana a 0 ppm para ambos gases, concordando con que, aunque el volcán tiene una actividad volcánica constante, los gases no se dirigen hacia las zonas de visitación. Para los valores del TWA, ningún puesto de medición superó la norma internacional de concentración de los 2 ppm. Sin embargo, para el STEL si se superó los 5 ppm de SO₂, en el centro de visitantes y en el mirador del volcán, con una concentración de hasta 10,1 ppm y 7,4 ppm, respectivamente.

El estudio del riesgo químico se determinó mediante 8 variables, tomando en cuenta el equipo de protección personal, las capacitaciones, la frecuencia y las características de las sustancias químicas. Los resultados obtenidos del sulfuro de hidrógeno en los cuatro puestos son de nivel bajo, para el SO₂ todos los puestos son bajos, exceptuando el centro de visitantes, el cual resultó tener un nivel medio de riesgo.

*Autor para contacto: jose.sibaja.brenes@una.cr



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Distribución espacial de la transmisividad del Acuífero Bagaces-sector Liberia, Guanacaste, Costa Rica

Paola Alvarado Piedra^{a*}, Ingrid Vargas Azofeifa^b

^aGrupo Empresarial El Encanto OC

^bEscuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica

Abstract: It was studied the spatial distribution of the transmissivity values of the pumping test included in drilling reports corresponding to the Bagaces aquifer in Liberia city and nearby. Transmissivity results show very high values in the northeast sector of the study area, which is associated with the complexity of the geological setting of the volcanic deposits and their spatial distribution, mainly: tuffs, ignimbrites, lava flows and some epiclastic and lacustrine deposits. Towards western high values predominate and in the central-west region intermediate values domain. The aquifer media is classify as considerably heterogeneous.

Palabras clave: Acuífero Bagaces, parámetros hidráulicos, transmisividad.

Key words: Bagaces aquifer, hydraulic parameters, transmissivity.

Introducción

Las condiciones naturales durante la historia geológica de un sistema hidrogeológico originan una variación y distribución espacial en la porosidad y permeabilidad de los acuíferos, que puede llegar hacer extremadamente compleja en medios fracturados [1].

Debido a las condiciones geográficas y climáticas de la zona, así como a la necesidad de buscar fuentes de abastecimiento, la zona de Liberia y alrededores ha motivado la realización de distintos estudios geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos. El primer trabajo en geología es el de Dengo [5] quien propuso la Formación Bagaces, su origen lo atribuye a una fractura a lo largo de una línea que se extiende desde el noroeste del volcán Tenorio al volcán Orosi, lo que posiblemente es una extensión de la falla del río Cañas según el autor. El acuífero de Bagaces se comenzó a estudiar desde finales de los 60's por parte del SENAS. [2] basado en geología y geomorfología, quien amplía y profundiza el estudio de la formación y sus rasgos hidrogeológicos, destaca la presencia de al menos cuatro miembros arenosos intercalados entre las tobas, estos miembros arenosos serían los más importantes de la Formación Bagaces desde el punto de vista hidrogeológico según el autor. Posteriormente, en el proyecto AQUASUB [3] se divide la Formación Bagaces en tres miembros y evalúa su potencial hidrogeológico. [4] publican el Mapa Hidrogeológico de la Península y se le asigna una clasificación del potencial desde bajo hasta muy bajo a la zona de estudio. [6] actualizan el mapeo de la formación geológica en la zona. [7] subdivide las

*Autor para contacto: paolalvarado@gmail.com

rocas piroclásticas de la Formación. Bagaces en doce unidades a partir de criterios estratigráficos, petrográficos y geoquímicos basado en el contenido de cristaloclastos.

El acuífero Bagaces es un sistema complejo debido a las heterogeneidades de la formación, algunas capas de tobas y paleosuelos constituyen horizontes de menor conductividad hidráulica, en general las lavas presentan las mejores condiciones hidrogeológicas [8].

Considerando la complejidad de los distintos materiales geológicos y su influencia en los parámetros hidráulicos del acuífero, se estudió la distribución espacial de los valores de transmisividad del acuífero Bagaces en las cercanías de la ciudad de Liberia, Guanacaste. En diversos estudios suelen utilizarse valores promedio de parámetros hidráulicos, sin embargo, es posible utilizar herramientas de distribución espacial más sofisticadas para obtener resultados más representativos para una zona en particular. Es importante indicar que los datos reportados en las pruebas de bombeo se midieron en su mayoría en pozos de extracción, solo dos reportan valores medidos en pozos de observación, además las rejillas con frecuencia se ubican en distintas litologías.

Materiales y Metodología

Se utilizaron datos de 51 pruebas de bombeo de pozos, en un área de 262 km², de la base de datos de SENARA, los cuales captan el acuífero Bagaces.

Se clasificó la transmisividad con base en la magnitud y su variación usando la metodología [1], la cual estudia la distribución estadística de este parámetro con el fin de estandarizar los valores de transmisividad, su representación y comparación en estudios regionales y locales. En este sistema los rangos de transmisividad son separados en 6 clases que van desde muy alta (clase I) a imperceptible (clase VI), estos indican rendimientos potenciales del agua subterránea en diferentes medios [9]

Otra propiedad importante según la metodología utilizada es la variación de la transmisividad, la cual también se clasifica en categorías, designadas de “a” a “f” basado en la desviación estándar. [1] también sugiere el uso del índice Y para estudios regionales, ya que en muchas ocasiones los valores de transmisividad no están disponibles, el índice Y es una transformación logarítmica de la capacidad específica y representa un parámetro regional comparativo. Fue introducido por Jetel & Krásný (1968) [En: 1], su fórmula es $Y = \log(106q)$, donde “q” es la capacidad específica expresada en l/s. Para la zona de estudio se utilizaron los valores de T puesto que se contaban con los mismos para el acuífero Bagaces.

Resultados y análisis

Las heterogeneidades del medio en el acuífero Bagaces hacen que estén presentes condiciones hidrogeológicas muy variables incluso en distancias relativamente cercanas. La Figura.1 muestra las distintas litologías que constituyen el acuífero, se observa en la base tobas e ignimbritas, lavas y depósitos epiclásticos aislados. Tomando en cuenta únicamente los pozos que captan tobas, ignimbritas y lavas de esta formación, según la información disponible, los valores de T se encuentran entre 2,47 m²/d y 5520 m²/d, mientras que los valores de S van desde 0,00038 hasta 0,003. En los pozos que captan los depósitos aluviales recientes o los epiclastos, los valores de T se encuentran entre 51 m²/d y 200 m²/d. Únicamente se cuenta con dos valores de S, estos son: 0,0005 y 0,0032.

Tal como se puede observar en el histograma del gráfico 1, los valores de T no tienen una distribución normal, al contrario, se observa una asimetría positiva; sin embargo, al hacer una transformación logarítmica la distribución es aproximadamente normal. La asimetría de la distribución también es posible en los diagramas de cajas del gráfico 1, a una escala lineal los valores están concentrados a la derecha, es decir, la mayor parte de los

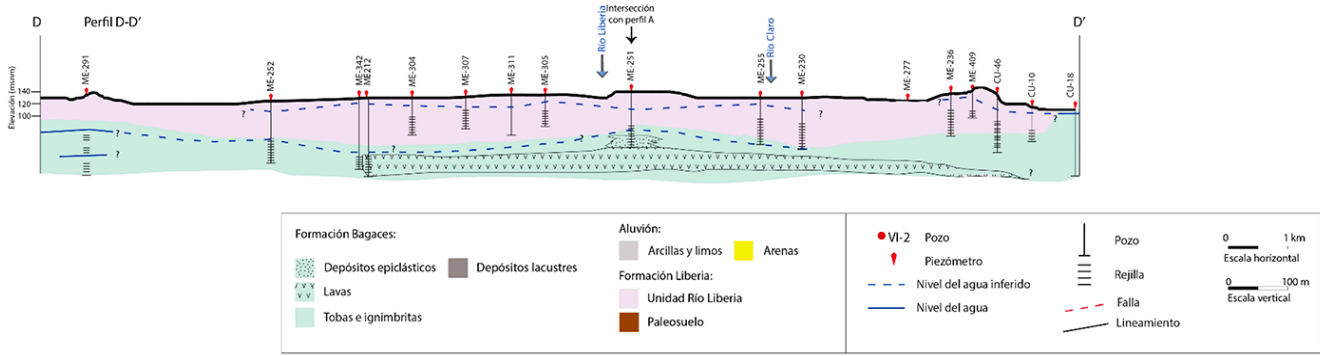


Figura. 1: Perfil hidrogeológico, tomado de Alvarado (2018).

valores están agrupados cerca del mínimo, mientras que existe mayor dispersión de los valores altos. Utilizando un valor de 1,5 del rango intercuartílico para los brazos las transmisividades mayores a 1000 m²/día representan valores atípicos. Al hacer una transformación logarítmica de este primer diagrama de cajas, se observa una mejor distribución, de acuerdo con este el 50% de los datos se encuentran entre 32,02 m²/día y 296,78 m²/día, y si se utiliza también para los brazos o “bigotes” 1,5 del rango intercuartílico no hay valores anómalos.

Gráfico 1

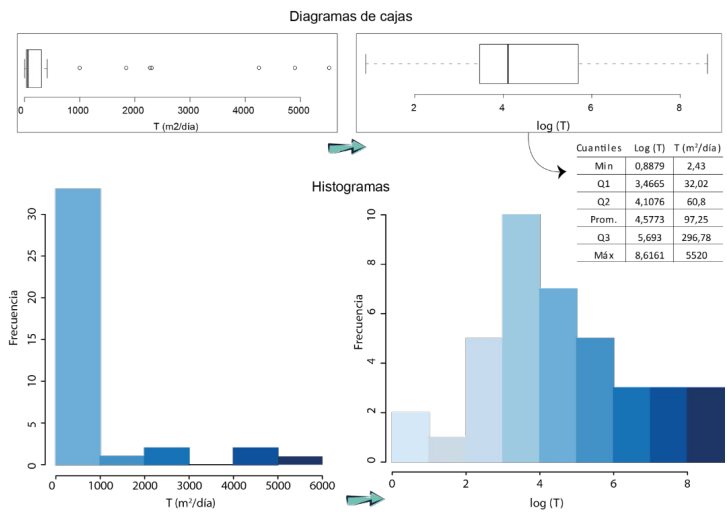


Gráfico 2

El gráfico 2 muestra los resultados obtenidos para el acuífero Bagaces en el sistema de clasificación de [1]. El intervalo denominado “fondo hidrogeológico” o $\bar{x} \pm s$ (media aritmética \pm desviación estándar) representa la transmisividad predominante, la cual incluye el 68,2% de los valores de toda la muestra estadística [10], sin embargo, si se toma como fondo hidrogeológico únicamente una desviación estándar gran parte de los datos quedan fuera de esta zona, por lo que conviene utilizar como valores predominantes aquellos que se encuentre entre dos desviaciones estándar, esto incluye aproximadamente 95,4 % de los valores de T, los cuales se encuentran entre 9,3 m²/día y 1000 m²/día.

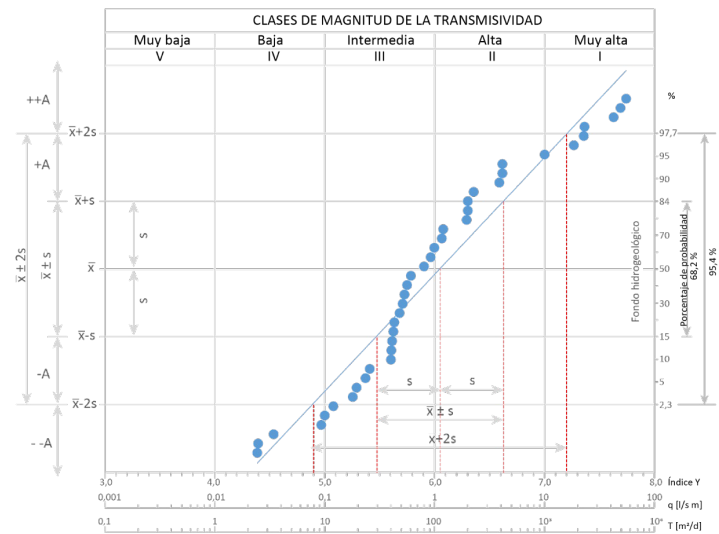


Gráfico 1. Histograma y diagrama de cajas de valores de transmisividad del acuífero Bagaces, tomado de Alvarado (2018).

Gráfico 2. Distribución de la transmisividad del acuífero Bagaces, según metodología de [1], tomado de Alvarado (2018).

En el gráfico 2, también se observa que la transmisividad tiene gran variabilidad desde baja hasta muy alta, por lo que, según la metodología, la importancia del acuífero es de local a regional. La T media es de 109,4 m²/d, es decir el promedio de la transmisividad predominante se clasifica como alto. Así mismo, el promedio del índice Y es 6,05 y su desviación estándar es de $\pm 0,58$, sin embargo, considerando dos desviaciones estándar, como se indicó anteriormente, la variabilidad de la transmisividad es mayor a 1, lo cual implica una variabilidad de la transmisividad “extremadamente grande”, por lo que el medio hidrogeológico puede ser clasificado como extremadamente heterogéneo

Representando un radio proporcional a la clase de magnitud de la transmisividad para el acuífero Bagaces se observa que al noreste del área predominan los valores muy altos y altos, al Oeste predominan valores altos y en la zona Oeste-central destacan los valores intermedios.

Conclusiones.

Los datos de transmisividad reportados para el acuífero Bagaces presentan una gran variabilidad, en el rango de 2,43 m²/d y 5520 m²/d. En el sector noreste del área de estudio predominan los valores muy altos y altos, al oeste predominan valores altos y en la zona oeste-central destacan valores intermedios, el medio se clasifica como considerablemente heterogéneo.

El potencial del sistema acuífero varía de bajo a muy alto, se estima que la posibilidad de aprovechamiento del recurso puede ser de abastecimiento local hasta de gran importancia a nivel regional.

Referencias

1. Krásný, Jiri. (1993). Classification of Transmissivity Magnitude and Variation. *Groundwater*, 31(2), 230–236. <https://doi.org/10.1111/J.1745-6584.1993.TB01815.X>
2. Bohnenberger, O., 1968: Un reconocimiento fotogeológico en Guanacaste.- 26 págs, Ed. Naciones Unidas, San José [Inf. Interno].
3. ONU, 1975: Investigaciones de aguas subterráneas en zonas seleccionadas, Costa Rica.- 261 págs. Naciones Unidas, New York [Inf. técnico].
4. SENARA (1992). Mapa hidrogeológico de la península de Nicoya.- Escala 1: 250 000, Dirección de Aguas y Estudios Básicos del SENARA, San José.
5. Dengo, G., 1962: Estudio geológico de la región de Guanacaste, Costa Rica.- 112 págs. Instituto Geográfico Nacional, San José.
6. Denyer, P., Aguilar, T. & Montero, W., 2013: Mapa geológico de la hoja Carrillo Norte.- Escala 1:50000, UCR-MINAE, San José.
7. Solano, J. (2018). Estratigrafía y petrografía del Plio-Pleistoceno del noroeste de Costa Rica: Formación Bagaces y lavas Pelón de la Bajura.- 389 págs. Univ. de Costa Rica [Tesis Lic].
8. Alvarado Piedra, P. (2018). Hidrogeología de la margen izquierda del río Tempisque, sector central del cantón de Liberia, Guanacaste. Tesis inédita. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
9. Krásný, Jiri. (2003). Distribución espacial de los parámetros hidráulicos en diversos medios hidrogeológicos. *Boletín Geológico y Minero*, 114 (2), 171–182. Recuperado de https://www.igme.es/boletin/2003/114_2_2003/ARTICULO_3.pdf



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Geoquímica de las rocas volcánicas de la estribación central noreste del arco volcánico de Tilarán

Martín Rojas-Barrantes^{a*}

^aDirección de Geología y Minas, San Francisco de Guadalupe, 10104-1000, Costa Rica.

Abstract: The geochemistry of the volcanic rocks is analyzed (Upper Miocene to Quaternary) from the northeast of the Cordillera de Tilarán. The volcanism is subalkaline of marked tholeiitic and calc-alkaline affinity and transition to both series, varying from basalts to dacites. The analysis suggest a strong differentiation of these magmas from OIB type source (calc-alkaline/alkaline rocks) to MORB type source (tholeiitic basalts) modified by the subduction processes. Related to primary magmas, the analysis suggest greater or high degrees of partial melting with an input of fluids and carbonate pelagic sediments from the subducting slab to the mantle metasomatism. The primitive mantle normalization shows LILE enrichments and HFSE depletions associated with the input of marine fluids and sediments dehydration of the subducted slab to the mantle metasomatism, typical of arc volcanism.

Palabras clave: toleítico, calco-alcálico, metasomatismo, elementos trazas, Tilarán.

Key words: tholeiitic, calc-alkaline, metasomatism, trace elements, Tilarán.

Introducción

El vulcanismo que ha generado las rocas volcánicas de la cordillera de Tilarán de edad Mioceno Superior hasta el Pleistoceno, ha sido considerado esencialmente calco-alcálico producto de la diferenciación magmática del arco volcánico interno del norte de Costa Rica. El área abarca la región central noreste de las estribaciones de la cordillera de Tilarán en el margen sur de la cuenca de San Carlos, incluyendo las hojas cartográficas Monterrey y Arenal (391835N/1177776E y 428453N/1161901E). Los nuevos datos geoquímicos sugieren al menos cuatro facies magmáticas modificadas por los procesos de subducción que ha resultado en diferencias de composición de estas rocas en un área de poca extensión de 240 Km². Los objetivos del estudio es caracterizar geoquímicamente el vulcanismo que generó estas rocas tanto ígneas como piroclásticas y su evolución desde el Mioceno Superior hasta el Cuaternario. De lo anterior, discutir los resultados y anomalías encontradas: (1) ¿son anomalías típicas de un ambiente de zona de subducción o corresponden a eventos particulares en la cámara magmática o el proceso de transporte de los magmas hasta la superficie? (2) ¿se pueden caracterizar geoquímicamente las diferentes posiciones del arco volcánico? (3) ¿por qué hay una tendencia toleítica y otra calco-alcálica tan marcada? Un aspecto importante a discutir es la presencia de cuatro facies magmáticas diferenciables muy marcadas, con variaciones de altos a bajos contenidos de álcalis y magnesio, mayor contenido de hierro y contenidos intermedios de álcalis, magnesio y hierro dentro de las series toleítica y calco-alcálica.

*Autor para contacto: martinr@minac.go.cr

Materiales y Metodología

El trabajo forma parte de la cartografía geológica de la hoja Monterrey y alrededores de la Dirección de Geología y Minas. Primeramente se desarrolló el trabajo de campo que consistió de varias campañas geológicas con el equipo convencional de campo (piqueta, lupa, gps, cámara fotográfica, etc.). Se realizaron muestreos sistemáticos de las rocas aflorantes en el área (sedimentos clásticos y el vulcanismo). En cuanto al muestreo de las rocas volcánicas se tuvo como objetivo la toma de muestras en la mayor cantidad de variaciones litológicas posibles. Se realizaron 29 análisis geoquímicos de los cuales 18 corresponden a rocas ígneas y 11 a rocas piroclásticas. El método de análisis corresponde a roca total según la norma AQ200. Los resultados de los análisis fueron procesados en el programa GCDkit [1 y 2]. Dado que el vulcanismo es mayormente de composición máfica a intermedia se utiliza el contenido de MgO para analizar los procesos de diferenciación. También los contenidos de TiO_2 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , los elementos trazas Ni, Zr, Sr, Nb, Co, Sc y Rb, las razones Ba/La, Zr/Nb, U/Th, La/Yb, Th/Nb, La/Nb, los REE normalizados a condritos y la normalización al manto primitivo para analizar la fuente de los magmas, los grados y mecanismos de fusión parcial y el aporte de sedimentos y fluidos al metasomatismo del manto.

Resultados y Análisis

Las rocas volcánicas se clasifican como subalcalinas con una marcada tendencia toleítica y calco-alcalina y de transición a ambas series. Es un vulcanismo diferenciado que varía de basaltos a dacitas ($\text{SiO}_2 \sim 48,2\text{--}66,3\%$) (figs. 1a y 2b). Las rocas ígneas agrupadas dentro del vulcanismo del Mioceno Superior, presentan una marcada tendencia toleítica y calco-alcalina y de transición a ambas series, con una mayor representación toleítica (2/3) principalmente para los basaltos y andesitas basálticas (figuras 1a y 1b). La razón Rb/Sr muestra una relación negativa del Sr respecto al Rb con la diferenciación de las unidades, con bajos y altos valores de Rb (5,3-64,9 ppm) y Sr (309,5-943,5 ppm) indicativos de una fuerte asimilación y diferenciación de los magmas de estas unidades. En general los óxidos mayores SiO_2 , Na_2O y K_2O muestran como se espera buena correlación negativa respecto al MgO, en tanto el Fe_2O_3 , CaO y TiO_2 una correlación positiva típica de los óxidos compatibles. Por otro lado los elementos trazas Ni, Sr, Co y Sc muestran correlaciones positivas con el MgO, indicando el carácter compatible, en tanto el Zr y Nb una correlación negativa indicando un carácter incompatible.

En relación a magmas primarios, los basaltos son de marcada tendencia toleítica y calco-alcalina (figs. 1a y 1b), la normalización a condritos de REE (fig. 1c) y al manto primitivo (fig. 1d) y las relaciones de elementos trazas sugieren que los de tendencia calco-alcalina tienen más afinidad con fuentes de tipo OIB en tanto los basaltos de afinidad toleítica con una fuente tipo MORB, así como mayores o altos grados relativos de la fusión parcial con un incremento en los basaltos de afinidad toleítica, un aporte de fluidos y sedimentos pelágicos carbonatados de la placa subducida a la fusión parcial y al metasomatismo del manto.

Las andesitas basálticas tienen un comportamiento similar, pero de clara tendencia toleítica (figuras 1a y 1b), presentan afinidad con una fuente de tipo OIB y leve deficiencia en Eu indicando posiblemente una fuente algo empobrecida en plagioclasa (figs. 1e y 1f). Las traquiandesitas basálticas se agrupan dentro de la serie calco-alcalina de alto potasio (fig. 1a y 1b), presentan una clara y mayor afinidad con una fuente de tipo OIB. La normalización a condritos de REE muestra las mayores pendientes positivas entre las unidades con un mayor enriquecimiento en LREE y deficiencia en Eu indicando una fuente empobrecida en plagioclasa (figuras 1e y 1f). Estos valores en relación con las dos unidades anteriores y las relaciones de elementos trazas sugieren un menor o bajos grados relativos de la fusión parcial entre las unidades analizadas.

Las dacitas muestran la transición de la serie toleítica a calco-alcalina y un comportamiento similar a los basaltos y andesitas basálticas (figuras 1a y 1b). La normalización a condritos de REE muestra un patrón cóncavo hacia abajo

con una pendiente positiva relativamente fuerte indicando enriquecimiento en LREE y una clara anomalía negativa de Eu indicativo de una fuente empobrecida en plagioclasa (figuras 1e y 1f). El vulcanismo piroclástico del Plioceno (ignimbritas) es mayormente calco-alcalino de composición dacítica y andesítica (figuras 2a y 2b).

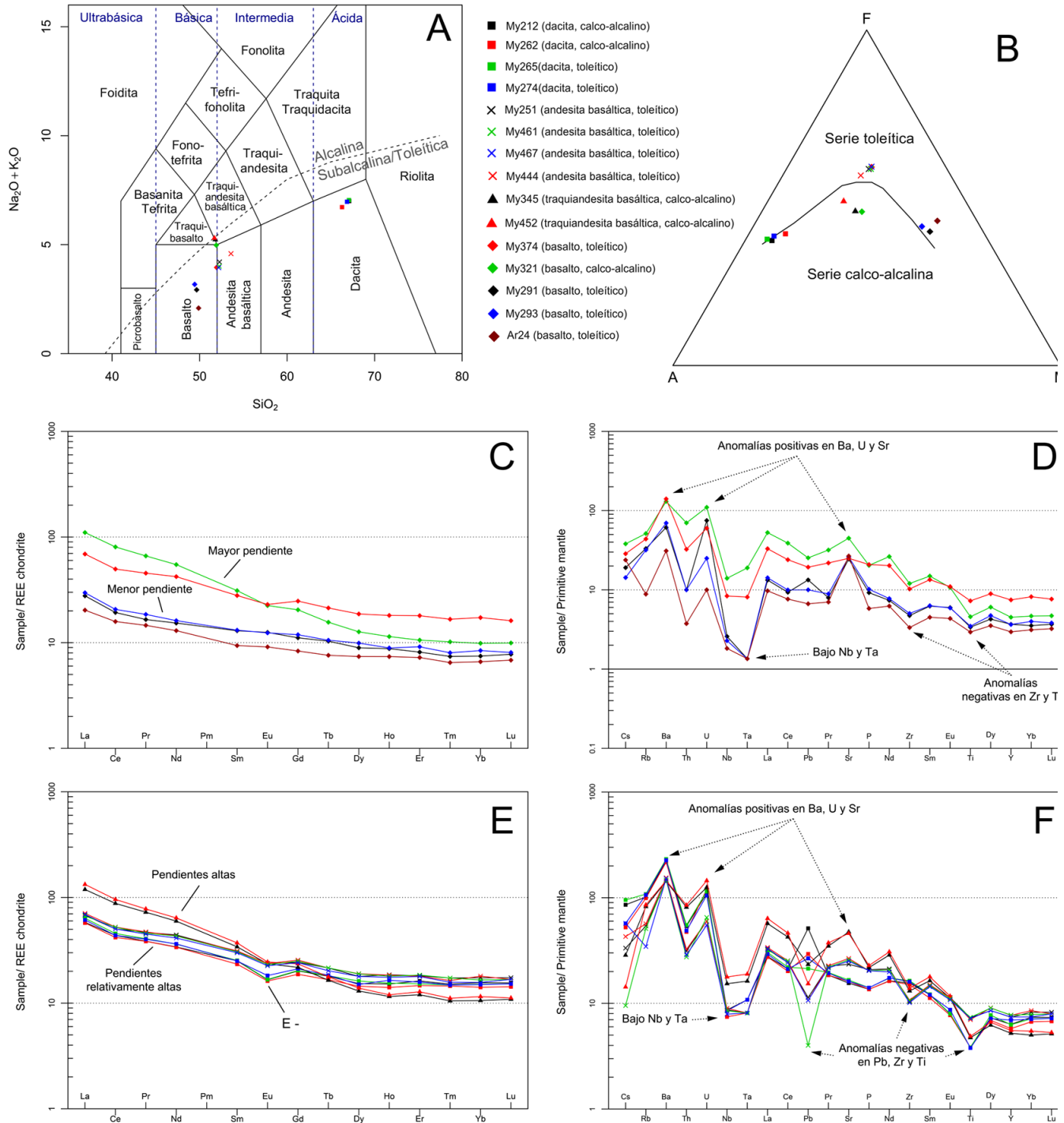


Figura 1. Diagramas de clasificación geoquímica de las rocas ígneas (Mioceno Superior). (A) Diagrama TAS [3]; (B) Diagrama AFM [4]; (C) Normalización REE condritos (Basaltos) [5]; Normalización Manto Primitivo (Basaltos) [6]; Normalización REE condritos (otras muestras) [5]; Normalización Manto Primitivo (otras muestras) [6].

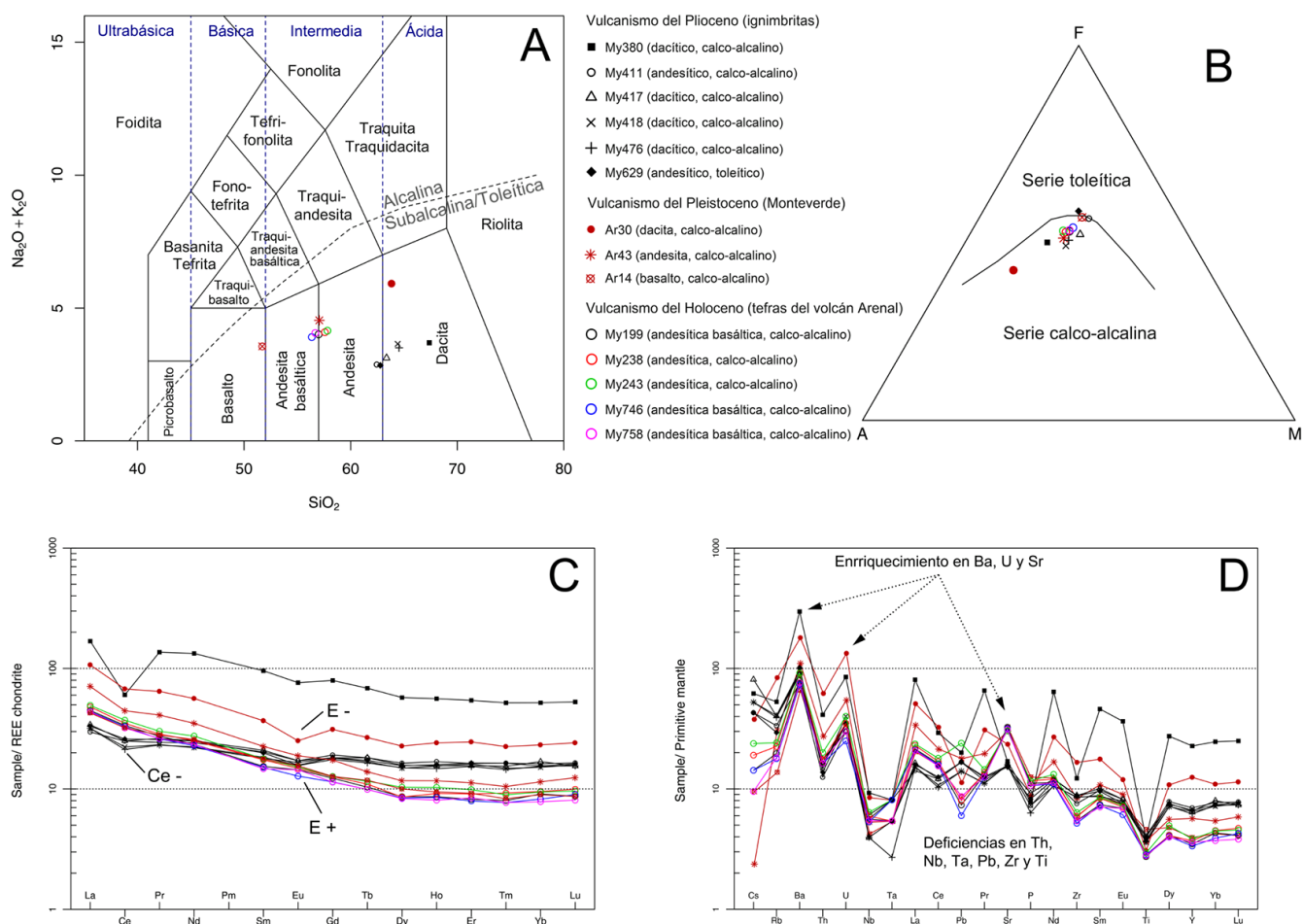


Figura 2. Diagramas de clasificación geoquímica de las rocas ígneas y piroclásticas (Plioceno–Cuaternario). (A) Diagrama TAS [3]; (B) Diagrama AFM [4]; (C) Normalización REE condritos [5]; Normalización Manto Primitivo [6].

La anomalía de Cerio tan marcada en esta unidad puede indicar la presencia de rocas y sedimentos de origen oceánico con aporte de sedimentos pelágicos de la placa subducida y fluidos de origen marino al metasomatismo del manto (figura 2c).

La normalización al manto primitivo muestra en general un enriquecimiento en elementos LIL y deficiencias en elementos HFS asociado al aporte de fluidos de la placa subducida y deshidratación de sedimentos al metasomatismo del manto típico de un ambiente de arco volcánico (figura 2d). El vulcanismo efusivo del Pleistoceno es diferenciado variando de basaltos a dacitas y de marcada tendencia calco-alcalina (figura 2a y 2b). La normalización a condritos de REE muestra tres niveles de concentración de estos elementos según la composición de la roca (figuras 2a y 2c), con un patrón de curva de mayor pendiente y concavidad hacia abajo, mayor enriquecimiento en LREE, ligeras anomalías negativas de Ce y una marcada anomalía negativa de Eu para el caso de la composición dacítica indicando una fuente empobrecida en plagioclasa (figuras 2c y 2d).

El vulcanismo piroclástico del Holoceno (tefras) asociado al volcán Arenal, es calco-alcalino de composición andesítico y andesítico basáltico (figs. 2a y 2b). La normalización a condritos de REE y la normalización al manto primitivo sugieren igual un típico vulcanismo de arco (figuras 2c y 2d).

Conclusiones

El vulcanismo magmático del Mioceno Superior es subalcalino con una marcada tendencia toleítica y calco-alcalina y de transición a ambas series y se manifiesta por cuatro facies magmáticas bien diferenciadas que varían en composición desde basaltos a dacitas. Según las dataciones $40\text{K}/40\text{Ar}$, las dacitas son más antiguas ($8,7 \text{ Ma} \pm 1,5$) por lo que se ha tenido una transición de un vulcanismo calco-alcalino a toleítico hacia facies magmáticas más máficas.

Los análisis de óxidos mayores y de elementos trazas indican una fuerte diferenciación de estos magmas a partir de fuentes de transición tipo OIB (para las rocas de afinidad calco-alcalina/alcalina) a tipo MORB (para los basaltos de afinidad toleítica) modificadas por los procesos de subducción. En relación con magmas primarios, los análisis indican mayores o altos grados relativos de la fusión parcial con una disminución para los basaltos de afinidad toleítica y con un aporte de fluidos de la placa subducida a la fusión parcial.

Los análisis también sugieren que hubo un aporte de sedimentos pelágicos carbonatados de la placa subducida al metasomatismo del manto.

Las anomalías positivas en Ba, U y Sr y negativas en Nb, Ta, Zr y Ti en conjunto con los análisis de óxidos mayores y de elementos trazas sugieren que estas facies magmáticas están asociadas al típico vulcanismo de arco con una componente alcalina que puede estar más emparentada al vulcanismo del tras-arco que al intra-arco del norte de Costa Rica.

Durante el Plioceno y Cuaternario el vulcanismo magmático y piroclástico en el área es marcadamente calco-alcalino a diferencia del vulcanismo magmático del Mioceno Superior donde se tiene una marcada tendencia toleítica y calco-alcalina y de transición a ambas series. Se caracteriza por ser muy bien diferenciado desde basaltos hasta dacitas donde el vulcanismo efusivo del Pleistoceno es el que presenta mayor grado de diferenciación.

El análisis de elementos trazas muestra típicas anomalías de un vulcanismo de arco donde la generación de magmas y el metasomatismo del manto son influenciados por el aporte de sedimentos y fluidos marinos de la placa subducida.

Referencias bibliográficas

1. Janoušek, V., Farrow, C. M. y Erban, V. (2006). Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). <https://doi.org/10.1093/petrology/egl013>.
2. Janoušek, V., Moyen, J-F., Martin, H.M., Erban, V. y Farrow, C. (2016). Geochemical Modelling of Igneous Processes—Principles and Recipes in R Language. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46792-3>.
3. Le Bas, M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A y Zanettin B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. doi: 10.1093/petrology/27.3.745.
4. Irvine, T. M. y Baragar W. R. (1971). A guide to the chemical classification of common volcanic rocks. doi: 10.1139/e71-055.
5. Boynton, W. V. (1984). Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. En P. Henderson P (eds). Rare Earth Element Geochemistry (pp. 63-114). Elsevier, Amsterdam.
6. Sun S. S. y McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. En A.D. Saunders y M. Norry M (eds). Magmatism in Ocean Basins (pp.313-345). Geological Society of London Special Publications 42.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Identificación de los tipos de minerales de cuarzo y feldespato para la determinación de la factibilidad de aplicación de la técnica de Termoluminiscencia en la evaluación del potencial geotérmico en el oriente de El Salvador

Lesly Mendoza^{a*}, Erick Moran^a, Lucía Cortez^a, Roberto Cruz^a

^aUniversidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, San Salvador, El Salvador

Abstract: The results of the investigation carried out in the area under study, Jucuarán, department of Usulután, are presented, where the presence of quartz and feldspars in rocks of volcanic origin was evaluated, in order to determine the feasibility of applying the Thermoluminescence technique (TL), which would allow evaluating the type of geothermal potential. For this study, fresh volcanic rocks were sampled and analyzed using X-ray diffraction techniques to determine minerals, and X-ray fluorescence to classify rocks. The results obtained by diffractometry indicate the presence in greater concentration of minerals belonging to feldspars: Labradorite, Albite and Andesine and in a lesser proportion, mineral such as augite (belonging to pyroxenes) and quartz. Based on the results of the fluorescence tests, loss of ignition and using TAS classification, the rock types were determined: Andesite-Basaltic, Andesite and Basalt. Based on the results obtained from the majority minerals, would be feasible the application of the TL technique to evaluate the geothermal potential of the area.

Palabras clave: Termoluminiscencia, XRD, XRF, Feldespatos, Cuarzo, El Salvador, Geotermia.

Key words: Thermoluminescence, XRD, XRF, feldspars, quartz, El Salvador, Geothermal.

Introducción

Desde el año 2018, la Universidad de El Salvador y LaGeo S.A de C.V trabajaron en el proyecto SATREPS (Cooperación JICA), que tiene como uno de los principales objetivos: la optimización y aprovechamiento de la energía geotérmica en El Salvador, a través de la aplicación de la técnica de Termoluminiscencia (TL), que es un fenómeno por el cual, un material, por ejemplo, el cuarzo, el feldespato y la calcita emiten luz cuando son calentados[1], y se fundamenta en el hecho de que la intensidad de la Termoluminiscencia natural es proporcional a la dosis de radiación que han recibido los diferentes minerales presentes en una muestra (roca) a través del tiempo. El cuarzo, los feldespatos y la calcita son conocidos como típicos minerales formadores de roca y muestran una emisión medible de termoluminiscencia [2]. “La técnica de TL es una herramienta de exploración eficaz para evaluar las manifestaciones naturales de temperatura y el flujo de calor subterráneo en sistemas geotérmicos” [2]. Por esta razón, se han iniciado campañas de muestreo en diferentes zonas del país que permitan identificar dichos minerales que son requeridos para evaluar el potencial geotérmico.

*Autor para contacto: lesly.mendoza@ues.edu.sv

Área de estudio

El área en estudio se encuentra ubicada cercana al municipio de Jucuarán, al sur del departamento de San Miguel y al costado suroriente del departamento de Usulután, El Salvador; las muestras fueron tomadas en una zona cercana a la costa, como se observa en la figura 1 y cuyas coordenadas se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Ubicación de puntos de muestreo.

Identificación de muestra	Región	Ubicación		Altura
		Latitud	Longitud	m.s.n.m.
ES210706-01	Usulután	13°14'57.12" N	88°18'19.89" W	184.62
ES210706-02	Usulután	13°12'51.72" N	88°17'21.30" W	169.93
ES210706-03	Usulután	13°14'51.68" N	88°16'8.27" W	447.29
ES210706-04	Usulután	13°14'54.90" N	88°15'44.28" W	509.82

Geología de la zona:

De acuerdo con el mapa geológico de El Salvador[4], las rocas presentes en el área de estudio corresponden a rocas volcánicas intermedias a básicas, pertenecientes a las formaciones el Bálsamo y Cuscatlán. La Fm. Bálsamo se caracteriza por tener aglomerados con intercalaciones de tobas volcánicas endurecidas y corrientes de lava basáltica-andesítica; además rocas extrusivas con pocas intercalaciones de tobas volcánicas y aglomerados; la parte inferior es de carácter andesítico y en la parte superior, basáltico. La Fm. Cuscatlán está compuesta por productos extrusivos de los volcanes individuales como son: corrientes de lava, aglomerados, tobas, escorias y cenizas volcánicas endurecidas, así como tobas fundidas con intercalaciones de sedimentos lacustres y fluviales[4]. Ver figura 2.

