

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COSTA RICA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
ESCUELA DE TOPOGRAFÍA, CATASTRO Y GEODESIA

**ESTUDIO DE LA GEOMORFOLOGÍA DE LA ZONA INTERMAREAL DE LA
CIUDAD DE PUNTARENAS, MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE DATOS
LiDAR Y BATIMÉTRICOS, PARA LA UTILIZACIÓN DE LOS RESULTADOS EN
UN MODELO NUMÉRICO DE SIMULACIÓN DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI**

Modalidad: Proyecto de Graduación

Trabajo sometido a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de
Topografía, Catastro y Geodesia como requisito parcial para optar al grado de
Licenciatura en Ingeniería en Topografía y Geodesia

SAÚL ROJAS DELGADO

CAMPUS OMAR DENGO
HEREDIA, COSTA RICA
ABRIL, 2019

Este trabajo fue _____ por el Tribunal Examinador de la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia de la Universidad Nacional, como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Topografía y Geodesia.

Dr. Jorge Moya Zamora
Presidente del Tribunal Examinador

Lic. Franklin Arroyo Solano
Director de la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia

MSc. Karen Ruiz Flores
Tutor

Lic. Rody Rodríguez Madrigal
Asesor

Dr. rer. nat. Silvia Chacón Barrantes
Asesor

Saúl Rojas Delgado
Graduando

Dedicatoria

A mis papás M. Isabel y V. Manuel por su esfuerzo y amor a lo largo de todos estos años para permitirme alcanzar esta meta tan satisfactoria.

A Dani por apoyarme incondicionalmente desde siempre.

Agradecimiento

A mi tutora Karen, que con su ayuda y apoyo me permitieron culminar este largo camino.

A mis lectores; don Rody, por toda su colaboración, amabilidad y por transmitirme su conocimiento. A Silvia por la oportunidad brindada, por su tiempo, guía y ayuda con toda su experiencia.

También le agradezco a Dra. Isabel Arozarena Llopis ya que a través de ella pude conocer el proyecto.

Y a todas las personas que me escucharon, dieron ánimo y rezaron por mí.

Índice de Contenidos

	Página
Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo General	5
1.3.2. Objetivos Específicos.....	5
Capítulo 2: Marco Teórico.....	6
2.1. Formaciones Costeras.....	6
2.2. Técnicas de medición y representación de la Tierra	8
2.2.1. LiDAR	10
2.2.2. Batimetría	13
2.3. Modelos digitales de elevaciones.....	14
2.4. Métodos de interpolación de un MDE	15
2.5. Tsunami.....	18
2.6. Modelos numéricos de tsunamis	20
Capítulo 3: Metodología, materiales y equipos	22
3.1. Materiales y equipos	22
3.2. Administración de las técnicas de medición y representación de la Tierra usadas	22
3.2.1. LiDAR.....	22
3.2.2. Batimetría.....	24
3.3. Evaluación de la calidad de los datos disponibles.....	25
3.4. Elaboración del MDE.....	26
3.5. Conversión de información del MDE a malla de valores.....	28
3.6. Conversión de información del MDE a entidades vectoriales de líneas	29
3.7. Adaptación de los datos topográficos para la simulación numérica de tsunamis.....	29
3.8. Generación de un modelo numérico de simulación de tsunami	30
3.9. Simulación de los tipos de tsunamis mediante modelado numérico	33
Capítulo 4: Resultados.....	35
4.1. Insumos de partida	35
4.1.1. Selección del dato LiDAR óptimo.....	35
4.1.2. Selección del dato batimétrico óptimo	40
4.2. Investigación de exactitudes de datos batimétricos.....	43
4.3. Investigación de exactitudes de datos LiDAR.....	45
4.4. Comprobaciones teóricas realizadas a valores de la elevación	46
4.5. Manipulación de datos DTM para establecer el MDE	50
4.6. Manipulación de datos SONDAS.DAT para establecer MDE.....	56
4.7. Fusión de fuentes de información acuática y terrestre	59
4.8. Generación de la malla de valores.....	61
4.9. Revisión de los datos topográficos usados y combinados.....	64
4.10. Mejoramiento y afinamiento de los datos topográficos mediante elementos vectoriales.....	65
4.11. Aplicación del modelo numérico de simulación de tsunami	67
4.12. Algunas muestras de la emisión de los mapas de evacuación producidos a partir de la validación efectuada.....	74

Capítulo 5: Análisis de Resultados	75
Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones.....	83
6.1. Conclusiones	83
6.2. Recomendaciones.....	85
Referencias Bibliográficas	86

Índice de Figuras

	Página
Figura 1.1 Zonas de subducción de Costa Rica	3
Figura 2.1 Algunos tipos de formaciones costeras.....	7
Figura 2.2 Concepto de técnica LiDAR instalada en un avión	10
Figura 2.3 Triangulación de Delaunay.....	17
Figura 2.4 Etapas de desarrollo de un tsunami.....	19
Figura 2.5 Principal fuente generadora de tsunamis	20
Figura 2.6 Ejemplo de mapa de evacuación por tsunamis en Potrero, Guanacaste	21
Figura 3.1 Diagrama de flujo de elaboración del MDE	28
Figura 3.2 Transformación de los datos topográficos para la simulación numérica de tsunamis	30
Figura 3.3 Ejemplos de planos de falla sísmica para la simulación numérica	31
Figura 3.4 Condición inicial de la simulación de ComMIT.....	32
Figura 3.5 Animación de los resultados de la simulación de ComMIT	33
Figura 3.6 Esquema de inundación de un tsunami en la costa.....	34
Figura 4.1 Extensión de archivos DTM del Proyecto SIA 0569-13	39
Figura 4.2 Extensión de archivos SONDAS.DAT	43
Figura 4.3 Carta náutica Puntarenas a escala 1:12.500	44
Figura 4.4 Medias de pleamar y bajamar de la carta náutica Puntarenas a escala 1:12.500	45
Figura 4.5 Línea de nivelación Puntarenas-Barranca.....	46
Figura 4.6 Método para ubicar los BM en el sistema de coordenadas de LiDAR	47
Figura 4.7 Método para extraer valores del archivo DTM y compararlos con BM	49
Figura 4.8 Estilos de visualización para los archivos DTM en Civil3D	50
Figura 4.9 Visualización por rango de elevación para los archivos DTM en Civil3D	51
Figura 4.10 Comparativa entre ortofoto y la visualización por rangos de elevación de los archivos DTM producidos en Civil3D	52
Figura 4.11 Herramientas de Civil3D para la generación de la interpolación TIN.....	52
Figura 4.12 Definición de parámetros para generar la interpolación TIN en archivos DTM	53
Figura 4.13 Interpolación TIN generada a partir de cada archivo DTM.....	53
Figura 4.14 Edición de la interpolación TIN generada por Civil3D	54
Figura 4.15 Almacenamiento de archivos que conforman la interpolación TIN de los datos DTM	55
Figura 4.16 Visualización de archivos XML que contienen la interpolación TIN elaborada.....	55
Figura 4.17 Visualización del archivo final con la interpolación TIN de la parte terrestre	56
Figura 4.18 Delimitación de la línea frontera de la batimetría.....	57
Figura 4.19 Delimitación de flecha litoral con la línea frontera a partir de datos LiDAR.....	58
Figura 4.20 Ampliación de un sector de la interpolación de los datos batimétricos	59
Figura 4.21 Herramientas del software para la fusión de datos TIN.....	59
Figura 4.22 Herramientas del software para unir dos o más archivos de superficie	60
Figura 4.23 TIN del MDE definitivo	61
Figura 4.24 Herramientas del software que permiten generar una cuadrícula de puntos.....	61
Figura 4.25 Muestra de malla de puntos generada con Civil3D	62
Figura 4.26 Visualización de la malla de puntos que conforman una matriz de profundidades.....	63
Figura 4.27 Visualización de puntos que conforman la matriz de profundidades	63
Figura 4.28 Planilla de transformación de coordenadas utilizada para convertir la matriz de profundidades	64
Figura 4.29 Puntos transformados que conforman la matriz de profundidades	64
Figura 4.30 Ploteo de elevaciones en MatLab para validación de la información.....	65
Figura 4.31 Isolíneas e isóbatas extraídas del MDE	66
Figura 4.32 Detalle de isolíneas e isóbatas en la zona intermareal de la ciudad Puntarenas	67

Figura 4.33 Composición de las mallas de batimetría de ComMIT	68
Figura 4.34 Condición inicial de la simulación de ComMIT para caso local y regional.....	68
Figura 4.35 Ejemplo de registro de mareógrafo de Puntarenas para el año 1960.....	70
Figura 4.36 Resultado de simulación de tsunami con fuente generadora en Nicoya	70
Figura 4.37 Resultado de simulación de tsunami con fuente generadora en Nicoya-Cóbano	71
Figura 4.38 Resultado de simulación de tsunami con fuentes generadoras lejanas	71
Figura 4.39 Resultado de simulación de tsunami con fuentes generadoras cercanas	72
Figura 4.40 Resultado de la propagación de la suma de tsunamis simulados.....	73
Figura 4.41 Resultado de alturas de tsunamis simulados.....	74