Metodología

Trabajo de campo:

Se realizó un recorrido por el área de estudio, donde se observó macizos rocosos expuestos de rocas volcánicas frescas, identificando cuatro lugares con estas características, las cuales se detallan en la figura 3 y tabla 1. A cada muestra se le asignó un código de identificación de la siguiente forma ESXXYYZZ-NN, ES: El Salvador, XX: dos dígitos para el año, YY: dos dígitos para el mes, ZZ: dos dígitos para el día y NN: correlativo de punto de muestreo.



Figura 1. Ubicación de zona en estudio [3].

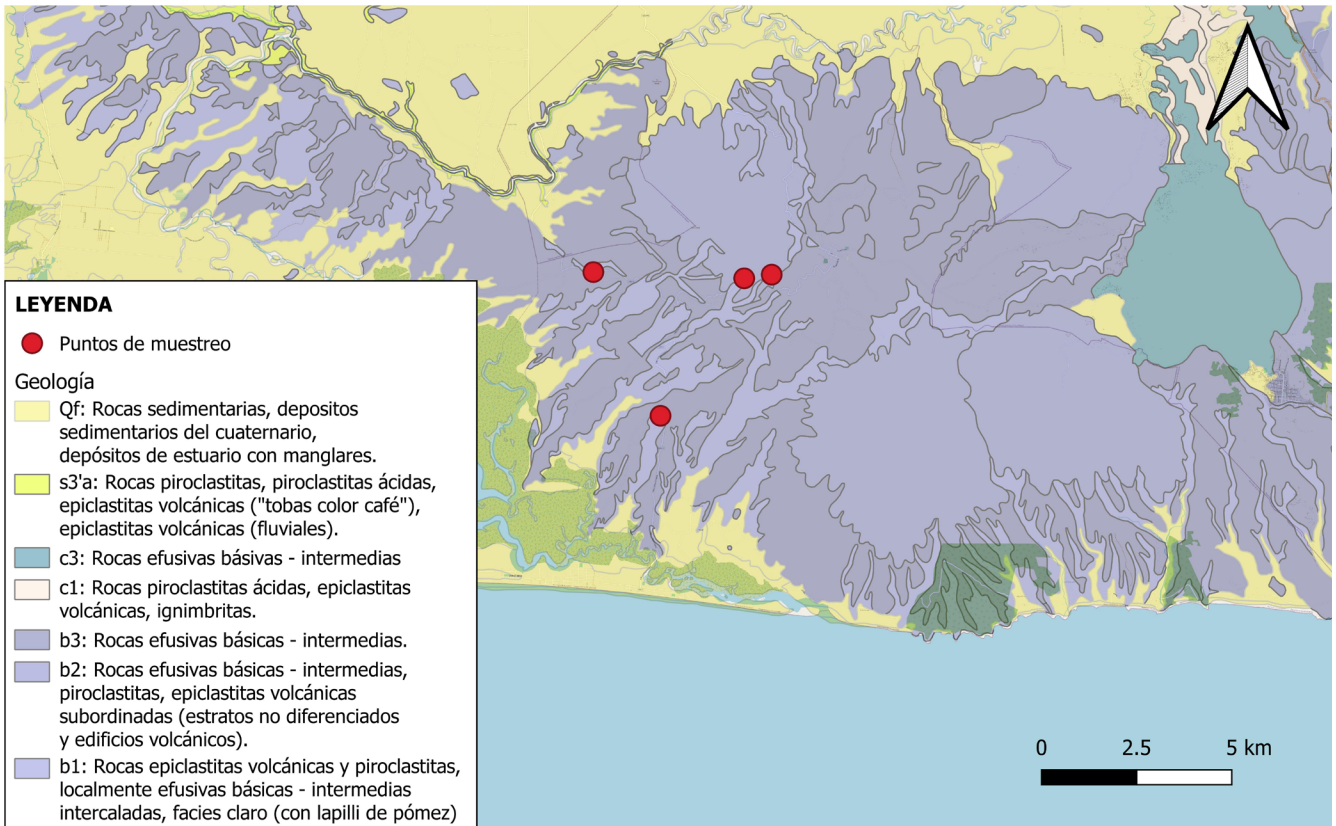


Figura 2. Mapa geológico de la zona de Jucuarán






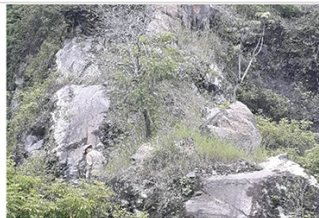



Figura 3. Ubicación de puntos de muestreo. [3]

Descripción de muestras:

Se realizó una descripción de campo, una identificación y un registro fotográfico de cada lugar muestreado. Ver tabla 2.

Tabla 2. Descripción de muestras recolectadas.

Código.	Descripción de campo/unidad geológica	Fotografía de punto de muestreo	Fotografía de muestras
ES210706-01	Muestra tomada de un flujo de lava andesítica de color gris. Unidad Bálsamo/b2		
ES210706-02	Muestra tomada de un flujo de lava andesítica con muchas juntas en forma de lascas, de color gris oscuro, de textura afanítica, con cristales muy pequeños. Unidad Bálsamo/ borde entre b1 y b3		
ES210706-03	Muestra tomada de un flujo de lava de composición andesítica de color gris, con una textura afanítica. Unidad Bálsamo/b1		
ES210706-04	Muestra tomada de un dique de lava andesítica, con textura porfirítica de color gris claro. Unidad Bálsamo/b2		

Trabajo de Laboratorio:

Las actividades de laboratorio fueron realizadas en las instalaciones del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador (CIAN-FIA-UES).

Previo al análisis se realizó la adecuación de las muestras recolectadas, se tomó un fragmento de roca y se redujo a un polvo de tamaño no mayor a 5µm, que sirvió para realizar los ensayos siguientes:

- Difracción de rayos X (XRD): el equipo utilizado es un difractómetro de rayos X, modelo Rigaku-Miniflex 600,

con el cual se determinaron los minerales presentes en cada muestra analizadas. El análisis de los datos se realizó con el programa PDXL 2 Rigaku Data Analysis Software.

- Espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF): el equipo para este ensayo es un espectrómetro modelo Rigaku ZSX Primus IV, con el que se determinó el % en masa de los compuestos químicos de las rocas, la técnica fue aplicada en muestras de polvo de rocas compactadas en anillos (pellet). El análisis se realizó con el programa ZSX Guidance Software.

- Pérdida por ignición (LOI): el resultado de este ensayo se utilizó junto con la composición química (XRF) para clasificar las rocas encontradas.

Un resumen de la metodología de trabajo en laboratorio se presenta en el gráfico 1

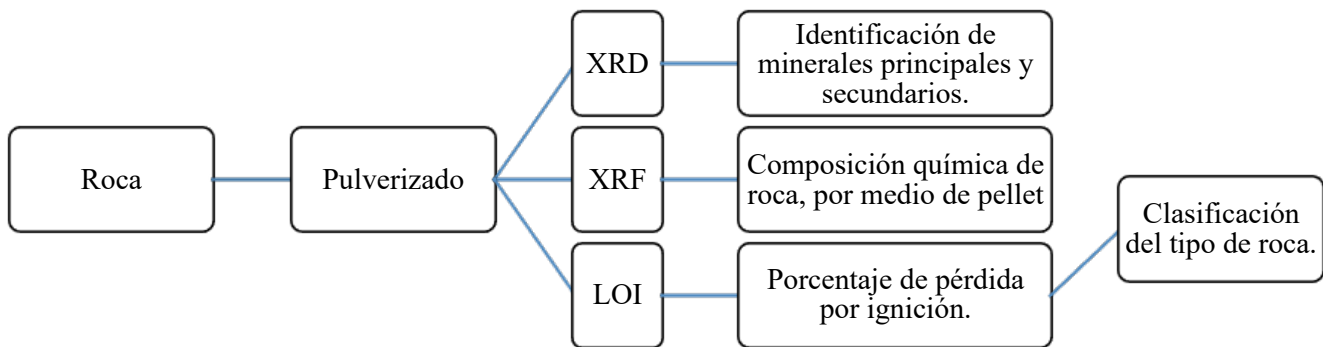


Gráfico 1. Metodología de trabajo en laboratorio (CIAN-FIA-UES).

Para la clasificación de los tipos de rocas, se utilizó los resultados obtenidos en el ensayo de XRF en conjunto con los resultados del ensayo de LOI, con lo cual se recalculó el porcentaje de sílice, sodio y potasio a base anhídrida para su posterior clasificación a través diagrama TAS (Total Alkali Silica).

Resultados y análisis

Resultados de Ensayo por Difracción de Rayos X (XRD):

Los resultados de minerales obtenidos a través de la técnica de XRD fueron los siguientes, ver tabla No 3.

Tabla 3 Minerales identificados por XRD.

Identificación de muestra	Minerales identificados
ES210706-01	Labradorita y Augita
ES210706-02	Albita intermedia y Cuarzo bajo
ES210706-03	Andesina
ES210706-04	Labradorita y Augita

Resultados de Ensayo por Fluorescencia de Rayos X (XRF):

Los resultados de la composición química de las rocas obtenidos a través de la técnica de XRF se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Composición química de las rocas obtenido por XRF.

Elementos	Identificación de muestra			
	ES210706-01	ES210706-02	ES210706-03	ES210706-04
% en masa	%m/m	%m/m	%m/m	%m/m
SiO₂ (%)	54.58	60.68	50.54	47.69
TiO₂ (%)	0.78	0.75	1.02	0.96
Al₂O₃ (%)	17.43	15.79	18.12	19.96
Fe₂O₃ (%)	8.46	5.82	10.91	11.34
MnO (%)	0.17	0.14	0.19	0.19
MgO (%)	2.68	1.08	2.85	3.61
CaO (%)	8.3	4.11	9.78	10.93
Na₂O (%)	3.41	4.28	3.45	2.84
K₂O (%)	1.37	1.75	0.69	0.35
P₂O₅ (%)	0.18	0.23	0.23	0.13
H₂O+ (%)	0.37	0.5	0.39	0.19
LOI (%)	0.99	1.2	0.12	0.22
Total	98.72	96.33	98.29	98.41

Resultados de Ensayo LOI:

Los resultados del ensayo de pérdida por ignición (Loss of Ignition, LOI) y de H₂O, se utilizaron para recalcular la composición química de las rocas libre de volátiles, los resultados se presentan en la tabla No 5.

Tabla 5. Resultados de ensayos de pérdida por Ignición (LOI) y contenido de humedad presentes en las muestras H₂O+.

Identificación de muestra	LOI (% m/m)	H₂O+ (%m/m)
ES210706-01	0.99	0.37
ES210706-02	1.2	0.5
ES210706-03	0.12	0.39
ES210706-04	0.22	0.19

Análisis de Resultados del Ensayo Difracción de Rayos X (XRD):

En la tabla No 6 se muestran los minerales identificados en las rocas de la zona de estudio, los cuales fueron obtenidos por medio de ensayos en difractorómetro de rayos X:

Tabla 6. Tabla No 6 Resultados de ensayo de difracción de rayos X.

Mineral	Encontrado en muestra No		Tipo	Comentarios
Labradorita	ES210706-01 ES210706-04	Silicatos (Grupo), tectosilicatos (clase) (Feldespatos sub-clase)	Plagioclasas	Aluminosilicatos de sodio y calcio,
Albita intermedia	ES210706-02	Silicatos, tectosilicatos (Feldespatos)	Plagioclasas	Aluminosilicatos de sodio.
Andesina	ES210706-03	Silicatos, tectosilicatos (Feldespatos)	Plagioclasas	Aluminosilicatos de sodio y calcio.
Augita	ES210706-01 ES210706-04	Silicatos, inosilicatos (Piroxenos)	clinopiroxenos	Aluminosilicatos de hierro, calcio y magnesio.
Cuarzo bajo	ES210706-02	Silicatos, tectosilicatos, Grupo SiO ₂	--	Oxido de sílice.

Los tipos de minerales presentes corresponden al grupo de los silicatos y dentro de ellos se encontraron los tectosilicatos: cuarzo bajo y feldespatos del tipo plagioclasas. También están presentes minerales del grupo de los inosilicatos: piroxenos del tipo clinopiroxenos (augita).

Clasificación de las rocas en la zona de estudio.

En la tabla No. 7 se muestra la identificación del tipo de roca por medio de la metodología del diagrama TAS.

Tabla .7 Identificación del tipo de roca por metodología TAS.

Identificación de muestra	Recalculo de sílice (%)	Recalculo de sodio (%)	Recalculo de potasio (%)	Tipo de roca
ES210706-01	55.33	3.46	1.39	Andesita-basáltica
ES210706-02	61.77	4.36	1.78	Andesita
ES210706-03	50.80	3.47	0.69	Basalto
ES210706-04	47.89	2.86	0.36	Basalto

Con base al análisis de los resultados de la composición química, se puede decir lo siguiente:

Las rocas presentes en el área en estudio presentan un contenido de Oxido de sílice (% SiO₂), en el rango de 48 a 62%, lo que determina que tienen una composición básica a intermedia, en las que se encuentran las rocas volcánicas: andesitas a basálticas.

Los resultados obtenidos sugieren que en el área en estudio, se identificó tres grupos de rocas: rocas andesitas-basálticas, presentes en la parte más al noroeste de la zona en estudio, en donde se encontró un flujo de lava de composición intermedia (55% de SiO₂). El segundo corresponde al grupo de rocas andesíticas, presentes en la parte más al sureste, en forma de flujo de lava de composición intermedia (62% de SiO₂) y el tercer grupo son las rocas

basálticas que se encontraron presentes en la parte más al noreste, en forma de flujo de lava con una composición básica (% de SiO₂ que varía entre 51 a 48%), ver el gráfico 2. Diagrama de TAS con puntos ubicados.

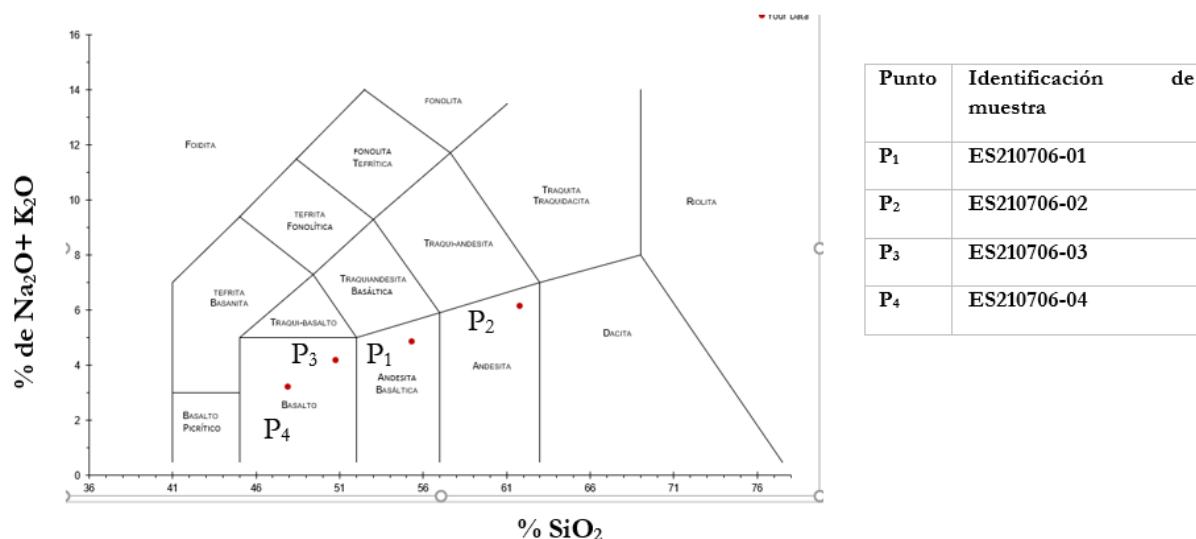


Gráfico 3. Diagrama TAS mostrando la ubicación de los tipos de las rocas en el área en estudio.

Los resultados de los ensayos de pérdida por ignición presentaron valores que varían entre 0.12 a 1.2%, que indica que las rocas evaluadas en la zona en estudio no han sufrido alteración.

Discusión

- Es factible la utilización de la técnica de Termoluminiscencia, debido a que en la zona en estudio se encontraron presentes feldespatos del tipo plagioclasa como son labradorita, albita y andesina.
- Las rocas presentes en el área son de composición intermedia (andesitas, andesita-basáltica) a básica (basalto).
- La aplicación de la técnica de Termoluminiscencia permitirá identificar posibles zonas de alto potencial geotérmico para el aprovechamiento de esos recursos.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la “Asociación de Investigación en Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Sostenible” (Por sus siglas en inglés SATREPS) de la “Agencia de Ciencia y Tecnología de Japón – Agencia de Cooperación Internacional de Japón” (JST-JICA) por su colaboración en la donación de equipos y generación de capacidades técnicas en el área de geotermia.

Referencias bibliográficas

1. Tsuchiya N., Takeda R., Hirano N. (2015). “Novel geothermal exploration techniques by thermoluminescence of minerals”. *Proceedings World Geothermal Congress*, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
2. Tsuchiya N., Nakatsuka K. (2002). “Application of thermoluminescence technique to geothermal exploration”. *Proceedings 24th NZ Geothermal Workshop*, Auckland, New Zealand, 85-90.
3. Map data copyrighted OpenStreetMap contributors and available from <https://www.openstreetmap.org>
4. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Mapa geológico general de la República de El Salvador.



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022

CICG Centro de
Investigación en
Ciencias Geológicas

Exploraciones espeleológicas en Costa Rica durante la última década

Andrés Ulloa Carmiol^{a,b*}

^aCentro de Investigación en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica.

^bEscuela Centroamericana de Geología

En Costa Rica se tiene registro de más de 450 cuevas, las cuales, son un geo-recurso muy valioso y poco estudiado. Menos del 40 % de las cuevas conocidas presentan planos o croquis espeleológicos y en total, se tiene registro de casi 11 kilómetros de cartografía subterránea en Costa Rica.

Las cuevas presentan un potencial para el desarrollo de investigaciones en diversas áreas del conocimiento (e.g., geología, biología, arqueología, hidrogeología, paleoclimatología, paleontología). También las cuevas conforman hábitats para formas de vida adaptadas a estos entornos, en algunos sectores son de vital importancia para la preservación y aprovechamiento del recurso hídrico y forman parte del patrimonio cultural de una región.

La mayoría de las cuevas en Costa Rica se encuentran desarrolladas en rocas calizas (asociadas a procesos kársticos), no obstante, también existe un número importante de cuevas desarrollado en rocas volcánicas (en algunos casos por procesos vulcano-espeleogenéticos poco convencionales) y cuevas desarrolladas por procesos tectónicos y/o erosivos.

Entre las particularidades más importantes de la última década de exploraciones espeleológicas se encuentra la cartografía del sistema de cuevas de mayor extensión de Costa Rica con casi 5 km de pasajes (con interconexión hídrica) cartografiados en múltiples campañas espeleológicas en Venado de San Carlos. También, para esta misma zona se han realizado estudios neotectónicos utilizando cuevas y actualmente se realizan trabajos en hidrogeología kárstica de este sistema de cuevas. Asimismo, en la última década se describió la mineralogía de cuevas volcánicas en las faldas del volcán Irazú, donde sobresale la Cueva los Minerales, que presenta particularidades únicas de interacción de sistemas hidrotermales, fallamiento y vulcanismo activo, que hacen que esta cueva sea la cueva con mayor diversidad mineralógica del mundo, reportada hasta el momento. Además, las cuevas del Irazú presentan formas de vida únicas (extremófilos conocidos como mucolitos) que sirven de análogos para analizar potenciales formas de vida en Marte.

Actualmente se trabaja en el proyecto de elaboración de un libro de Cuevas y Karst de Costa Rica que pretende formar una base científica de información de cuevas, incentivando esta línea de investigación emergente en el país. Con el proyecto de este libro se pretende concientizar a la población en general sobre la importancia de las cuevas en nuestro país.

*Autor para contacto: andres.ulloa@ucr.ac.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Actividades de la Comisión de Geopatrimonio de la Unión Internacional de Geociencias: Asesoría de los Geoparques Mundiales de la UNESCO, Geositios Mundiales, y proyectos del Programa Geocientífico de la UNESCO

Benjamin Van Wyk de Vries^{a,b*}

^aUniversité Clermont Auvergne, Laboratoire Magmas et Volcans, OPGC, CNRS et IRD, Clermont-Ferrand, Francia

^bChair of sub-commission for geosites, Geoheritage Commission, International Union of Geological Science (IUGS)

El IUGS (Unión Internacional de Geociencias) estableció su comisión de Geopatrimonio en 2017 con la fusión de dos grupos de trabajo de geopatrimonio y piedras patrimoniales. Actualmente la comisión cuenta con tres sub-comisiones, de Geositios, de Piedras patrimoniales, y de colecciones geológicas.

La sub-comisión de geositios tiene carga del asesoramiento del valor internacional científico de la propuesta de geoparques mundiales de la UNESCO. Una asesoría que marca la primera etapa de una nominación de un geoparque aspirante. Voy a explicar el proceso de asesoramiento brevemente, que consiste de una serie de revisiones del documento por un variado número de expertos, seguido por un análisis profundo por parte del panel de la sub-comisión, básicamente una revisión general para la comisión antes que los resultados sean transmitidos vía el secretario general de la IUGS a la UNESCO. Es un proceso riguroso, abierto y transparente en todas las etapas. Por cada propuesta es necesario brindar un inventario del geopatrimonio y valoración de geositios usando métodos conocidos internacionalmente. Además, una justificación argumentada y sólida del significado internacional es requerido para que la propuesta del geoparque sea aceptada. Esta etapa asegura la calidad y resiliencia del geoparque futuro.

La sub-comisión es activa, también el programa de geositios mundiales, una iniciativa que inició en los años 90 y se reactivó recientemente. Los 'Global Geosites' van a recomenzar con 'los primeros 100' este año y hemos trabajado para asegurar una cobertura global de los primeros, incluyendo la representación de zonas del sur a nivel global, incluso África, América Central, el Caribe y el Pacífico. En los primeros 100 se van a ver unos geositios de América Central, y se propone a Uds. a crear un grupo de trabajo de América Central para consolidar este programa en los próximos años.

Finalmente hablaré del Programa Geocientífico de la UNESCO, que opera en conjunto con la IUGS. Este programa da la posibilidad de crear redes y grupos de trabajo internacionales, con el grupo sugerido de trabajo para los 'Global Geosites'. Actualmente estamos trabajando en 'Geopatrimonio para la Resiliencia', un programa mundial de proyectos sobre geopatrimonio para la reducción de desastres.

*Autor para contacto: ben.vanwyk@uca.fr



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Pasos en la construcción del Geoparque Río Coco, el Primer Geoparque Mundial de la UNESCO en América Central

Mónica Bueno de Frutos^{a*}

^aGeoparque Mundial de la UNESCO Río Coco, Madriz, Nicaragua.

El Geoparque Mundial de la UNESCO Río Coco debe su nombre al Río Coco, considerado uno de los ríos más largos de Centroamérica (680 km) y se forma por la confluencia del río Comalí (Honduras) y Tapacalí (Nicaragua). El territorio abarca 954 km² y está localizado al norte de Nicaragua, en el departamento de Madriz, los municipios que conforman el Geoparque son: Somoto, Totogalpa, San Lucas, San José de Cusmapa y Las Sabanas.

En el año 2005 se realiza el primer estudio geológico en el geositio Cañón de Somoto y nace la idea de crear un Geoparque, durante el año 2015 se inicia el trabajo en base a las directrices y formularios establecidos, y el programa Geoparques Mundiales de la UNESCO asigna de forma oficial a personas de la GGN para acompañarnos en el proceso. En el año 2017, se envía la candidatura a través de la Comisión Nacional UNESCO en Nicaragua, recibiendo posteriormente la visita de los evaluadores de Geoparques en el año 2019. El nombramiento oficial como el primer Geoparque de América Central tiene lugar en julio de 2020.

El Geoparque cuenta con valor patrimonial geológico, natural y cultural; se establecen 22 geositios y tres pueblos originarios. La mayor parte de la población se dedica al sector de la agricultura y ganadería, siendo en la cabecera departamental, Somoto, donde se centraliza el comercio. El clima es tropical seco, encontrándose el corredor seco en el área, lo que produce una alta vulnerabilidad ante el cambio climático y los procesos lluviosos.

El desarrollo del geoturismo supone un mecanismo para promover nuevas fuentes de ingresos y mejorar la calidad de vida de los pobladores locales. A pesar del impacto de la pandemia del Covid19, la nominación del territorio ha provocado un creciente interés tanto a nivel nacional como internacional.

*Autor para contacto: monika.bueno.defrutos@gmail.com



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Colca y volcanes de Andagua Primer Geoparque Mundial UNESCO reconocido en Perú, con asistencia técnica del INGEMMET

Danitza Churata^a, Bilberto Zavala^a

^aInstituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico.

Actualmente, el cambio global al cual se enfrenta la humanidad y las diferentes dificultades que se viven a nivel mundial; constituyen un marco de referencia que involucra significativamente en la gestión sostenible del territorio, el cual puede ser manejado satisfactoriamente mediante los Geoparques Mundiales de la UNESCO.

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), servicio geológico nacional, tiene como rol realizar estudios que permitan identificar y regular las zonas que en razón de la presencia de patrimonio geológico puedan considerarse áreas protegidas o constituir geoparques.

En este contexto con el aporte institucional del INGEMMET, basado en investigaciones sobre riesgos geológicos, geodiversidad, patrimonio geológico, geoconservación y propuestas de desarrollo del geoturismo; se encaminó el proyecto del primer geoparque aspirante a UNESCO (febrero 2015), conjuntamente con el Gobierno Regional de Arequipa, las provincias de Caylloma, Castilla y Autocolca. Proyecto que obtuvo la designación de Geoparque Mundial de la UNESCO Colca y volcanes de Andagua (abril 2019), primer geoparque en Perú. Cabe resaltar que tras su designación, INGEMMET sigue brindando asistencia técnica al geoparque, a través de Autocolca y el Gobierno Regional de Arequipa.

El Geoparque Mundial de la UNESCO Colca y Volcanes de Andagua ubicado al sur del Perú, comprende 22 distritos de dos provincias de la región de Arequipa (16 de Caylloma y 6 de Castilla), abarcando una extensión de 6,582.43 Km². Alberga una importante geodiversidad y un rico patrimonio geológico, que ha contribuido a esta designación de UNESCO; además de los aspectos de patrimonio cultural, histórico y arqueológico, de ocupación prehispánica e hispánica y de identidad cultural, propia del territorio del geoparque. Constituyendo un libro abierto para el conocimiento y educación de las geociencias. Siendo su territorio un contexto ideal para la gestión del riesgo geológico.



*Autor para contacto: danitzachurata@gmail.com



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Valoración de Geositios en Áreas Volcánicas para la Resiliencia ante Peligros Volcánicos y Geoconservación

Carla Arias^{a*}, Nélide Manrique^a, Benjamin Van Wyk de Vries^b, Jersey Mariño^a,
 Rigoberto Aguilar^a, Kevin Cueva^a, Andy Ancalle^a

^aInstituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET, Observatorio Vulcanológico del INGEMMET

^bUniversité Clermont Auvergne, Laboratoire Magmas et Volcans, OPGC, CNRS et IRD, Clermont-Ferrand, Francia

La valoración de geositios es de gran importancia en el estudio del geopatrimonio, en lugares de interés geológico con un importante valor científico, educativo y turístico, pero vulnerables al deterioro por falta de protección. Es por ello que su adecuado estudio y la aplicación de un proceso de valoración acorde, es primordial para ponerlos en valor como sitios clave para entender los procesos geológicos e históricos de un lugar determinado.

El proceso de valoración de geositios aplicado se dio partir de criterios de distintos autores. La metodología consta de 2 primeras etapas fundamentales: inventario y cuantificación, así clasificar los geositios con un ranking según su interés local - regional o nacional – internacional, valor científico, uso potencial educativo - turístico y riesgo de degradación.

Actualmente se aplicó esta metodología conjunta en áreas de principal interés volcánico en el sur del Perú, con una propuesta de geositios en el volcán Huaynaputina en la región Moquegua y en el volcán Chachani en la región de Arequipa.

La geología es la base para la identificación de geositios que ilustren sencillamente los procesos geológicos acontecidos. Es así que en el Huaynaputina se identificaron 21 geositios, agrupados como: 9 geositios volcánicos (depósitos y estructuras volcánicas); 7 arqueológico volcánicos (pueblos sepultados por la erupción); 2 geomorfositos (terrazas y zona de represamiento del río Tambo) y 3 en fuentes termales. Y en el volcán Chachani 5 geositios piloto de principal interés volcánico, y que actualmente se encuentra en proceso la identificación de más geositios relacionados al volcán Misti en Arequipa.

Finalmente, el estudio de geositios es una herramienta que ayudará a contribuir con la educación sobre los peligros y beneficios de la actividad volcánica, el desarrollo socioeconómico de su población local y la generación de comunidades resilientes ante los peligros volcánicos. Siendo ello, uno de los principales objetivos del proyecto UNESCO IGCP 692 “Geopatrimonio para la resiliencia ante peligros geológicos”, en el que se desarrolla parte de este trabajo en conjunto con el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico INGEMMET Perú.



*Autor para contacto: carla.ariassalazar05@gmail.com



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



El Triángulo Sagrado de Querétaro: Patrimonio Geológico del Proyecto Geoparque Mundial UNESCO

Geraldine V. Vásquez-Alarcón^{a*}, Gerardo J. Aguirre-Díaz^b

^a Unidad Multidisciplinaria de Investigación y Docencia de la Facultad de Ciencias, Campus UNAM-Juriquilla, Querétaro, México.

^b Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro, México.

El Triángulo Sagrado se ubica en el Estado de Querétaro, México, y forma el núcleo del Proyecto Geoparque Mundial UNESCO con el mismo nombre. Los vértices son la Peña de Bernal al sur, el Cerro El Zamorano al poniente, y el Cerro El Frontón al oriente, región vinculada a la riqueza cultural Otomí-Chichimeca ya inscrita en la UNESCO como patrimonio cultural intangible. Se encuentra en la intersección de las provincias geológicas Sierra Madre Oriental (SMO_r; cordillera plegada del Mesozoico), Sierra Madre Occidental (SMO_{cc}, vulcanismo del Terciario medio), y el Cinturón Volcánico Mexicano (faja volcánica del Neógeno-Cuaternario).

Cada vértice del Triángulo Sagrado representa a cada una de estas provincias proporcionando la geodiversidad del territorio. El Cerro El Frontón está formado principalmente por rocas marinas del Triásico (areniscas de 240 Ma), que son las unidades más antiguas del geoparque y están cubiertas por un domo dacítico mioceno, el cual forma la cima de la montaña. El Cerro El Zamorano es la montaña más elevada del estado (3,280 msnm) y está compuesta de una parte inferior de ignimbritas oligocenas de la SMO_{cc}, y una parte superior, que es un estratovolcán andesítico de 11 Ma con un domo dacítico tipo espina en el cráter del mismo. La Peña de Bernal es un domo dacítico tipo espina de 8.7 Ma, que forma un monolito de 433 m de altura, sobresaliendo en el paisaje por su morfología, y es considerado como Monumento Natural del Estado de Querétaro.

Estos sitios son lugares emblemáticos que pueden ser reconocidos como patrimonio geológico. Sus características geológicas, únicas en el mundo, son el sustrato rocoso sobre el cual se desarrollaron el paisaje y los diversos ecosistemas, suelos, flora y fauna, formando un entorno geodiverso y biodiverso, que finalmente dieron lugar a la riqueza cultural y cosmovisión de la región, con múltiples festividades y tradiciones que forman parte del patrimonio cultural en conexión con los rasgos geológicos de este territorio geoparque. Agradecimientos: UNAM-PAPIME PE102822; beca Ayudante Investigador CONACYT-SNI3-19255.

*Autor para contacto: geraldinevazal@ciencias.unam.mx, ger@geociencias.unam.mx



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Inventario y Valorización de lugares de interés geológico para la promoción del Patrimonio Geológico en Costa Rica

Ana Sofia Huapaya^{a*}

^aDepartamento de Investigación, Dirección de Geología y Minas, Ministerio de Ambiente y Energía.

El inventario y valorización de lugares de interés geológico (LIG) que realiza la Dirección de Geología y Minas (DGM) pretende constituirse en un catálogo sistemático, establecido en una base de datos, con el fin de lograr una adecuada gestión y promoción del patrimonio geológico; facultad que confiere el artículo N° 6, inciso 13), del Reglamento del Código de Minería, decreto ejecutivo 43443-MINAE. Lo anterior con el objetivo de contribuir al desarrollo de la geoconservación, geoducción y geoturismo.

La metodología utilizada por la DGM se basa en la propuesta metodológica aprobada en la XXIV Asamblea General de la Asociación de Servicios Geológicos y de Minería Iberoamericanos [1] y en la metodología utilizada por el Instituto Geológico y Minero de España [2]. La misma permite el inventariado, valorización y protección del LIG, a fin de que estos se conviertan y formen parte del desarrollo económico, social y cultural de Costa Rica.

El inventario es un listado abierto y dinámico (incorporación/eliminación) del LIG, con información sobre características generales del mismo, las cuales se divulgan a través de la página web de la Institución. La valorización tiene como objetivo ordenar los sitios de interés geológico seleccionados según su valor Científico, Educativo/Didáctico y Turístico/Recreativo, para lo cual se utiliza una herramienta que permite el cálculo de esta a partir de criterios establecidos por los expertos. Esta misma herramienta permite la valorización de la susceptibilidad (natural o antrópica) y el riesgo de degradación al que estaría expuesto el LIG, datos importantes para establecer las medidas de protección del lugar.

El inventario de la información se realiza durante el levantamiento geológico que la DGM efectúa para la construcción del mapa Geológico de Costa Rica a escala 1:50 000.

La información se procesa en sistemas de información geográfica, así como en bases de datos de Excel. Se generan capas de puntos con la ubicación de los LIGS y los atributos que demuestran las características generales del lugar y su valorización, con las fotografías respectivas.

Se ha inventariado y valorizado LIGs de las diferentes regiones del país, así mismo se ha generado rutas geoturísticas las cuales se plasman en folletos y guías de viajes o giras, que se encuentran de forma digital en la página de la Institución <http://www.geologia.go.cr/geologia/LugaresInteresGeologico.aspx> o www.geologia.go.cr.

Referencias

- 1.ASGMI (2018). "Metodología de valoración del Patrimonio Geológico". Primer Taller de ASGMI Sobre Patrimonio Geológico. 66 p. Salta, Argentina.
- 2.Instituto Geológico y Minero de España, IGME (2014). Documento Metodológico para la Elaboración del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG) en su versión (V16). Madrid, España.

*Autor para contacto: shuapaya@minae.go.cr



MEMORIA
 XIV Congreso Geológico de América Central &
 VII Congreso Geológico Nacional
 San José - Costa Rica, 2022



Unos pasos en el desarrollo de un Geoparque en la isla de Ometepe, Co-construcción con los isleños y Mapeo de Geositios

Eveling Espinoza^{a*}, David Chavarría^a, Benjamín Van Wyk de Vries^b

^aINETER, Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Frente a Hospital Solidaridad, Av. Xolotlán, Managua, Nicaragua.

^bUniversité Clermont Auvergne, Laboratoire Magmas et Volcans, OPGC, CNRS et IRD, Clermont-Ferrand, Francia.

En el marco del proyecto UNESCO IGCP (Programa Internacional de Geociencias) 692 “Geopatrimonio para la resiliencia ante peligros geológicos”, hemos iniciado en el año 2021 un proyecto de Geoparque en la Isla de Ometepe, Nicaragua.

Es a raíz del XII Congreso Centroamericano de Geología, realizado en Managua en septiembre de 2015, que surge la idea del proyecto del Geoparque Isla de Ometepe, en la cual se han involucrado científicos vulcanólogos internacionales, INETER, delegación de la UNESCO Nicaragua y otros actores locales. El nombramiento oficial de la Isla de Reserva Mundial de la Biosfera y más reciente del Geoparque Rio Coco, en Madriz, ambos por la UNESCO, han dado un nuevo impulso al proyecto de geoparque de la Isla de Ometepe.

La candidatura de geoparque de la Isla de Ometepe, fue propuesta por INETER durante la reunión de “Geopatrimonio para la Resiliencia ante Amenazas Naturales” del Programa Internacional de Ciencias Geológicas de la UNESCO, realizada en Manizales, Colombia en octubre de 2019.

Los estudios geocientíficos realizados sobre Ometepe basados en importantes investigaciones geológicas-geofísicas, monitoreo constante del INETER, crean un volumen de información científica existente muy alto. El INETER en conjunto con otras entidades y actores locales han contribuido en la comunicación y comprensión de los riesgos, para el conocimiento de los isleños.

Este ambiente fértil, es propicio para el desarrollo de un Proyecto de Geoparque, con el objetivo de promover el desarrollo sostenible económico de la Isla tanto en geoturismo, productos locales, y en la gestión de riesgos y el ambiente.

En septiembre 2021 se efectuó un taller inicial del Proyecto Geoparque Isla de Ometepe, con la participación de más de 80 personas de la Isla, actores nacionales y locales, sociedad organizada y la delegación de la UNESCO Nicaragüense, para el intercambio de ideas sobre el desarrollo ordenado, la resiliencia y conciencia del patrimonio geológico y las oportunidades que ofrece este patrimonio. Este taller inicio los primeros pasos de la organización administrativa del geoparque. Este año continuamos con la cartografía de los geositios y los talleres, con la participación de las experiencias del Geoparque Rio Coco, y delegados de patrimonio peruano y francés.



*Autor para contacto: eveling.espinoza@gf.ineter.gob.ni



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



La rotulación en los parques volcánicos de Costa Rica y áreas vecinas como complemento para una gestión del riesgo: Un ejemplo de geoalfabetización a seguir en otros sitios de interés geológico

Guillermo E. Alvarado^{a,b*}, Ramón Araya^a, Lidier Esquivel^a, Blas Sánchez^a, Yemerith Alpízar^c

^aComisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), San José, Costa Rica.

^bAhora en: Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

^cUniversidad Técnica Nacional.

Con una visión prospectiva de conservación y de reducción del riesgo, casi todos los grandes volcanes de Costa Rica, ya sea históricamente activos, dormidos y extintos, comenzaron a ser declarados parques nacionales a partir de 1955, deteniendo la ocupación humana y la extensión de actividades productivas no acordes al potencial de uso del suelo, particularmente la agricultura y la ganadería, así como posibles actividades de comercio e industria en la cúspide de estos sectores. Varios de estos parques nacionales han estado expuestos a la actividad eruptiva de alguno de los cinco volcanes históricamente activos.

A finales del siglo XX, Costa Rica comenzó a promocionarse a nivel mundial como un destino turístico importante por su gran biodiversidad y su vocación de conservación; ello hizo que la visitación a los diferentes volcanes de país aumentara y, por ende, la exposición de las personas a los diferentes peligros volcánicos. En aras de una mejor gestión del riesgo, las universidades públicas y la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), monitorean los diferentes volcanes del país y desarrollan una serie de actividades informativas y educativas hacia la población (talleres, charlas, conferencias, plegables informativos, posters, folletos, rótulos entre otros). Como parte de estas actividades, se dio una campaña intensa de geoalfabetización volcánica a partir del 2020, que consistió en el diseño, diagramación e instalación de rótulos de aluminio (resistentes a la lluvia ácida e inclemencias del trópico) con información preventiva y educativa en español e inglés, que contiene mapas, fotografías, dibujos históricos y advertencias.