Índice de Cuadros

	Página
Cuadro 2.1 Algunos tipos de formaciones costeras	6
Cuadro 2.2 Clasificación de los tsunamis	20
Cuadro 3.1 Insumos LiDAR para desarrollar el Proyecto de Graduación	23
Cuadro 3.2 Insumos Batimétricos para desarrollar el Proyecto de Graduación.....	24
Cuadro 3.3 Clasificación de tsunamis simulados mediante el modelo numérico	34
Cuadro 4.1 Comparación entre las fuentes de información LiDAR disponibles	35
Cuadro 4.2 Referencia espacial de datos LiDAR.....	38
Cuadro 4.3 Archivos DTM utilizados para crear el MDE	40
Cuadro 4.4 Comparación entre las fuentes de información batimétrica disponibles	40
Cuadro 4.5 Referencia espacial de datos batimétricos.....	42
Cuadro 4.6 Niveles de referencia para la batimetría	44
Cuadro 4.7 Control de calidad de datos LiDAR	45
Cuadro 4.8 Comparación entre valores de elevaciones LiDAR y nivelación directa	48
Cuadro 4.9 Tamaño de archivos de la interpolación TIN antes y después de fusionarse	60
Cuadro 4.10 Valores a utilizar en el software de trabajo para generar una malla de puntos.....	62
Cuadro 4.11 Composición de las mallas de batimetría de ComMIT	67
Cuadro 4.12 Resultados de la simulación numérica de ComMIT.....	69

Índice de Gráficos

	Página
Gráfico 2.1 Variantes y subvariantes de la técnica LiDAR	12
Gráfico 4.1 Comparación de ventajas entre fuentes LiDAR según Cuadro 4.1	37
Gráfico 4.2 Comparación de desventajas entre fuentes LiDAR según Cuadro 4.1	38
Gráfico 4.3 Comparación de ventajas y desventajas entre fuentes batimétricas según Cuadro 4.4..	42
Gráfico 4.4 Comparación entre diferencias de valores de elevaciones LiDAR y elevaciones de nivelación directa publicada por el IGN	49
Gráfico 4.5 Comparación de EMC obtenidos de valores de elevaciones LiDAR y elevaciones de nivelación directa	50

Índice de Anexos

	Página
Anexo 1. Fichas de Bancos de Nivel de la línea de Nivelación Puntarenas-Barranca, localizados en el área de estudio del Proyecto.....	90
Anexo 2. Imágenes fotogramétricas históricas de la flecha litoral de Puntarenas, proyectos CAW y TERRA.....	94
Anexo 3. Documentación oficial de la licitación 2012CD-000164-00200 Captura de datos en la franja costera entre Puntarenas y el Parque Marino Ballena y Desembocadura del Río Pirris-Parrita	99
Anexo 4. Documentación oficial donde se describe el Proyecto General al que se encuentra vinculado el presente Proyecto de Graduación	103
Anexo 5. Datos estadísticos extraídos del MDE obtenido de la fusión de los datos batimétricos y LiDAR.....	111

Lista de acrónimos y siglas

ASC o ASCII:	American Standard Code for Information Interchange Código Estándar Americano Intercambio Información
BM:	Bench Mark Banco de Nivel
CNE:	Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias
CNPDG:	Centro Nacional de Procesamiento de Datos GNSS
COI:	Intergovernmental Oceanographic Commission Comisión Oceanográfica Intergubernamental
ComMIT:	Community Model Interface for Tsunami Interfaz para la Elaboración en Comunidad de Modelos de Tsunamis
DSM:	Digital Surface Model Modelo Digital de Superficie
DTM:	Digital Terrain Model Modelo Digital del Terreno
DWG:	DraWinG Dibujo
ECW:	Enhanced Compression Wavelet Compresión Mejorada de Ondícula
EMC:	Error medio cuadrático
ETCG:	Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia
Gb:	Gigabyte
GNSS:	Global Navigation Satellite System Sistema Global de Navegación por Satélite
GPS:	Global Positioning System Sistema de Posicionamiento Global
IAGS:	Inter American Geodetic Service Servicio Geodésico Interamericano
IDW:	Inverse Distance Weighting Distancia Inversa Ponderada

IGN:	Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica
INCOP:	Instituto Costarricense de Puertos del Pacífico
INEGI:	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INS:	Inercial Navigation System Sistema Inercial de Navegación
Kb:	Kilobyte
LAS:	LASer Láser
LIDAR:	Laser Imaging Detection and Ranging Detección y rango de imágenes láser
MDE:	Modelo Digital de Elevaciones
MDT:	Modelo Digital del Terreno
Mb:	Megabyte
MOST:	Method Of Splitting Tsunamis Método de División de Tsunamis
Mw:	Moment Magnitude Scale Magnitud de Momento Sísmico
NOAA:	National Oceanic and Atmospheric Administration Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
PREVENTEC:	Programa de Información Científica y Tecnológica Satelital al Servicio de Prevención y Mitigación de los Desastres
RONMAC:	Red de Observación del Nivel Medio del Mar de Costa Rica
RSN:	Red Sismológica Nacional
SSD:	Solid-State Drive Unidad de Estado Sólido
SIA:	Sistema de Información Académica
SIG:	Sistema de Información Geográfica
SNIT:	Sistema Nacional de Información Territorial
TIN:	Triangulated Irregular Network Red de Triángulos Irregulares

UCR:	Universidad de Costa Rica
UNA:	Universidad Nacional
UNESCO:	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USAID:	United States Agency for International Development Organismo de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
XML:	Extensible Markup Language Lenguaje de Marcado Extensible

Resumen

El fin de este proyecto de graduación consistió en preparar datos topográficos que describieran la geomorfología de la zona intermareal de la ciudad de Puntarenas, para efectuar simulaciones numéricas de tsunamis, usando el modelo Method Of Splitting Tsunamis (MOST). Este es un modelo numérico no lineal de propagación e inundación de tsunamis, desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA), la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y el Organismo de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).

El objetivo de las simulaciones fue determinar qué tan propensa es a inundarse la flecha litoral donde se asienta la población puntarenense ante tsunamis de tipo distantes, regionales y locales. Los datos topográficos disponibles para este estudio correspondieron a una fuente batimétrica que detallaba el Golfo de Nicoya y una fuente LiDAR que describía la parte terrestre de la flecha litoral.

Las exactitudes de los insumos fueron indagadas y la calidad de los insumos topográficos de entrada fue evaluada mediante una propagación de errores, obteniendo errores medio cuadráticos asumidos como teóricos entre el rango de 0,03 m a 0,26 m.

Los datos se combinaron conjuntamente a través de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) utilizando una interpolación de tipo TIN (*Triangulated Irregular Network*) bajo los estándares de la Triangulación o Condición de Delaunay (elaborada por Borís Nikoláievich Delaunay, en 1934) aplicada a MDE. La creación del MDE contempló trabajar sobre un área de 343 138 hectáreas, 1 902 220 nodos, 6 652 323 triangulados adosados, con una topografía entre plana y ondulada.

Para aplicar el modelo de tsunamis de MOST hubo que descomponer el MDE extrayendo elementos de líneas con valores de elevaciones a cada metro, convertirlos desde la proyección plana CRTM05 a coordenadas geodésicas de latitud, longitud, e introducirlos en el software Community Model Interface for Tsunami (ComMIT) junto a datos de la fuente sísmica que se deseaba estudiar.

Con los resultados obtenidos en este proyecto de graduación, el Proyecto SIA 0569-13 (proyecto del que está ligado el presente trabajo) fue capaz de evaluar el posible impacto en la ciudad de Puntarenas y de presentar e instruir a la población mediante talleres un plan basado en mapas de evacuación por tsunamis derivados de la investigación y simulación de alrededor de 45 tsunamis con origen en diferentes ubicaciones en el Océano Pacífico.

Capítulo 1: Introducción

1.1. Planteamiento del problema

El Instituto Costarricense de Puertos del Pacífico (INCOP, 2014) explica que la ciudad de Puntarenas es una región geográfica perteneciente al Litoral Pacífico costarricense, localizada en la provincia del mismo nombre y ubicada en una formación costera denominada flecha, de 10 km de largo y de unos 400 m de ancho aproximadamente, rodeada por un estero a un lado y el Golfo de Nicoya al otro. La flecha también denominada como lengüeta o lengua se ha formado poco a poco por la acción de los ríos, vientos alisios y corrientes de deriva litoral que traían arena y lodo depositándolo en dicho sector.

La historia de la zona data del año 1722 cuando la lengua comenzó a llamarse Puerto de Arenas. La ciudad de Puntarenas se caracteriza por ser una zona densamente poblada, con una importancia cultural histórica para el país, en la que sus habitantes desarrollan actividades económicas como la pesca, los servicios, el comercio y el turismo (INCOP, 2014).

El punto de acceso terrestre a Puntarenas es único y se da por el estero, mediante carretera y vía férrea. Entre El Roble y el centro de Puntarenas existen poblaciones densamente habitadas, como Chacarita, Carrizal y El Cocal.

La ciudad de Puntarenas es uno de los sectores costeros prioritarios de evaluar ante la amenaza de un tsunami debido al gran número de habitantes que en ella se encuentra, la desordenada planificación urbana que experimenta, aunado a las características geomorfológicas naturales que presenta. La probabilidad de la afectación y su imprevisibilidad, obligan a la realización de estudios de diversa índole que permitirán evaluar acciones y poner en práctica mecanismos que contribuyan a minimizar pérdidas materiales y salvaguardar la vida.

Cualquier región costera está expuesta a una inundación por tsunami; la geomorfología de la costa y la inclinación del terreno en la zona intermareal son parte de los factores que pueden influir en que el impacto sea mayor o menor, situación que encausó la realización de un estudio de la ciudad de Puntarenas.

Ante este escenario la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), en su momento aceptó que no existía un protocolo a seguir ni para Puntarenas u otra costa del país, puesto que las estimaciones en el campo son insuficientes como para evaluar los riesgos y emitir alertas. Por ende en los últimos años se ha empezado a trabajar en mejorar la preparación de las regiones costeras ante el inminente riesgo y llenar el vacío que existía (Torres, 2014).

1.2. Justificación

Considerando el crecimiento demográfico en las costas del país y la necesidad de crear comunidades resilientes y sistemas integrados de alerta temprana para tsunamis y otros peligros relacionados con los océanos en América Central se activó el interés de efectuar estudios científicos de inundaciones producto de tsunamis, y por ende realizar estudios topográficos, los cuales son el insumo para alcanzar el entendimiento e interpretación de la dinámica de estos fenómenos extraordinarios (COI, 2018).

Las estimaciones empíricas y científicas de tsunamis (de carácter escaso y propósitos distintos a la elaboración de mapas de evacuación) que se tienen sobre Costa Rica indican que el área de mayor potencial es la costa Pacífica principalmente la zona de la Península de Nicoya (aunque estudios recientes señalan un potencial similar en el Caribe sur). La Red Sismológica Nacional (RSN, 2014) señala que sismos de magnitud igual o mayor a 7,0 grados de magnitud de momento sísmico (M_w , por sus siglas en inglés) con epicentros cercanos a la costa, pueden generar tsunamis que impacten áreas de riesgo.

La costa Caribe posee menor incidencia de tsunamis que la costa del Pacífico, ya que la Fosa Mesoamericana está ubicada en el Océano Pacífico Centroamericano y es el límite tectónico de la región que presenta mayor actividad sísmica. En Costa Rica la mayor actividad tectónica se deriva de la geodinámica de esta zona de subducción y la amplitud del rango de magnitudes en los sismos que acontecen es amplia. En otras regiones del globo se han aprendido lecciones: un sismo relativamente pequeño puede generar un gran tsunami, la ausencia de grandes tsunamis históricos no necesariamente significa que estos no ocurrirán alguna vez en el futuro. Esta posibilidad representa una amenaza potencial para las costas del país (RSN, 2013).

La Fosa Mesoamericana afecta directamente a Costa Rica mediante 5 segmentos de zonas de subducción: Nicaragua-Papagayo, Nicoya, Cóbano-Herradura, Quepos-Sierpe y Osa-Burica. El área de ruptura sísmica más grande de Costa Rica se encuentra en la Península de Nicoya con una longitud de alrededor 100 km, esta zona de subducción es capaz de producir terremotos de 7,8 M_w . Dicho segmento presenta periodos de recurrencia de 50 años aproximadamente donde ocurren terremotos de gran magnitud (Chacón & Protti, 2011). En el 2011 el trabajo de Chacón y Protti simuló tsunamis con la fuente de los segmentos Nicoya y Cóbano-Herradura (ver Figura 1.1).

El escenario de un tsunami hipotético en el segmento de Nicoya, empleando el modelo de dislocación co-sísmica de Mansinha y Smylie de 1971, usando datos del relieve con baja resolución espacial y un terremoto de magnitud esperable, mostró una máxima elevación de 1,2 m frente a la costa oeste de la Península de Nicoya y hasta 0,70 m como valor máximo en la ciudad de Puntarenas. Existieron valores de hundimiento de 0,50 m en Angostura y Chacarita, con los mayores valores en la zona del muelle. El modelo predijo la penetración del tsunami a lo largo de toda la primera línea de playa de Puntarenas (Chacón & Protti, 2011).

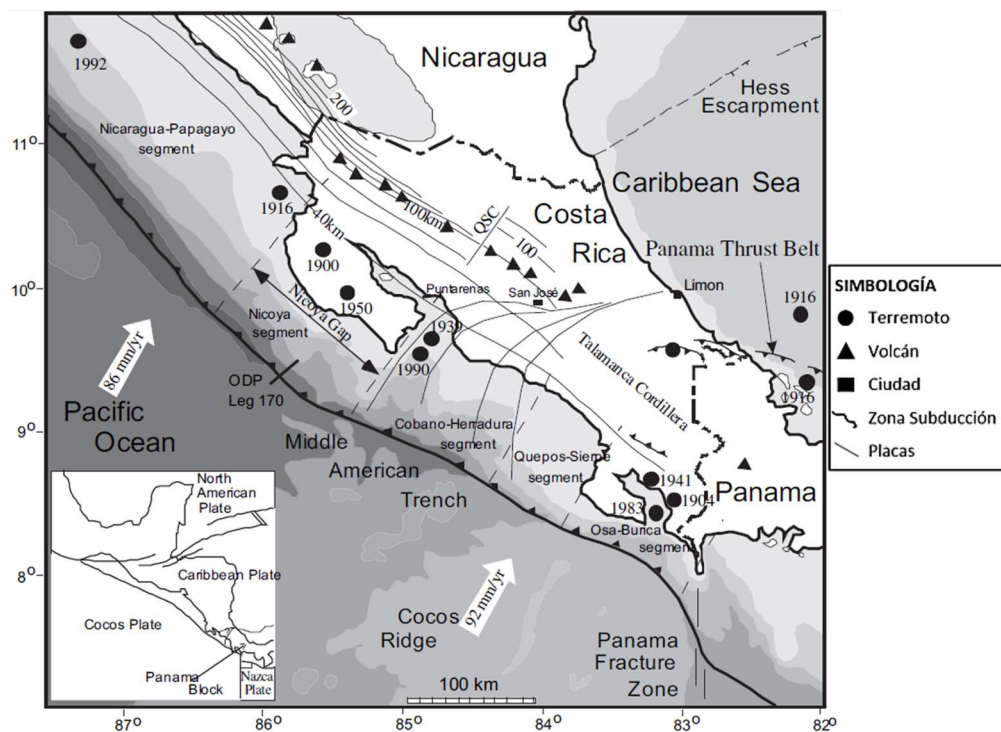


Figura 1.1 Zonas de subducción de Costa Rica

Fuente: Chacón & Protti, (2011).

Como parte del escenario existente la CNE firmó un convenio con la Universidad Nacional (UNA) para elaborar mapas de evacuación por tsunamis para 35 comunidades. El proyecto inició con un diagnóstico de peligrosidad para definir las localidades a mapear, adicionalmente la CNE solicitó incluir la ciudad de Puntarenas en la lista de localidades. El convenio fue denominado: Uso de una plataforma de Sistema de Información Geográfica (SIG) para la elaboración de mapas de evacuación por tsunamis. Etapa 1: desde Bahía Santa Elena hasta Ventanas de Osa, Litoral Pacífico Costarricense, inscrito como proyecto en el Sistema de Información Académica (SIA) de la UNA con el código: 0569-13. El convenio estableció una guía de pasos para crear mapas de evacuación por tsunami que sirvan de base a la CNE para establecer un plan de mitigación de riesgos vinculados a tsunamis, a partir de simular tsunamis considerando los peores escenarios ocurridos en el pasado y los peores escenarios con posibilidad de ocurrir en el futuro.

Los datos de índole batimétrica con que se contó para efectuar el estudio estaban limitados a las cartas náuticas publicadas por el Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica (IGN) de las que se digitalizó la información. En cuanto a la parte terrestre la información topográfica de la ciudad de Puntarenas se obtuvo mediante tecnología LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging, por sus siglas en inglés) realizado por la CNE en el año 2012. Se trabajó de esa forma debido a que fueron los datos más representativos que lograron recolectarse.

Desde inicio de los años 40's el IGN empezó a plasmar el objetivo de establecer una red altimétrica para satisfacer las necesidades del país en proyectos de interés nacional. La ciudad

de Puntarenas contó con un mareógrafo que registró observaciones del nivel del mar durante al menos un periodo completo lunar: 19 años, por lo que se decidió emplear como datum vertical de la red altimétrica nacional de Costa Rica. Hoy en día, dicha red se encuentra sin mantenimiento físico y con información desactualizada. El mareógrafo original desapareció, el cero altimétrico se trasladó con bancos de nivel (BM, por sus siglas en inglés) a través de líneas de nivelación, de las cuales aún prevalecen remanentes en todo el país, posiblemente afectadas en la correspondiente lectura del terreno para periodos actuales (IGN, 2013).

El control geodésico vertical de Costa Rica se apoyó en la información obtenida de mareógrafos con observaciones de un determinado lapso en el pasado y redes de nivelación antiguas y con poco mantenimiento, sin vinculación o corrección por mediciones gravimétricas, que al menos, tras efectuar una campaña de medición vertical, permitieran determinar valores aproximados en cuanto a variaciones que se han dado desde entonces. Sin embargo, la conexión a una época inicial significa, entre otras cosas, que no se consideren efectos tales como movimientos geodinámicos en el área del mareógrafo y cambios del nivel medio del mar con el tiempo (Wildermann, 2001).

La definición del datum vertical se ve afectado por los siguientes inconvenientes: la no coincidencia entre el nivel medio del mar registrado en cualquier mareógrafo con la superficie de nivel del campo gravitatorio terrestre; datum verticales materializados por mareógrafos diferentes tienen niveles diferentes y por lo tanto, las alturas asociadas a ellos no son compatibles entre sí y sus diferencias se propagan en las redes de nivelación generando deformaciones considerables en las cotas niveladas en los límites (Drewes, Sánchez, Blitzkow & Freitas, 1998).