Hasta mayo del 2022, se han rotulado 7 parques nacionales volcánicos (en orden cronológico: Poás, Turrialba, Irazú, Rincón de la Vieja, Barva y Miravalles) y zonas protegidas (Los Maares de Hule y Río Cuarto y el Volcán Congo), así como en las zonas de amortiguamiento (buffer) de los sectores aledaños y comunidades cerca de los parques (Campo Volcánico Pasquí-Las Cazuelas; La Central, Dos Ríos, Gavilán, Buenos Aires, Bajos del Toro). Más de dos centenares de rótulos se han instalado hasta el momento, con la colaboración del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), comunidades, empresas privadas, sector turismo y Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados comunales (ASADAS), lo que ha generado un empoderamiento y sentido de pertenencia e importancia en todas las organizaciones y la comunidad en general.

Los rótulos se agrupan en dos tipos: a) rótulos informativos, con aspectos geológicos y vulcanológicos relevantes del volcán, su grado de actividad eruptiva presente y pasada, incluyendo ejemplos directos en el campo de tipos de peligros volcánicos, entre otros, y b) rótulos preventivos, con advertencias para los turistas de que están ingresando a zona con actividad volcánica, peligrosidad por deslizamiento, lahares, caídas o erupción volcánica, no ingresar y rutas de evacuación. Todas las acciones están vinculadas a la Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo N.º 8488, a la Política Nacional de Gestión del Riesgo (2016-2030) y al Plan Nacional de Gestión del Riesgo 2021-2025.

Lo anterior debería de implementarse no solo en otras áreas de conservación que posean aspectos de interés geológico, sino en aquellos lugares que puedan tener su atractivo y de protección (afloramientos, geoformas, tipos particulares de rocas o depósitos, entre otros) como geomorfosio y de geodiversidad, o incluso un candidato para ser declarado patrimonio geológico o futuro geoparque.

*Autor para contacto: GAlvaradoI@ice.go.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



EG
Escuela de
Geografía

Geodiversidad y Geoturismo en América Central

Adolfo Quesada-Román^{a*}

^aLaboratorio de Geografía Física, Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica

Centroamérica se encuentra en una región dinámica donde la tectónica y el vulcanismo junto con el clima tropical y su diversa vegetación han moldeado sus paisajes.

El principal objetivo es revisar el estado de la geodiversidad, la geoconservación y el geoturismo en Centroamérica. Se identificarán los entornos geomórficos y la geodiversidad de la región utilizando técnicas clásicas de mapeo de geomorfología regional. Asimismo, a través de mapas turísticos y páginas web identificamos los geositos más destacados de diferente origen en Centroamérica. Además, se exploran las políticas ambientales nacionales, los sistemas de conservación natural y las iniciativas turísticas para promover su geopatrimonio nacional a través del geoturismo.

Se encontró que los ambientes geomórficos volcánicos, costeros, kársticos, glaciares y fluviales son los más comunes en la región. Además, se identificaron 393 geositos de origen volcánico, costero, kárstico, glacial, fluvial y arqueológico en Centroamérica.

La promoción del geopatrimonio, su geodiversidad, la geoconservación y, por lo tanto, el desarrollo de geoparques son excelentes oportunidades para promover el desarrollo sostenible, los estilos de vida sostenibles, la apreciación de la diversidad natural y cultural y la promoción de la paz.

Estos resultados pueden resultar importantes para difundir ampliamente información sobre geociencias entre los tomadores de decisiones sobre geoturismo y conservación en cada país y las partes interesadas de la región. Los estudios de geopatrimonio en países tropicales y en desarrollo como los de América Central deben mejorarse y ser una prioridad debido a la dinámica geomorfológica y las fuertes presiones antrópicas sobre su geografía y biodiversidad, para aumentar sus ingresos a través del geoturismo, especialmente entre las comunidades menos favorecidas y evitar afectar sus ya amenazados recursos naturales.

*Autor para contacto: adolfo.quesadaroman@ucr.ac.cr



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES

Comunicación basada en el impacto, en el campo de los peligros geológicos y la gestión del riesgo

Jacqueline Yamileth Rivera Ayala^{a*}

^aMinisterio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, San Salvador.

Abstract: El Salvador is implementing a multi-hazard impact-based information to apply in the early warning services and to strengthen the communication with the response institutions during crisis. The Natural Hazards and Resources Observatory (DOA) support the approach of communication based in impacts as an essential component to provide effective information to decision-makers at national and local level. To do so, it is important that DOA understands how users are benefiting from IBF, even as they look to improve it. During the approach implementation and continuous improvement, a standardized validation process was adopted. Feedback from key sectors and users has been collected throughout the process, through surveys and focus group interviews, to improve the early warning approach and communication strategy.

Palabras clave: peligro, riesgo, comunicación, comunicación basada en impactos, preparación.

Key words: hazard, risk, impact-based communication, forecast, preparedness.

Introducción

La Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales (DOA) de El Salvador es un observatorio multi-amenazas, que aloja los servicios geológicos (sismología, vulcanología y deslizamientos), hidrológico, meteorológico, oceanográfico y de calidad de aire. Estos servicios realizan esfuerzos continuos para desarrollo de capacidades en el campo de la comunicación del riesgo. Los servicios y productos de datos e información mejoran continuamente, los procedimientos-protocolos se actualizan de acuerdo con la evolución de los enfoques y los modelos se calibran y actualizan en función de evaluaciones sistemáticas de su desempeño. El personal recibe capacitación continua para mejorar las capacidades de pronóstico basadas en amenazas e impactos. Se llevan a cabo programas de divulgación pública, y el programa de Observadores Locales se ha fortalecido a lo largo de los años, para ayudar a construir Sistemas de Alerta Temprana (SAT) centrados en los usuarios.

En tal sentido, técnicas de las ciencias sociales, relacionadas con la comprensión de la sociedad y el

*Autor para contacto: jacquelinrivera@marn.gob.sv

comportamiento humano, juegan un papel crucial para transformar todo el conocimiento, que las ciencias de la tierra generan, en acciones concretas para reducir riesgos y salvar vidas. En El Salvador, proyectos tales como, Weather Ready Nations (WRN) implementado desde el 2017, que es respaldado por la Oficina de Actividades Internacionales del Servicio Meteorológico Nacional de EE. UU. y la Agencia de EE. UU. para el Desarrollo Internacional (USAID)/Oficina de Asistencia Humanitaria (anteriormente OFDA), en asociación con el Centro de Investigaciones Hidrológicas de California (HRC, por las siglas en inglés); y, Tsunami Ready Program, desde 2019, en un programa auspiciado por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por las siglas en inglés), han sido de gran soporte para fortalecer este tipo de enfoques.

El objetivo principal de la información basada en impactos es proporcionar a las comunidades información integrada – multi-amenaza. De tal manera que la difusión de la información sea precisa, oportuna y fácilmente comprensible. En este proceso los diferentes servicios de que realizan el monitoreo y vigilancia de fenómenos naturales deben desarrollar capacidades y herramientas para la implementación y operatividad.

En terminos generales, los sistemas de información basados en impacto poseen cuatro ejes de acción principales: servicios de toma de decisión basadas en el impacto, comunicación, experiencia local y socios y cooperantes (figura 1). Teniendo como propósito construir comunidades resilientes a través de la concienciación y estrategias de preparación para proteger las vidas las pertenencias y las propiedades, ante la ocurrencia de un fenómeno natural amenazante.

La información basada en el impacto se centra en traducir las amenazas en impactos específicos por sector y ubicación, y el desarrollo de respuestas sectoriales para mitigar esos impactos. Los pronósticos de impacto enfatizan lo que hará la amenaza en lugar de describir cuál será la amenaza y sus características. Estos tipos de pronósticos están diseñados para expresar los impactos esperados como resultado del tiempo esperado (WMO, WBG, & GFDRR, 2016).



Figura 1. Componentes principales de los sistemas basados de información basados en impacto.

La comunidad científica usualmente transmite información basada en amenaza, la cual contiene información las variables ya sean atmosféricas, hidrológicas y geológicas, y cómo se espera que cambien; describiendo la evolución esperada de las variables sensibles, ya sea de manera numérica (probabilidad, umbrales, porcentajes, rangos, valores de mediciones directas, etc.). Así mismo, la comunicación de este tipo de información por parte de los servicios de monitoreo y vigilancia ha evolucionado desde la provisión de información en un horario regular (por ejemplo, actualizado cuatro veces al día) a un paradigma donde los pronósticos se actualizan casi continuamente, a través de texto escrito, gráficos, radio y, con la llegada de las tecnologías inalámbricas, mensajes de texto, correo electrónico y aplicaciones móviles (WMO, WBG, & GFDRR, 2016). En este sentido, la implementación de enfoque más efectivos en términos de comunicación necesarios; sin omitir que, un buen pronóstico basado en la amenaza siempre es necesario para la generación de un buen pronóstico de impactos.

Materiales y Metodología

La implementación de este enfoque requiere de un proceso de diseño que considere diferentes pasos desde la definición del problema, la recolección de información (amenaza, exposición y vulnerabilidad), lluvia de ideas con diferentes actores, desarrollo de soluciones y construcción de modelos, retroalimentación de los usuarios y desarrolladores, y procesos de mejora (figura 2). En El Salvador, este proceso de diseño, de acuerdo con la experiencia, ha sido cíclico para cada área especializada de vigilancia y monitoreo. No es un proceso que identifique un fin, sino más bien ciclos de evolución y mejora.



Figura 2. Proceso de diseño para la implementación de información basada en el impacto en El Salvador. Basados en el proceso de diseño tipo propuesto por el Chicago Architecture Center, 2012-2019.

En El Salvador, se adoptó la metodología del WRN para implementar el enfoque basado en impactos, donde se comunica la probabilidad de una amenaza prevista y su posible gravedad. La OMM propone el establecimiento de una “matriz de riesgo” como aplicación operativa para la emisión de avisos, a diferencia del sistema de advertencias convencionales (que se emplean umbrales o la opción “sí/no”). La matriz de impacto relaciona el impacto esperado de una amenaza con su probabilidad de ocurrencia (figura 3), a través de un esquema de color simple de “semáforo”, que busca ser (OMM, 2015):

1. Un medio coherente para emitir la alerta temprana de un posible impacto, mucho antes de que ocurra un fenómeno hidrometeorológico importante.
2. Un medio para comunicar progresivamente los cambios en las expectativas respecto del riesgo en función de la variación de la exposición, la vulnerabilidad y la probabilidad de un fenómeno hidrometeorológico.

Probabilidad del Impacto						
Muy alta	100%	4 - Monitoreo	8-Aviso	12-Alerta	16-Emergencia	No. de Matriz/ Etapa Interna
		En línea base ó < 10%	20% - 40%	40% - 60%	> 60%	Porcentaje de variación en los parámetros de monitoreo
Alta	80%	3 - Monitoreo	7-Aviso	11-Alerta	15-Alerta	No. de Matriz/ Etapa Interna
		En línea base ó < 10%	20% - 40%	40% - 60%	40% - 60%	Porcentaje de variación en los parámetros de monitoreo
Media	60%	2 - Monitoreo	6-Preaviso	10-Aviso	14-Alerta	No. de Matriz/ Etapa Interna
		En línea base ó < 10%	10% - 20%	20% - 40%	40% - 60%	Porcentaje de variación en los parámetros de monitoreo
Baja	30%	1 - Monitoreo	5-Preaviso	9-Aviso	13-Aviso	No. de Matriz/ Etapa Interna
	10%	En línea base ó < 10%	10% - 20%	20% - 40%	20% - 40%	Porcentaje de variación en los parámetros de monitoreo
		Bajo	Medio	Significativo	Severo	Nivel de Impacto

Figura 3. Matriz de riesgo propuesta para el área de monitoreo volcánico, para la implementación de información basada en impacto, durante crisis relacionadas a erupciones volcánicas.

Pueden ser generadas matrices de impacto por fenómeno aplicada a diversos eventos naturales que pueden ocasionar efectos adversos, ya sean estos hidrometeorológicos, oceanográficos, geológicos, clima, etc. El proceso es fluido (figura 4), iniciando con la determinación del tipo de fenómeno que se espera que ocurra (su probabilidad, intensidad de la amenaza, dónde y cuándo la amenaza ocurrirá). Luego identificar sus efectos. Para posteriormente valorar que ocasionarán esos efectos potenciales de la amenaza en los elementos en exposición (vivienda, caminos, medios de vidas, vidas humanas, etc.). Para obtener como producto final un pronóstico claro, para la toma de decisiones.

Resultados y Análisis

La efectividad de este tipo de enfoques en El Salvador ha sido posible fortaleciendo tres aspectos importantes de la DOA, la integración, el entrenamiento y la comunicación. La DOA es un observatorio integrado que aloja todos los servicios de monitoreo, y por lo tanto, compartir datos de un servicio es fluido y en tiempo real. En el tema de entrenamientos, la DOA ha dedicado esfuerzos continuos de entrenamientos de sus especialistas y técnicos para mejorar la efectividad de la transmisión de la información técnica y científica a la población de tal manera que esta se traduzca en acciones efectivas que reduzcan los impactos negativos de los fenómenos naturales con potencial de impactar zonas de riesgo; así mismo, ha sido necesaria la educación constante de los diferentes usuarios de la información (Protección Civil, instituciones de respuesta a la emergencia, ONGs, población en general, etc). Y, en el tema de comunicación se han realizado esfuerzos tales que la comunicación se considere en tres ejes principales: comunicación no verbal, comunicación escrita y comunicación auditiva; estos ejes deben centrarse en el usuario, poniendo especial atención en el diseño gráfico de la información, diseño de los mensajes y canales de difusión (figura 5).

Conclusiones

A través de los proyectos implementados, en el campo hidrometeorológico, sismológico y oceanográfico, la DOA ha comprobado que la difusión de la información es más precisa, oportuna y fácilmente comprensible; tener una

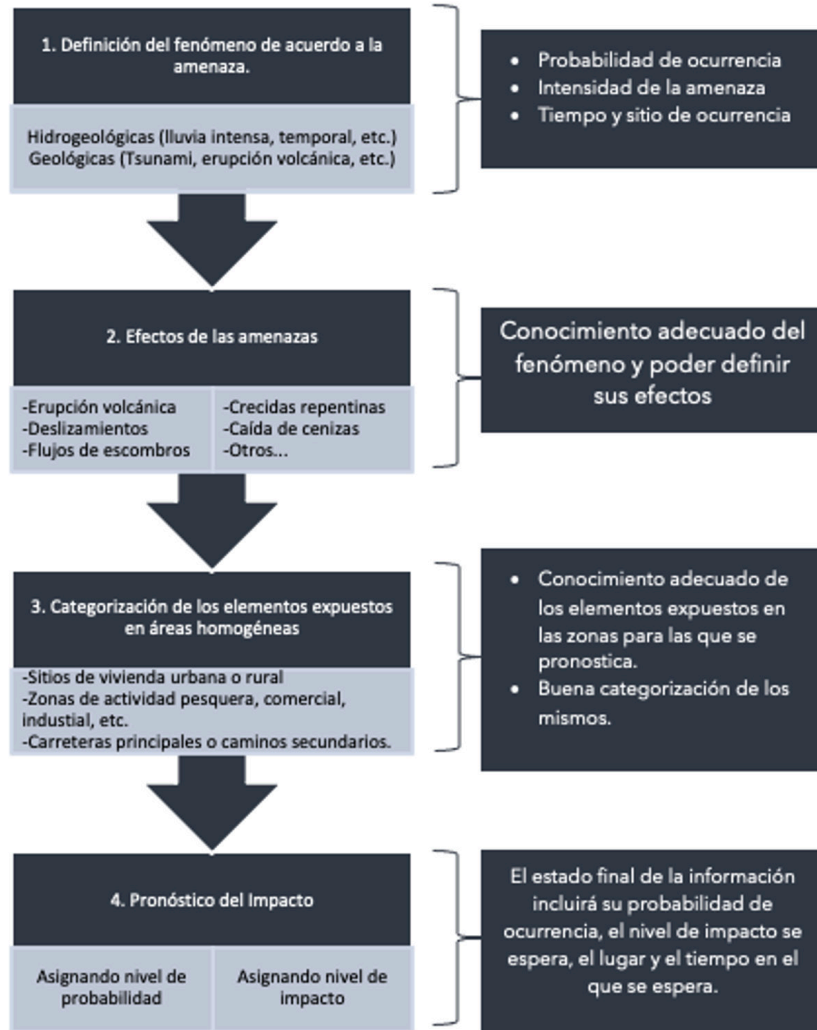


Figura 4. Diagrama de flujo resumido. Proceso para la toma de decisiones para la emisión de información basada en el impacto.

mejor comprensión de las amenazas, garantiza la adopción de las medidas pertinentes. Dentro de la Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, se mejoran las capacidades del personal, se crean herramientas que facilitan los procesos internos y se actualizan y robustecen las bases de datos. Tomando en cuenta que:

- A pesar del grado de incertidumbre de los pronósticos, la matriz de impactos permite dimensionar la severidad de los eventos y evolucionar en confianza a medida el fenómeno evoluciona.

- Un buen pronóstico que toma en cuenta impactos necesita de buenos pronósticos de amenaza y de información de exposición actualizada y detallada.

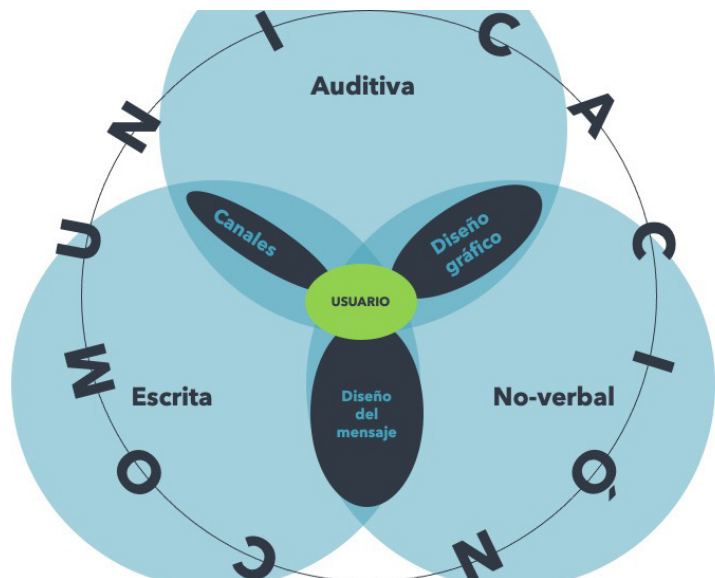


Figura 5. Principales componentes de la comunicación identificados en la implementación de enfoques de información basados en impactos, dentro de la DOA.

- Este enfoque debe permitir traducir en un lenguaje tal, que contribuye al proceso de toma de decisiones para atención de las emergencias.

- No existe ni un solo canal, ni un solo mecanismo de información. Se deben identificar los más eficientes y poder llegar a la mayor parte de usuarios finales de la información.

Referencias

1. WMO, WBG, & GFDRR. (2016). Implementing Multi-Hazard Impact-based Forecast and Warning Services., (págs. Parte I, Resumen). Shanghai.

2. OMM. (2015). Directrices de la OMM sobre servicios de predicción y aviso multirriesgos que tienen en cuenta los impactos .

Apéndice I.

Patrocinadores internacionales



Nombre: Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR por sus siglas en Alemán)

País: Sede de oficina regional en Nicaragua

Representante: Sulamith Kastl, Directora Regional para Centroamérica

Teléfono: +505 2278 5625

Dirección: Rotonda Jean Paul Genie 800m al Oeste, Centro Ejecutivo San Marino, Módulo B (Planta Baja). Managua, Nicaragua C.A.

Correo electrónico: sulamith.kastl@bgr.de

Página web: <http://www.bgr.bund.de>



Nombre: Proyecto plurianual de investigación “Estudio Regional Integrado de la Estructura y Evolución 4D de la Litósfera en América Central. Implicaciones en el cálculo de la amenaza y riesgo sísmico” del Programa Estatal de I+D+i del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España.

País: España

Representante: María Belén Benito Oterino (Coordinadora Subproyecto 2)

Teléfono: +34 610 29 67 56

Dirección: Campus Sur - Universidad Politécnica de Madrid, Calle Mercator, 2 28031, Madrid, España.

Correo electrónico: mariabelen.benito@upm.es

Página web: <https://blogs.upm.es/proyectokukahpan/>

Patrocinadores Nacionales



Nombre: UAV LATAM COSTA RICA SRL

Representante: Francisco Fallas Sánchez

Teléfono: 8385-3934

Dirección: Cartago, Occidente, El Molino 125 metros al Suroeste de la Biblioteca Pública de Cartago.

Correo electrónico: ffallas@uavlatam.com

Página web: www.uavlatam.com

RECOPE

Seguridad energética

Nombre: Refinadora Costarricense de Petróleo

Representante: Juan Manuel Espinoza Quesada

Teléfono: 2284-2700 ext. 2745

Dirección: San José, Goicoechea, San Francisco, Carretera 108, contiguo inicio ruta 32.

Correo electrónico: recopecomunicacion@recope.go.cr

Página web: www.recope.go.cr

Auspiciadores Nacionales



www.tajochirripo.com



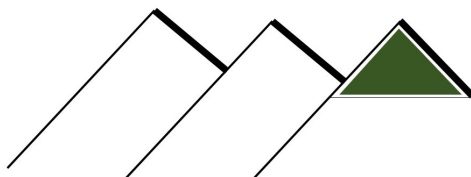
Daniel Kivari ctogrylo@cs.com



Gerardo Beita info@brpcostarica.com

www.brpcostarica.com

MINA MONCADA S.A.



Flory Moncada García



Federico Leandro ctogrylo@cs.com

Auspiciadores Nacionales



SOMOS MÁS QUE UNA MARCA.

Gerardo Beita info@mg.cr

www.mg.cr

Auspiciadores adicionales

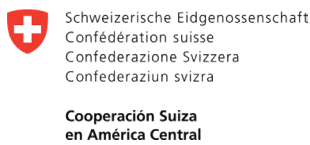


Filiaciones de nuestros autores, coautores y revisores científicos





INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS



Comunidad de Madrid





UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA



Schweizerischer Erdbebendienst
Service Sismologique Suisse
Servizio Sismico Svizzero
Swiss Seismological Service



Apéndice II.

Como citar los documentos

A continuación se exponen algunos ejemplos de como realizar las citas bibliográficas de los resúmenes de las charlas magistrales y ponencias regulares, así como de los pósteres presentados en el XIV Congreso Geológico de América Central y el VII Congreso Geológico Nacional.

Las mismas son una sugerencia y los formatos pueden variar según los requerimientos de los editores de otras publicaciones. Sin embargo, los ejemplos expuestos siguen los parámetros sugeridos por la APA.

Como citar una charla magistral

Córdoba, D. y Benito, M.B. (2022). Proyecto KUK_AHPAN: avances y retos para la mejora del conocimiento de la amenaza y riesgo sísmico en América Central (Charla magistral). En C. A. Laurito (Ed.), *Memoria del XIV Congreso Geológico de América Central y VII Congreso Geológico Nacional* (M3-1- M3-6). San José, Costa Rica.

Como citar una charla de una sesión determinada

Mixa, P. y Žáček, V. (2022). Métodos de muestreo geológico para análisis geocronológicos, isotópicos y radiológicos (Sesión de Estratigrafía y Cartografía). En C. A. Laurito (Ed.), *Memoria del XIV Congreso Geológico de América Central y VII Congreso Geológico Nacional* (R17-1-R17-7). San José, Costa Rica.

Como citar un póster

Cubillos, F. y Mora, M. (2022). Aplicación de métodos geofísicos para la creación de un mapa de concentraciones de ^{40}K de un yacimiento epitermal, localidad de Montezuma, Costa Rica (Sesión de Pósteres). En C. A. Laurito (Ed.), *Memoria del XIV Congreso Geológico de América Central y VII Congreso Geológico Nacional* (P7). San José, Costa Rica.

ISBN: 978-9930-9769-0-6



Editorial Colegio de Geólogos de Costa Rica

INTRODUCCION

Cerro Negro, el volcán más joven y uno de los más activos de Nicaragua hizo su primera erupción en abril de 1850 y hasta la actualidad se registran alrededor de 23 erupciones (Hill et al., 1998; La Femina et al., 1999). La actividad predominante que presenta este volcán es del tipo estromboliano (INETER 2000, Hill et al. 1998), lo cual está estrechamente ligado a la composición química de su magma, basáltico.

El volcán Cerro Negro pertenece al complejo volcánico Las Pilas – El Hoyo (McKnight and Williams, 1997), y es la estructura volcánica más joven de este complejo. No se había realizado anteriormente una evaluación de la amenaza por flujos de lava de este complejo volcánico, lo cual es una amenaza real, tanto para la creciente población que habita dentro de la zona de peligro, como para su infraestructura y cultivos, siendo estos últimos uno de los rubros principales de subsistencia y desarrollo económico de esa zona (foto 1).

El presente estudio tiene precisamente como objetivo principal la evaluación de la amenaza por flujos de lava del volcán Cerro Negro, tomando como referencia los flujos de lava más voluminosos emitidos por las estructuras del complejo volcánico Las Pilas – El Hoyo. A partir de datos de campo, complementados con interpretación fotogeológica e imágenes satelitales, se determinaron los volúmenes de los flujos de lava más grandes, los que luego fueron utilizados para simular numéricamente una erupción efusiva del volcán Cerro Negro y así evaluar la amenaza por flujos de lava.

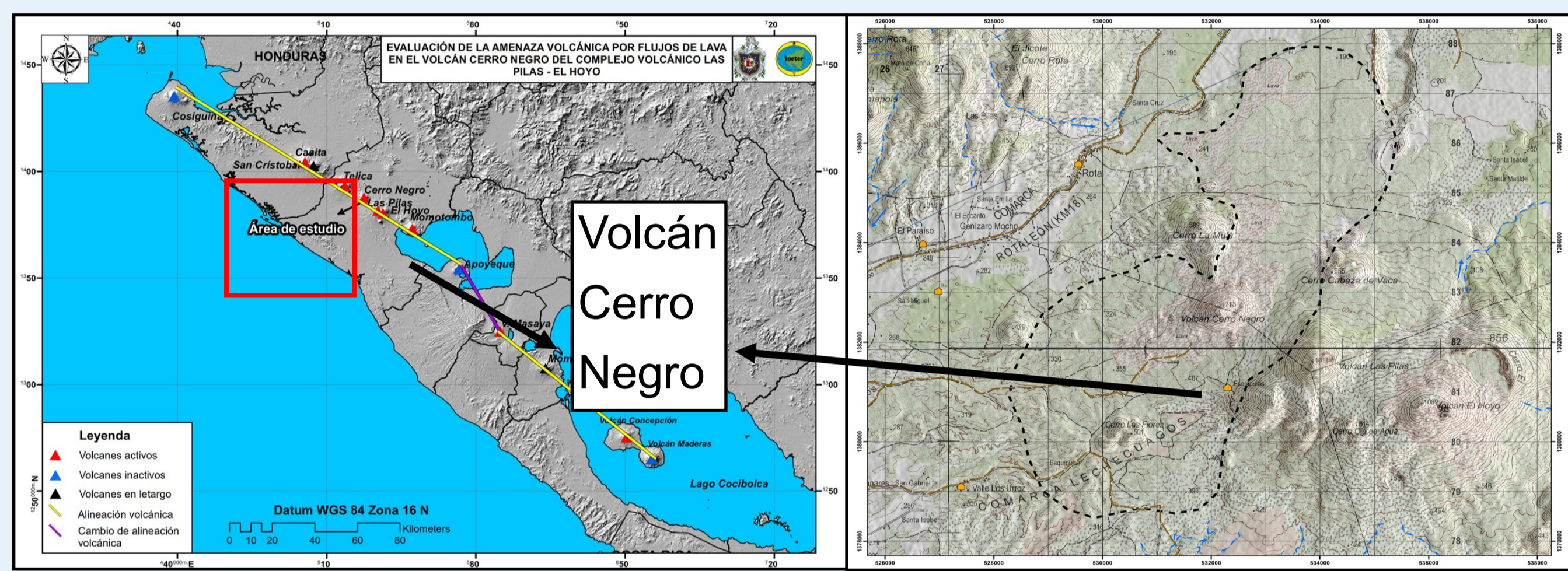


Foto 1. Ubicación de la cadena volcánica cuaternaria del Pacífico de Nicaragua con enfoque del área de estudio y evaluativa en línea discontinua oscura. Contiene un área estimada de 3249.83 ha.

METODOLOGÍA

La metodología que se implementó en este trabajo monográfico se divide en 2 etapas que se describen a continuación:

Etapa de gabinete

- Recolección y recopilación de toda la información referente al área de estudio, incluyendo artículos científicos.
- Revisión del mapa geológico organizado por Centro Geológico Checo (CGC, 2005), para la corroboración de la geología, lineamientos y fallas que afecten o circunden al área de estudio.
- Planificación de gira de reconocimiento geológico y ubicación de flujos de lavas anteriores.
- Correlación de la información obtenida en gabinete y campo para la caracterización geológica del área y amenazas por flujos de lava.
- Uso de las hojas topográficas Malpaisillo 2853-I y La Paz Centro 2853-II, 2006, INETER.
- Interpretación de fotografías aéreas para la evaluación de antiguos flujos de lavas.
- Introducción de datos de campo en un sistema de información geográfica (SIG) usando Arc-Map 10.2, AutoCAD 2020 y uso del código Downflow sobre MATLAB.
- Preparación del informe monográfico final.

Etapa de campo

- Reconocimiento exhaustivo del área de estudio propuesta que cuenta con 3249.83 hectáreas.
- Recolección de datos para la realización de mapas geológicos, geomorfológicos y por amenazas de flujos de lava.
- Recorrido de antiguos flujos de lava que se encuentran dentro del área de estudio y toma de muestras de rocas.
- Inspección in situ para recolección de datos y discusión de especialistas geólogos de INETER.

RESULTADOS

Se realizaron 35 simulaciones con el método DOWNFLOW con 3 diferentes puntos de emisión en el volcán Cerro Negro ubicados en las coordenadas 1) 532380 E – 1382037 N, 2) 532365 E – 1381928 N, y 3) 532367 E – 1382788 N (foto 3). Con los resultados obtenidos, se procedió a hacer un cálculo de sensibilidad con los flujos levantados en campo y los digitalizados por medio de imágenes satelitales y fotografías aéreas. Esto nos permitió definir los flujos mejores proyectados en el área de estudio, por ello se eligieron 13 simulaciones (foto 4).

El cálculo de sensibilidad nos permitió identificar y definir las proyecciones óptimas de flujos de lava para hacer la zonificación de amenazas en la zona, definiéndose entonces tres (3) clasificadas en Alta, Media y Baja (figura 1). Aunque la zona en cuestión no se encuentre poblada de manera sobre extendida, existe un porcentaje poblacional nómada que crece cada año en los municipios principales de la zona, tales como Malpaisillo, Rota y Telica. (INIDE, 2005).

Para la realización del mapa final por amenazas de flujos de lava zonificado en alta, media y baja; fue necesario la confección de mapas temáticos (foto 2) ocupados como base científica para esta investigación, entre ellos: geológico, estructural, geomorfológico y de pendientes, así como la interpretación de varias líneas de fotografías aéreas.

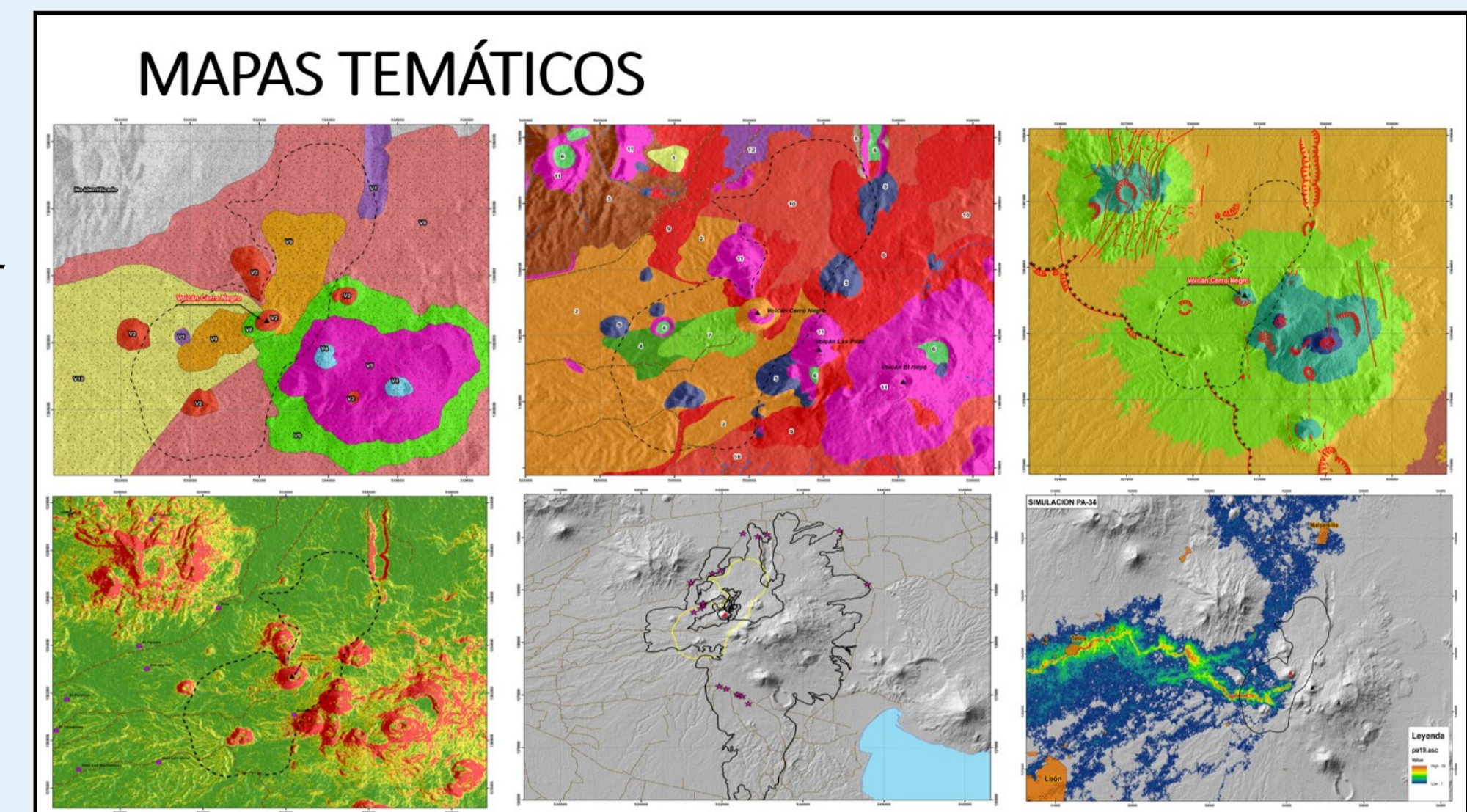


Foto 2. Mapas temáticos realizados con la recolección de datos de campo y gabinete.

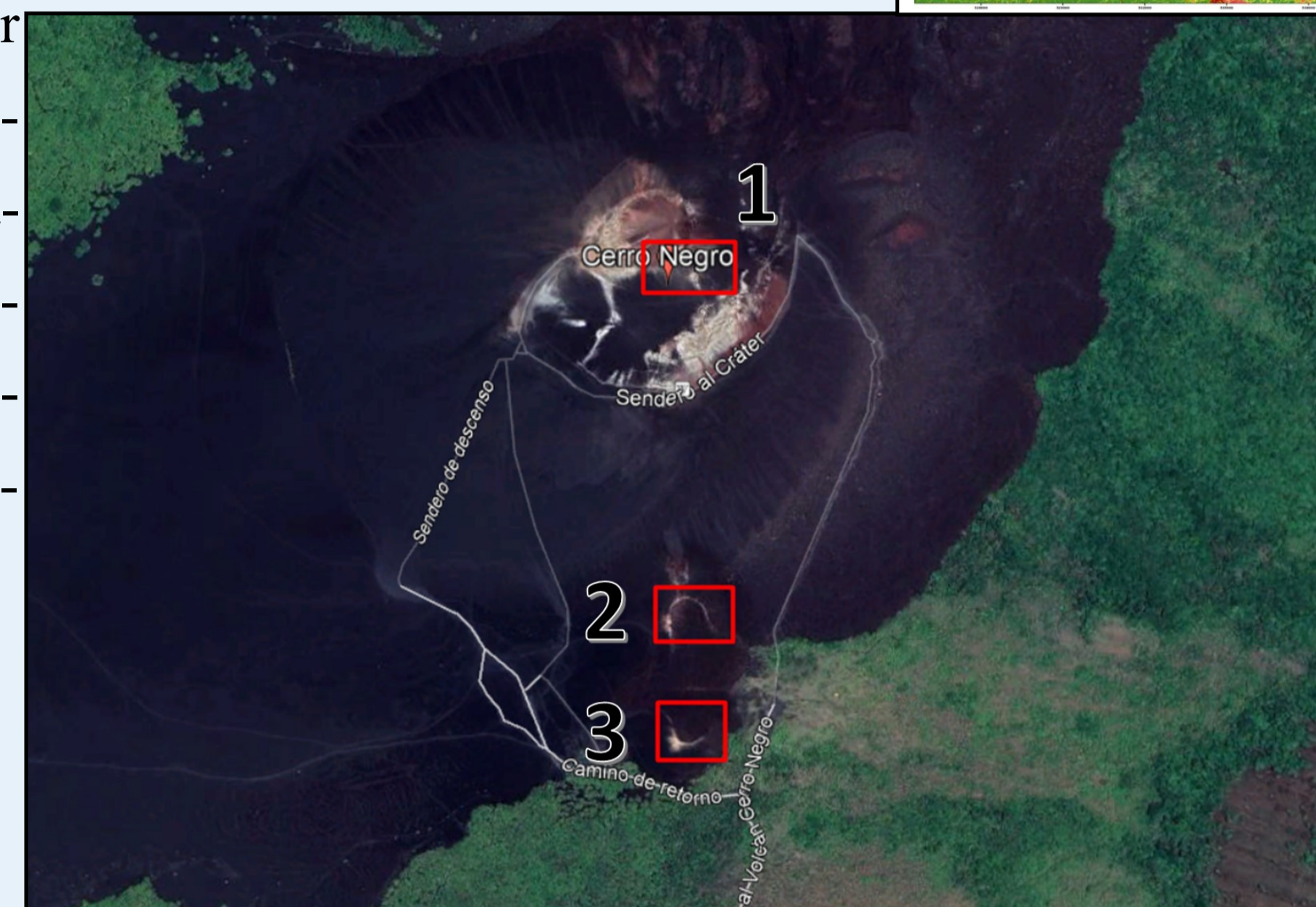


Foto 3. Puntos de emisión del volcán Cerro Negro utilizados para las simulaciones con el método DOWNFLOW.

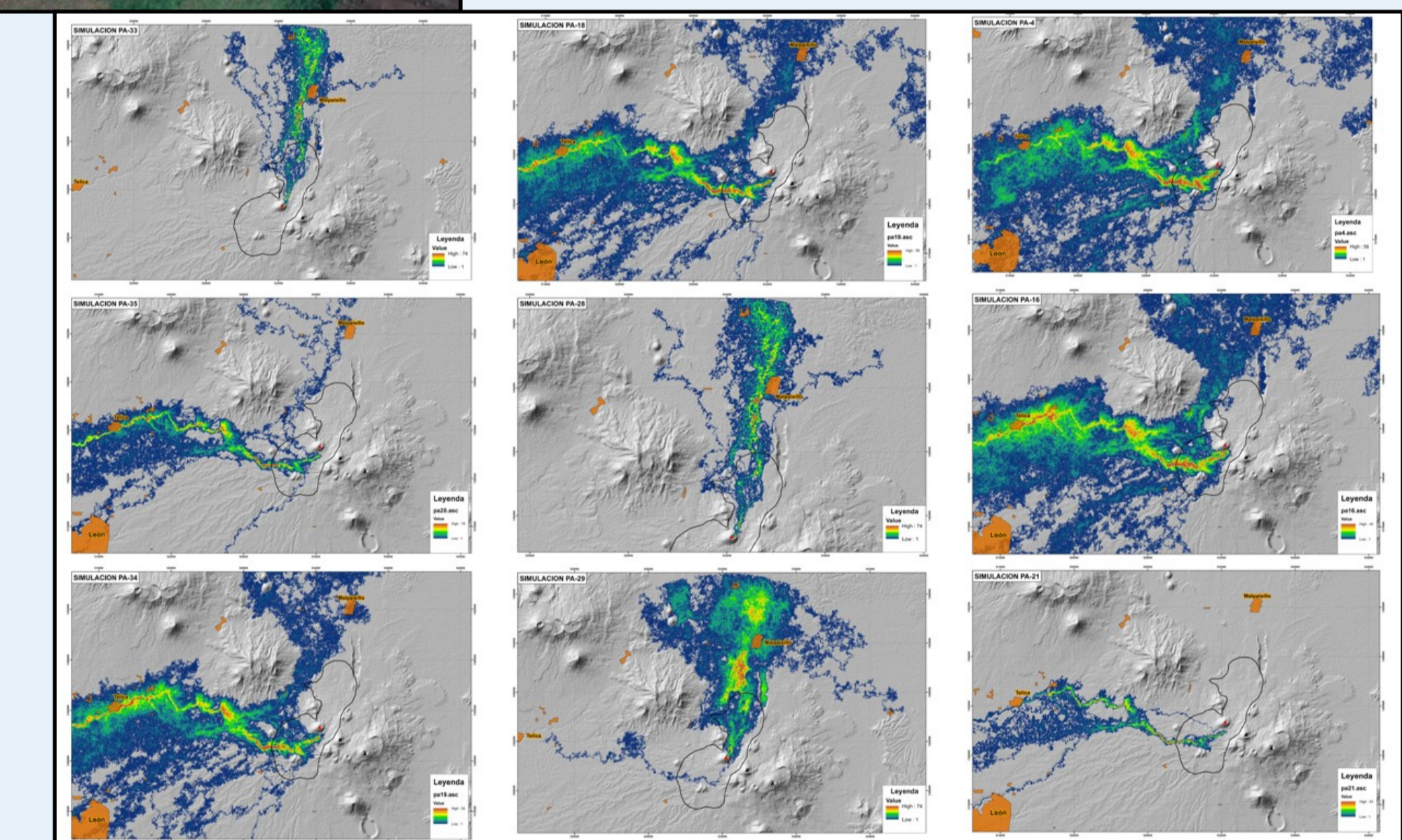


Foto 4. Simulaciones utilizadas para el cálculo de sensibilidad a través de DOWNFLOW.

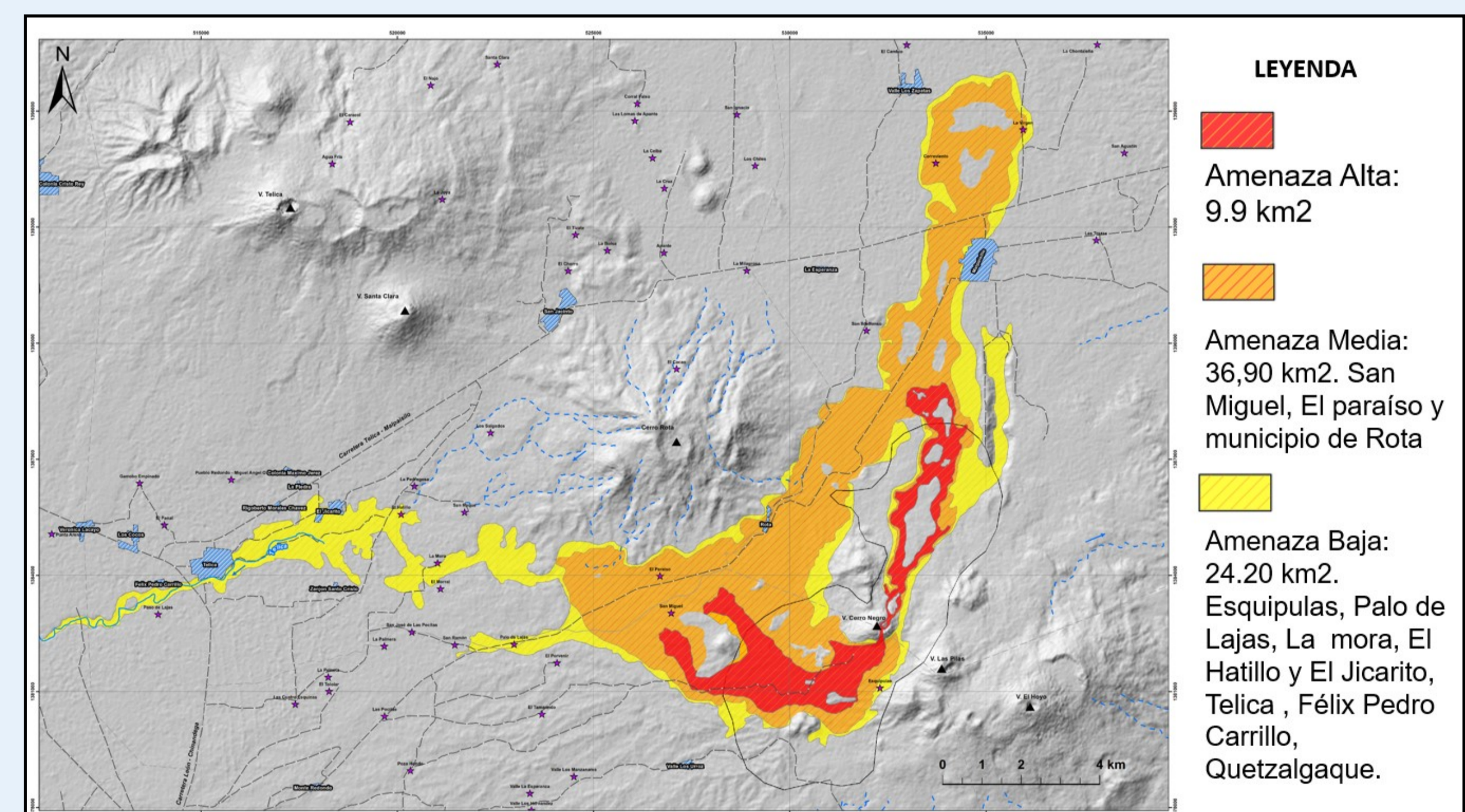


Figura 1. Mapa de amenaza volcánica por flujos de lavas del volcán Cerro Negro

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Conocer el comportamiento pasado de un área volcánica activa es fundamental para comprender su funcionamiento actual y constituir la base para la elaboración de los mapas de peligros volcánicos.

- Se recolectaron datos de campos de flujos de lavas anteriores en los alrededores del área de estudio.
- Se prepararon mapas temáticos como: Mapa geológico, estructural, geomorfológico, pendientes, fotogeológico y mapas de simulaciones para el cálculo de sensibilidad de la zona.
- Se elaboró un mapa probabilístico de flujos de lavas con el método DOWNFLOW.
- Zonificación del mapa probabilístico de flujos de lavas en amenaza alta, media y baja.

RECOMENDACIONES

- Determinar pautas y frecuencias eruptivas para crear mapas de amenazas para otro tipo de actividad volcánica.
- Realizar con mayor detalle los mapas que sirven de base científica para la realización de mapas de amenazas/ riesgos
- Realizar la vigilancia instrumental constante del volcán Cerro Negro.
- Considerar el cálculo de volúmenes de flujo de lavas de la cámara magmática, lo que puede realizarse con estudios geofísicos.



Construcción de insumos sobre recarga acuífera para estrategia de gestión de ciclo hídrico en el Área Metropolitana de San Salvador

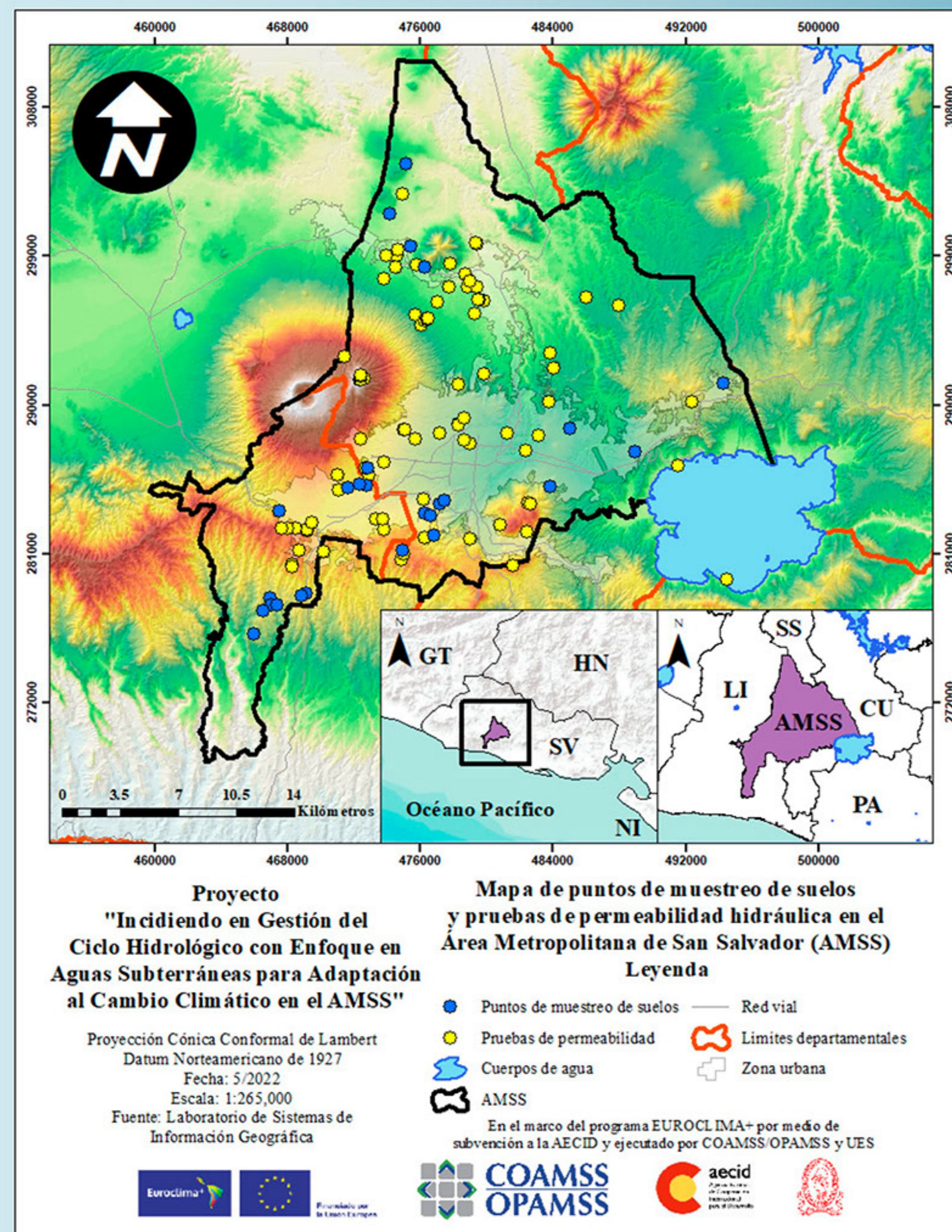
César Alvarado¹, Ingrid Alfaro², José Alexander Chávez², Marcia Barrera¹, Efraín Alas², Sara Cornejo², Mauricio Vásquez², Fernando Menjívar¹, David Flores¹
¹Universidad de El Salvador (UES) y ²Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS)

Introducción

El crecimiento del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) se ha extendido a lo largo de todo el valle, reduciendo las zonas de recarga acuífera, ocupando suelos problemáticos, perturbando el ciclo hidrológico y por ende afectando la disponibilidad de agua futura en los acuíferos de la zona. Por primera vez de manera sistemática se ha levantado información de permeabilidad y texturas de suelo dentro de la zona, lo cual servirá como insumo importante en el balance hídrico, así como en la toma de decisiones para medidas de mitigación/adaptación. Además, esta nueva base de datos ayudará a tener criterios para obras de infiltración, evitar la erosión y a prepararse en cuanto a los escenarios de cambio climático donde se prevé disminución de lluvias, así como aumento en la temperatura.

Esta investigación hace énfasis en la cooperación institucional entre la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), las municipalidades y la Universidad de El Salvador (UES). Que tiene como objetivo principal, el desarrollo de información técnica valiosa que permita la caracterización de los suelos, tasas de infiltración del AMSS y propuestas de modelo de gestión de la recarga acuífera; tales como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Partiendo de la ecuación del balance hídrico general que pretende encontrar la proporción y distribución del agua que reciben los acuíferos por infiltración directa de lluvia.

El AMSS compuesto por 14 municipios y se localiza en la zona central del país, extendiéndose en una superficie que cubre 589.91 Km², (Fig. 1) aproximadamente equivalentes al 3% del territorio nacional. De esta superficie, el área urbana corresponde a 175,28 Km² (Miranda & Santos, 2014).



Metodología

La revisión técnica y la retroalimentación de información sirve de insumo para la selección de puntos de muestreo, los cuales se fortalecen con los criterios técnicos fundamentados en la teoría como son los siguientes: el tipo de uso de suelo, geología, accesibilidad y tipo de suelo, además que se distribuyeran en zona de estudio. La muestra seleccionada debe responder a una representatividad del AMSS, para que los resultados sean apropiados a la realidad. En algunos puntos se hicieron pruebas de permeabilidad a diferentes estratos en mismo punto para entender su distribución y características de perfil. (Figura 1).

Se realizaron los siguientes pasos: Protocolo de muestreo de suelos, ejecución de pruebas de infiltración por medio del método de permeámetro de Guelph, análisis granulométrico por el método de tamizado y construcción de estratigrafía utilizando la herramienta Rockworks de 973 datos.

Resultados

Los resultados de la granulometría de las muestras se visualizan en el siguiente gráfico (Fig. 2), de lo cual se puede observar que la clasificación de las muestras se presenta en suelos limosos-arcillosos y muy pocas muestras tienen la categoría de arenas y de las pruebas de infiltración en la figura 3, donde se categoriza la infiltración en el AMSS.

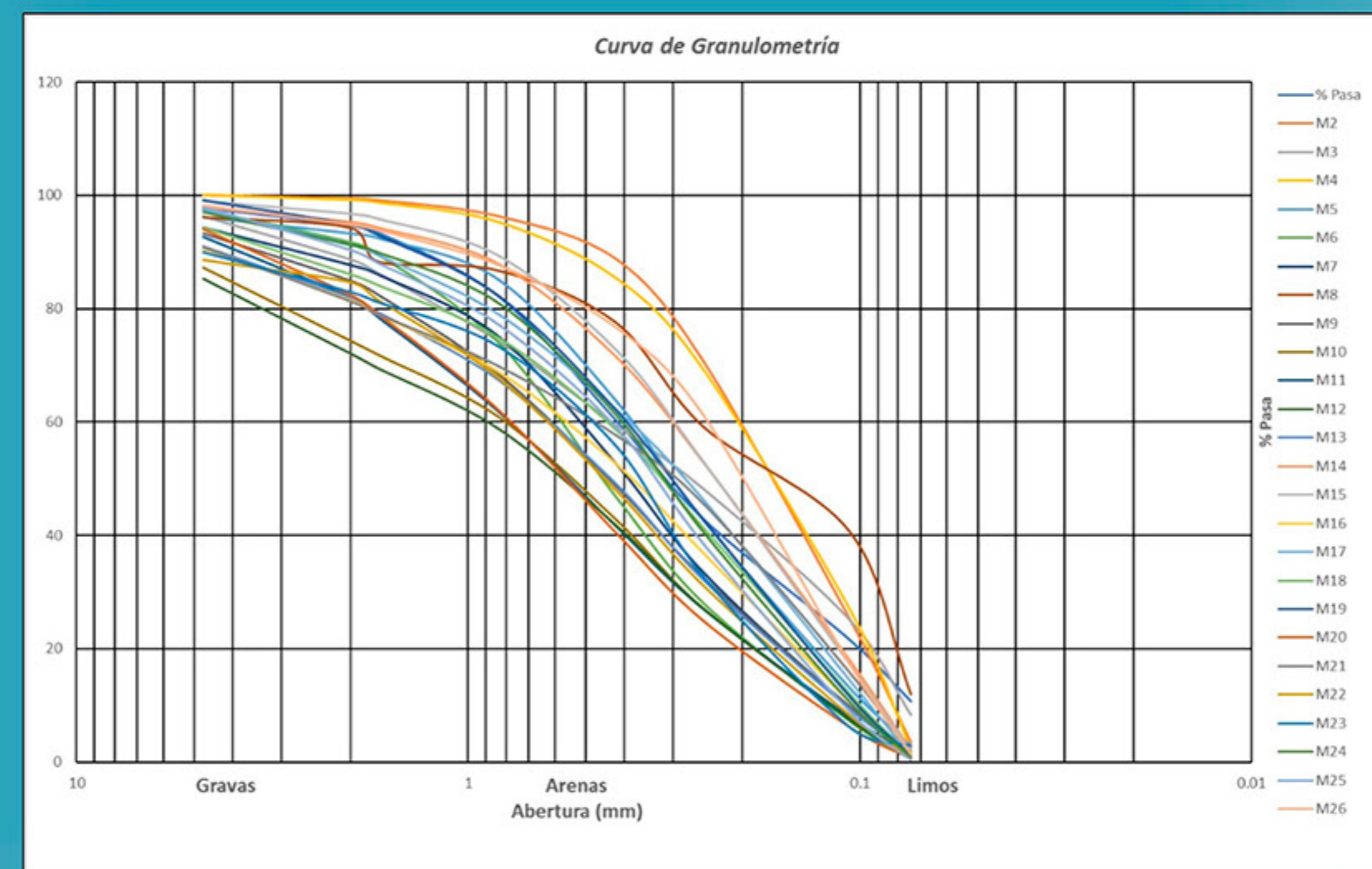


Figura 2. Curvas granulométricas de las muestras analizadas en el AMSS

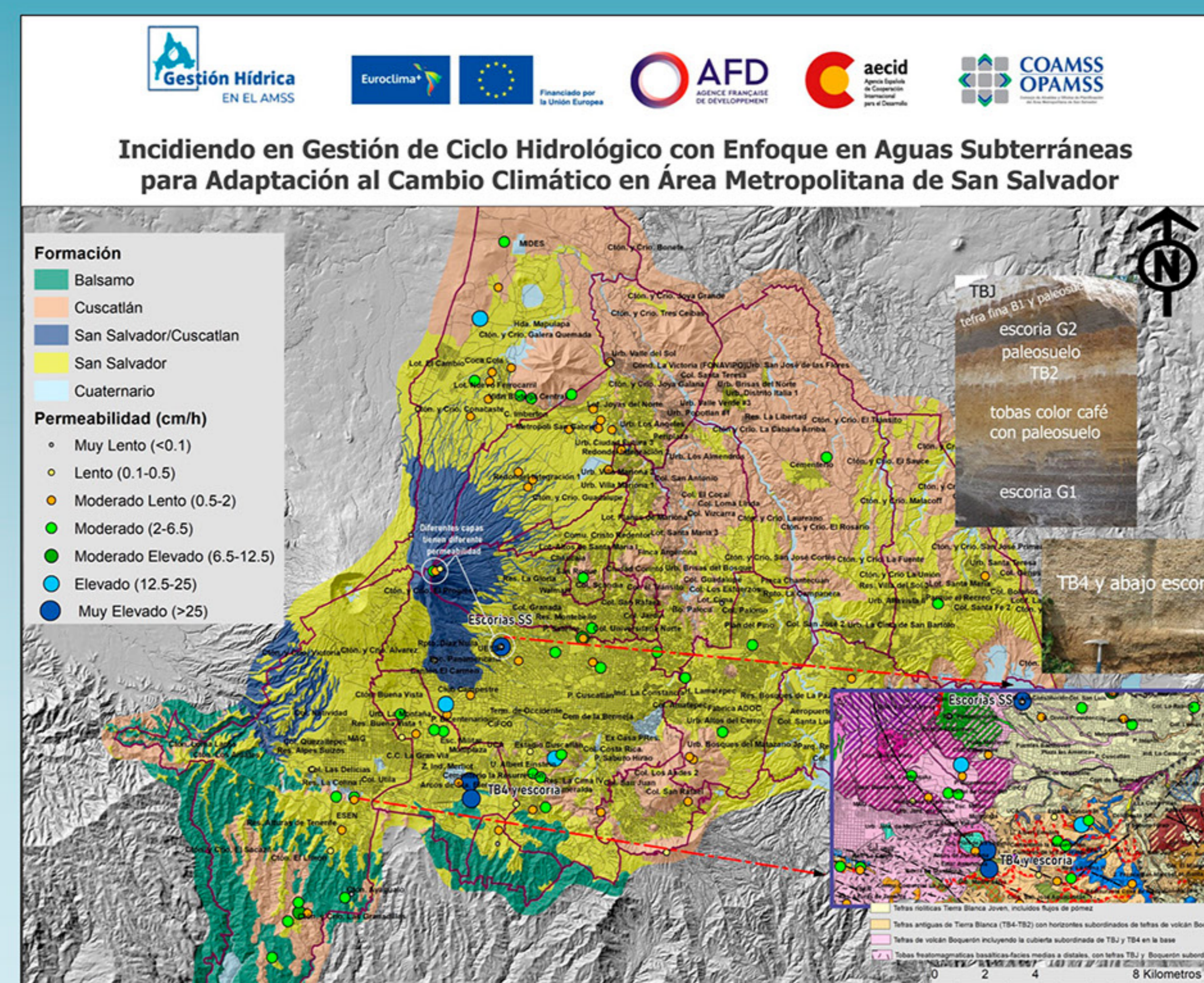


Figura 3. Mapa de permeabilidad del AMSS

De la información de afloramientos visitados, de levantamiento de mapa geológico se construyó una base de datos para obtener perfiles litológicos (Fig. 4), esto con la idea de tener una idea de la estratigrafía en otras zonas y criterios para infiltración.

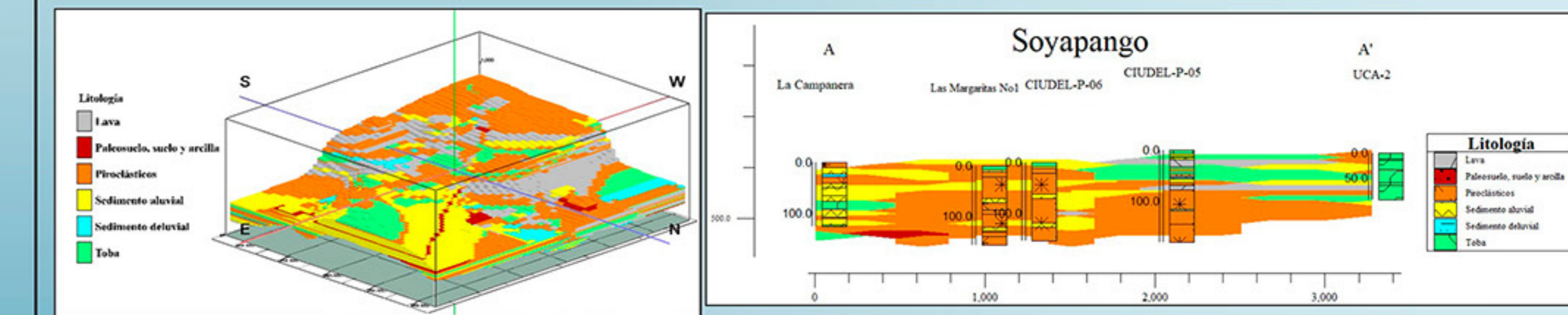


Figura 4. Modelos y secciones litológicas de registros de pozos profundos y de afloramientos

Análisis y Discusión

Ya que el nivel de las aguas subterráneas en las zonas urbanas se mantiene más de 35 m de profundidad (Rolo et al., 2004) se puede decir que en la superficie está en estado de suelo parcialmente saturado (presencia de agua, aire y suelo) y hay fuerzas capilares que actúan sobre la estructura del suelo controlando movimiento de agua entre poros. Rahardjo y Leong (1997) expresan que, para suelos parcialmente saturados, las curvas características de suelo-agua (curva donde se presenta cambio de contenido de agua con respecto a cambio de succión y que es muy usada para caracterizar estos suelos) pueden ser usadas para obtener y estimar indirectamente la permeabilidad. Para la estimación de la conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados (Lobbezoo y Vanapalli 2002) se puede obtener de manera simplificada por medio de las propiedades del suelo como la granulometría, la conductividad hidráulica saturada, grado de saturación (o contenido de agua) en el suelo (usando la Curva de Retención Suelo-Agua (SWRC por sus siglas en inglés).

Conclusiones

El Área Metropolitana de San Salvador está cubierta en la superficie por intercalación de productos recientes de caldera de Ilopango y volcán de San Salvador. La presencia de espesores importantes de TBJ en zona oriental del AMSS hace que sea una zona de precaución para la infiltración si no se conoce bien litología de la zona y sus propiedades hidrogeológicas debido a ser un suelo colapsable y apareamiento de erosión subterránea o cárcavas. Esta información de permeabilidad más su ubicación de estratigrafía mediante modelos superficiales y profundos levantados con Rockworks pueden ayudar en la toma de decisión de sectores que pueden ser analizados para infiltración, esto puede ser mediante SUDS. La implementación en sectores ya afectados por la urbanización puede ayudar a una regulación de las temperaturas del aire y de edificaciones, cuidado del agua, la reducción inundaciones, entre otros, todo en búsqueda de la sostenibilidad de las ciudades tomando en cuenta los escenarios de cambio climático donde se espera menos lluvia y aumento de temperatura, lo cual afectaría directamente al ciclo hidrológico y por tanto a la recarga de los acuíferos.

Con respecto a las pruebas de infiltración los resultados obtenidos nos demuestran que el uso del método de carga constante del permeámetro de Guelph, resultó muy eficiente en la determinación de infiltración para los diferentes tipos de suelo del AMSS, además, se facilitó mucho el cálculo de la conductividad hidráulica de los mismos. Por otro lado, estos resultados son coherentes con los análisis granulométricos de suelo.

Referencias

- Miranda, K., & Santos, P. (2014). *The mayor council and the Planning office for Metropolitan Area of San Salvador, as a model for urban management*. Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy.
- Lexa et al. (2021). Geología del Área Metropolitana de San Salvador (1:50 000), El Salvador. doi: 10.15517/rgac.v0i66.49972
- Rolo R, B. J. (2004). Geologic and engineering characterization of Tierra Blanca pyroclastic ash deposits. *Geol Soc Am Spec*, 55-67.
- Rahardjo H, a. L. (1997). Soil water characteristic curves and flux boundary problems. *Amer. Soc. Civil Eng.*, 88-112.
- Lobbezoo, J. P. (2002). *A simple technique for estimating the coefficient of permeability of unsaturated soils*. Niagara Falls.

Agradecimientos

Desemosa reconocer apoyo recibido de Consejo de Alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador (COAMSS), la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), programa EUROCLIMA+ de la Unión Europea, la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y a la Escuela de Física de la Universidad de El Salvador (UES), MARN, ANDA y técnicos municipales de 14 municipios del AMSS.

Figura 1. Mapa de ubicación y distribución de puntos de muestreo y pruebas de infiltración

Un modelo hidrogeomecánico para caracterizar los efectos inducidos por el terremoto de Andalucía de 1884

Manuel Mudarra Hernández^a, Juan Carlos Mosquera Feijoo^{b*},
María Belén Benito Oterino^c, Eugenio Sanz Pérez^a

INTRODUCCIÓN

El Terremoto de Andalucía (España) de 1884 fue uno de los más devastadores en la Península Ibérica en los últimos siglos. Causó entre 1050 y 1200 víctimas [1]. Tuvo una magnitud de entre 6,2 y 6,7 en la escala de Richter, y duró aproximadamente 10 segundos con un hipocentro situado entre 10 y 20 kilómetros de profundidad [2-4]. El origen de este terremoto se asocia a la falla de gravedad de Ventas de Zafarraya (Granada), lo que ha sido evidenciado mediante el estudio de trincheras, y a la cual se ajustan también las isosistas [5]. Además del desprendimiento de rocas y deslizamientos de ladera, hay que agregar los efectos hidrogeológicos de distinto rango inducidos por el terremoto [5-7].

Alteraciones hidrogeológicas registradas:

Licuefacción de suelos (en Vélez-Málaga), aparición de nuevos manantiales, desaparición de manantiales existentes y descenso del nivel freático (en Sierra Tejeda), incremento persistente de la descarga en manantiales y arroyos (el manantial termal de Alhama), variaciones de niveles en pozos, en las propiedades físicas y químicas del agua subterránea, y de la presión [8-10].

MODELO CONCEPTUAL

El modelo geológico conceptual representa la falla de Zafarraya con buzamiento variable en torno a 60° hacia el Norte, un nivel de despegue a 10 km y una falla ciega de empuje. En el modelo cinemático la falla ciega empuja por el SSE, produce una elevación de Sierra Tejeda y por consiguiente una falla normal de hundimiento al NNO, con la formación de un graben, el Polje de Zafarraya.

A partir del modelo conceptual, se implementa un modelo hidro-geomecánico de elementos finitos 2D en deformación plana. La falla se representa mediante una entidad unidimensional con respuesta friccional tipo “slip-weakening”, esto es, su resistencia friccional se debilita cuando se activa el deslizamiento relativo entre sus bordes. El modelo de elementos finitos considera el fenómeno completamente acoplado, es decir, considera la fricción en la falla, la existencia de agua intersticial en los poros del medio poroelástico. El terreno se considera homogéneo e isotrópico, si bien incluye un campo heterogéneo de tensiones iniciales debido a su historia tectónica. La ruptura sísmica se produce cuando las tensiones tangenciales alcanzan en alguna zona de la falla su resistencia friccional. El medio se considera viscoelástico (Kelvin-Voigt), con coeficiente de viscosidad 10^7 Pa.s y una permeabilidad intrínseca variable entre $10^{(-11)}$ m² en superficie y $10^{(-13)}$ m² en profundidad. Se supone pleno acoplamiento entre las variaciones de presión de poro y la deformabilidad del medio poroso [21]. La viscosidad dinámica del agua intersticial se considera $10^{(-3)}$ Pa.s y su compresibilidad es $[4 \times 10]^{(-10)}$ [(Pa)]⁽⁻¹⁾. Se considera una falla más bien permeable en sentido transversal, cuyo flujo hidráulico [kg/m² s] entre sus bordes se representa simplificado mediante un coeficiente de permeabilidad transversal de $[10]^{(-11)}$ s/m. Se tiene en cuenta el fenómeno de amortiguamiento por radiación como mecanismo de disipación volumétrica de las ondas sísmicas, en forma de una cohesión dependiente de la velocidad, en la definición de la resistencia a fricción de la falla.

VARIABLES Y FORMULACIÓN POROELÁSTICA

La ley de Darcy expresa la dinámica del flujo volumétrico en medios porosos:

$$\vec{q} = -\mathbf{K} \nabla h$$

\mathbf{K} es el tensor de conductividad hidráulica.

Permeabilidad intrínseca (variable) K_D en el estrato de las **dolomías**:

$$k_D(y) = \frac{(k_S - k_i)}{H} \cdot (y) + h_S$$

Ecuación de almacenamiento (poroelasticidad)

$$\rho_f S \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_f \alpha_B \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\rho_f \frac{k}{\eta_f} (\nabla p - \rho_f g) \right)$$

$k_S = 10^{-11}$ m²: permeabilidad en contorno superior

$k_i = 10^{-13}$ m²: permeabilidad en contorno inferior

$\rho_f = 1000$ kg/m³: densidad del agua intersticial

$\eta_f = 0.001$ Pa.s: viscosidad dinámica del agua intersticial

S : coeficiente de almacenamiento del medio poroso

ϵ_v : deformación volumétrica del medio poroso

α_B : coeficiente de Biot-Willis

p : presión de poro

k : permeabilidad intrínseca del medio poroso

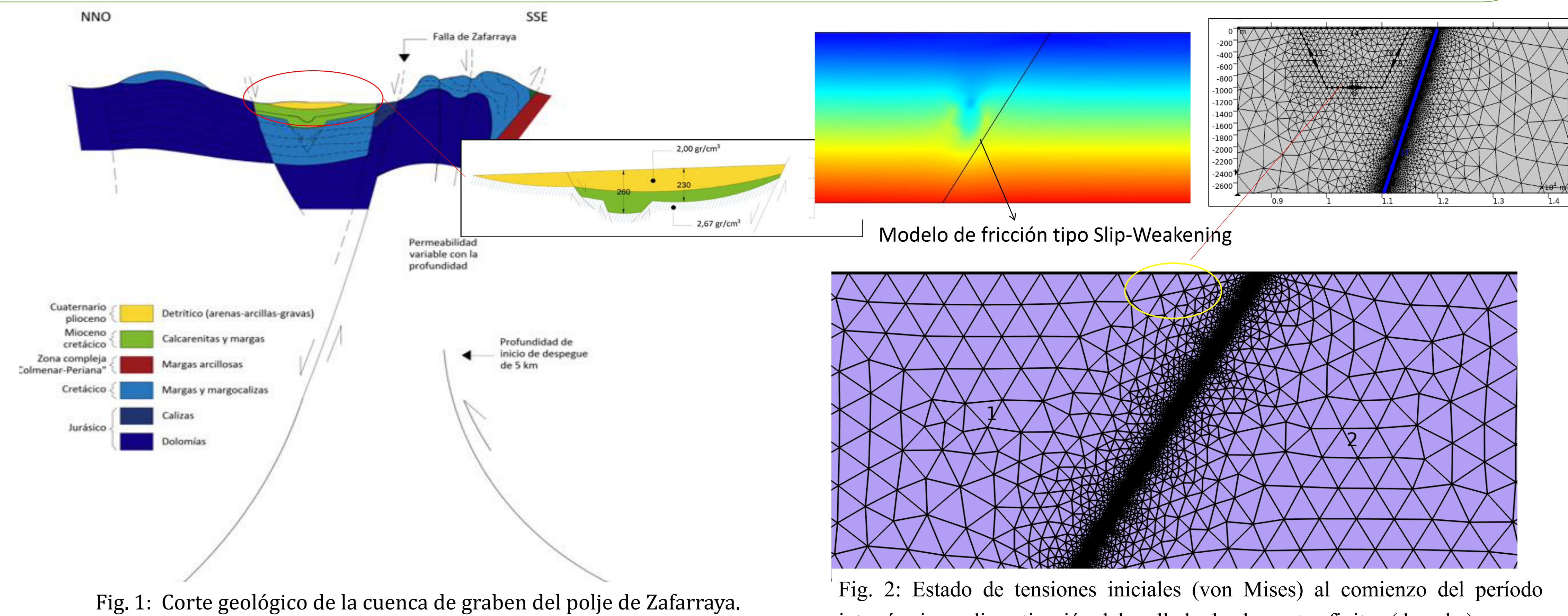


Fig. 1: Corte geológico de la cuenca de graben del polje de Zafarraya.

Fig. 2: Estado de tensiones iniciales (von Mises) al comienzo del período intersísmico y discretización del mallado de elementos finitos (derecha).

CONCLUSIONES

- Fase presísmica: zona al sur de la falla se encuentra comprimida y zona norte traccionada. Los poros en el terreno se encuentran abiertos y se llenan de agua.
- Fase cosísmica: la zona del valle se hunde y se comprime cerrando los poros, por lo que el agua retenida es expulsada originando nuevas fuentes y otras alteraciones hidrogeológicas.
- Deslizamiento asísmico tipo *creep*.
- Necesidad de datos de campo adicionales.
- Mayor conocimiento del Catálogo de Sismos español.

FUTURO TRABAJO

- Estudio más preciso del entorno.
- Conocimiento geológico del suelo.
- Revisión de los parámetros del terreno.
- Modelo más complejo y amplio

REFERENCIAS

1. Quidam, U. (1885) Cartas desde los sitios azotados por los terremotos de Andalucía. Lib. Nac. y Ext. Madrid, 142.
2. Lasala y Collado, F. (1888). Memoria del comisario regio para la reedificación de los pueblos destruidos por los terremotos en las provincias de Granada y Málaga. M. Minuesa de los Ríos, Impresor, Madrid.
3. Fouqué, F. (1889). Estudios referentes al terremoto de Andalucía ocurrido el 25 de diciembre de 1884 ya la constitución geológica del terreno conmovido, hecho por la comisión destinada al objeto por la Academia de Ciencias de Paris.
4. Botella y Hornos, F. (1885). Los terremotos de Málaga y Granada. Bol. Soc. Geográfica de Madrid, t. XVII, 30.
5. Fernández de Castro, M., Lasal, J. P., Cortazar, D., & Tarín, J. G. (1885). Terremotos de Andalucía. Informe de la Comisión nombrada para su estudio dando cuenta del estado de los trabajos en 7 de Marzo de 1885.
6. Comisión Italiana. (1886). Informe del terremoto de Andalucía de 1884. R. Accademia dei Lincei. Memorie della classe di scienze fisiche, matematiche e naturali. Volume III, 195 y mapas.
7. Seco de Lucena, L. (1941): Crónicas sobre el terremoto de Andalucía de 1884. Memorias. 79-103.
8. López Arroyo, A., Martín Martín, A. J., & Mezeua Rodríguez, J. (1980). Terremoto de Andalucía. Influencia en sus efectos de las condiciones del terreno y del tipo de construcción. El terremoto de Andalucía de 1884, 5-94.
9. Udías, A., & Muñoz, D. (1979). The Andalusian earthquake of 25 December 1884. Tectonophysics, 53(3-4), 291-299.
10. Fernández-García, C., & Ruano, P. (2016). Caracterización de la geometría del Polje de Zafarraya a partir de prospección gravimétrica (Cordillera Bética). Geogaceta.
11. de Galdeano, C. S. (2013). The Zafarraya Polje (Betic Cordillera, Granada, Spain), a basin open by lateral displacement and bending. Journal of Geodynamics, 64, 62-70.

a Dep. Ing. y Morfología del terreno, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.
b Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de estructuras, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.
c Dep. Ing. Topográfica y Cartografía, ETSI Topografía, Geodesia, Cartografía, Madrid, España

* Contacto: juancarlos.mosquera@upm.es

“PROPUESTA DE CARACTERIZACIÓN DE BARRIO CON ENFOQUE EN REDUCCIÓN DE RIESGOS A DESASTRES: UN APOORTE A LA RECONFIGURACIÓN DE BARRIOS INFORMALES EN HONDURAS”

Antúnez Williams, Brenda Itzel*; Benito Oterino, Maria Belén**

(*) Arquitecta. Maestrante en Ordenamiento y Gestión del Territorio. Facultad de Ciencias Espaciales, Universidad Nacional Autónoma de Honduras. brenda.antunez@unah.hn

(**) Dr. Ciencias Físicas. Catedrática de la Universidad Politécnica de Madrid. mariabelen.benito@upm.es



Imagen 1. Vista Colonia Villanueva Norte en Tegucigalpa, Distrito Central

OBJETIVO GENERAL

Analizar el proceso metodológico para la caracterización de barrios con enfoque en reducción de riesgo a desastres como un aporte a la reconfiguración de barrios urbanos informales y aplicado a un barrio del Municipio del Distrito Central, Honduras.

OBJETIVO ESPECIFICOS

1. Realizar una revisión bibliográfica en relación los conceptos claves de la investigación.
2. Definir variables para la caracterización con relación a la reducción de riesgos a desastres.
- 3.3. Diseñar la secuencia metodológica para la aplicación de la caracterización barrio.
4. Aplicar la metodología en un barrio informal del área urbana del Municipio del Distrito Central.