Contar con medios para la observación y la gestión de datos mediante servicios que combinan experiencia y tecnología para reforzar las capacidades de investigación y obtener una base científica, son los esfuerzos más determinantes para vigilar el océano (COI, 2013). Gestionar datos de una red de monitoreo oceanográfica compuesta por ejemplo de mareógrafos, boyas y BM con información representativa desde la década de los años 40's a la actualidad, facilitaría generar pronósticos de oleaje extremo, mareas extraordinarias, corrientes de retorno, variaciones de nivel del mar, detectar tsunamis, entre otros. Sin embargo, esta situación no ocurre en Costa Rica y se explica como resultado común y recurrente en estaciones mareográficas, debido a la falta de seguridad, deterioro de instrumentos, dificultad de adquisición y reemplazo de equipos, entre otros (Virla, Wildermann, Hoyer, Hernández, Álvarez & Medina, 2014).

Mientras el país busca cómo mejorar la instrumentación o adaptar la información se puede empezar a trabajar en otros componentes complementarios que muestren hacia dónde dirigirse en caso de una alerta. Hay diversas formas de reducir el riesgo de tsunamis, una de ellas consiste en estimar la vulnerabilidad de los asentamientos costeros, definiendo áreas potenciales de inundación mediante el estudio de: comportamientos de tsunamis históricos, modelos teóricos – históricos y simulación numérica.

La confiabilidad de la información oficial existente es insuficiente e inadecuada para aportar insumos al estudio de una inundación por tsunami; en especial al modelo numérico que ayuda a elaborar planes de evacuación. Por lo tanto se planteó mejorar relativamente el escenario extrayendo datos del relieve terrestre mediante la combinación de técnicas topográficas de medición más recientes con información batimétrica oficial.

Considerando lo indicado anteriormente, se formuló el presente proyecto de graduación que tuvo como propuesta principal la definición de una estrategia que proporcionara información base que permitiera estudiar la zona intermareal de la ciudad de Puntarenas, que fue utilizada en el modelo numérico desarrollado bajo el Proyecto SIA 0569-13 para determinar la propensión a inundarse ante tsunamis, todo a través de una combinación de datos generados mediante distintas metodologías de estudio de la superficie terrestre.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Estudiar la geomorfología de la zona intermareal de la ciudad de Puntarenas, a partir de la combinación de datos LiDAR y batimétricos, para el uso de los resultados en un modelo numérico de simulación de inundación por tsunami; que permita la generación de información preventiva.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Recopilar datos LiDAR y batimétricos de la flecha litoral, mediante la recepción de datos digitales del Proyecto 0569-13 y de futuras campañas de medición, para una modelización topográfica basada en la densidad de información existente.
- Crear un Modelo Digital de Elevaciones, a partir de la fusión de los datos LiDAR y batimétricos, contribuyendo en el estudio de la zona intermareal requerida para la estimación de las zonas más propensas a una inundación por tsunami.
- Analizar distintos escenarios de inundación por tsunami, a partir de los resultados generados en el Proyecto 0569-13 donde se involucró como datos de entrada el Modelo Digital de Elevaciones y parámetros de magnitud de momento sísmico causados por diferentes escenarios sísmicos, como fuente de comprensión de los fenómenos desde la fase de generación, propagación e inundación.
- Generar un proceso de retroalimentación con el Proyecto 0569-13 por medio de los resultados que se obtengan en la simulación numérica de tsunamis, mediante la revisión o mejoramiento y afinamiento de los datos topográficos usados y combinados, para que la emisión de los mapas de evacuación del Proyecto 0569-13 e información útil para la toma de medidas preventivas a futuro de la CNE se encuentren validadas.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1. Formaciones Costeras

Según Schneider (1900) “la costa es la porción de tierra que bordea la orilla del mar u otro cuerpo de agua, que ha sido moldeada por la acción del oleaje a lo largo del tiempo. Algunas son abruptas y apenas distinguibles de las pendientes superiores, otras son anchas y suavemente inclinadas”.

Las costas asumen distintas figuras de acuerdo al autor ya mencionado, por ejemplo “todas las bahías redondeadas son tranquilas y tienen la figura de una gran ola que al quebrarse forma en la costa una larga curva elíptica”. A medida que las costas adquieren esta “forma curva van sufriendo menos el embate de las olas, y por el contrario cuando más agudas y salientes son sus puntas más enfurecen en ellas las olas” (p. 91).

Schneider (1900) considera que el mar tiene una doble función: destruir y edificar, por esto mientras desploma y arruina en unas regiones, construye y levanta en otras. Por ende, las costas pueden clasificarse en dos grandes grupos, ya sean formados producto de la sedimentación y las que están expuestas a la erosión (ver Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1 Algunos tipos de formaciones costeras

Costas Erosivas	Costas Sedimentarias
Acantilado	Flecha
Ladera Costera	Tómbolo
Plataforma	Barrera
Cuevas	Delta
Arcos	Estuario
Stack	Cúspide Arenosa

Fuente: Recopilación de datos de “Costas y Montañas”. Schneider, (1900).

El tamaño del sedimento define de la fuerza del oleaje, en una costa sedimentaria de alta energía, por lo general el sedimento es grueso. Mientras que en energía baja o media baja, los sedimentos son finos y medios (Nielsen & Quesada, 2006)

En costas erosivas el oleaje socava las bases de las formaciones, lo que provoca posteriormente el derrumbe de las partes superiores, en un proceso continuo que hace retroceder la pared rocosa, pero sin afectar a la zona por debajo del nivel de la marea baja. Normalmente la roca sumergida reduce la fuerza del oleaje, por lo que la erosión disminuye y el proceso de retroceso se detiene a los pocos metros. Sin embargo, en zonas donde la diferencia intermareal es grande, el oleaje es intenso y el tipo y disposición de las rocas es propicio, el proceso de retroceso continúa hasta decenas o centenares de metros (Nielsen & Quesada, 2006).

En la costa pueden hallarse múltiples formas a las que se les asigna un nombre, son generadas producto de procesos deposicionales y erosivos; en la Figura 2.1 se ilustran algunos tipos de estas formaciones costeras.

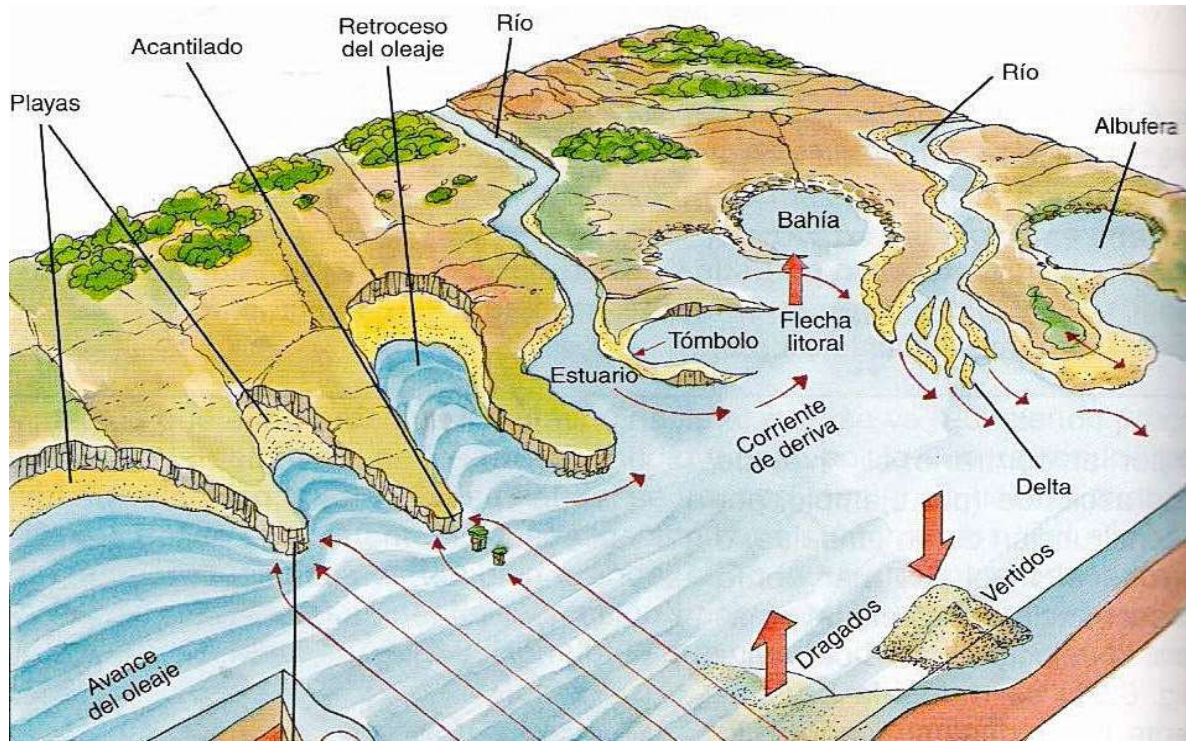


Figura 2.1 Algunos tipos de formaciones costeras

Fuente: Dudley & Lee, (1988).

La marea y el oleaje forman las flechas litorales en los puntos en los que la línea de la costa cambia de dirección abruptamente, por ejemplo desembocaduras de ríos y estuarios. Los sedimentos que se acumulan en estos lugares emergen a la superficie y se depositan debido a que son arrastrados desde aguas poco profundas hasta un entorno de menor energía, como bahías o estuarios. Las flechas suelen ser paralelas a la costa y es frecuente que se curven, de manera que la parte arqueada queda situada en dirección al mar (Nielsen & Quesada, 2006).