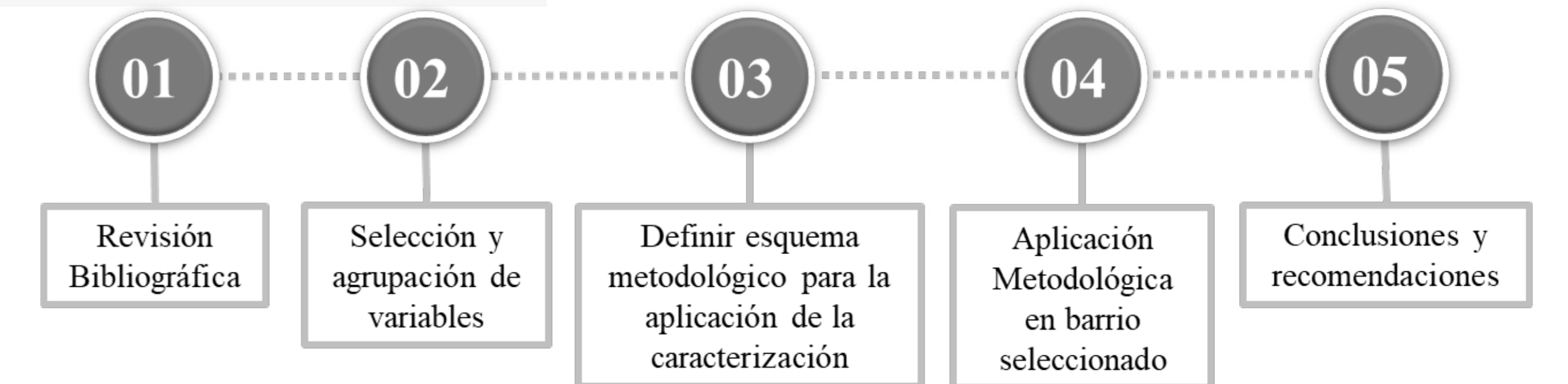
ENFOQUE Y DISEÑO METODOLOGICO

MIXTO MULTIVARIABLE. Recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada (meta inferencias) y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio (Toledo et al, 2010)

TRANSFORMATIVO CONCURRENTENTE. La recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos se desarrollan en un mismo momento (concurrente) y puede darse o no mayor peso a uno u otro para explicar el fenómeno de estudio (Toledo et al, 2010)

METODOLOGÍA

La investigación se desarrolla en 5 fases de investigación:



FASE 1. Revisión Bibliográfica

ASENTAMIENTO INFORMAL. Son áreas residenciales... más necesitados y excluidos, y se caracterizan por la pobreza y las grandes aglomeraciones de viviendas en mal estado, ubicadas, por lo general, en las tierras más peligrosas. Además de la inestabilidad del derecho de tenencia, los habitantes de los barrios no disponen de infraestructura y servicios básicos, el espacio público y las áreas verdes, y están expuestos de manera constante al desalojo, las enfermedades y la violencia. (ONU, 2015)

BARRIO. Áreas geográficas definidos por sus características sociales, económicas y físicas, que a su vez sirven como base para consolidar una identidad jurídica/administrativa dentro de una jurisdicción mayor. Las características de un barrio proporcionan a sus residentes una identidad y, por ende, familiaridad y seguridad dentro del caos del contexto urbano (USAID, 2014)

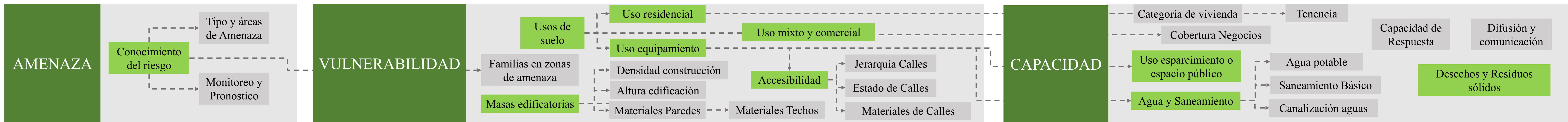
REDUCCIÓN DE RIESGO DE DESASTRES. Es el concepto y la práctica de reducir el riesgo de desastres mediante esfuerzos sistemáticos dirigidos al análisis y a la gestión de los factores causales de los desastres, lo que incluye la reducción del grado de exposición a las amenazas, la disminución de la vulnerabilidad de la población y la propiedad, una gestión sensata de los suelos y del medio ambiente, y el mejoramiento de la preparación ante los eventos adversos (UNISDR, 2009).

RECONFIGURACIÓN DE BARRIO. Estrategia basada en un enfoque multidisciplinario que permite relacionar al hombre y mujer con el medio físico y viceversa, que simultáneamente responde a las necesidades multisectoriales reales, comunes y relevantes de la población (USAID, 2014).

CARACTERIZACIÓN TERRITORIAL. Comprende la línea base (punto de partida que se determina para medir y evaluar en un periodo determinado, el impacto de las estrategias, acciones o actividades en un territorio (DPEN, 2017)) y diagnóstico territorial (Es el proceso de recopilación, procesamiento e interpretación de la información de un espacio territorial determinado (DPEN, 2017)).

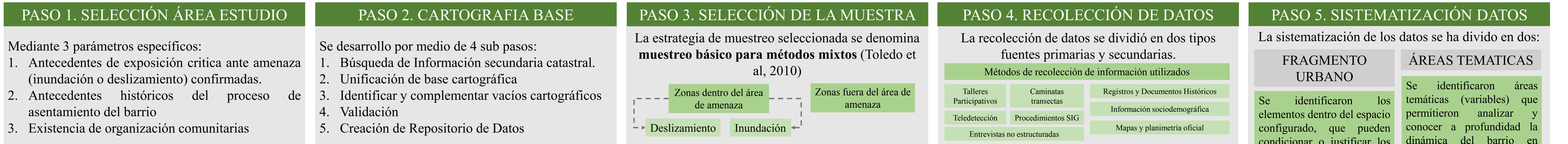
FASE 2. Selección y agrupación de variables

Se destacan 10 variables y 30 indicadores interrelacionados y agrupados en los términos de Amenaza - Vulnerabilidad - Capacidad que determinan la variable del Riesgo.

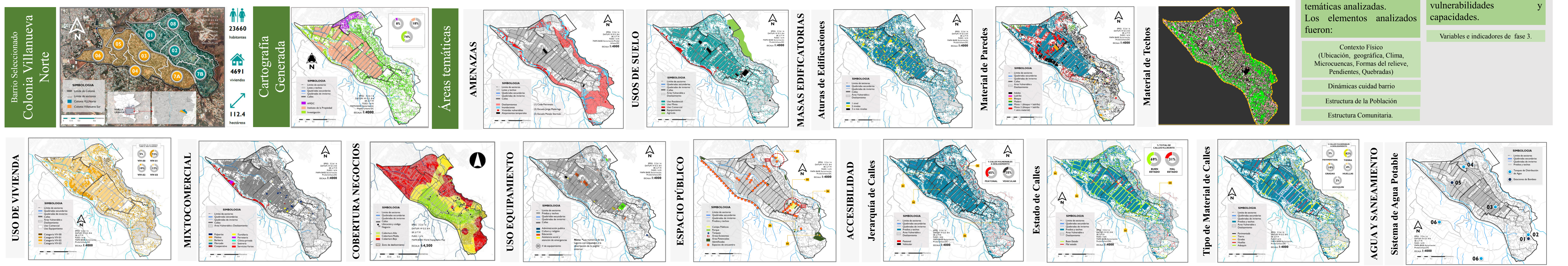


FASE 3. Pasos metodológicos para la aplicación

El esquema metodológico para la implementación en el barrio seleccionado consta de 5 pasos.



FASE 4. Sistematización del proceso



FASE 5. Conclusiones y Recomendaciones

La reducción de riesgos a desastres no es un asunto aislado o particular, visto como una situación propia del territorio, proporciona una mirada integral a las propuestas de reconfiguración de barrio. Las variables aplicadas al estudio proveen una caracterización del barrio que permitió generar un análisis situacional y prospectivo del riesgo a desastres en el caso del barrio Villanueva Norte permitiendo reconocer los principales problemas a abordar para reducir el riesgo de desastres y proveer una reconfiguración e inversión segura y a largo plazo. Se recomienda a largo plazo la generación de un índice de riesgo con las variables priorizadas.

Bibliografía

- DPEN. (2017). Guía Metodológica para elaboración de Planes de Ordenamiento Territorial (Vol. Tercera Edición). Tegucigalpa, Honduras: Dirección Ejecutiva de Plan de Nación.
- ONU, 2015. Temas Hábitat III - 22. Asentamientos Informales, Nueva York: Conferencia de las Naciones Unidas sobre la vivienda y el desarrollo urbano sostenible. Traducción realizada con el apoyo de Oficina de la Coordinación Residente de Naciones Unidas en Bolivia.
- Toledo et al, M., 2010. "Metodologías de Investigación". Quinta Edición ed. México : McGRAW-HILL / Interamericana Editores, S.A. de C.V., ISBN: 978-607-15-0291-9.
- USAID, 2014. "La Perspectiva del Barrio. Mejorando la Ayuda Humanitaria en la zona urbana", s.l.: Bureau for Democracy, Conflict, And Humanitarian Assistance (DCHA). Office of U.S. Foreign Disaster Assistance (OFDA).
- UNISDR, 2009. Terminología sobre Reducción de Riesgo a Desastres, Suiza: Estrategia Internacional para la Reducción de Riesgo a Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR).

Cambios geomorfológicos por procesos erosivos y sedimentarios en el volcán Arenal, período post eruptivo 2010 - 2022

Older Torres B. y Guillermo Alvarado E.

Comisión Nacional de Emergencias y Universidad de Costa Rica



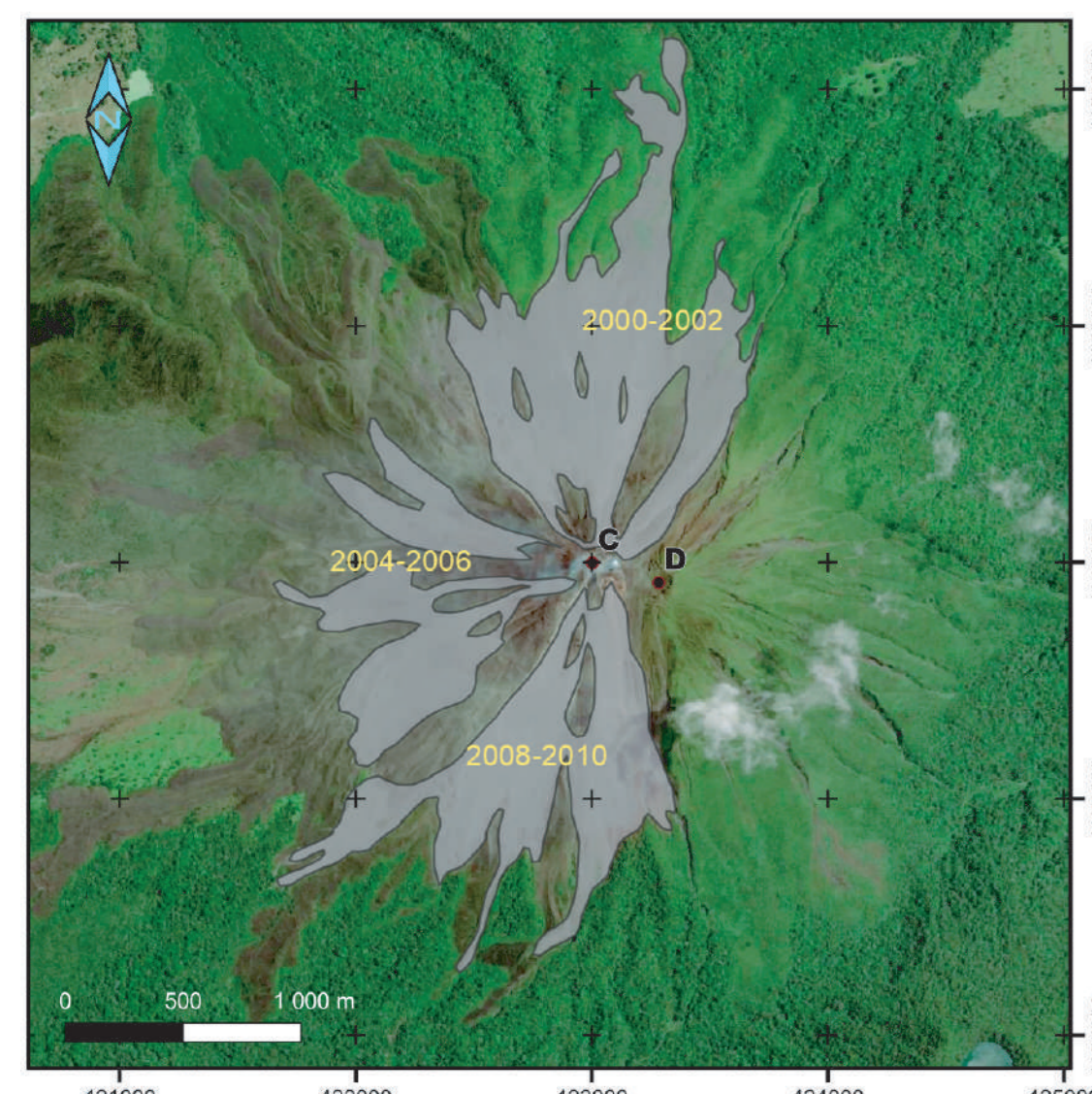
El volcán Arenal tuvo su última actividad eruptiva relevante fue en marzo del 2010, donde un importante flujo piroclástico, bajó por el flanco sur-oeste del volcán, sin embargo, en el 2011 desde entonces ha merchado su actividad. Durante estos 12 años de reposo, los importantes cambios geomorfológicos en el cono principal del volcán se han dado únicamente por procesos de movimientos de masas (erosivos y sedimentológicos).

Objetivo general:

Analizar los cambios geomorfológicos por procesos no eruptivos del complejo volcánico Arenal, poniendo énfasis al período en reposo 2010-2022.

Objetivos Específicos:

1. Generar y actualizar información cartográfica y satelital del área de estudio para identificación de las principales geoformas del volcán Arenal.
2. Recopilar información acerca de los principales eventos históricos del conjunto volcánico Arenal.
3. Identificar, diferenciar y mapear los principales procesos erosivos durante los últimos años de reposo.



Principales eventos eruptivos, eventos con expulsión de material volcánico (Flujos piroclásticos y depósitos de detritos) no consolidado, período 2000-2010.

Metodología:

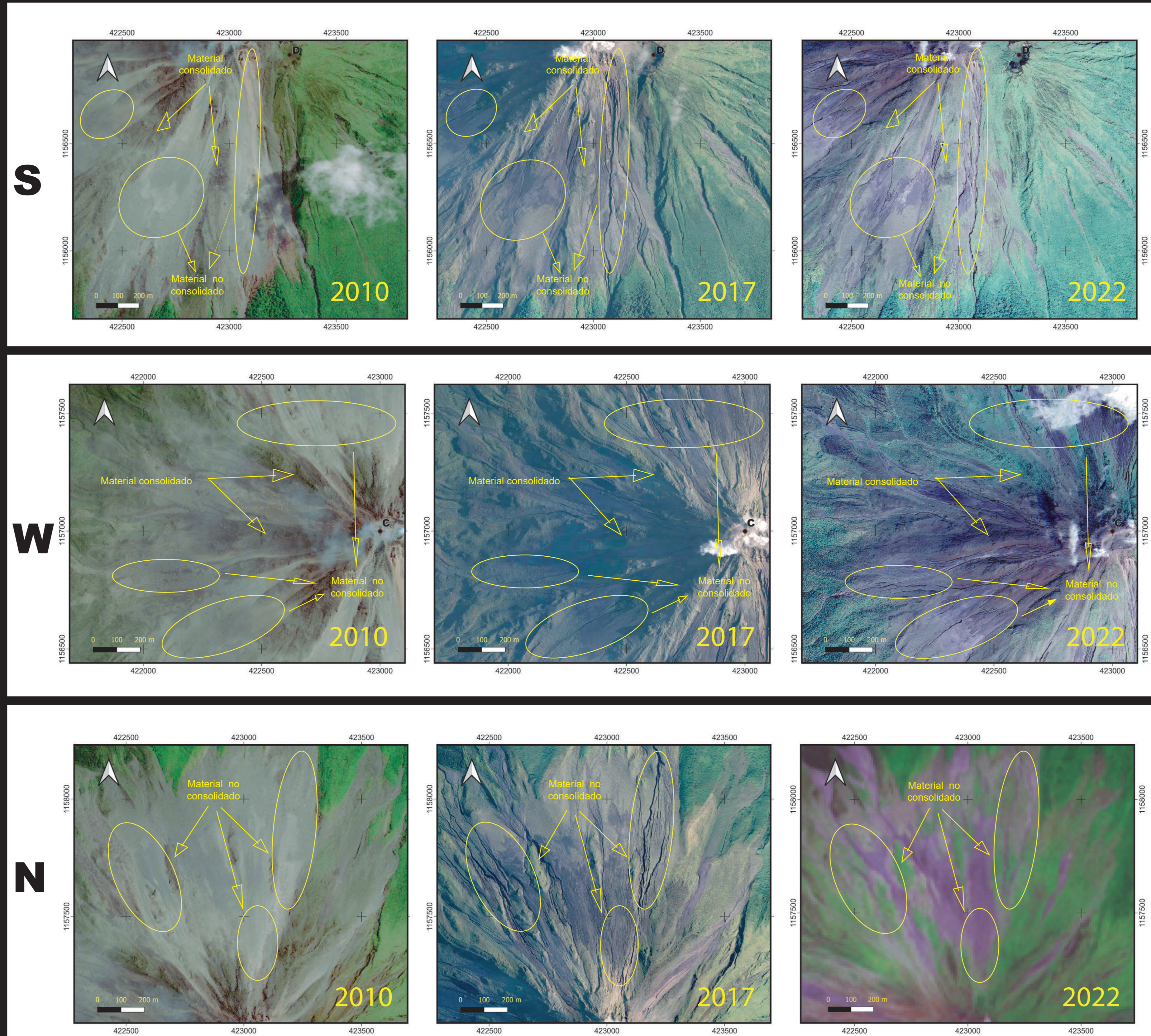
Se trabajó con el uso de herramientas de sistemas de información geográfica para generar modelos de elevación digital y análisis de imágenes satelitales para el respectivo cartografiado. Se utilizaron plataformas tales como: Sentinel HUB, Google Earth y Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) para la obtención de fotografías. Las imágenes y el proceso de datos se realizaron con base en los paquetes de bandas de los proyectos Sentinel 2 y LANDSAT 7 y 8. Además se realizaron observaciones preliminares de campo.

Análisis y Conclusiones:

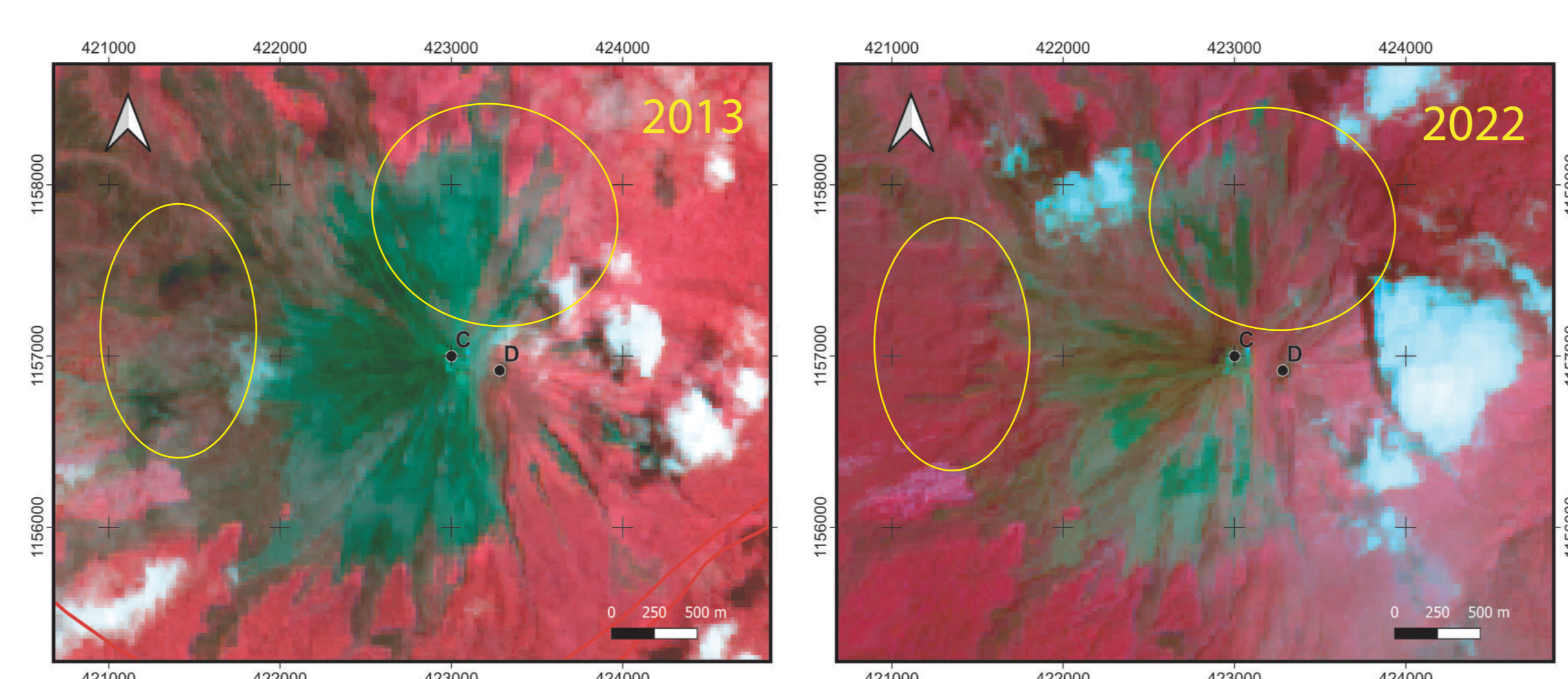
En análisis preliminar evidenció que los principales sectores que han mostrado cambios notables son los flancos N, W y S del cono volcánico. Sin embargo, puesto que una de las últimas erupciones importantes del flanco N ocurrió en el 2000, esta zona ha presentado cambios más significativos con respecto al flanco W y S, donde los últimos eventos importantes ocurrieron entre febrero y marzo del 2010. Por ello, resulta posible que, debido a esa diferencia de años, el flanco N presente mayor erosión que el W y S. No obstante, es posible, además, que debido al tipo de material depositado en el flanco W y S (coladas de lava) sea más difícil de erosionar, salvo en los pequeños sectores donde se depositaron los últimos flujos piroclásticos reportados y depósitos de detritos, que corresponden a un material inconsolidado. Por lo tanto, el flanco norte tiene mayor depositación de material no consolidado tipo clástico (coluvión de lavas, depósitos de flujos de granos y depósitos de flujos de hiperconcentrados volcánicos no-eruptivos), mientras que el sector W y S, presenta material más consolidado o protegido por vegetación, más difícil de erosionar, pero con pequeños depósitos de material no consolidado que ha sido erosionado con el paso del tiempo.

El flanco N presenta una morfología bien desarrollada de surcos (erosión en regueros), cárcavas (0,5-5 m de ancho y < 5m profundidad) y barrancos (>5 m de profundidad). El flanco S presenta una importante formación de cárcavas y barrancos, aunque estos últimos apenas empiezan a formarse. Por otra parte, con imágenes infrarrojo se nota un acelerado crecimiento de la vegetación de la zona, principalmente en el sector oriental, cuyo flanco es el que recibe de frente a los vientos cargados de humedad que recorren el país y, en menor grado, en el sector austral, dado que fue el menos afectado por las erupciones en los últimos 80 años. La geoforma de planèzes apenas se está empezando a desarrollar en el nuevo cono, en sus flancos. Más trabajo de campo se piensa realizar en el presente año.

Comparativa a lo largo de los años de la erosión vs sedimentación, cambios en los flancos S, W y N (2010-2022). Volcán Arenal, Costa Rica.



Cambios en la densidad de la vegetación (2013 vs 2022).

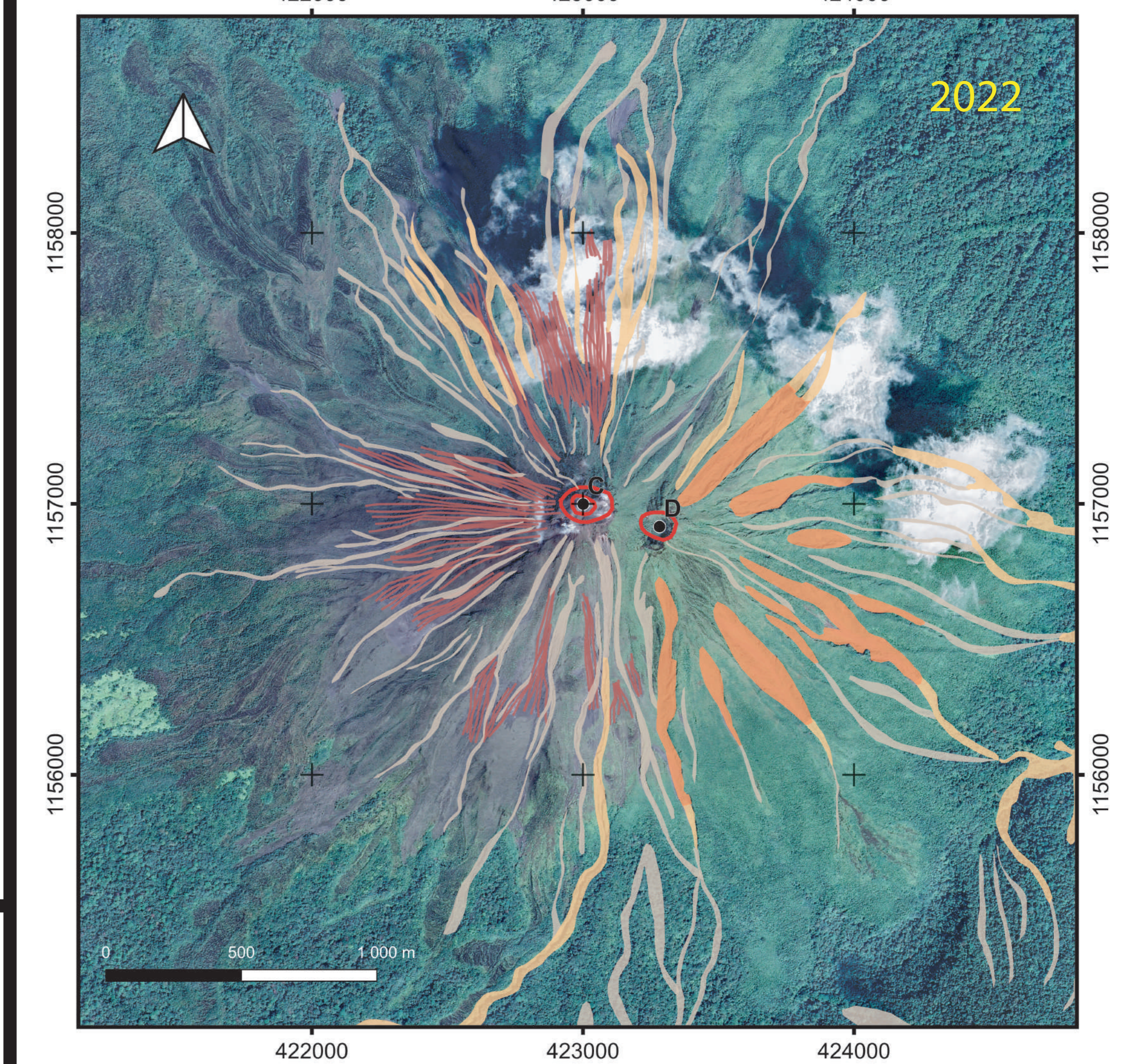
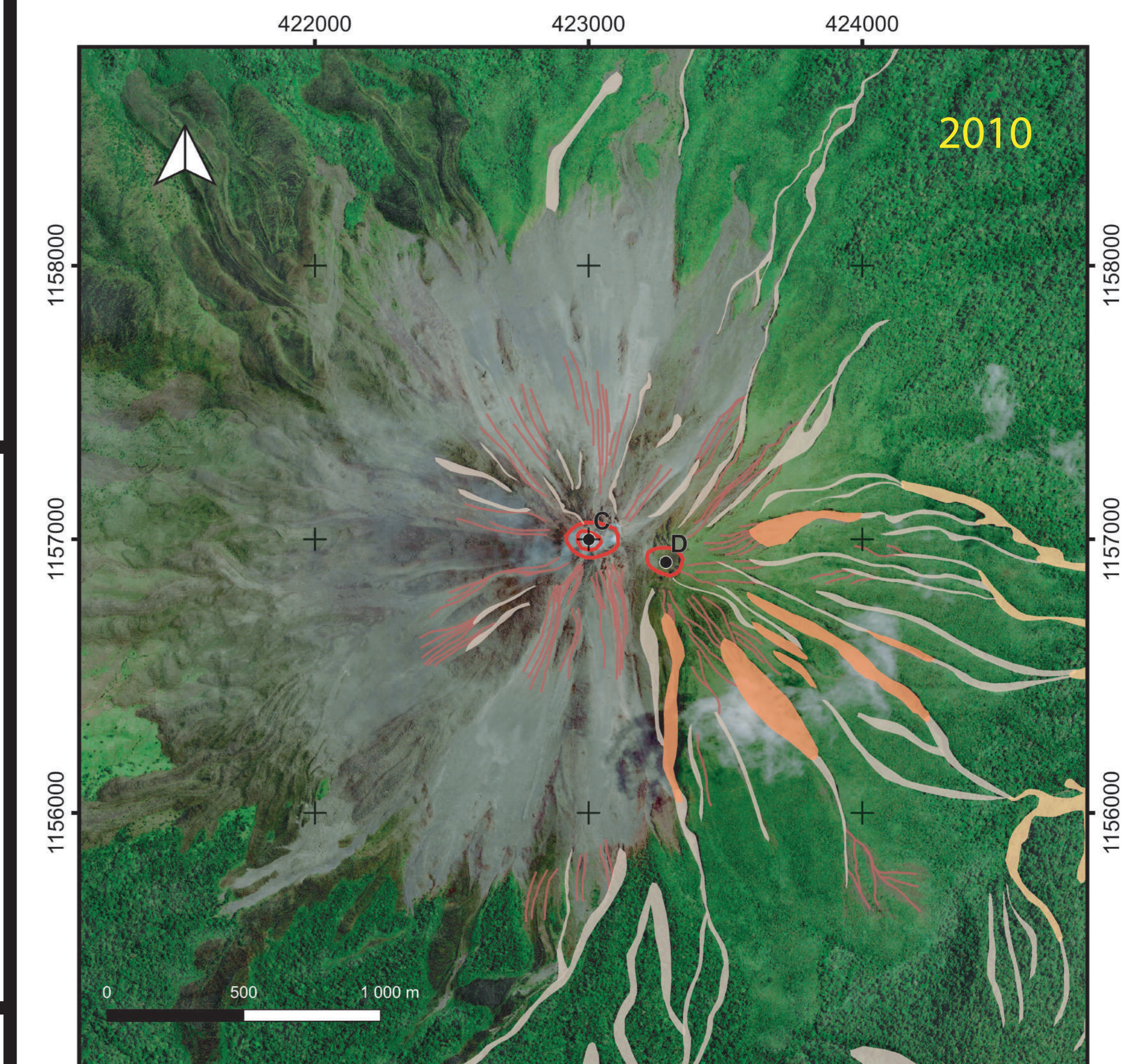


Fotografía del flanco N tomada desde el mirador Los Laureles, donde se señalan los principales barrancos en este sector. tomada por: Guillermo A., enero 2022.

A partir de la composición de las bandas 5, 4 y 3 de LANDSAT 8, se crea una imagen en infrarrojo que resalta los cambios en la densidad de la vegetación. Los colores rojos resaltan dichos cambios.

Cambios geomorfológicos por procesos exógenos en materiales no consolidados. Volcán Arenal, Costa Rica.

- Simbología:**
- Cráter Volcánico.
 - Surcos (erosión en regueros).
 - Cárcavas (0,5-5 m de ancho y < 5m profundidad).
 - Barrancos (>5 m de profundidad).
 - Cause de gran anchura (>10m Prof.).



Referencias:

Soto, G. y Alvarado, G. (2006). Eruptive history of Arenal Volcano, Costa Rica, 7 ka to present. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157, 254-269. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.03.041>

Soto, G. J. y Sjöbohm, L. (2005). Sobre el mapeo de los peligros volcánicos del Arenal (Costa Rica) como una herramienta para la planificación del uso del suelo y la mitigación de desastres. Presentado en Memoria VIII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica, San José, Costa Rica.

Alvarado, G. E. (2021). *Costa Rica y sus volcanes*. EUCR, EUNA, ETCR.

United States Geological Survey (USGS): <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Google Earth: <https://earth.google.com/>

Sentinel HUB: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>

Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT): <https://www.snitr.go.cr/>

Red Sismológica Nacional (RSN): <https://rsn.ucr.ac.cr/>

Proyección de los mapas: CRTM05

Fotografías satelitales tomadas de Google Earth, Sentinel HUB y proyecto ortofoto 2017 (SNIT).
Obtención de paquetes de bandas espectrales de la página de USGS y procesadas en QGIS 3.16.

Contacto: Older Torres, oldert1471@gmail.com, (506) 85810621.

Agradecimientos:

Javier Chinchilla, Jorge Abarca y Sonia Hajaji, por su acompañamiento, opiniones y comentarios. También a la Comisión Nacional de Emergencias por la oportunidad de la práctica geológica, principalmente a Guillermo Alvarado. Y finalmente a todos los funcionarios y profesores de la Escuela Centroamericana de Geología, principalmente a los profesores encargados Paulo Ruiz y Percy Denyer.

INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS EN LOS DISTRITOS PIEDRAS NEGRAS Y GUAYABO DEL CANTÓN DE MORA



Sebastián Corrales M
Trabajo práctico en la municipalidad de Mora
Unidad de gestión ambiental y reducción de riesgo y desastres



INTRODUCCIÓN

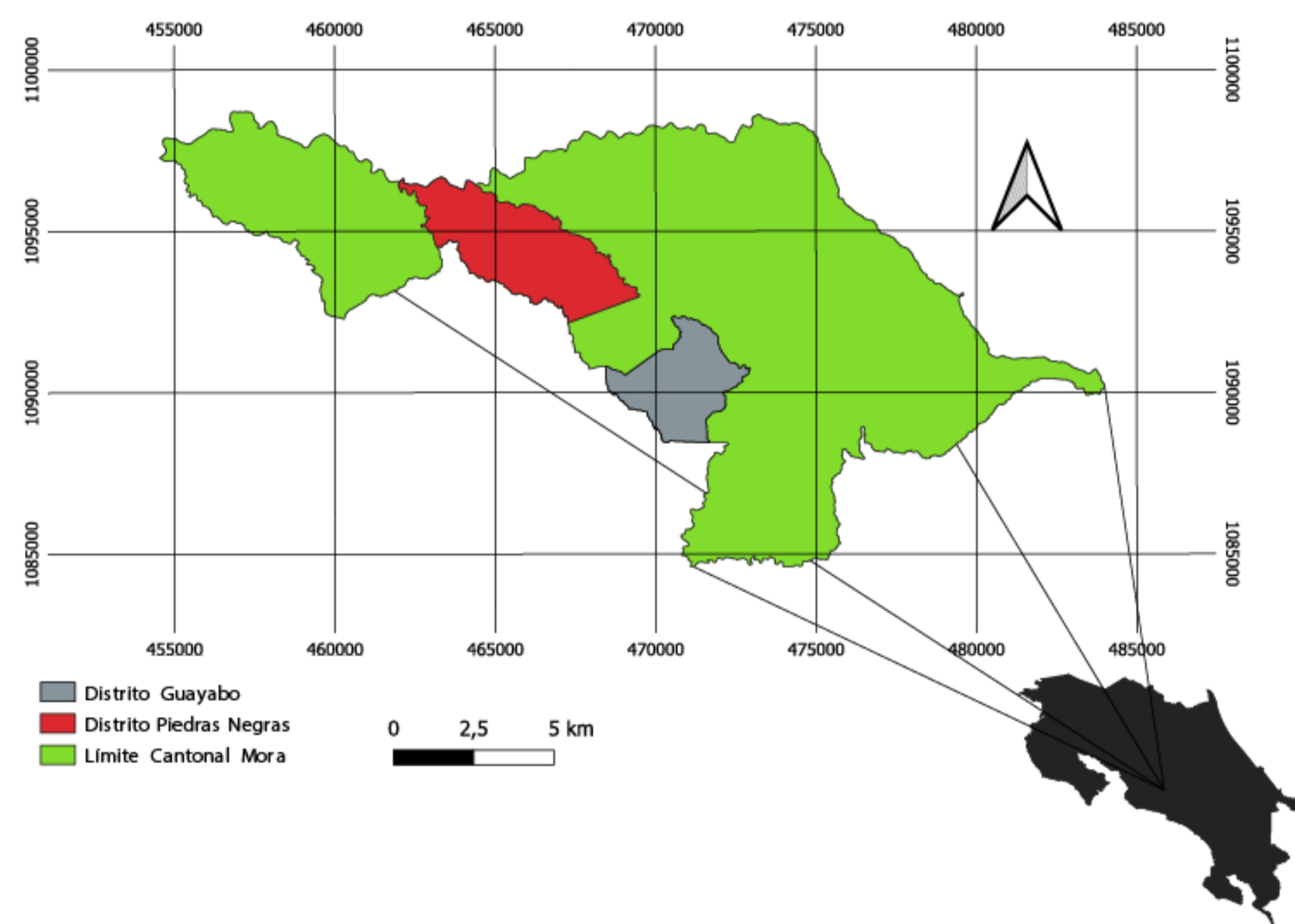
Las formas de remoción en masa y/o deslizamientos de tierra son procesos que se deben estudiar para evitar que afecten a la población en el futuro y consiga prevenir los riesgos y desastres. Es bien conocido que los distritos del cantón de Mora se caracterizan por sus extensas laderas sin vegetación, las cuales son utilizadas en ganadería principalmente. Estas mismas laderas son propensas a desplazarse colina abajo lentamente mediante un proceso conocido como reptación.

El presente trabajo realiza un cartografiado para obtener un inventario de deslizamientos detallado en los distritos de Guayabo y Piedras Negras del cantón de Mora, con la finalidad de tener una base de datos confiable que permita contemplar la estabilidad de las laderas enfocado en la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial

Se pretende, además, clasificar cada deslizamiento de reptación por su grado de intensidad que oscilaría entre leve, intermedio y grave. Aparte de esto, también se determina el área y perímetro de cada deslizamiento.

OBJETIVO

Generar un inventario de las formas de remoción en masa presentes en los distritos de Guayabo y Piedras Negras del cantón de Mora, mediante el uso de sistemas de información geográfica, para contar con una base de datos significativa que permita advertir sobre las condiciones en que se encuentran las laderas de la zona y sea utilizado en gestión de riesgo y ordenamiento territorial.