Según Nielsen & Quesada (2006) un estuario es una masa de agua ubicada en una zona costera, en una cuenca semicerrada que está influenciada por las mareas. En un estuario el agua del mar es diluida por el agua dulce que proviene de las escorrentías terrestres.

Se distinguen tres zonas principales en un estuario: la boca, la región media y la cabeza. La boca corresponde a la sección que se encuentra en contacto directo con el mar, por lo tanto tiene una marcada presencia de agua de mar en la columna de agua. En la zona media converge el agua dulce y salada. Por lo general contiene marcados gradientes de distintos parámetros físicos y químicos a lo largo de la columna de agua. La cabeza es el segmento de claro dominio del agua dulce, es una zona fluvial, con salinidades muy bajas,

cercanas a cero (Nielsen & Quesada, 2006). Estos autores establecen que un Golfo es un entorno de estuario, que está sujeto a cambios estacionales determinados por variaciones en el régimen climático (2006).

En geomorfología litoral la zona intermareal también denominada zona intertidal se define para toda costa como la parte del litoral o ambiente delimitado entre los niveles conocidos de las máximas y mínimas mareas (pleamar y bajamar). Las mareas son variaciones del nivel del mar, generadas principalmente por la fuerza de atracción gravitacional de la luna en primer término y el sol en segundo lugar, aunque pueden ser localmente modificadas por aspectos océano-meteorológicos (Lizano, 2006).

Las mareas se amplifican según se propaga hacia las regiones costeras, como consecuencia de la conservación del flujo de energía de la onda de marea que experimenta asomeramiento y es incrementada según la extensión y profundidad de la plataforma continental sobre la cual se propaga (costas erosivas o costas sedimentarias). También se incrementa hacia el interior de cuerpos semi-cerrados de agua como golfos y bahías (Lizano, 2006).

En estas regiones, la comunicación directa con el océano es limitada por lo que las mareas experimentan compresión lateral de la onda, lo que genera aumento en su altura. Por otro lado, la onda de marea también puede experimentar refracción, reflexión y resonancia en su propagación a través de la plataforma continental. La reflexión genera ondas atrapadas en la costa que aumentan la altura de la marea. Fenómenos atmosféricos también generan variaciones en el nivel del mar, como el viento, las presiones atmosféricas y las corrientes marinas (Lizano, 2006).

Las mareas hacen que las aguas suban o bajen de nivel, cubriendo las orillas de los distintos elementos costeros que existen, tal es el caso de las flechas, los tómbolos o los acantilados entre otros, llegando más allá de la rivera normal para dichos casos o por el contrario generando un reflujo provocando que el agua se aleje de la costa, adentrándose en los estuarios, deltas o bahías. En síntesis el rango de variabilidad en el nivel ocurre debido a la topografía del sector y a que la Luna desarrolla un fenómeno cíclico. El Sol también tiene incidencia sobre estos movimientos pero en menor cantidad (Silva, 1982).

2.2. Técnicas de medición y representación de la Tierra

La topografía es la disciplina encargada del estudio de mediciones y representación de la superficie de la Tierra delimitada en una extensión menor que la geodesia, donde la inclusión de las variaciones temporales por medio de mediciones de distancia, tiempo y gravedad en el entendimiento de los cambios de la Tierra no está sustancialmente involucrados.

Particularmente la topografía al no abarcar el estudio respecto a la dinámica en el tiempo, facilita medir y representar la superficie de la Tierra con un enfoque distinto. Hoy en día, esta técnica contempla (al igual que la geodesia) precisión y exactitud en sus deducciones, para ello se requiere una obtención y procesamiento de datos, el análisis de resultados y la representación gráfica de información dimensional de la superficie terrestre y su entorno.

La topografía realiza una representación de la realidad determinando la proyección espacial de cada elemento horizontal y verticalmente, debido a que la superficie terrestre no es plana. El método que se ocupa de la parte horizontal se le conoce como planimetría y al que involucra las alturas o profundidades como altimetría (IAGS, 1970).

En la actualidad, técnicas como LiDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*), GPS (*Global Positioning System*), batimetría, fotogrametría entre otros, son empleadas por otras disciplinas para trabajos en los que se requiere topografía para fines científicos o investigativos, donde los atributos de un objeto tales como la posición espacial o elevación de referencia son de utilidad para modelar fenómenos, realizar estimaciones e interpretar eventos.

Técnicas modernas como LiDAR se usan a menudo para la delineación automatizada de hábitats, a pesar de la incertidumbre vertical que se ha encontrado en los datos recopilados con los sistemas aéreos topográficos LiDAR por ejemplo en zonas de vegetación densa o pendientes pronunciadas. La necesidad de mapear ha producido el desafío de buscar métodos estandarizados que sean eficientes y repetibles. La importancia de los análisis de incertidumbre mediante pruebas estadísticas, iteraciones o el refinamiento manual se utilizan cada vez como soluciones para la extracción automatizada de ambientes dependientes de la elevación (Enwright, 2017).

En ocasiones las técnicas deben combinarse para establecer el producto deseado. Lo que significa que las técnicas se deben muestrear para coincidir con la otra metodología, los planos de cada fuente se pueden superponer para comparar dos o más conjuntos de datos independientes. Ya que con las áreas de superposición se hace evidente si existen grandes diferencias entre dos superficies a lo largo de franjas o sitios específicos. Las diferencias pueden tratarse removiendo ciertos datos o aplicando un análisis estadístico que sirva como un control independiente de la calidad del conjunto de datos, mediante una conversión de datos para construir una misma referencia. Para finalmente poder aplicar un algoritmo de fusión de superficies (Foxgrover, Finlayson, Jaffe, & Fregoso, 2018).

2.2.1. LiDAR

El sistema LiDAR es una técnica que combina tecnología óptica de teledetección remota para medir propiedades de luz reflejada o esparcida hacia atrás por un blanco remoto, con el fin de estimar la distancia, velocidad u otras propiedades del blanco. El sistema LiDAR más utilizado es el que determina la distancia de un objeto mediante la medición del retardo de los pulsos láser. Como en un sistema RADAR, que usa ondas de radiofrecuencia en lugar de radiación a frecuencias ópticas, la distancia del objeto se determina midiendo el retardo entre la transmisión de un pulso y la detección de la señal reflejada (Fuentes, Hernández, Jiménez, Montilla-Rosero, Saavedra & Silva, 2014).

Según Chance (2000) con el pulso láser empleado se mide la distancia inclinada del punto reflejado y el ángulo del rayo localizado en un sistema de coordenadas. De cada rayo se obtiene tiempo, distancia láser, error del dato y la intensidad además de las coordenadas del origen de cada pulso, los datos del Sistema Inercial de Navegación (INS, por sus siglas en inglés) y las coordenadas del sistema satelital, ver Figura 2.2.

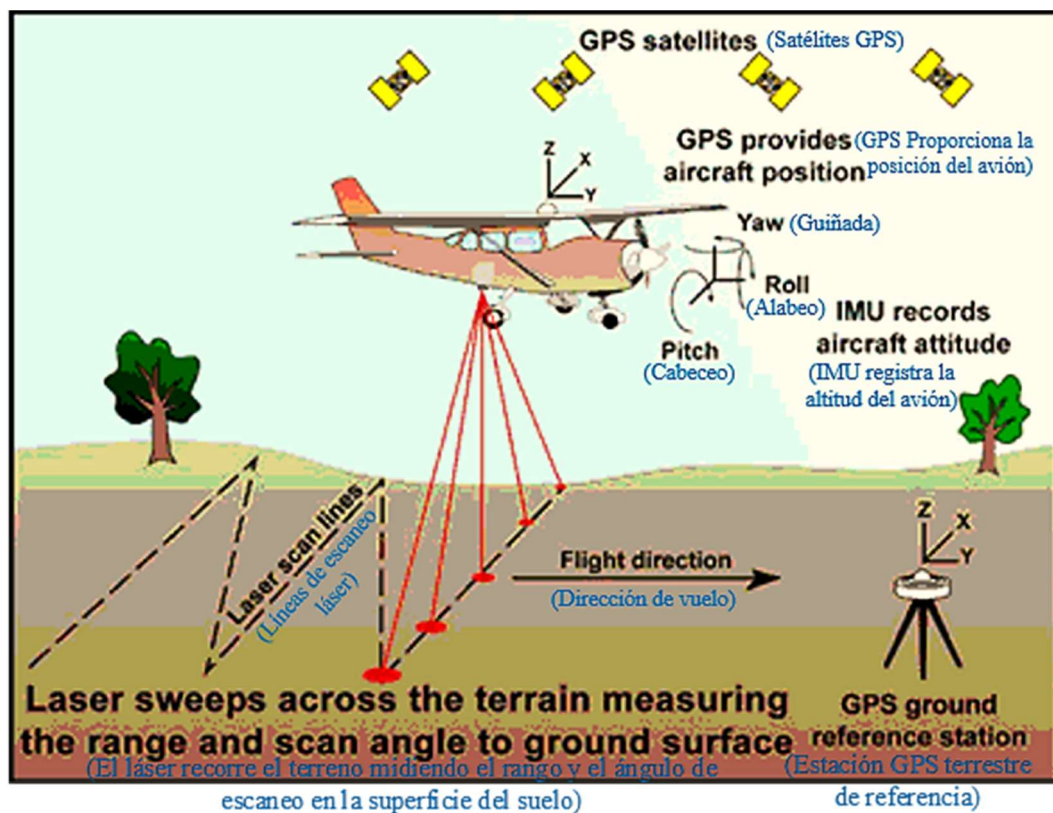


Figura 2.2 Concepto de técnica LiDAR instalada en un avión

Fuente: Chance, (2000).

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI, 2015), LiDAR integra las tecnologías del GPS, unidad de medición inercial y sensores láser, para coleccionar datos de altitud. Estos datos sirven para definir superficies del terreno y generar

Modelos Digitales de Elevación, para lo cual se eliminan los retornos que presentan anomalías altimétricas (puntos altos y bajos); posteriormente los puntos obtenidos se comparan con puntos de control terrestre con el objeto de verificar la información y poder reducir errores sistemáticos en altura; finalmente, se aplica un proceso de ajuste entre líneas que permite reducir otros errores a fin de procurar la redundancia en áreas de sobre posición.

Los pulsos láser emitidos se reflejan desde objetos sobre y por encima de la superficie del suelo: vegetación, edificios, puentes y así sucesivamente, exceptuando al agua que no genera retornos. Un pulso láser emitido puede regresar al sensor como uno o muchos retornos. Cualquier pulso láser emitido que encuentre varias superficies de reflejo a medida que viaja hacia el suelo se divide en tantas devoluciones como superficies reflectoras existen. El primer pulso láser devuelto es el más importante y se asociará con la entidad más grande en el panorama como una copa de árbol o la parte superior de un edificio, comúnmente se trabaja con los primeros y últimos retornos. La primera devolución también puede representar el suelo, en cuyo caso el sistema solo detectará un regreso. Varias devoluciones pueden detectar las elevaciones de varios objetos dentro de la huella láser de un pulso láser saliente. Las devoluciones intermedias, en general, se utilizan para la estructura de la vegetación, y la última devolución para los modelos de terreno de suelo desnudo, (INEGI, 2015).

Las investigaciones de Rodríguez (2008) muestran que LiDAR es un sistema basado en la tecnología láser de dos frecuencias (azul-verde e infrarrojo), que traza un patrón de arco a través del rumbo de vuelo de la plataforma aerotransportada, graba las señales de llegada de las reflejadas por la superficie del terreno, la diferencia del tiempo medido entre los dos pulsos de luz reflejados es convertida en distancia.

Para la aplicación de la técnica es necesaria la combinación de varias metodologías como GPS, sistemas inerciales, láser y cámaras digitales, todo instalado en una plataforma de un helicóptero o avión debidamente configurado y con apoyo terrestre de receptores GPS, y ubicados sobre estaciones con coordenadas conocidas en tierra, ya que desde estas es posible obtener coordenadas y elevación de todos los puntos observados desde el sistema aerotransportado (Rodríguez, 2008).

La técnica LiDAR se ha explicado hasta ahora para el ámbito aéreo y que los equipos son aerotransportados, pero se puede clasificar en grupos y subdivisiones, tomando en consideración para ello el sistema de operación y en especial la calidad del sensor, ver Gráfico 2.1.

Los componentes de hardware principales de un sistema LiDAR independientemente del ámbito de ocupación incluyen un vehículo de recolección (avión, helicóptero, vehículo y trípode), sistema de escáner láser, GPS e INS el cual mide la rotación, inclinación y encabezamiento del sistema.

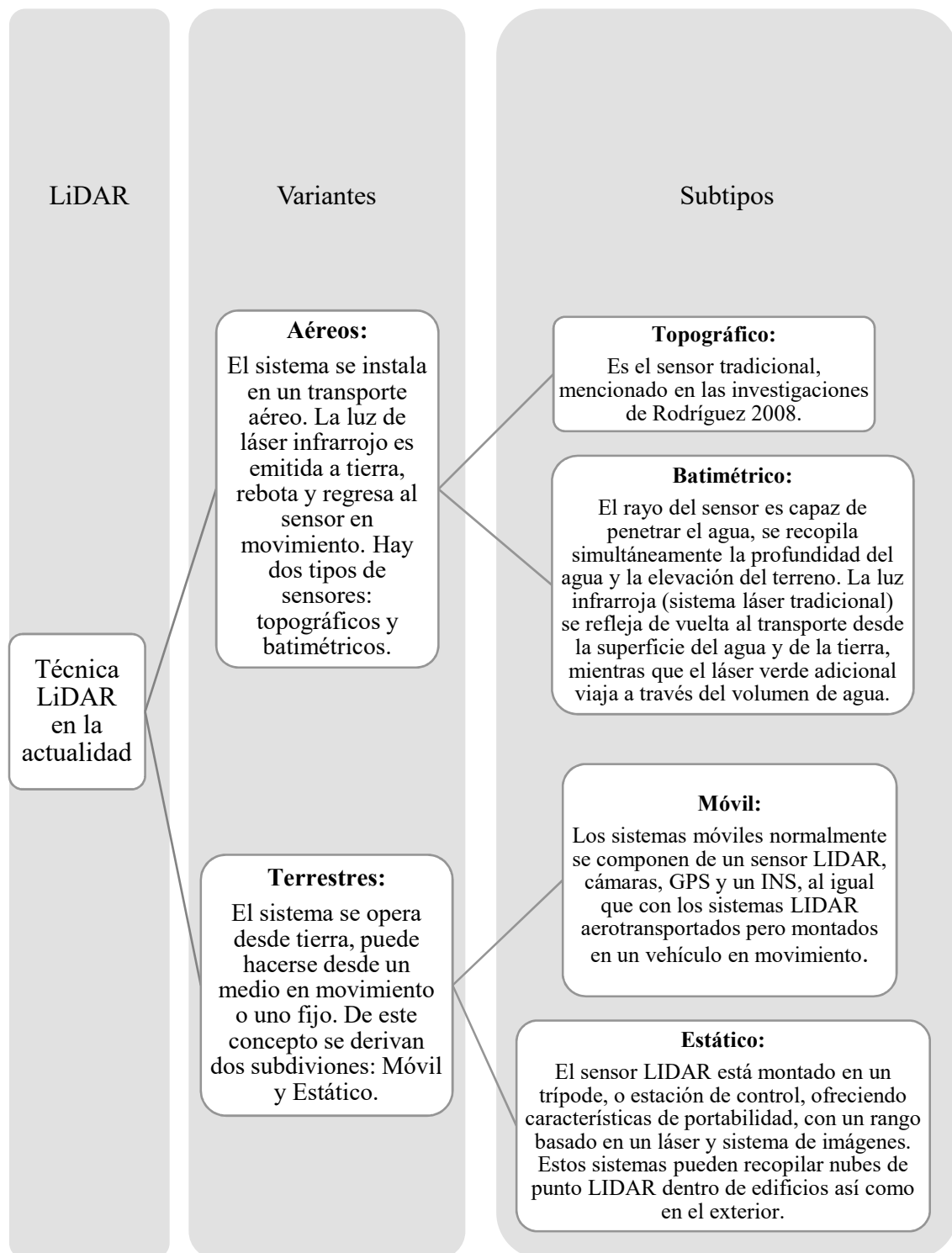


Gráfico 2.1 Variantes y subvariantes de la técnica LiDAR

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Batimetría

La batimetría es una rama de la topografía que se especializa en medir las profundidades de cuerpos de agua para determinar la topografía del fondo subacuático. La técnica está asociada a la obtención de valores de profundidad del agua para determinar la forma del fondo de estas superficies. Los resultados de la batimetría al igual que la topografía se representan en un plano, un mapa o carta batimétrica; normalmente el relieve del fondo se modela con isógramas, estas son líneas de constante profundidad y también se les denomina isóbata o isolínea (Lizano, 2010).

Según Forrester (1983) la elevación puede ser expresada relativamente a la elevación respecto a cualquier cosa, puede ser el centro de la Tierra, el nivel medio del mar, la altura de un satélite o simplemente a un punto en una roca. Este cero altimétrico designado para referenciar cualquier elevación, se llama datum de referencia vertical. Así una superficie de nivel puede ser una superficie de igual potencial gravitacional alrededor de la Tierra. La gravedad actúa perpendicular a las superficies de nivel y estas serían las superficies a las cuales todos los niveles del agua se ajustarían en ausencia de otras fuerzas. El geoide es la superficie de nivel que más se aproxima a la superficie promedio de los océanos en el mundo.

Los niveles de profundidad en el mar o elevación en la Tierra que se muestran en una carta náutica o una hoja topográfica, deben ser referenciados sobre o debajo de un datum. Para seguridad de la navegación, las profundidades son referenciadas a un datum de nivel bajo del mar y las elevaciones a un datum de nivel alto del mar. Una práctica común es referenciar niveles del mar y predicciones de mareas al mismo datum. Estos niveles son definidos en un período de 19 años, que es el tiempo del ciclo nodal de la Luna o el tiempo en el que la Luna rota su elipse completamente alrededor de la Tierra (Forrester, 1983).

Para obtener la verdadera cota del punto levantado se debe tener en cuenta una serie de correcciones entre las que se incluye la corrección por marea. Las mareas son variaciones periódicas en la altura del nivel del mar, debido a las atracciones de los cuerpos celestes. El estudio de la marea debe realizarse en las cercanías de la zona en la que se está realizando el levantamiento, para poder reducir los sondeos al datum o cota de referencia (Celada, 1999).

Según Celada (1999) además del conocimiento de las mareas, en cualquier carta náutica son imprescindibles parámetros como:

- Nivel medio del mar, al que se refieren las cotas.
- Nivel de bajamar escorada, que es la altura de las mareas mientras dura la operación de sonda.
- Unidad de altura y establecimiento del puerto, para calcular los niveles de pleamar y bajamar de un lugar a otro.