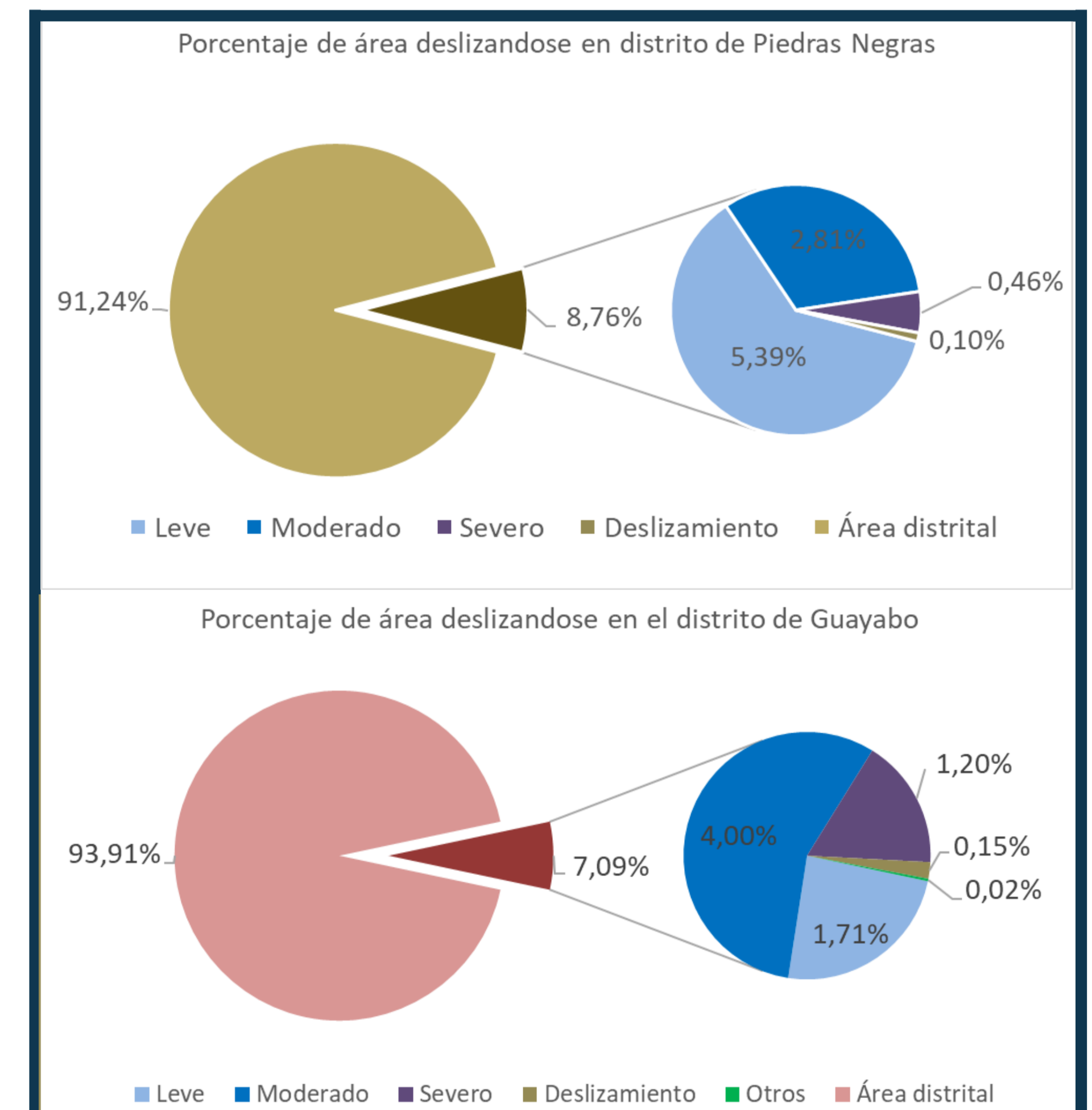
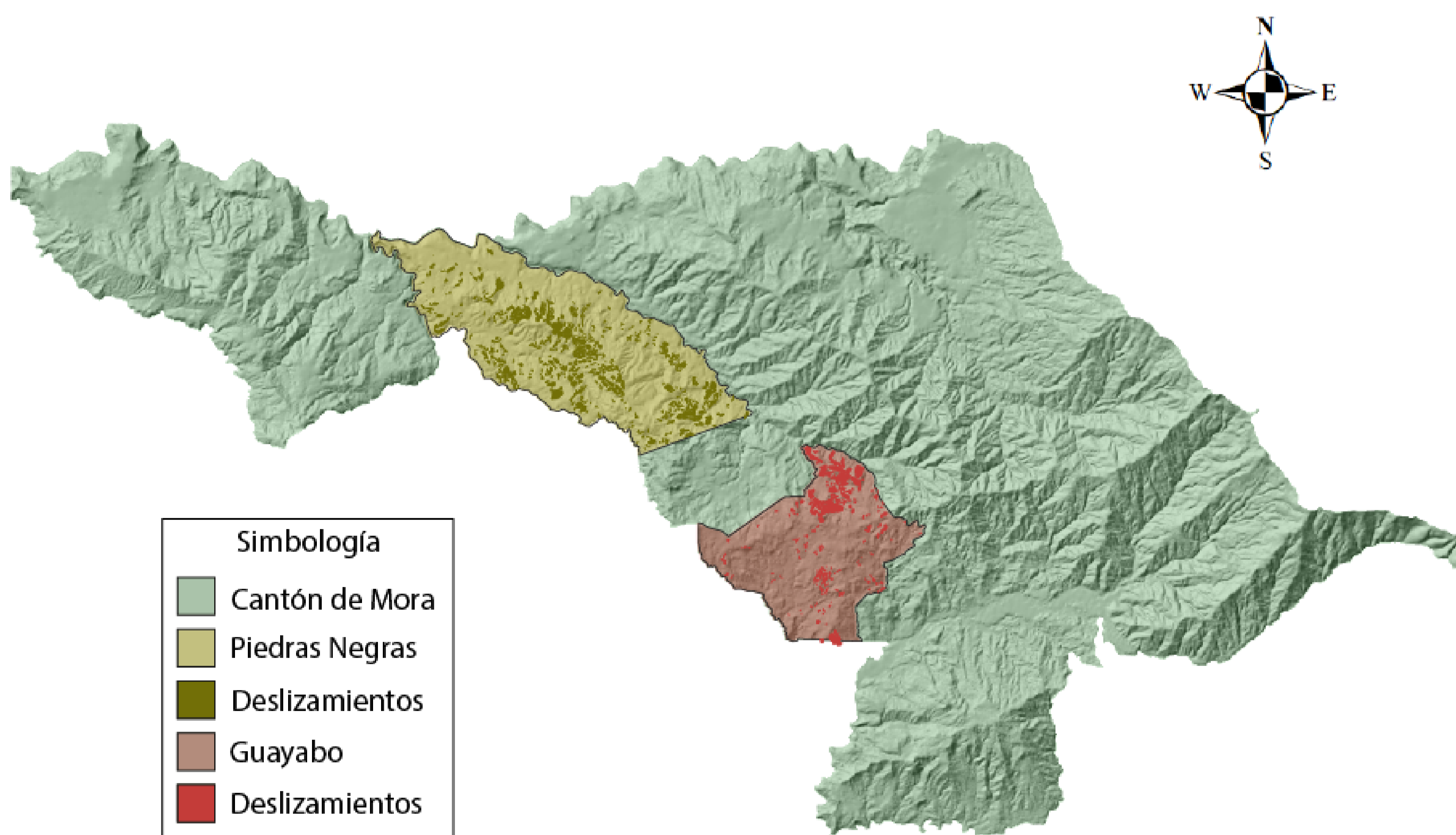


METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se utilizaron los programas Google Earth Pro de donde se toma la principal información y delimitan los deslizamientos, QGIS Desktop en su versión 3.16.9 en donde se procesa la información obtenida y ArcGis 10.4.1 para generar los mapas correspondientes.

Debido a que en la zona de estudio se puede encontrar diversos tipos de procesos de remoción en masa, no se consideró diferenciar los deslizamientos rotacionales, traslacionales y de caída de roca y todos estos se agruparon como "deslizamientos". La reptación si es posible identificarla y clasificarla con mayor precisión, de modo que, se dividió la reptación en "leve", "moderado/intermedio" y "severo" según su intensidad o grado de avance. Se creó otro grupo denominado como "otros" en el cual se añadieron aquellos deslizamientos que no cumplían con los parámetros establecidos para la clasificación.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES



- El distrito Guayabo contiene 213 procesos de remoción en masa, de los cuales 97 son de reptación leves, 66 de reptación moderada, 25 de reptación severa, 19 deslizamientos, 6 sin clasificar y se le añaden los 6 deslizamientos marcados por la CNE (Comisión Nacional de Emergencias).

- El distrito Piedras Negras contiene 536 procesos de remoción en masa, de los cuales 400 son de reptación leve, 86 de reptación moderada, 26 de reptación severa, 24 deslizamiento y a esto se le suma los 2 deslizamientos mostrados por la CNE (Comisión Nacional de Emergencias).

- En Guayabo el porcentaje de procesos erosivos con respecto al área total del distrito es de 7,09% mientras que en Piedras Negras es de 8,76%.

BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (s.f.) Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de Mora, escala 1: 100 000.
Herrera, P. (2021). Sistema de alerta temprana para el cantón de Mora, descripción de amenazas. Gobierno local de Mora
Herrera, P. (2020) Mapa de amenazas: Deslizamiento Jaris - Falla Activa o Potencialmente Activa Jaris. Gobierno local de Mora

Aplicación de métodos geofísicos para la creación de un mapa de concentraciones de ^{40}K de un yacimiento epitermal, localidad de Montezuma, Costa Rica.

Fabián Cubillos^{a*} & Meilyn Mora^a.

^a Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica



Introducción

Las técnicas geofísicas constituyen una herramienta útil en la geología de exploración. Distintos métodos como la gravimetría, polarización inducida, magnetometría, radiometría, entre otros son utilizados en el mapeo geológico y en la localización de yacimientos minerales.

El objetivo de esta investigación fue medir mediante el uso del método radiométrico la emisión de radiación natural en afloramientos ubicados entre las coordenadas 118033-1118434 N y 422760-422437 E CRTM05, en la localidad de Montezuma, distrito Miramar, cantón Montes de Oro de la provincia de Puntarenas, Costa Rica. Y con los datos obtenidos construir un mapa de porcentajes de concentraciones de isótopos de potasio 40 (^{40}K), que permita identificar zonas con anomalías, indicador de la existencia de alteración hidrotermal.

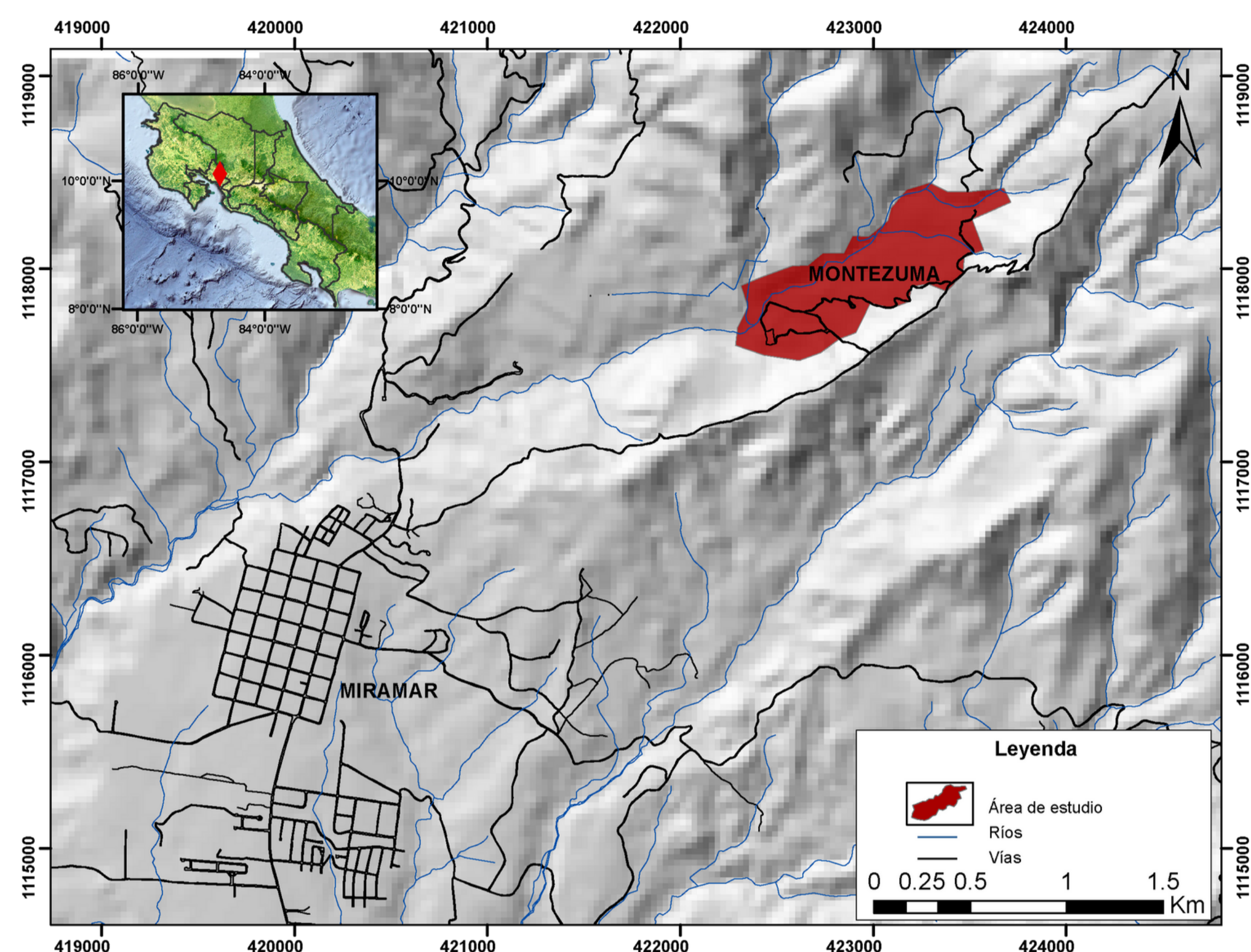


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio el cual se encuentra delimitada de color rojo.

Metodología

Para desarrollar este estudio se llevó a cabo una serie de pasos: se realizó visitas al campo donde se describieron los afloramientos, estructuras (diacclasas, fallas) y vetas (descripción, orientación y muestras).

Se utilizó el espectrómetro de rayos gamma RS-230, el cual mide la radiación de las rocas del isótopo de potasio 40 (^{40}K). Estos datos se tomaron cada 5 metros (fig. 2 B y C), colocando el RS-230 en contacto con la roca como se muestra en la figura 2A. Se espera un tiempo de al menos 30 segundos para obtener el dato y este se almacena en el equipo y así repetitivamente en diferentes puntos del área. Se obtuvo 300 datos (fig. 3) con los cuales se determinó una línea base de radiación natural ^{40}K en la zona de estudio. Según [1] se define que valores mayores a 2.4% se consideran anómalos.

Los datos se descargan con el software Georadis RAnalyst posteriormente se estructuran en el MS Excel para procesarlos en Surfer Golden Software y obtener el mapa de anomalías.

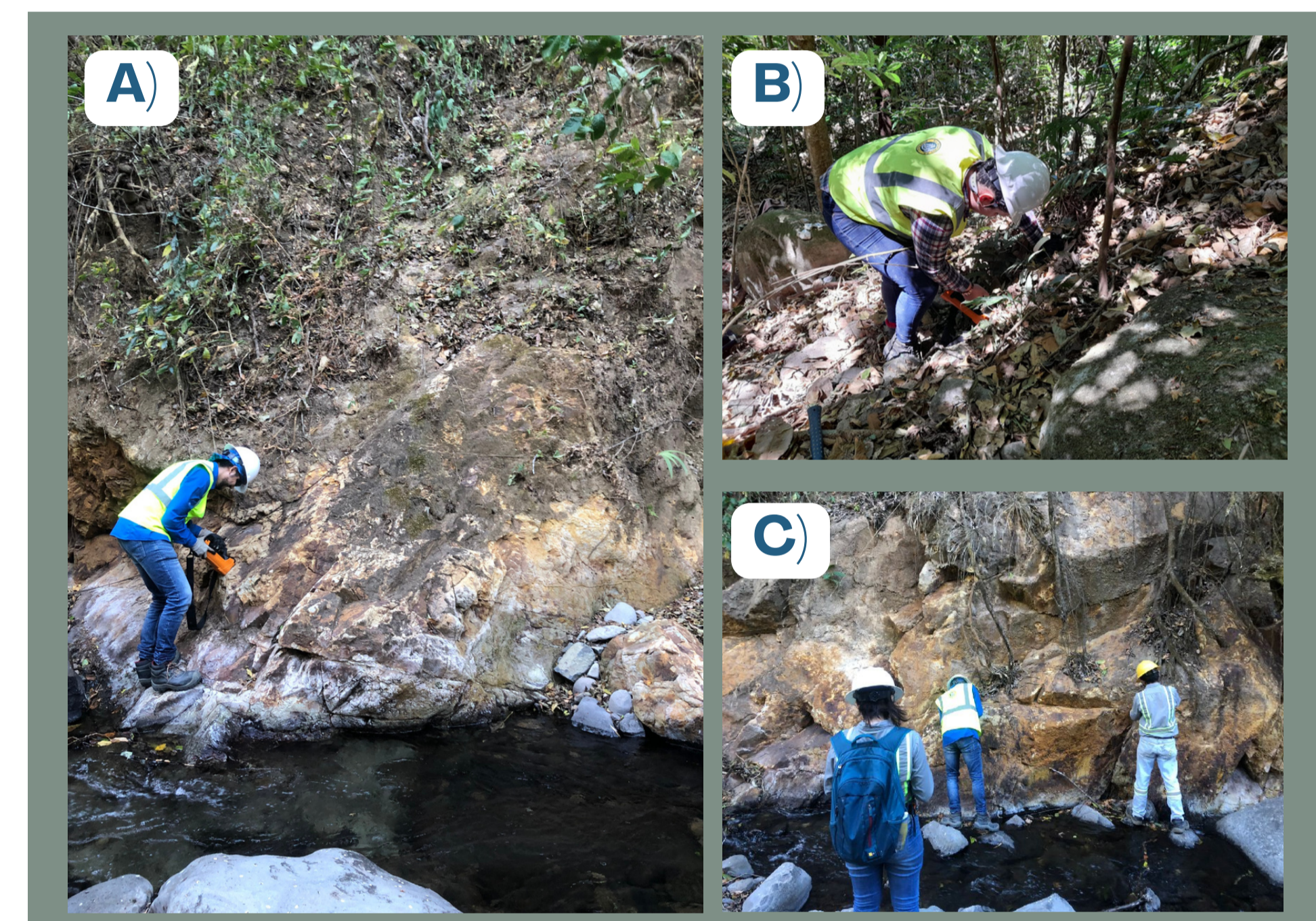


Figura 2. Diferentes pasos que se llevaron a cabo en el trabajo de campo para la recolección de los datos.

Resultados y conclusiones

Los resultados muestran en la zona de estudio concentraciones de isótopos de potasio 40 (^{40}K) que van desde 0,1% hasta 6,6% en afloramientos de lavas basalto-andesíticas, tobas moradas y brechas que concuerdan con la litología descrita por [2].

Se identificó nueve zonas de anomalías de isótopos de potasio 40 (^{40}K) con concentraciones que van desde 2,6% en tono amarillo hasta 6,6% en tono morado intenso (fig. 4), estas concentraciones de acuerdo con [3] están relacionadas a la existencia de alteración hidrotermal y de tipo propilitico y argilítico de grado medio y alto.

Con los resultados obtenidos se concluye que la zona de estudio está afectada por alteración hidrotermal asociada a un yacimiento epitermal y su origen está relacionada a zonas de falla o fractura que se caracterizan por la presencia de vetas de cuarzo, lo cual concuerda con [3].

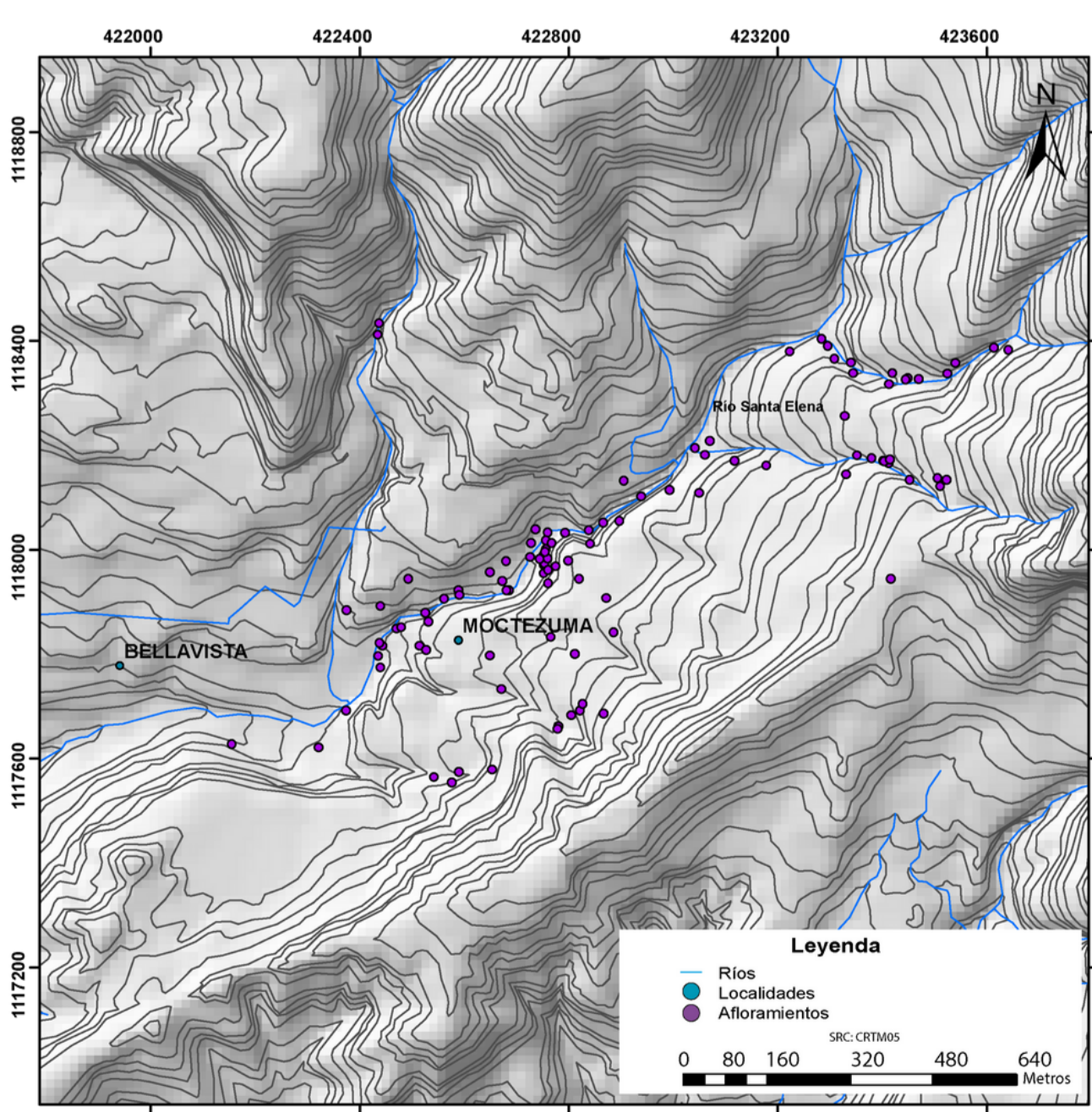


Figura 3. Mapa de afloramientos medidos con el Espectrómetro RS-230.

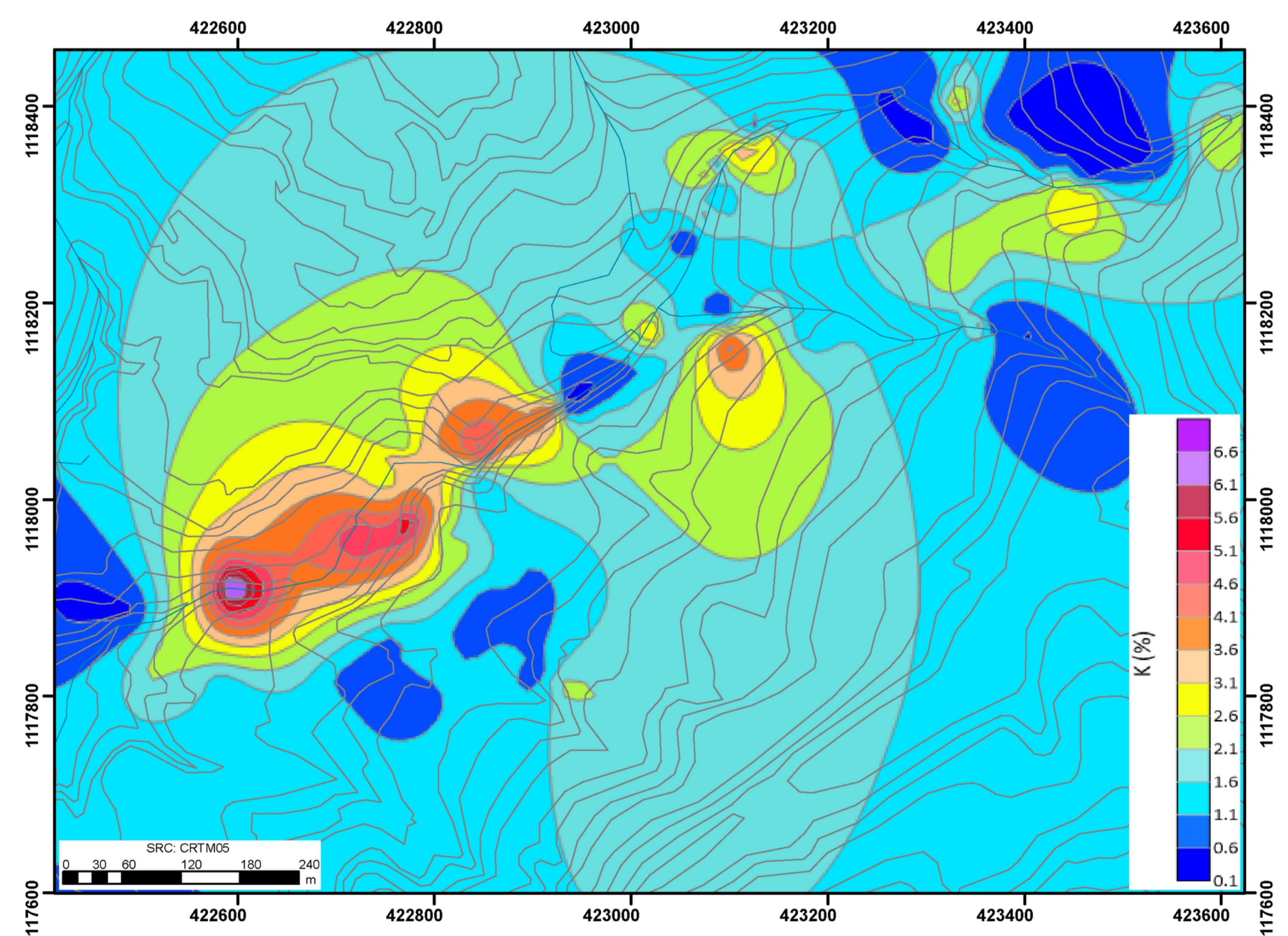


Figura 4. Mapa radiométrico de concentraciones de potasio 40 (^{40}K), en la esquina inferior izquierda se observan las zonas de anomalías desde el color amarillo hasta el morado intenso.

Referencias:

- Batista, J.; Ramayo, L. (2000). Utilización de datos aerogamma espectrométricos para la localización de zonas de alteración hidrotermal en la región Sagua-Moa, Cuba oriental. *Minería y Geología*, 17 (3-4) : 3-10.
- Kusssmaul, S. (2000). Minería y recursos minerales. En P. Denyer & S. Kusssmaul (Eds.), *Geología de Costa Rica* (1a ed., pp. 367-392). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Záček, V., Vorel, T., Kyd, P., Huapaya, S., Mixa, P., Grygar, R., ... Pécskay, Z. (2012). Geología y estratigrafía de la Hoja 3246-II Miramar, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 47, 7-54.

Agradecimientos A TerraSun Resources S.A y Río Minerales S.A, por la ayuda y facilidades brindadas durante el proceso de esta investigación.

Contacto*: fabian.cubillos@ucr.ac.cr

Actualización del catálogo sísmico regional de Centroamérica

Carlos Gamboa-Canté^a, Mario Arroyo-Solórzano^a & Belén Benito^a

^a Escuela Técnica Superior de Topografía, Cartografía y Geodesia. Universidad Politécnica de Madrid, España.

* Contacto con autores: carlosgamboa312@gmail.com ; mario.arroyo@alumnos.upm.es



INTRODUCCIÓN

A partir del último estudio regional que se realizó en Centroamérica por parte de Benito et al. (2012) en el marco del proyecto RESIS II y la actualización de zonas sismogénicas para Centroamérica por Alvarado et al. (2017), se ha incorporado nueva información en el catálogo regional para Centroamérica hasta el año 2020. Para esto, se han recopilado los catálogos sísmicos de 14 fuentes de información, tanto locales como regional, con el propósito de obtener un catálogo lo suficientemente denso para su posterior uso en los trabajos del cálculo de la peligrosidad sísmica en Centroamérica en el marco del proyecto KUK-AHPAN.

METODOLOGÍA

Para la incorporación y análisis de la base de datos del catálogo sísmico de Centroamérica, se hizo lo siguiente:

1. Recopilación de datos

Se recopilaron catálogos sísmicos de 14 fuentes de información, tanto locales como regionales, con diferentes periodos de observación.

No.	Fuente del Catálogo	País	Periodo del catálogo
1	Catálogo Macrosísmico -marca GEHN- de RIESCA	Guatemala	1522 - 2018
2	Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH)	Guatemala	2016 - 2020
3	Comisión Permanente de Contingencias (COPECO)	Honduras	1918 - 2020
4	Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET)	Salvador	1522 - 2020
5	Nuevo Catálogo para la República de Nicaragua - Álvarez, L. (2021)	Nicaragua	1520 - 2018
6	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER)	Nicaragua	1975 - 2017
7	Red Sismológica Nacional (RSN)	Costa Rica	1522 - 2020
8	Universidad de Panamá (UPA)	Panamá	2016 - 2020
9	Servicio Geológico Colombiano (SGC)	Colombia	1993 - 2020
10	Catálogo sísmico del proyecto RESIS II	GLOBAL	1522 - 2011
11	Catálogo de la nueva zonificación de amenaza sísmica en Centroamérica - Alvarado, G. et al.	GLOBAL	2011 - 2016
12	The Global Instrumental Earthquake Catalogue (ISC-GEM)	GLOBAL	1904-2018
13	Data Earthquake Catalog (USGS)	GLOBAL	1902 - 2020
14	The Global Centroid Moment Tensor Catalog (CMT)	GLOBAL	1976 - 2020

Tabla I Fuentes de información utilizadas para la recopilación de catálogos sísmicos.

2. Niveles de prioridad

Se establecieron niveles de prioridad a los diferentes catálogos sísmicos, según la información disponible en cada país. El cuadro de prioridades fue el siguiente:

ORDEN	CATÁLOGOS LOCALES Y REGIONALES
1	Catálogo de la red sísmica local del país de estudio
2	Catálogos de las redes sísmicas locales de los países vecinos
3	Catálogo de CA actualizado hasta 2016 (Alvarado et al., 2017)
4	Catálogo del RESIS II hasta 2009
5	Catálogo de red sísmica regional (GEM)
6	Catálogo de red sísmica regional (USGS)
7	Catálogo de red sísmica regional (CMT)

Tabla II Cuadro de prioridad según recopilación de la información sísmica.

Ahora bien, para aquellos eventos sísmicos que se encuentren duplicados dentro de cada país, se establecen niveles de prioridad según la información disponible en el registro de dicho evento. El cuadro de prioridades fue el siguiente:

ORDEN	PRIORIDADES
1	Observación del valor de RSM (< 1.5s)
2	Profundidad (ubicación correcta dentro del régimen tectónico)
3	Ubicación del epicentro
4	Valor de la magnitud Mw

Tabla III Cuadro de prioridad según la información disponible de los eventos sísmicos.

3. Polígonos de frontera

Se dibujaron dos tipos de polígonos de frontera. El primero se utilizó para establecer los límites que ocuparían los catálogos sísmicos locales de cada país. El segundo, establece las áreas donde irán asignados los catálogos sísmicos de cada país para el análisis de eventos sísmicos duplicados.

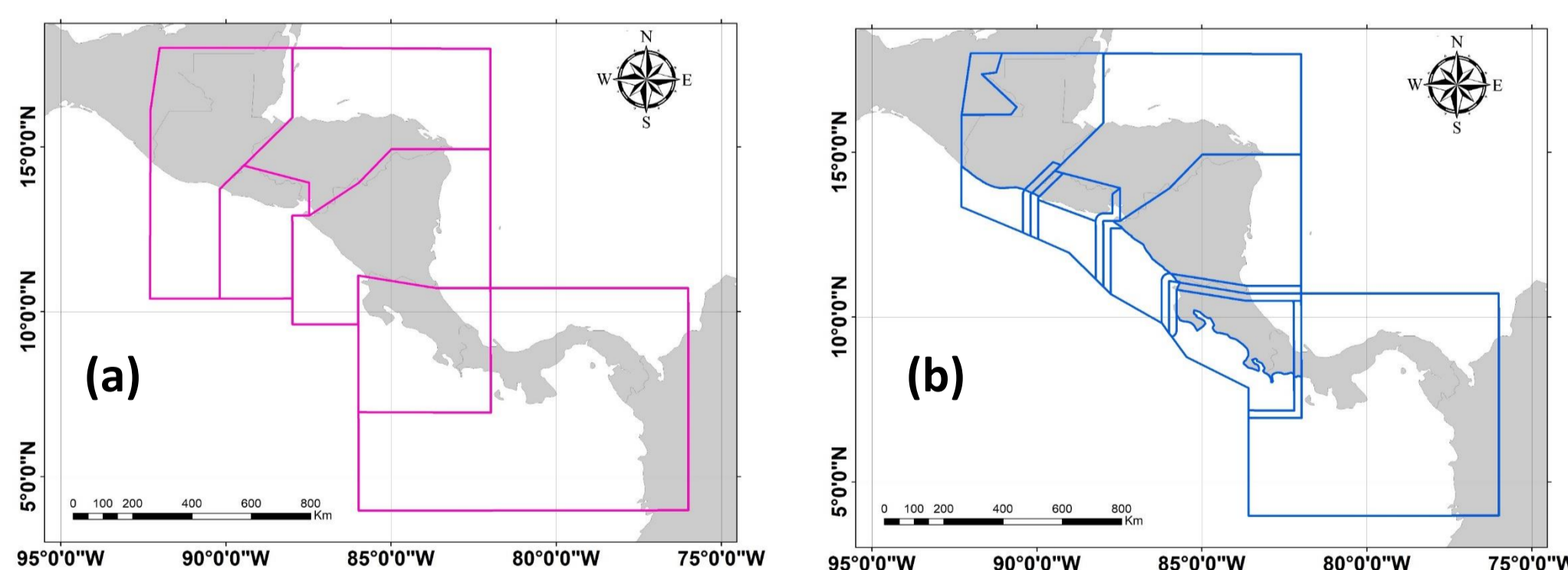


Figura 1 (a) Polígonos utilizados para la recopilación de los catálogos locales y regionales, (b) polígonos de frontera utilizados para el análisis de eventos sísmicos duplicados.

4. Asignación de eventos sísmicos en cada país

Según los polígonos de fronteras (figura 1b) y el orden de prioridades de los catálogos sísmicos (tabla II), la información en cada país fue asignada de la siguiente manera:

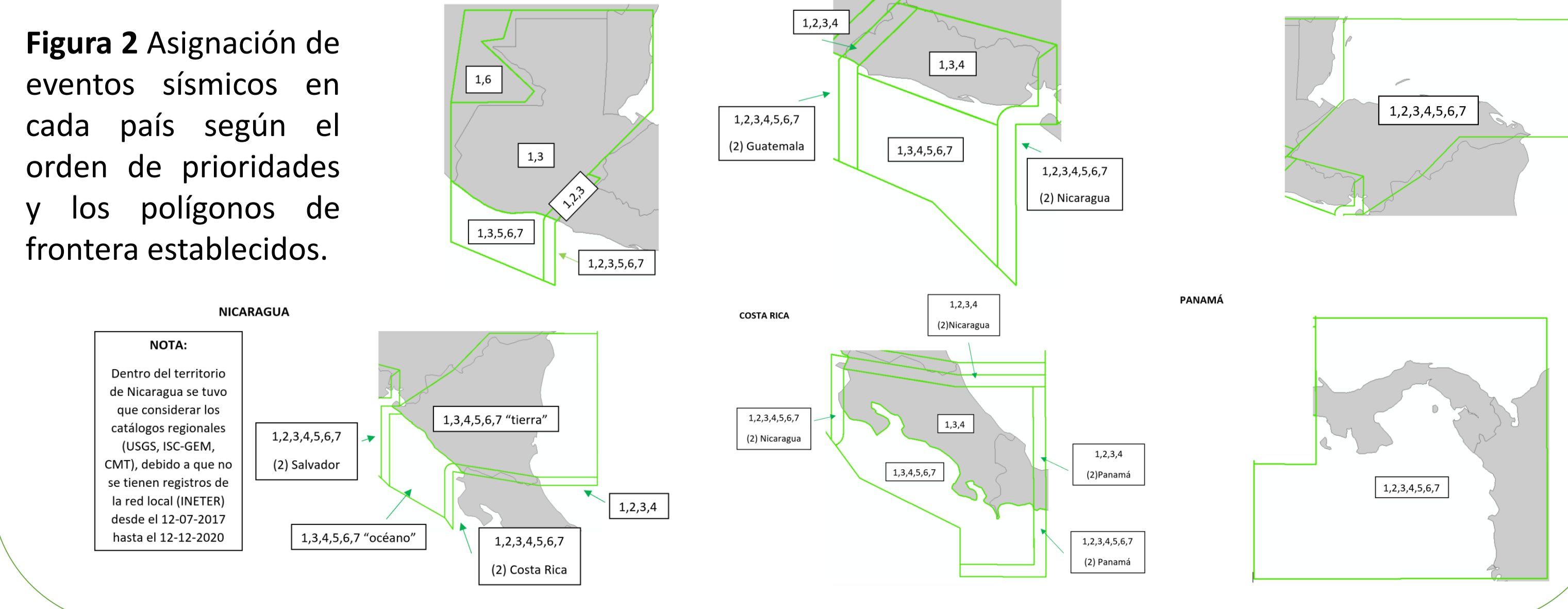


Figura 2 Asignación de eventos sísmicos en cada país según el orden de prioridades y los polígonos de frontera establecidos.

5. Eliminación de Duplicados

Se hicieron dos filtrados para la eliminación de duplicados:

1. El primer filtro se hizo de forma automática

Se creó un archivo macro en Excel que seleccionara todos aquellos eventos sísmicos que fueron registrados en el mismo periodo con una precisión hasta minutos. Seguidamente ordena los eventos de forma cronológica y compara cada uno de los eventos sísmicos en el orden establecido por los cuadros de prioridades de la tabla II y tabla III. Al final, selecciona el evento sísmico más idóneo que cumpla todas las características establecidas.

2. El segundo filtro se hizo de forma manual

Teniendo todo el catálogo del primer filtrado, se extrajeron nuevamente todos los eventos sísmicos que fueron registrados en el mismo periodo con una precisión hasta minutos. Se ordenaron nuevamente los eventos sísmicos de forma cronológica y se observa detenidamente si se trata de un evento duplicado o no. Realizando estas observaciones se llegaron a encontrar los siguientes casos:

- ✓ CASO 1: Dos agencias locales registran el mismo evento sísmico en la frontera de los países. (duplicados)
- ✓ CASO 2: La agencia local registra dos eventos sísmicos en el mismo periodo pero en diferentes partes del país. (no duplicados)
- ✓ CASO 3: Se registran eventos sísmicos que sucedieron en el mismo periodo pero en países diferentes. (no duplicados)
- ✓ CASO 4: Existencia de enjambres sísmicos que suceden en el mismo periodo dentro del país. (no duplicados)
- ✓ CASO 5: La agencia local registra eventos sísmicos con el mismo periodo, epicentro, profundidad y magnitud. (duplicados)

6. Catálogo sísmico regional de Centroamérica

A continuación, se muestra el catálogo sísmico regional de Centroamérica actualizado hasta el año 2020. Así mismo, se muestra el número de eventos sísmicos y el periodo de registro que se tiene en cada uno de los países.

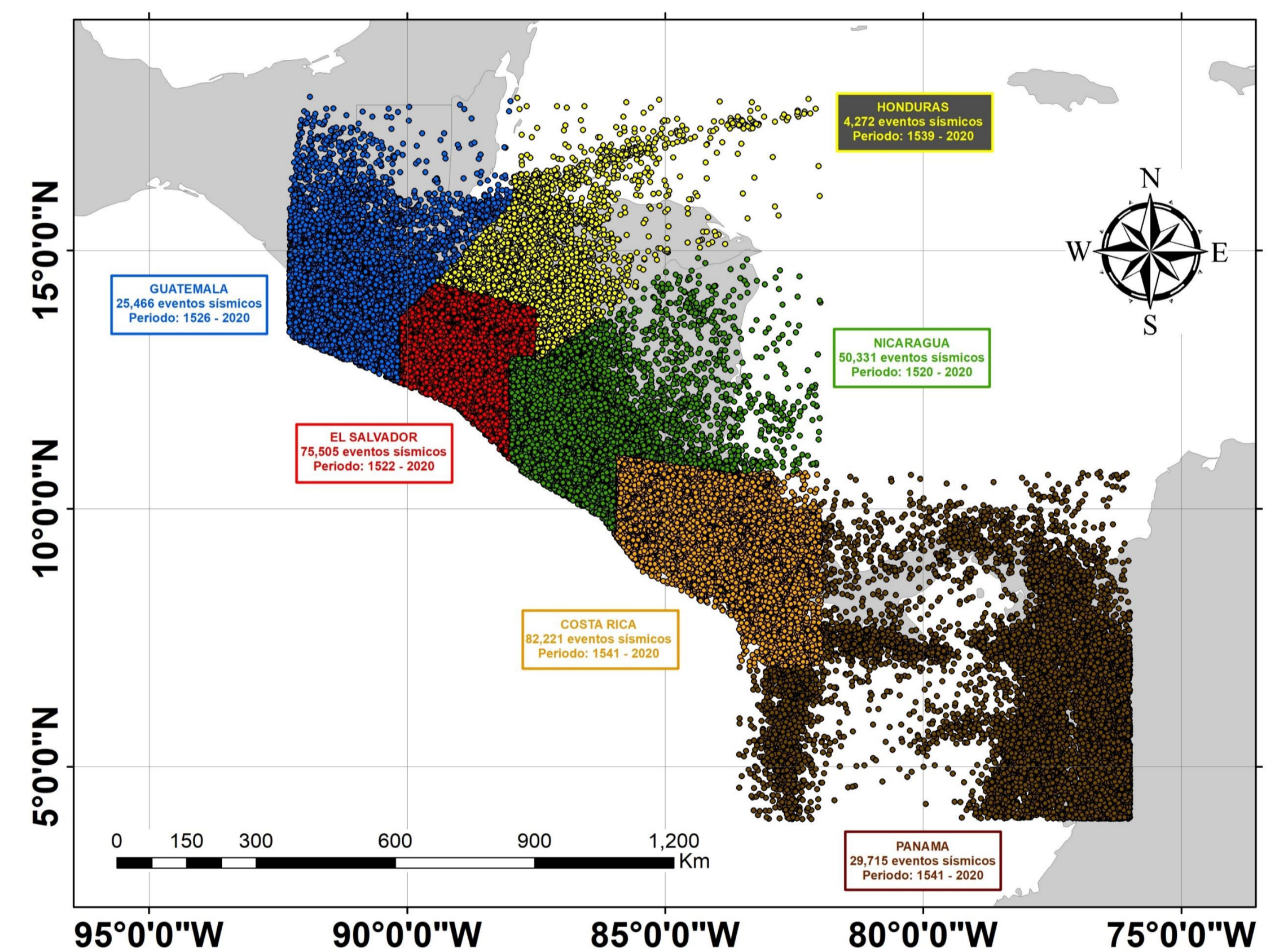


Figura 3 Catálogo sísmico regional de Centroamérica actualizado hasta el año 2020.

CONCLUSIONES

1. Se recopiló un catálogo sísmico regional para Centroamérica con más de 260,000 eventos sísmicos.
2. Se eliminaron aproximadamente 20,000 eventos sísmicos por estar duplicados.
3. En general, todos los países contienen más de 20,000 eventos sísmicos a excepción de Honduras que posee menos de 5,000 eventos sísmicos. Esto se debe a la carencia de una red sismológica en dicho país.
4. El 80% del catálogo sísmico recopilado pertenece al periodo instrumental y el otro 20% a eventos sísmicos históricos.

FUTURO TRABAJO

1. Se deben calcular y comparar los parámetros sísmicos de las zonas sismogénicas establecidas por Alvarado et al. (2017) para analizar su variación.
2. Actualizar el mapa de peligrosidad sísmica probabilista para Centroamérica para compararlo con el mapa de peligrosidad sísmica del proyecto RESIS II y el mapa de peligrosidad sísmica global realizado por The Global Earthquake Model (GEM) en 2018.

REFERENCIAS

1. Albuquerque Seismological Laboratory (ASL)/USGS. (1988). *Global Seismograph Network - IRIS/USGS* [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/IU>
2. Alvarado, G. et al. (2017). *The new Central American seismic hazard zonation: Mutual consensus based on up to day seismotectonic framework*. Tectonophysics, 721(28), 462-476. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.013>
3. Alvarez, J. L. (2021). *Un nuevo catálogo de terremotos para la República de Nicaragua*. Investigaciones Geográficas, (62), 43-68. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2021.64948>
4. Benito, B. et al. (2012). *A New Evaluation of Seismic Hazard for the Central America Region*. The Bulletin of the Seismological Society of America, 102, 504-523. doi: 10.1785/0120110015.
5. Ekström, G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski. (2012). *The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes*. Phys. Earth Planet. Inter., 200-201, 1-9. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002
6. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). (1976). *Red Sismológica Nacional* [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/GI>
7. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). (1975). *Nicaraguan Seismic Network* [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/NU>
8. International Seismological Centre. (2018). *ISC-GEM Earthquake Catalogue*. <https://doi.org/10.31905/d808b825>
9. Peruzza, L. et al. (2021). *MARCA-GEHN, a prototype macroseismic archive of four Central America countries*. Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata, 62(2), s1-s198. <https://doi.org/10.4430/beta0355>
10. Red Sismológica Nacional de Costa Rica (RSN). (2021). *The Costa Rica National Seismological Network Catalog during 1975-2020*. DOI: <https://doi.org/10.15517/TC>
11. Servicio Geológico Colombiano (SGC). (1993). *Red Sismológica Nacional de Colombia* [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/CM>
12. Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). (2004). *El Salvador (SNET-BB)*. International Federation of Digital Seismograph Networks. Recuperado de: <https://www.fdsn.org/networks/detail/SV/>
13. Universidad de Panamá (UPA). (2011). *Red sismológica de Panamá*. International Federation of Digital Seismograph Networks. Recuperado de: <https://www.fdsn.org/networks/detail/RP/>

MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS, CUENCA DE RÍO ABANGARES, GUANACASTE, UTILIZANDO LA METODOLOGÍA MORA-VARHSON Y MODIFICACIONES



Iván Villagra

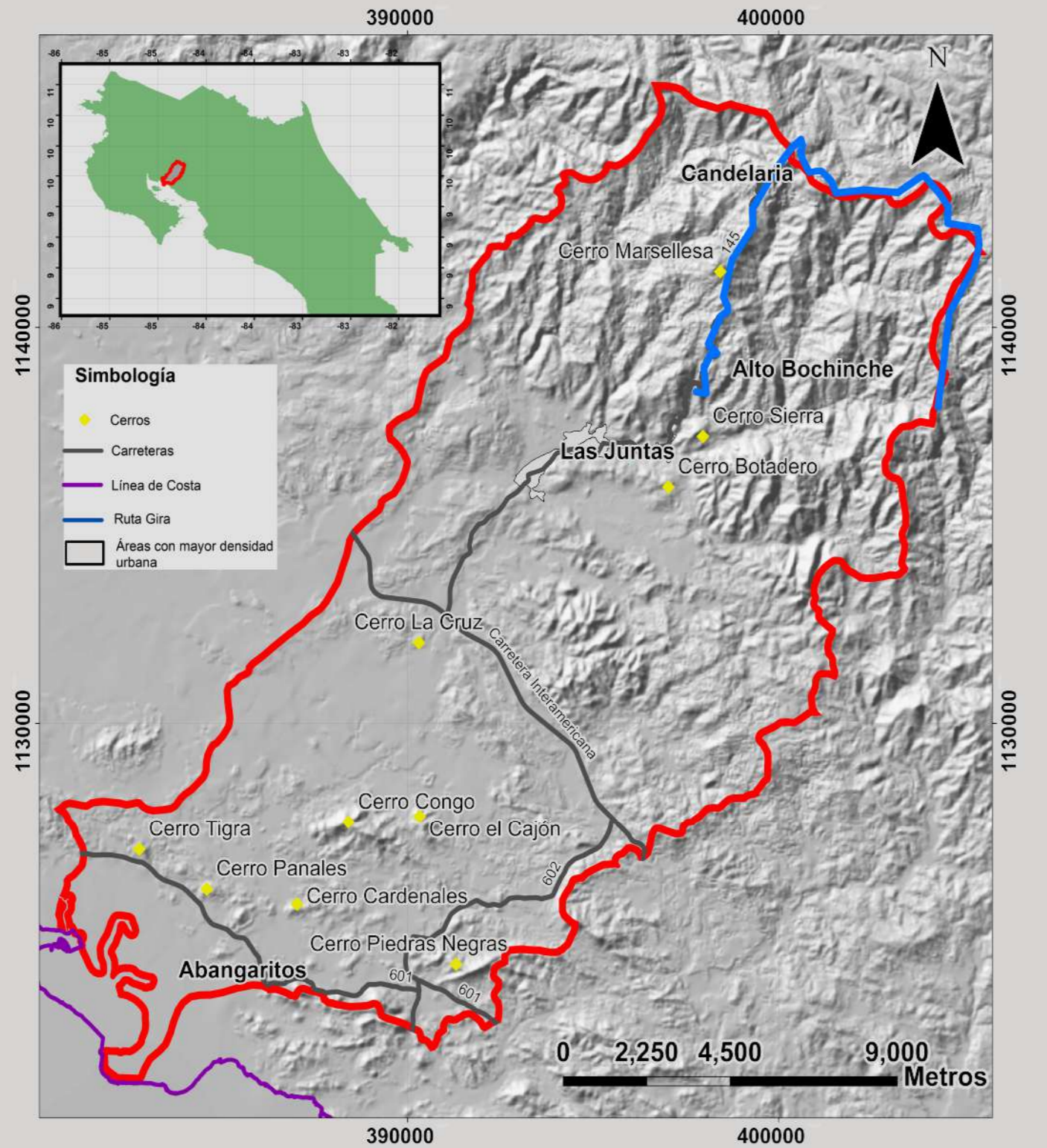
Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica

Contacto: ivan.villagra@ucr.ac.cr



Introducción:

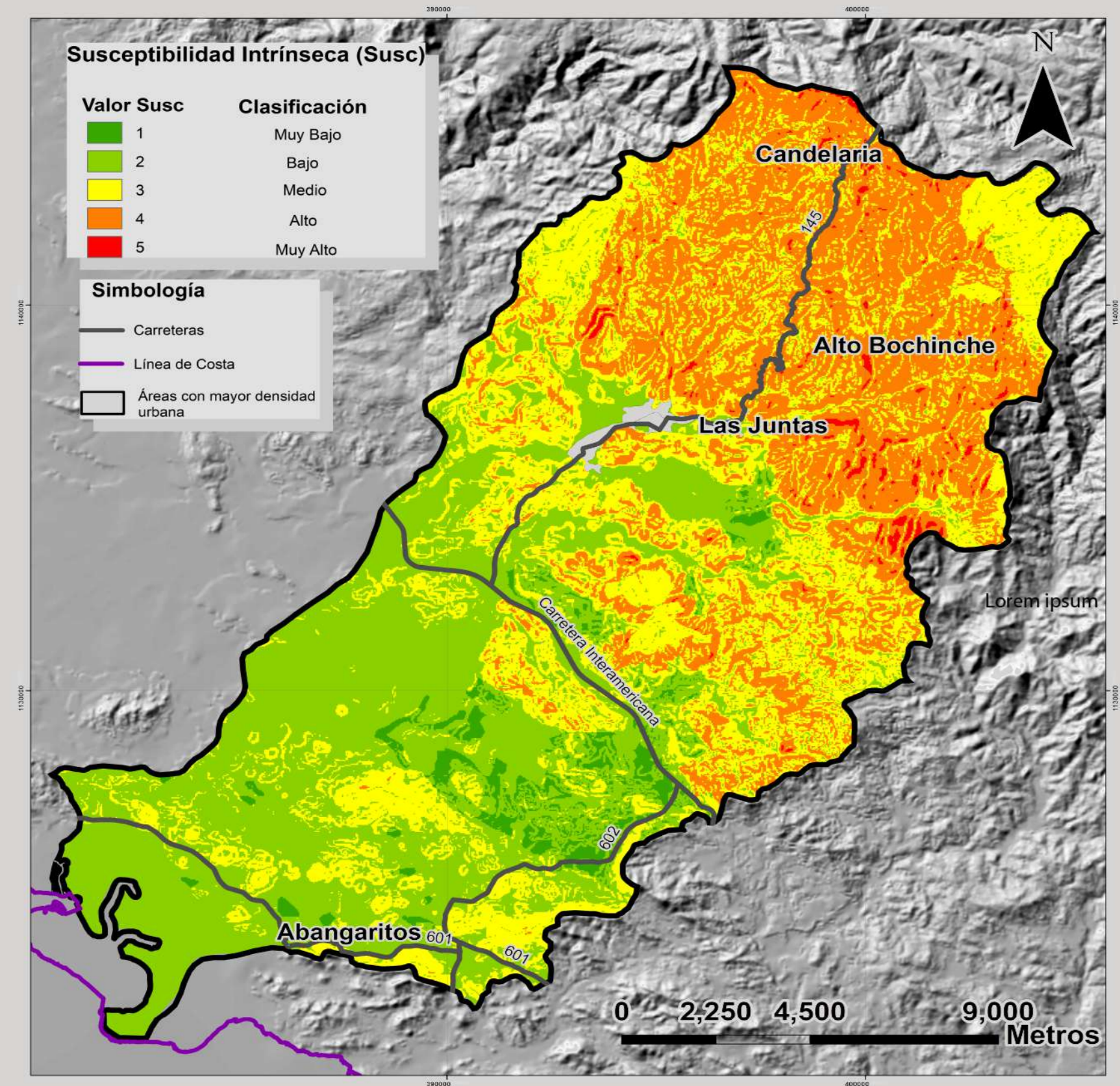
La zona de estudio se encuentra en la provincia de Guanacaste, Abangares, específicamente el trabajo se realizó en la cuenca de río Abangares, que posee una extensión de unos 300 km². La zona presenta pendientes importantes en las comunidades de La Candelaria, Marsellesa y Alto Bochinche, con un clima muy marcado entre la época seca y lluviosa, lo que genera problemas de acceso al recurso hídrico en los meses más secos.



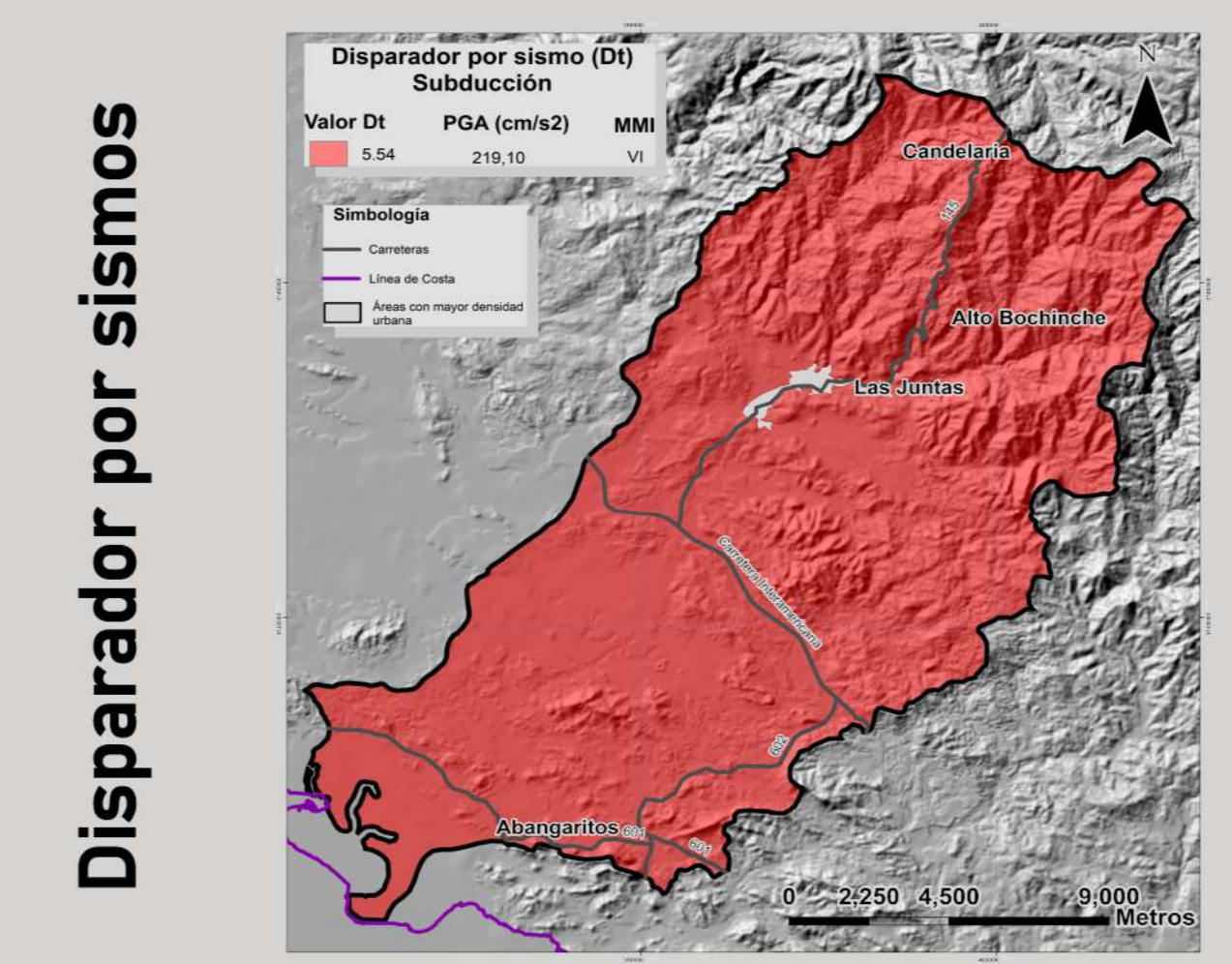
Metodología: La metodología Mora- Vahrson permite realizar un análisis a priori de áreas extensas bajo amenaza de deslizamientos, utilizando indicadores morfodinámicos (Mora & Vahrson, 1993). Para determinar la susceptibilidad de una ladera a deslizarse o susceptibilidad final, (H) es necesario primero determinar la susceptibilidad intrínseca (Susc) de la zona de estudio, y luego determinar los disparadores, en este proyecto se trabajó con dos distintos tipos de disparadores, el primero por intensidad de lluvias (DLI), utilizando la metodología de Intensidad de Saturación, propuesta por Ruiz y Soto (2014) y por sismos (Dt), utilizando un disparador móvil para sismos de fallamiento local, propuesto por Ruiz (2012)

Susceptibilidad Final: Cuatro modelos finales resultado de la multiplicación de la susceptibilidad intrínseca y los disparadores

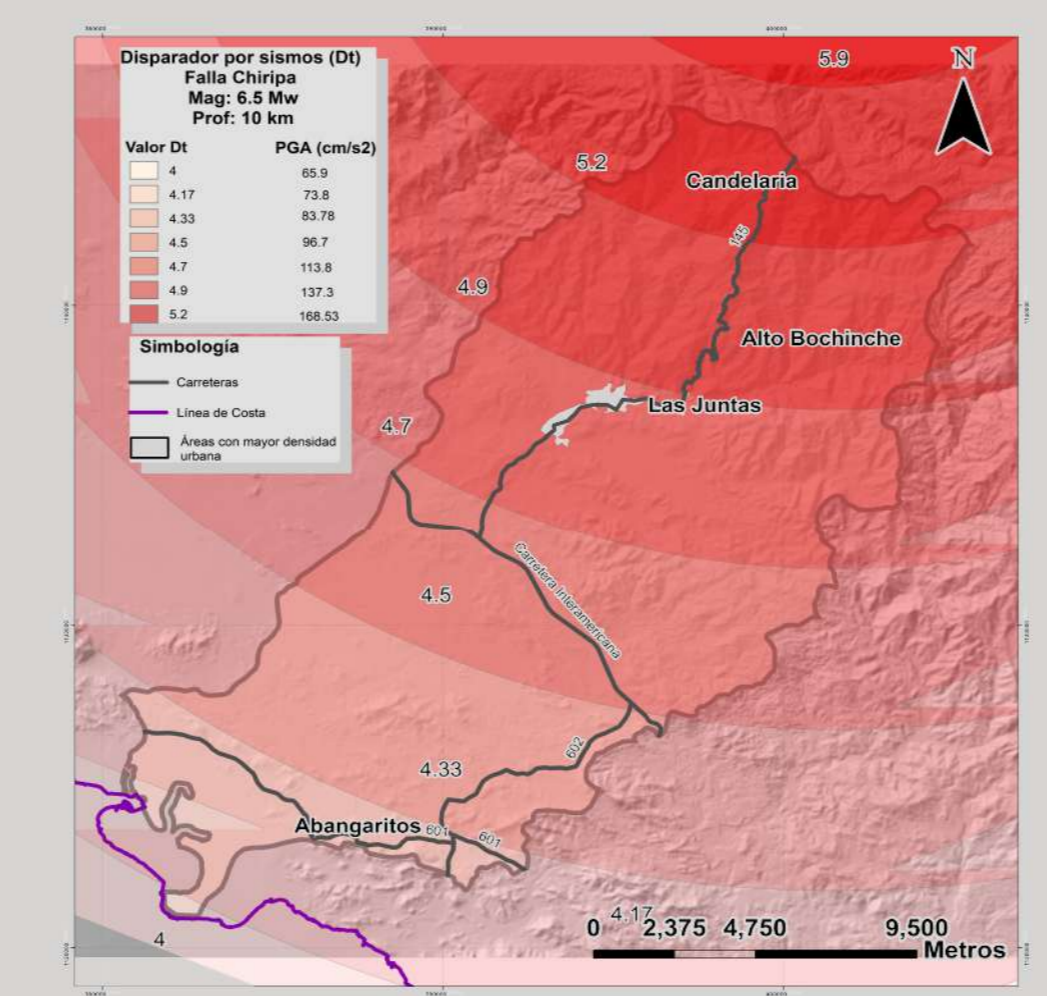
Susceptibilidad Intrínseca: Esta variable está dada por la multiplicación de tres factores, el factor litológico, de humedad de suelo y de ángulo de pendiente.



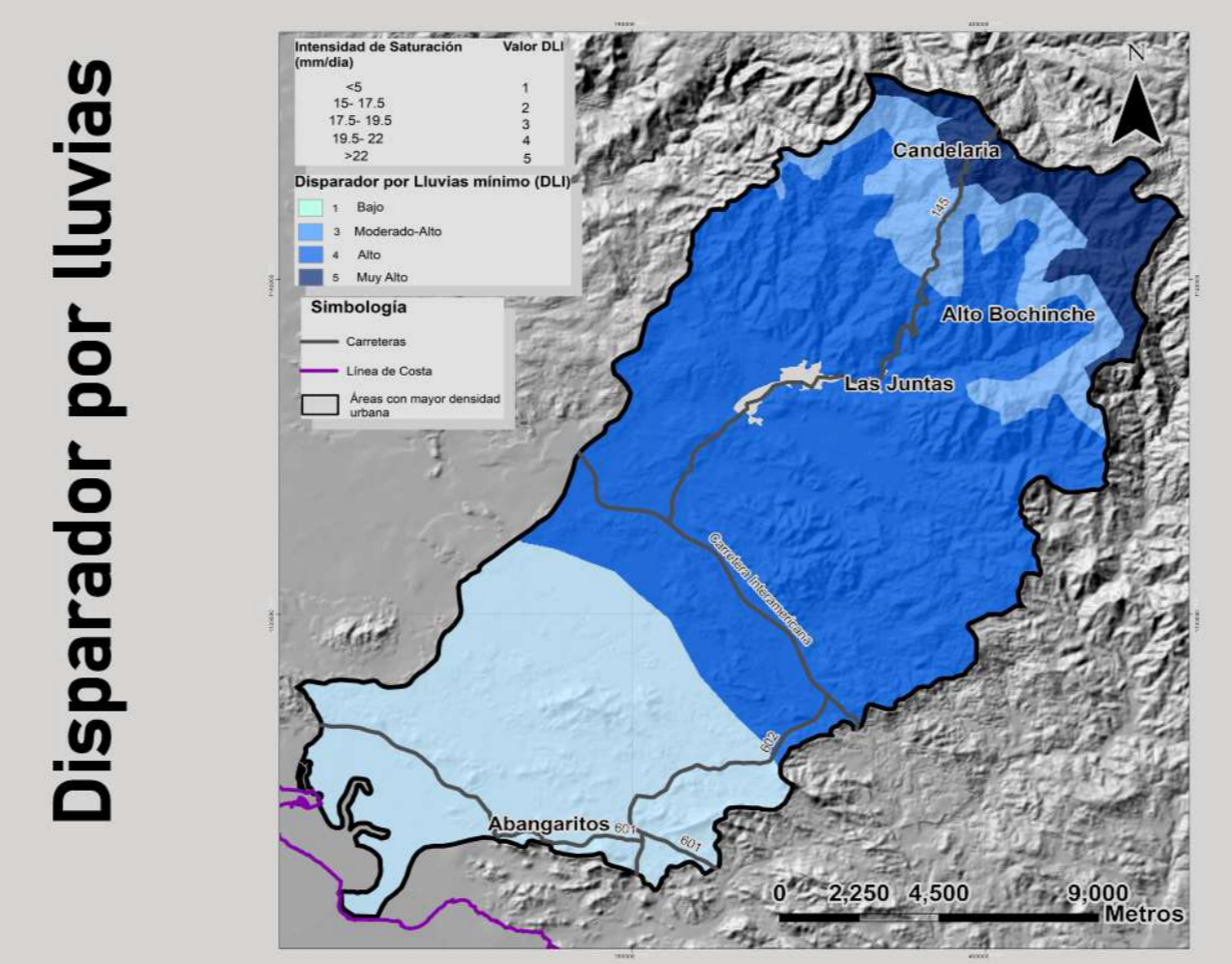
Disparadores: A partir de la obtención de cada uno de los disparadores en base a las distintas metodologías empleadas, se multiplica por la susceptibilidad intrínseca para así obtener la susceptibilidad final.



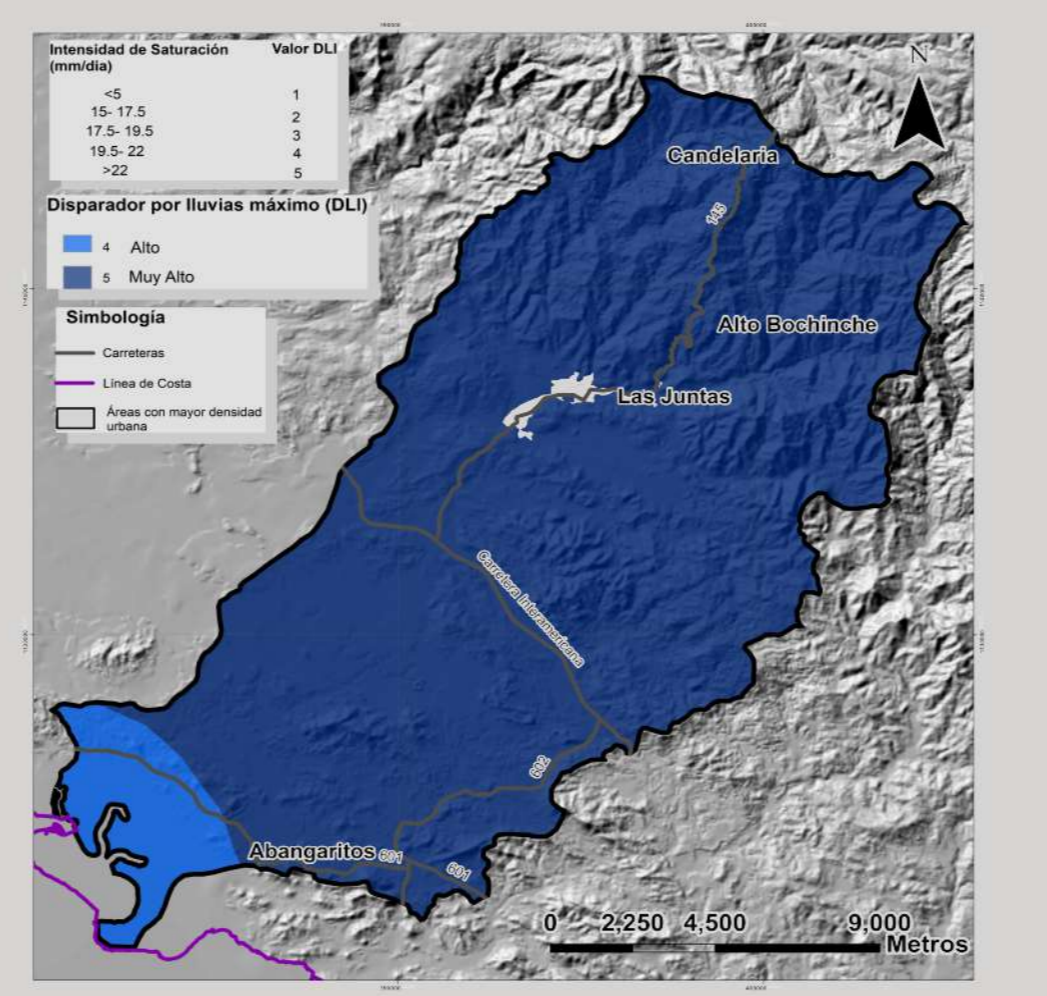
Subducción, Sámara 2012



Fallamiento Local, Tilarán 1973

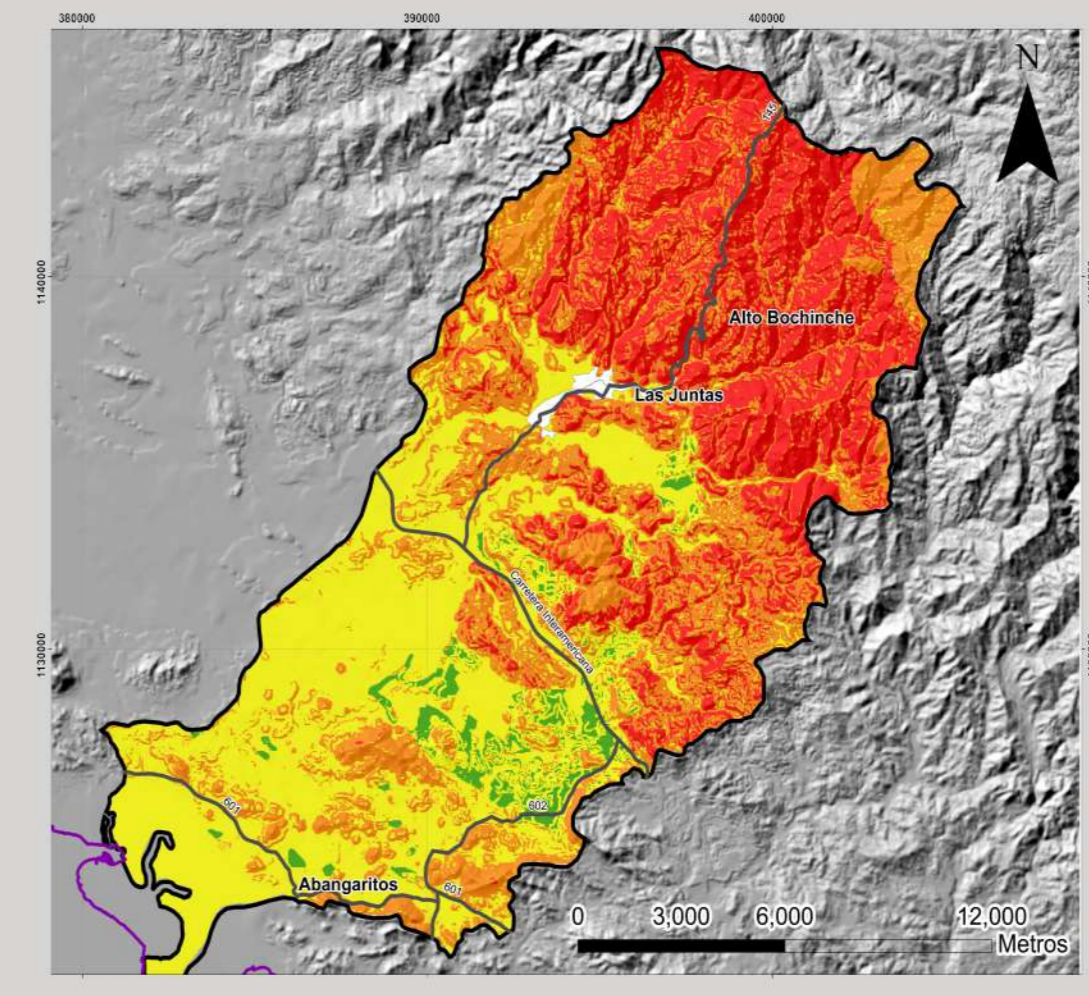


Mínimas

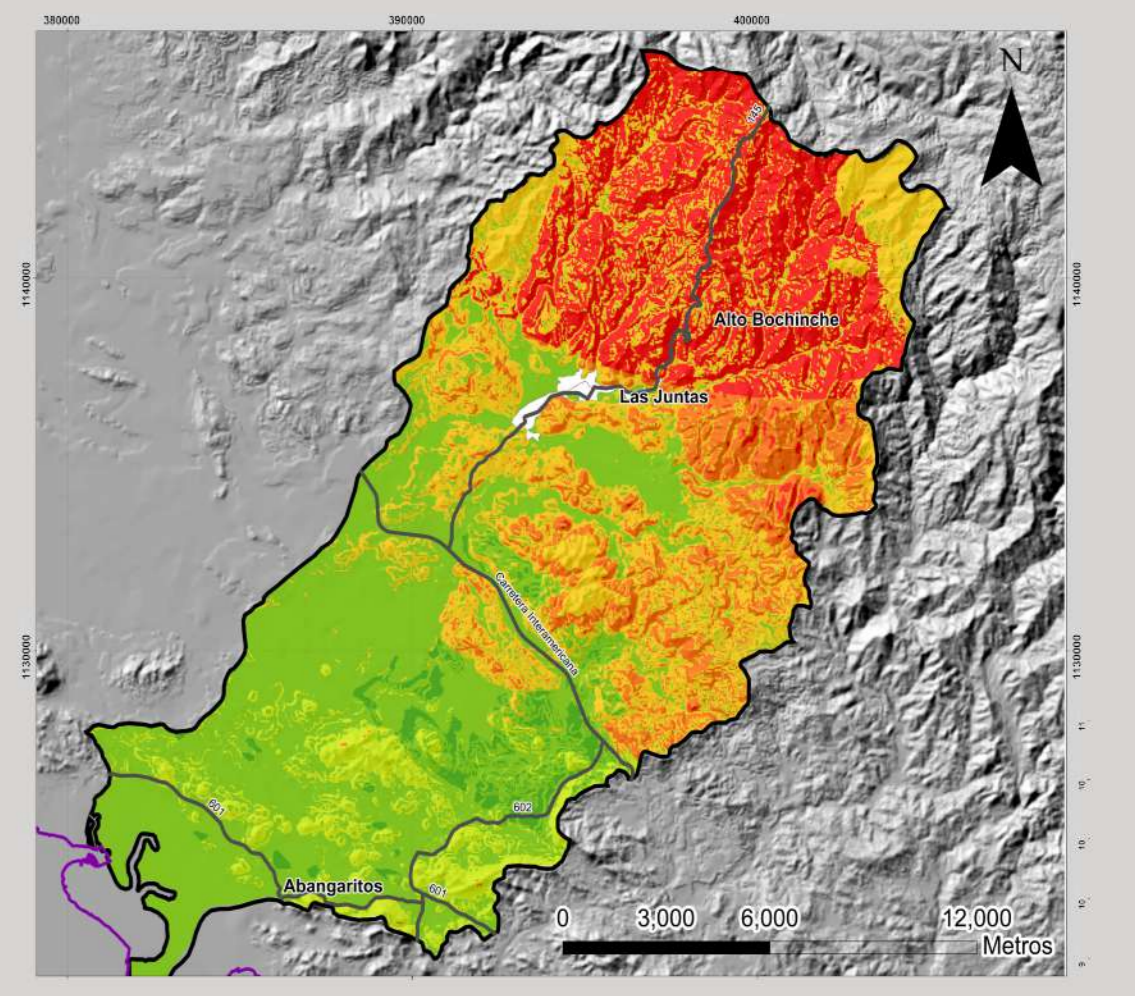


Máximas

Disparador por sismos

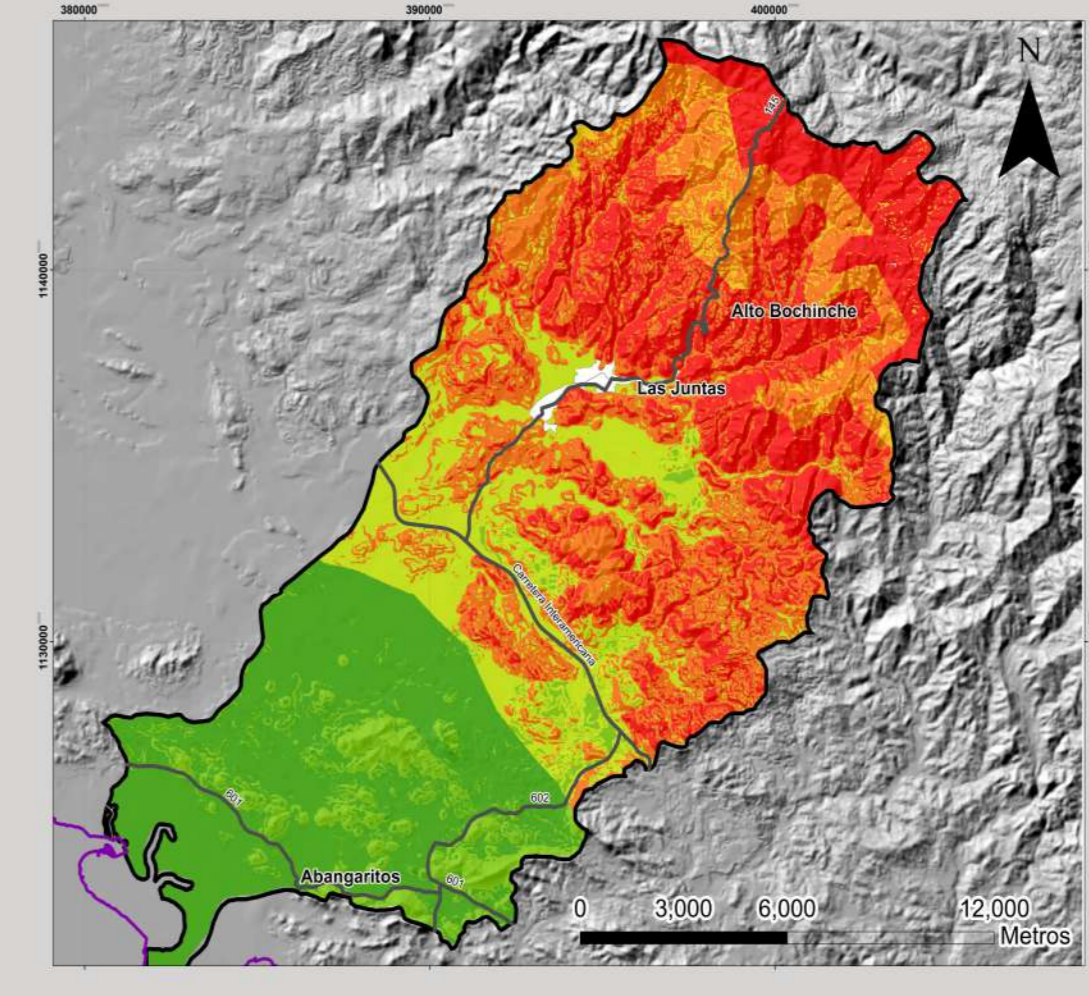


Subducción

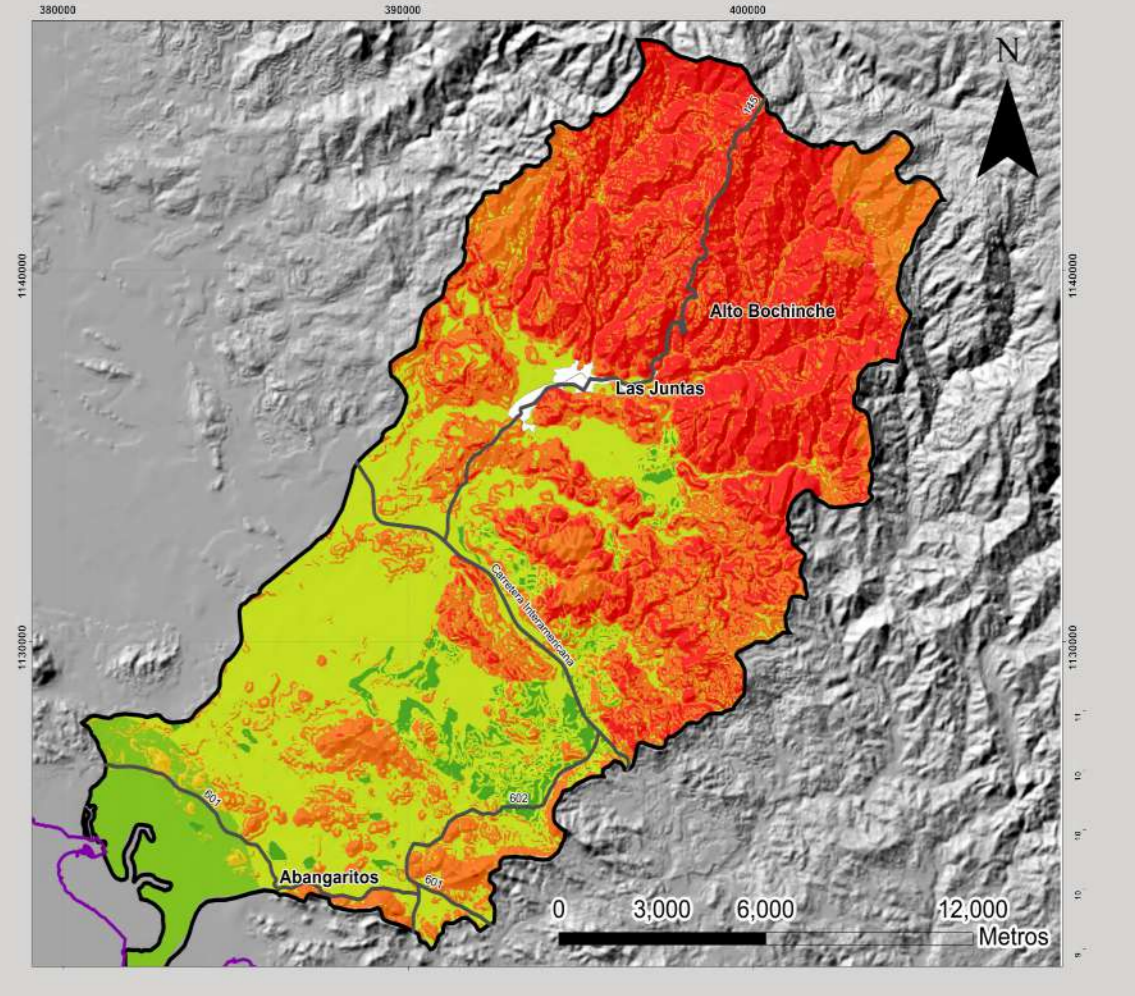


Falla Local

Disparador por lluvias



Mínimas



Máximas

Conclusiones:

Las zonas de mayor pendiente presentan una mayor susceptibilidad intrínseca y son las que se ven más afectadas al agregar un disparador en todos los modelos generados, por lo que se puede plantear que zonas con pendientes de 16°-35° que están ubicadas en las zonas como La Candelaria y Alto Bochinche van a presentar una mayor susceptibilidad a procesos de remoción de masas

Por lo que estas zonas son de vital importancia de vigilar y estudiar más a fondo para un ordenamiento territorial efectivo.