La batimetría de cuerpos de agua significativos se efectúa utilizando equipos GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que se combinan con equipos que permiten determinar profundidades por técnicas sónicas digitales, todo ello computarizado y controlado en tiempo real por software capaces de gestionar los datos. El desarrollo técnico e informático hace que las tareas en un levantamiento batimétrico se reduzcan, disminuyendo tiempos de ejecución y gastos, mejorando precisiones finales tanto en la planimetría como en la determinación de la profundidad (Núñez, Valbuena & Velasco, 1992).

Existen inconvenientes asociados fundamentalmente al movimiento de la masa de agua, ya que es una barrera que repercute en la estabilidad de los instrumentos de observación y la repetitividad de las mediciones (Núñez et al., 1992).

2.3. Modelos digitales de elevaciones

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se ha convertido en una fuente de información de primera mano para el estudio del ambiente, ya que es el equivalente moderno de la cartografía tradicional de elevaciones simbolizadas mediante curvas de nivel.

En cuanto a la construcción de un MDE, los trabajos de campo establecidos con las técnicas de medición y representación de la Tierra como las mencionadas anteriormente, permiten obtener datos bastante precisos, además facilitan adaptar el muestreo a las condiciones y las irregularidades del terreno. El principal inconveniente es el elevado costo económico de recolección de información que ofrecen en la actualidad. El método de generación de MDE más habitual y económico es la digitalización de curvas de nivel, sin embargo según (Olaya, 2014) pueden existir diversas fuentes:

- a) Métodos directos mediante sensores remotos:
 - Altimetría: altímetros transportados por aviones o satélites que permiten determinar las diferencias de altitud entre la superficie terrestre y el vehículo que transporta el altímetro.
 - Radargrametría o interferometría de imágenes radar.
- b) Métodos directos sobre el terreno:
 - Con equipos de topografía convencional.
 - Con receptores de sistemas de posicionamiento GNSS.
- c) Métodos indirectos:
 - Restitución fotogramétrica a partir de fuentes analógicas (fotografía aérea) o digitales (imágenes de satélite).
 - Digitalización de curvas de nivel de un mapa.

El término MDE comúnmente se ha confundido con el de Modelo Digital del Terreno (MDT) debido a discrepancias asociadas a conceptos del lenguaje español y su empleo como sinónimos (Olaya, 2014).

Un MDT es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, mientras que un MDE es un caso particular dentro de los MDT en el cual la variable detallada es la elevación (Olaya, 2014). Según este mismo autor, el concepto de MDT es más genérico y no guarda relación con el relieve, ya que puede recoger variables como la temperatura o la humedad en un punto dado, obteniendo un Modelo Digital de Temperaturas para ese caso.

El MDT no es sino una capa con información continua que contiene la relativa a elevaciones, aunque pudiendo recoger cualquier otra variable con esas características (Olaya, 2014).

Los MDE son representaciones matemáticas de la topografía basada en muestreos de coordenadas este, norte, elevación de la superficie del suelo en intervalos de cuadrícula regular. Estos conjuntos de datos se pueden usar para producir mapas topográficos o detallados modelos matemáticos de la superficie del suelo (Dzurisin, 2007).

Los MDE generalmente se asocian por definición como entidades raster e incluso algunos autores así lo reflejan explícitamente, sin embargo no necesariamente pertenecen a dicho formato. Las redes de triángulos irregulares (TIN, por sus siglas en inglés) son una buena forma de modelar el relieve, no obstante, la implementación de algoritmos de análisis basados en TIN resultan complejos, por ello, son menos frecuentes al igual que la práctica del análisis de un MDE en formato TIN (Olaya, 2014).

El formato más adecuado, tanto por sus características como por la facilidad con la que permite la implementación de algoritmos, es el formato raster, de ahí la relación de varios autores entre los MDE y este formato (Olaya, 2014).

Un MDE permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. En los MDE existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos (INEGI, 2014).

En los MDE la interpolación se usa para predecir la elevación de las unidades en las que se encuentra subdividido el espacio, en el caso de la estructura vectorial se define por la ecuación de un plano que pasa a través de tres puntos no colineales en el espacio, y en el caso de los ráster se calcula la elevación del centro geométrico de las celdas en que se divide el espacio geográfico. Esta división al encontrarse regularmente distanciada no quiere decir que los valores de la elevación en la superficie real sean igualmente homogéneos (Bosque, 1992).

2.4. Métodos de interpolación de un MDE

Según Bosque (1992), la interpolación es definida como un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral con

valor estimado), conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio (puntos muestrales con valores reales).

De acuerdo con Velásquez, Marín y Ordoñez (2013) se debe cumplir una serie de condiciones para que el valor estimado de la interpolación sea fiable: se debe crear una superficie continua a partir de datos distribuidos discretamente en el espacio, debe tener propiedades matemáticas y debe ajustarse a los datos con un nivel de precisión determinado.

La confiabilidad de la predicción con cualquier algoritmo de interpolación está fuertemente relacionada con la calidad de los datos de la muestra inicial, una mala distribución de los mismos o una intermediación por falta de ellos, hacen que el resultado se aparte de la geometría que realmente tiene la zona representada mediante el MDE (Velásquez et al., 2013).

La interpolación tiene como objetivo estimar a partir de una muestra, valores de elevación para un conjunto de puntos (este, norte). Además, la interpolación puede utilizarse para: estimar valores de elevación para ubicaciones particulares (este, norte); estimar valores de elevación para una cuadrícula rectangular o cambiar la resolución de la cuadrícula en un archivo raster (método conocido como remuestreo) (Fallas, 2007).

Según Burrough (1986) los métodos de interpolación se clasifican en dos grandes categorías:

- Los que asumen una superficie discreta.
- Los que asumen una superficie continua.

La técnica de superficie discreta es utilizada en el área de procesamiento digital de imágenes o en el análisis de conjuntos de datos multivariados y se fundamenta en la condición de que existen unidades homogéneas en el conjunto de datos. La función del algoritmo es tratar de definir los límites entre dichas unidades (Fallas, 2007).

Los métodos basados en el concepto de continuidad parten del supuesto de que la superficie puede describirse utilizando una función matemática y puntos de muestreo. Los métodos pueden dividirse en locales y globales. Los primeros utilizan todos los puntos de muestreo para crear la superficie; en tanto que los segundos utilizan sólo un subconjunto de los mismos (concepto de vecino más cercano) (Fallas, 2007).

Por otra parte, cada modelo de datos puede expresarse mediante diferentes estructuras de datos. Las más representativas son dos estructuras vectoriales y dos estructuras raster: la primera basada en contornos y en un TIN, y la segunda basada en matrices regulares y matrices jerárquicas (Felicísimo, 1994).

Sin embargo, para efectos del presente proyecto de graduación se va a profundizar con mayor detalle sobre el modelo vectorial TIN. Según Felicísimo (1994) esta estructura de

datos se compone de un conjunto de triángulos adosados, que se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, apoyándose y uniendo sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve. La creación de un TIN se compone de dos partes diferentes: la triangulación propiamente dicha y la selección de los puntos que deben usarse como vértices.

Los TIN son una representación de datos geospaciales digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). Los vértices están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos. Existen diversos métodos para formar estos triángulos, donde la triangulación de Delaunay es el método más recurrente al aplicarse (aunque existen otros menos comunes como el orden de distancias).

Una triangulación de Delaunay es un algoritmo formulado para construir una red de triángulos que cumplen con la condición matemática de Delaunay, la cual dice que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de una red no debe contener ningún vértice de otro triángulo ver Figura 2.3, (Cruz, 2016).

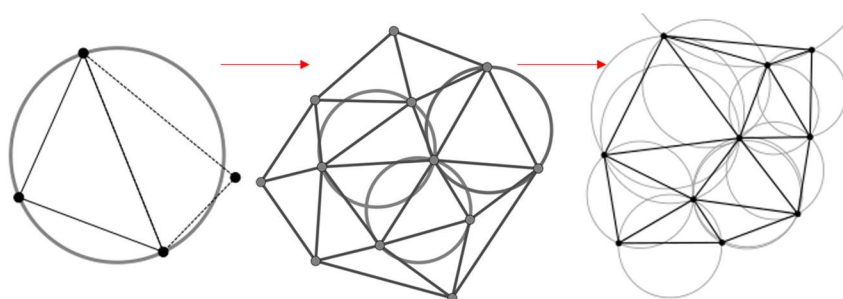


Figura 2.3 Triangulación de Delaunay

Fuente: Elaboración propia

En principio, cualquier triangulación podría ser igual de válida, aunque a simple vista unas parecen más naturales que otras. La triangulación que forme los "triángulos más regulares (equiláteros)" aparentemente dará la imagen más fiel del terreno real. Estableciendo así la Triangulación de Delaunay (Priego de los Santos & Porres de la Haza, 2018)

De un conjunto de puntos se construye una triangulación empleando cada punto como vértice y conectándolos entre sí mediante una geometría triangular, con la Condición de Delaunay se puede examinar si esa triangulación es útil, ya que en cada circunferencia no debe haber más de tres vértices de los triángulos. Si se cumple el criterio de Delaunay en todo el TIN, se maximizará el ángulo interior mínimo de todos los triángulos. El resultado es que los triángulos finos y largos se evitan en lo posible, obteniendo solo triángulos equiláteros (Cruz, 2016).