Referencias principales:

MORA, S., VAHRSON, G. (1993) Macro-zoning land-slide hazards. Manual for zonation on Seismic Geotechnical Hazards. Japanese Geotechnical Society Pp58-61 and 128-136
 RUIZ, P., (2012) Reconstruction of the Paleo and Neostages of Poás and Turrialba volcanoes, Costa Rica: Competing processes of growth and destruction. Tesis doctoral, Rutgers University, Nueva Jersey
 RUIZ, P SOTO, G. (2014). Preparación del mapa de susceptibilidad a deslizamientos utilizando imágenes lidar en los Cerros de Escazú, cantones Aserrí, Desamparados, Alajuelita, Santa Ana y Escazú, Costa Rica. DOI: 10.13140/RG.2.2.33311.76967.

Exposición sísmica de los edificios por métodos geoespaciales

Rodríguez-Saiz, J.^{a*}, Marchamalo M.^a, Esquivel L.^b, Rejas-Ayuga, J.G.^{a,c}
 García-Lanchares, C.^d, González-Rodrigo, B.^e & Benito, B.^f

INTRODUCCIÓN

La exposición sísmica de una población es una característica relevante para prever su respuesta ante un sismo. Es esencial para la planificación urbana y la gestión de desastres. Existen diversas metodologías mundiales para evaluar la exposición sísmica de un asentamiento humano. El presente trabajo se basa en taxonomía del GEM (Global Earthquake Model) y la metodología propuesta por el GFZ (Centro de investigaciones en Geociencias) alemán. Se parte del trabajo de Esquivel (2020), que evaluó una muestra de 7.296 edificaciones del cantón de San José. El objeto de este trabajo es determinar el potencial de las técnicas geoespaciales para la estimación de las variables de exposición.

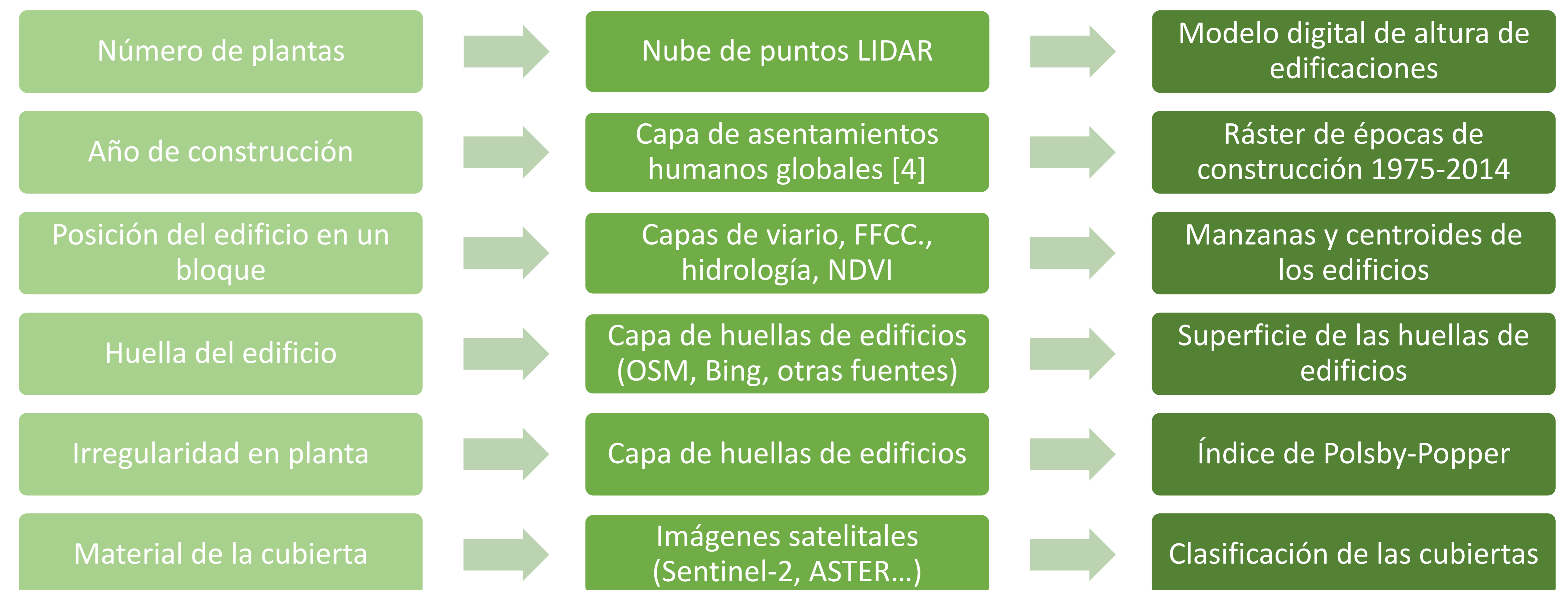
METODOLOGÍA

- 1) Se determinan los atributos de la taxonomía GEM que se pueden identificar mediante técnicas geoespaciales (SIG, fotogrametría, datos satelitales, LiDAR, geodatabases mundiales abiertas,...).
- 2) Se debe disponer de una muestra previa de edificios evaluados según la taxonomía elegida (en este caso GEM) para poder entrenar y validar los modelos.
- 3) Con la base de datos de atributos de las edificaciones, se clasifica la población total de estructuras en diferentes clases para agruparlas y poder trabajar más adecuadamente con ellas.
- 4) A futuro se propone entrenar y validar modelos que proporcionen la clase de exposición a partir de variables fácilmente obtenibles de bases de datos y técnicas geoespaciales.

Tabla de atributos de la taxonomía GEM destacando los estimados por técnicas geomáticas

Grupo de atributos	#	Atributo	Niveles del atributo
Sistema estructural	1	Dirección	Dirección del edificio
	2	Material del sistema de resistencia de cargas laterales	Tipo de material (nivel 1) Tecnología del material (nivel 2) Propiedades del material (nivel 3)
	3	Sistema de resistencia de cargas laterales	Tipo de sistema de resistencia de cargas laterales (nivel 1) Ductilidad del sistema (nivel 2)
Información del edificio	4	Altura	Altura
	5	Fecha de construcción o rehabilitación	Año de finalización de construcción
Atributos exteriores	6	Uso	Clase general de uso del edificio (nivel 1) Clase detallada de uso del edificio (nivel 2)
	7	Posición del edificio dentro de un bloque	Posición del edificio dentro de un bloque
	8	Forma en planta del edificio	Huella del edificio
	9	Irregularidad estructural	Regular o irregular (nivel 1) Irregularidad en planta o irregularidad vertical (nivel 2) Tipo de irregularidad (nivel 3)
Cubierta / forjados / cimentación	10	Muros exteriores	Muros exteriores
	11	Cubierta	Forma de la cubierta (nivel 1) Cobertura de la cubierta (nivel 2) Material del sistema de la cubierta (nivel 3) Tipo de sistema de la cubierta (nivel 4) Conexiones de la cubierta (nivel 5)
	12	Forjados	Material del sistema de los forjados (nivel 1) Tipo de sistema de los forjados (nivel 2) Conexiones de los forjados (nivel 3)
	13	Sistema de cimentación	Sistema de cimentación

Nota-. En negrita las variables estimadas por técnicas geoespaciales



CONCLUSIONES Y FUTURO TRABAJO

El estudio de la exposición sísmica por técnicas geomáticas es un campo promisorio con el que ya se puede hacer un estudio parcial de la exposición sísmica, pudiendo seguir ampliándolo en un futuro próximo. La metodología propuesta permite realizar un estudio preliminar rápido en situación de emergencia o para optimizar los recursos de un estudio más exhaustivo. A futuro se propone entrenar y validar modelos que proporcionen la clase de exposición a partir de variables fácilmente obtenibles de bases de datos y técnicas geoespaciales.

REFERENCIAS

1. Brzev S., Scawthorn C., Charleson A. W., Allen L., Greene M., Jaiswal K., Silva V., (2013). GEM Building Taxonomy Version 2.0. GEM Technical Report 2013-02 V1.0.0, 188 pp., GEM Foundation, Pavia, Italy.
2. Esquivel Salas, L. C., (2020). Inventario de edificaciones del cantón de San José para el caso específico de amenaza sísmica utilizando el método de mapeo ambiental rápido. Th MSc UCR. 102pp. C. Rica
3. Pittore M., Haas M., Megalooikonomou K. G., (2018). Risk-Oriented, bottom-up modeling of building portfolios with faceted taxonomies. Frontiers in built environment 4:41. GFZ, Potsdam, Germany.
4. Corbane C., Florczyk A., Pasaresi M., Politis, P, Syrris, V., (2018). GHS built-up grid, derived from Landsat, multitemporal (1975-1990-2000-2014), R2018A. European Commission, Joint Research Centre (JRC).
5. Microsoft (2022) Edificios de Microsoft Bing. Recuperado de: <https://short.upm.es/o87pd>
6. Open Street Map (2022) Recuperado de: <https://www.openstreetmap.org>
7. Comisión Nacional Emergencias (2022). LiDAR Escazú. Agrad. Ing. Guido Matamoros
8. ESA (2022) Copernicus Hub. <https://short.upm.es/mqo2v>
9. NASA (2022) Earthdata. <https://short.upm.es/v59yo>

a Laboratorio de Topografía y Geomática, ETSI CCP. Universidad Politécnica de Madrid, España.

b Laboratorio de Ingeniería Sísmica. Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

c Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Madrid, España.

d Detektia Earth Surface Monitoring SL, Madrid, España

e Departamento de Ing. y Gestión Forestal, ETSI CCP. Universidad Politécnica de Madrid, España.

f ETSI de Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid, España.

* Contacto con autores: javirodrisaiz@gmail.com; miguel.marchamalo@upm.es

Autores: L. Herrera García, L. Cruz Gámez, K. Martínez Mena: *Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL)*. F. Duran Duran, A. Ramirez García, Y. Rodríguez, J. Rodríguez Reyes, F. Javier Mendoza Ulloa: *Servicio Geológico Nacional (SGN)*, República Dominicana. A. Mayén: *Consejo Nacional de Energía (CNE)*, El Salvador. K. Ventura: *Universidad de El Salvador (UES)*. A. Ermertz, S. Kastl: *Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR)*.

Introducción

¿Qué son los lineamientos?

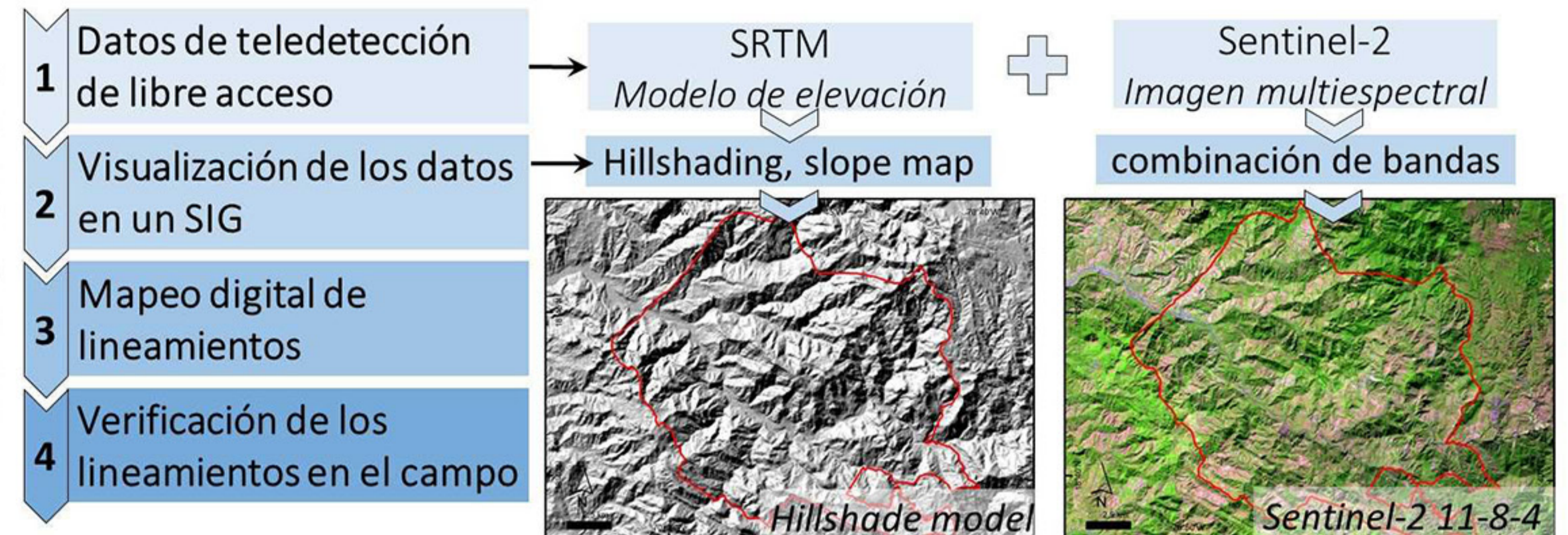
En geología estructural, los lineamientos se entienden como “líneas en el paisaje que revelan la arquitectura escondida de la tierra” (Hobbs, 1912). El desafío de mapear los lineamientos con sensores remotos es la diferenciación de lineamientos que reflejan estructuras geológicas en las rocas del basamento de los elementos lineales que son sólo características de la superficie. Los primeros son significantes para los recursos geotérmicos, como fracturas o fallas pueden servir como conductor para la circulación de fluidos hidrotermales.

¿Por qué son interesantes los lineamientos para la exploración geotérmica?

El análisis de lineamientos es una aplicación valiosa para la fase inicial de exploración de un yacimiento geotérmico y en forma más detallada también en fases posteriores de desarrollos geotérmico. Una alta densidad de lineamientos o intersecciones de lineamientos puede implicar una alta probabilidad de una mayor migración de fluidos en el subsuelo, incluyendo fluidos hidrotermales en áreas de interés geotérmico.

Metodología y Materiales

El análisis de los lineamientos se realizó en áreas con potencial geotérmico comprobado a través de un inventario de manifestaciones geotérmicas. Se utilizaron datos de teledetección disponibles públicamente: Modelos digitales de elevación (DEM; 30 m) de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) y datos multiespectrales de Sentinel-2 y Landsat 8 (resolución espacial: 20-30m). Las estructuras se visualizan con modelos de sombras y mapas de pendientes a partir del DEM y de distintas combinaciones de bandas de los datos ópticos. Para el procesamiento de datos se utilizó el software abierto QGIS. Las lineamientos mapeadas se verifican en el campo, para comprobar las estructuras/fallas geológicas y áreas de significancias para la exploración geotérmica.



Resultados



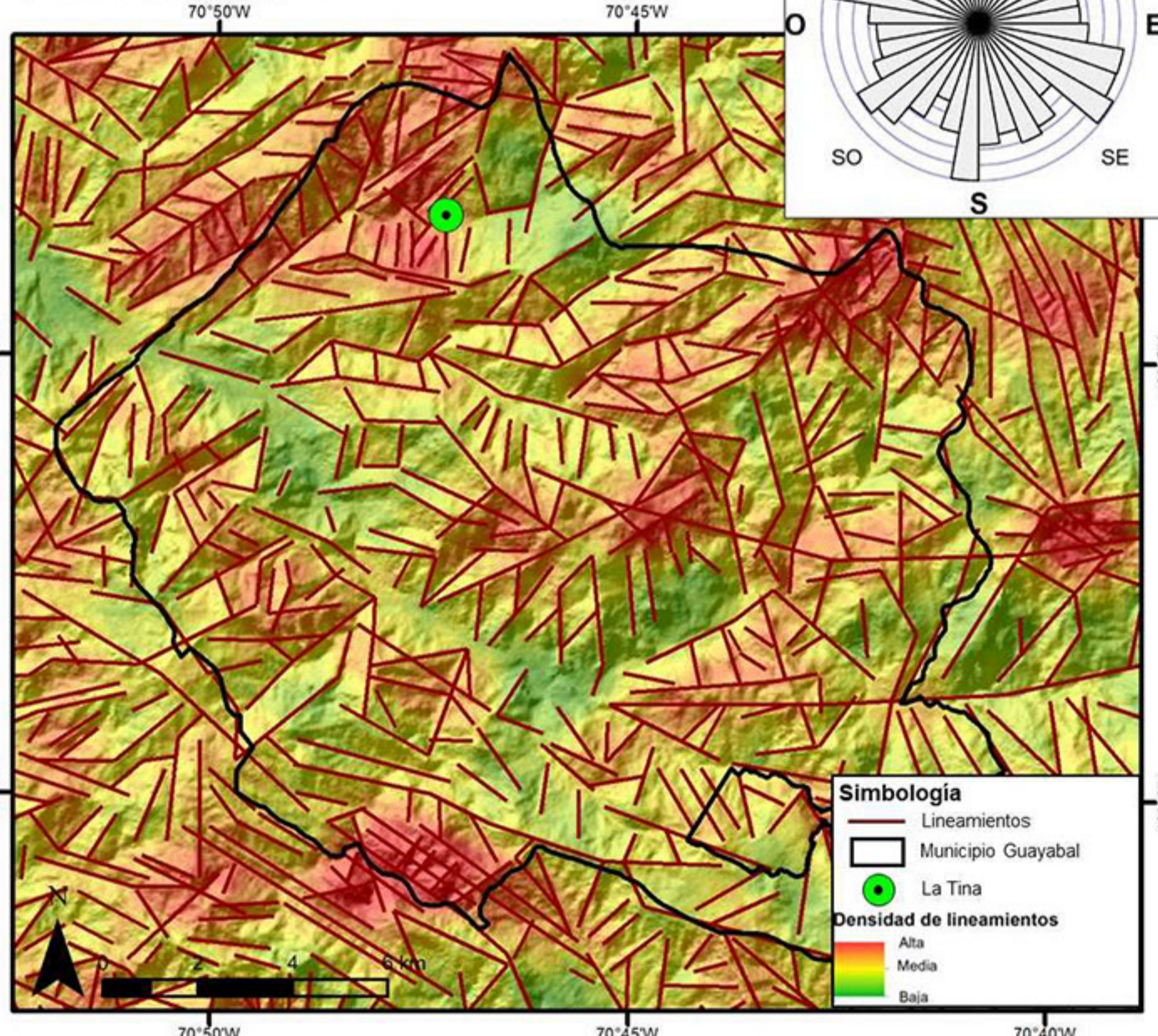
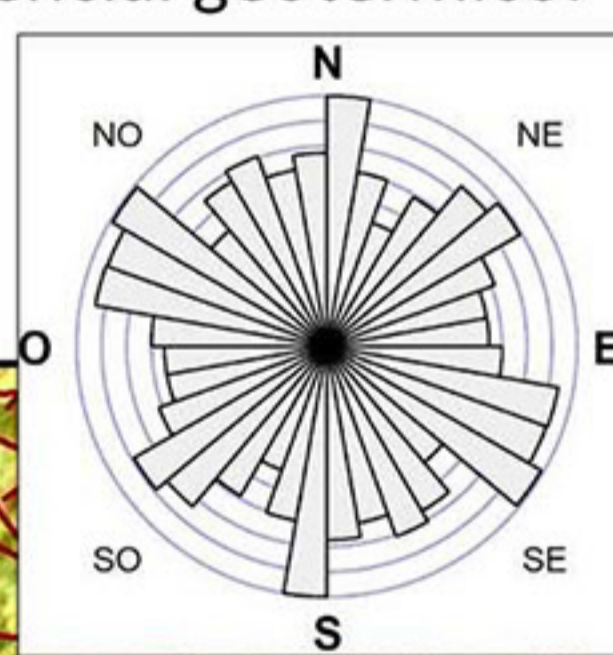
República Dominicana, Guayabal

El área de estudio se encuentra localizada en el municipio Guayabal, en una zona montañosa de la provincia de Azua, al Suroeste de la República Dominicana, enmarcada en un área de interés geotérmico; con una manifestación hidrotermal denominada “LaTina”, con una temperatura superficial 36°C.

Se identificaron tres direcciones de lineamientos en la zona: ONO-ESE, N-S y NE-SO. La dirección de los lineamientos principales ONO-ESE, concordando con el empuje del frente del Cinturón de Peralta, aunque los lineamientos cartografiados muestran una tendencia hacia estructuras de orientación más hacia al Este.

El análisis de la densidad de los lineamientos demuestran que debido a la característica topográfica de la zona, se distingue difícilmente el sitio de La Tina, de otras áreas de alta densidad estructural. Aunque, La Tina se ubica en una de esas áreas de mayor densidad de lineamientos. Cerca del emplazamiento de La Tina, hay una intersección de lineamientos con orientación NE-SO, y N-S, que podría tener impacto en el flujo de fluidos. Otras áreas de alta densidad de lineamientos en las partes Este y Sur del municipio Guayabal, no se han podido relacionar con un potencial geotérmico.

La mayoría de lineamientos se resaltan por el relieve y no por su impacto geológico.

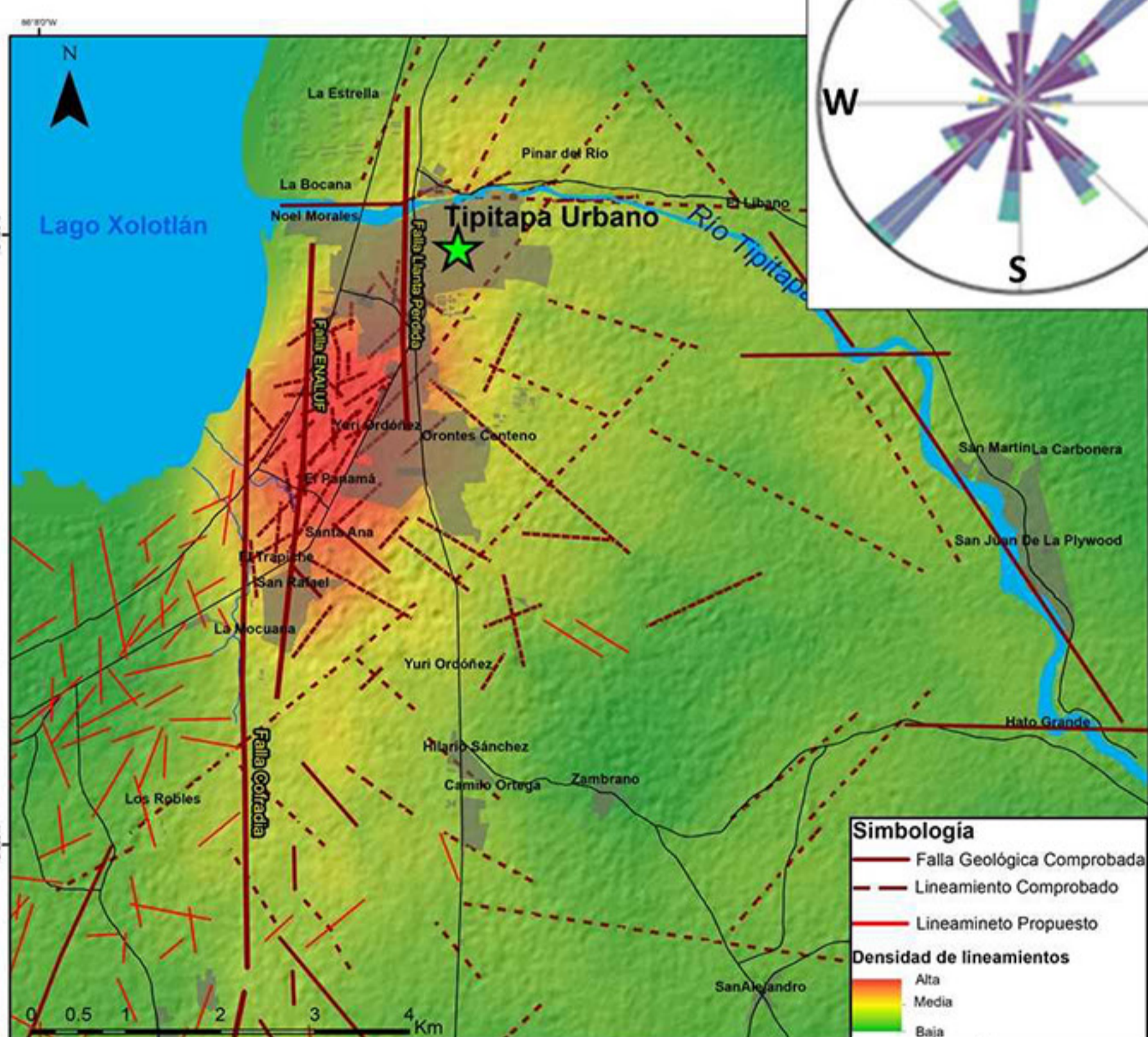
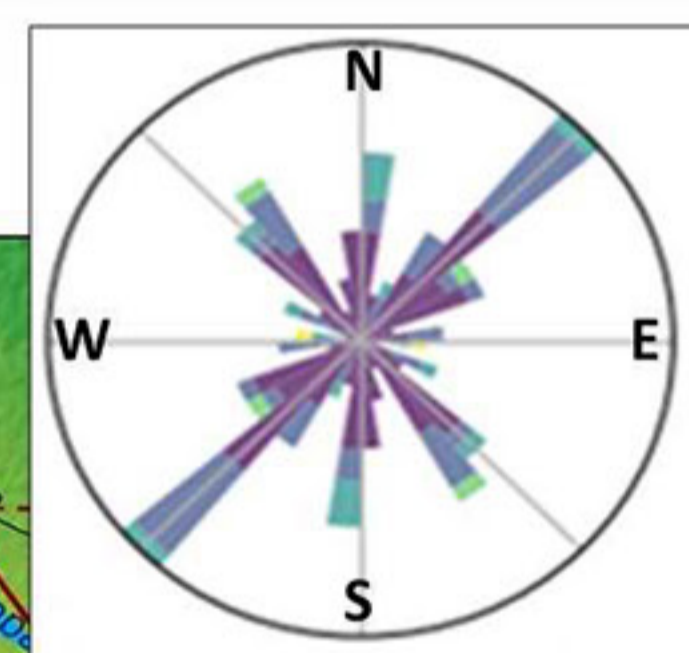


Nicaragua, Tipitapa

En el municipio de Tipitapa, se identificaron estructuras geológicas (fallas y lineamientos) distribuidas densamente en la zona de investigación geotérmica.

En Tipitapa Urbano, el sistema de fallas y lineamientos, presenta un régimen de esfuerzo principal horizontal (σ_1) de orientación preferencial N-S levemente hacia al E, generando cuatro patrones de fracturamiento NE-SW, N-S, NW-SE, E-W; concordando con el modelo esquemático del Graben de Managua (Frischbutter, 2002).

Las manifestaciones hidrotermales en Tipitapa Urbano están asociadas a los sistemas de fallas y lineamientos N-S, el más representativo está formado por el Graben el Aeropuerto y sistema de Falla Cofradía, este sistema podría controlar la circulación de fluidos termales y se le asocia la existencia de manantiales de aguas termales. El sistema NE-SW, presenta una amplia distribución en el área, se caracteriza por desplazar estructuras mayores (sistema de falla Cofradía y Graben El Aeropuerto - El Playón) que podría estar controlando la circulación de los fluidos termales. Anomalías térmicas del orden de 34 – 42°C, fueron identificadas siendo la manifestación más representativa la vertiente termal llamada Termal de Tipitapa (88°C).



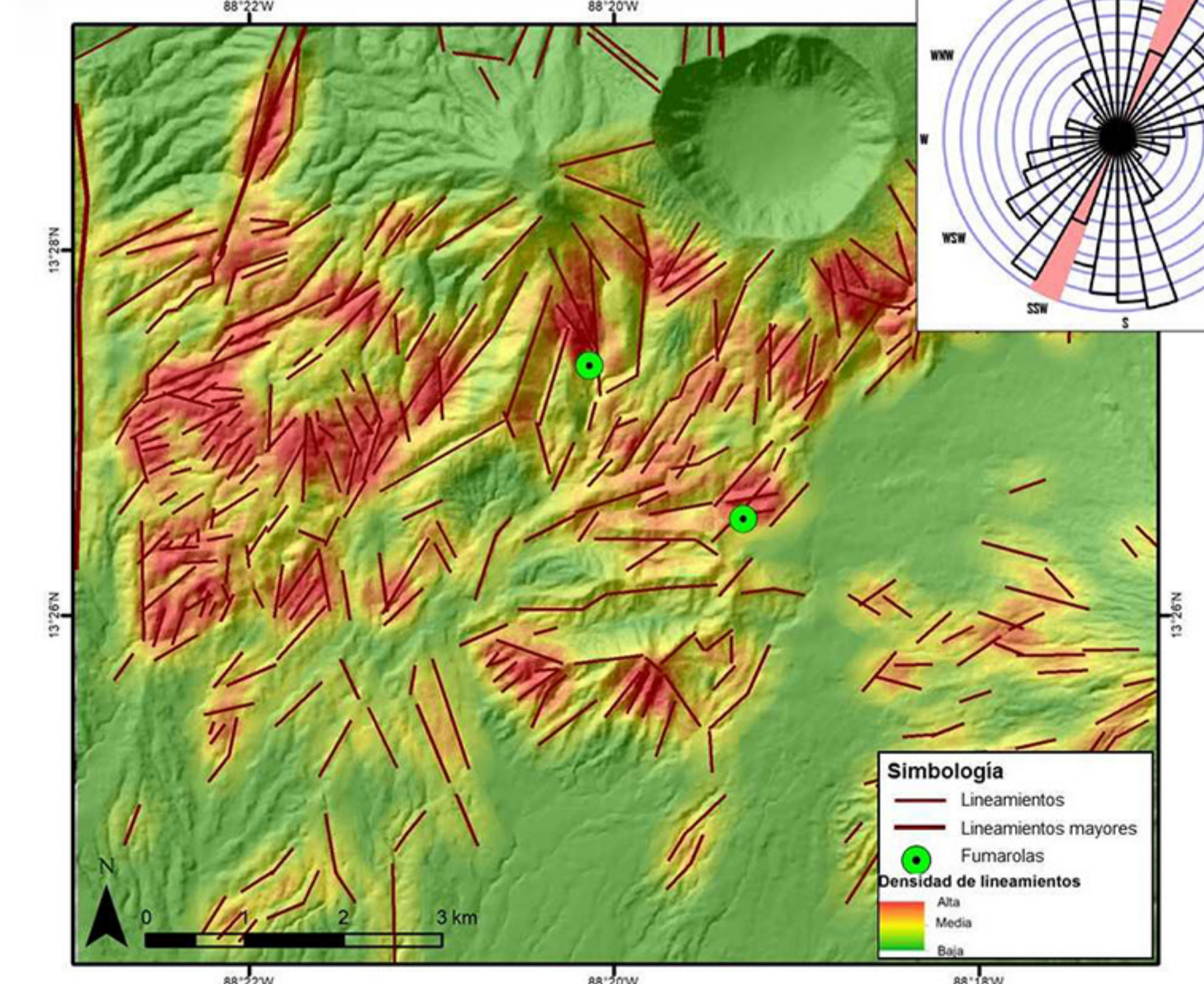
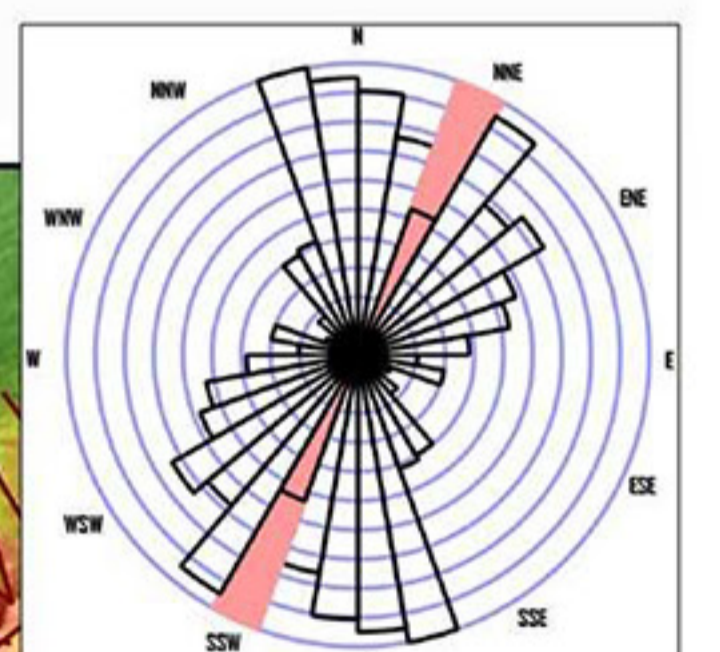
El Salvador, Chinameca

El área de Interés Chambala, Chinameca se ubica al Oeste del Volcán de San Miguel en el Este de San Salvador.

En el estudio de mapeo de lineamientos, se identificaron la mayoría de ellos al Sur del cerro El Pacayal y Volcán El Limbo, con direcciones predominantes de NE-SW y N-S. En su mayoría son lineamientos de cortas longitudes y alta densidad, presumiblemente generados por los esfuerzos tectónicos que predominan en la zona.

Existen dos manifestaciones hidrotermales tipo fumarola con temperaturas de hasta 99°C, en la zona que coinciden con lineamientos/fallas con orientación E-W y N-S. Ambas fumarolas están limitadas al Sur con lineamientos mayores identificados en este estudio, así como en el estudio de Martínez-Díaz et. al (2021). Estos lineamientos pueden considerarse conductos que podrían facilitar el ascenso de fluidos geotérmicos.

La orientación N-S se asocia en principio a la prolongación hacia el Sur de las grandes estructuras distensivas muy evidentes en Honduras, producto del arrastre hacia el Este de la Placa Caribe, mientras que los lineamientos de dirección NE-SO, que son menos dominantes en el área de estudio, podrían responder a los esfuerzos principales NW-SE, que producen estructuras antitéticas, o pueden ser producto de una cuenca pull-apart, efecto de la Zona de Falla de El Salvador.



Análisis y Conclusiones

¿Cuáles son las ventajas de este tipo de mapeo de lineamientos?

El mapeo de lineamientos para investigaciones geotérmicas permite: 1. Caracterizar extensas áreas en forma preliminar en poco tiempo, 2. Identificar direcciones estructurales preferenciales, 3. Identificar patrones de circulación de fluidos a través de una integración de información de la tectónica regional, semi regional y local de las áreas de investigación.

¿Cuáles son las limitaciones?

Varios factores limitan la aplicabilidad de este método. En zonas con un relieve vigoroso se puede cartografiar una densa red de lineamientos, aunque una alta densidad de lineamientos no indica necesariamente un mayor potencial geotérmico. La correlación con datos adicionales es importante para poder obtener una interpretación válida. Esta limitante se observa en el estudio de caso de Guayabal (República Dominicana). En áreas con bajo relieve topográfico, como se presenta para Tipitapa (Nicaragua), la visualización detallada es crucial debido a la baja presencia de afloramientos y escarpes. Aún así, el rol de los lineamientos identificados es más relacionado a estructuras geológicas que en áreas de relieve fuerte. Por ello se podría considerar una mayor relevancia geotérmica del mapeo en este tipo de zonas. La misma implicación se recibe del área volcánica (Chinameca, El Salvador), que se debe considerar más complejo debido al carácter del sistema geotérmico típico de esta zona y el drenaje radial asociado a los conos volcánicos.