Una solución de triangulación es mejor que otra solución, cuando el menor ángulo de los triángulos es mayor que el menor ángulo de los triángulos de la otra. Es decir, la triangulación óptima, es la que maximiza el ángulo mínimo de los triángulos. Partiendo de

una triangulación cualquiera: cuatro puntos en posición convexa tienen dos posibles triangulaciones. Aquella triangulación en la cual los círculos circunscritos están vacíos, es decir, no contienen en su interior al cuarto punto, es la que tiene un vector de ángulos mayor, por lo tanto la triangulación es correcta (Priego de los Santos & Porres de la Haza, 2018).

Anteriormente se indicó en las investigaciones de Felicísimo (1994) que las interpolaciones pueden concentrarse en dos grupos: discretas y continuas, los algoritmos de software aplican principalmente interpolaciones continuas, estas a su vez se subdividen en locales y globales. Inicialmente se detalló la interpolación TIN, pero también existen otros métodos que pueden mencionarse y que utilizan superficies continuas para producir MDE, en síntesis, otras metodologías para representar superficies son las que utilizan el concepto de celdas y raster en lugares de redes irregulares de triángulos. Según Olaya (2014) se tiene:

- Distancia Inversa Ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) es un método de interpolación raster que determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. El método de distancia inversa no es adecuado para la interpolación de MDE, pues genera abundantes depresiones de carácter artificial y elementos no naturales en el relieve.
- Kringing aplica un procedimiento geoestadístico que genera una superficie raster a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores específicos. Esta interpolación supone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra tienen una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación de la elevación. Las superficies generadas son excesivamente suavizadas, aunque la precisión del método es alta cuantitativamente, tampoco refleja con precisión la configuración del relieve y sus accidentes, tiende a extrapolar valores erróneos en los límites del área de trabajo.
- Curvatura mínima o spline es un método de interpolación raster que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, resultando una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de muestra. Aplica una función matemática a una cantidad especificada de puntos cercanos de entrada, mientras genera una curva a través de los puntos de muestra. Este método es mejor para generar superficies que varían levemente siendo así una de las mejores alternativas para la creación de MDE frente a las restantes metodologías mencionadas.

2.5. Tsunami

Según Madrigal (2008), "un tsunami es un movimiento (oscilatorio) en forma de olas (ondas de agua) de una masa de agua en los mares u océanos, ocasionado por un sismo, una erupción volcánica, un desplazamiento en el fondo marino o la caída de un meteorito" (p. 4). Según este mismo autor, "la frecuencia de ocurrencia no se puede predecir debido a las causas que lo originan, algunos pueden ser muy grandes, en las zonas costeras su altura puede llegar

a 10 m o 40 m en casos extremos, pudiéndose propagar varios kilómetros tierra adentro” (p. 5). Además todo tsunami está conformado por tres etapas: generación, propagación e inundación véase Figura 2.4.



Figura 2.4 Etapas de desarrollo de un tsunami

Fuente: Madrigal, (2008).

Para este mismo autor, “la magnitud del proceso generador (sismo, actividad volcánica, deslizamiento o meteorito) y la topografía submarina en las zonas costeras, pueden determinar el tamaño e impacto de las ondas del tsunami. Los arrecifes, las bahías, desembocaduras de ríos y la pendiente de la playa, contribuyen a modificar el tsunami a medida que se aproxima a la línea de costa” (p. 9).

La definición más reconocida por la comunidad científica es la de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) la cual es una institución perteneciente a la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés) define tsunami como un término japonés que significa ola (“nami”) en puerto (“tsu”). Conformado por una serie de ondas de longitud y período largos, normalmente generados por perturbaciones asociadas con terremotos que ocurren bajo el fondo oceánico o cerca de él. Asimismo, las erupciones volcánicas, los deslizamientos de tierra submarinos, los derrumbes costeros de montañas, y el impacto en el mar de un meteorito de gran tamaño, también pueden dar origen a la generación de un tsunami (ver Figura 2.5). Los tsunamis pueden alcanzar grandes dimensiones y viajar por toda la cuenca oceánica perdiendo poca energía en el proceso (COI, 2013).

Los tsunamis se propagan como olas de gravedad normales con un periodo típico de entre 10 a 60 minutos. Al acercarse a aguas someras, las ondas de tsunami se amplifican y

aumentan en altura provocando inundaciones; la topografía en la zona intermareal provoca esa amplificación de las olas, además los tsunamis no guardan relación con las mareas (COI, 2013).



Figura 2.5 Principal fuente generadora de tsunamis

Fuente: COI, (2013).

Varios autores (Dudley & Lee 1988; COI, 2013) clasifican los tsunamis en tres grupos: locales, regionales y distantes (véase Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2 Clasificación de los tsunamis

Tipo	Descripción
Local	La fuente generadora es cercana a la costa, además el tiempo de viaje del tsunami es menor a 1 hora desde su fuente y en una distancia menor a 300 km.
Regional	Los tsunamis regionales igualmente se clasifican de acuerdo a la distancia, el tiempo que tarda en arribar al lugar; por ende si se encuentran en el rango de 300 km a 1000 km, el recorrido de sus ondas de 1 a 3 horas y la afectación a regiones geográficas se habla de esta clase de tsunami.
Distante	Ocurren a más de 1000 km de un área afectada y su tiempo de viaje es mayor a 3 horas, producto de que las olas siguieron viajando toda una cuenca oceánica con suficiente energía desde el área inmediata de generación.

Fuente: Recopilación de datos de “Tsunami!” Dudley & Lee, (1988) y “Glosario de Tsunamis”. COI, (2013).

2.6. Modelos numéricos de tsunamis

Los modelos numéricos son descripciones matemáticas que pretenden reproducir fenómenos físicos. Debido a que los datos de tsunamis ocurridos son regularmente escasos, la

única manera de determinar el potencial de alcance máximo de las aguas tierra adentro (run-up) y su posterior inundación es usando la simulación numérica. Con el objeto de determinar la inundación los modelos pueden ser empleados con los peores escenarios posibles en cuanto a las fuentes de tsunamis, tanto locales como lejanos.

También pueden simularse tsunamis con fuentes más pequeñas para entender la severidad del riesgo mediante eventos menos extremos. Esta información es básica para la elaboración de mapas de evacuación y protocolos a seguir en caso de tsunamis, ver Figura 2.6.

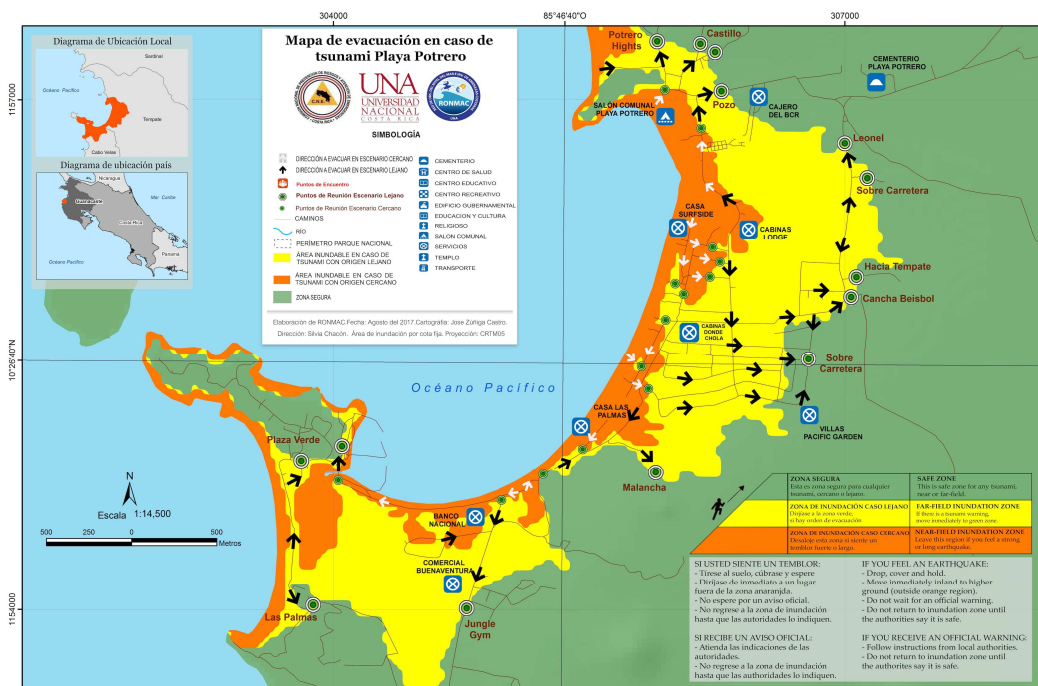


Figura 2.6 Ejemplo de mapa de evacuación por tsunamis en Potrero, Guanacaste
Fuente: RONMAC, (2017).

Las técnicas de construcción exacta de modelos numéricos de tsunamis de las que se dispone actualmente existen desde hace muy pocos años, para poder realizar una buena interpretación y un buen uso se requiere de una formación técnica, así como de la introducción de datos topográficos y batimétricos detallados del área que se desea estudiar (COI, 2013).

Según COI (2013), en los últimos años los modelos numéricos han sido usados para simular la propagación de las ondas de tsunami y su efecto en la costa. Estos modelos normalmente resuelven ecuaciones similares, pero a veces emplean técnicas numéricas diferentes y se aplican a segmentos diferentes del problema total de la propagación del tsunami, desde las zonas de generación hasta su penetración tierra adentro. Los centros de alerta contra los tsunamis usan modelos numéricos para predecir los tiempos de llegada de las olas, la dirección de la energía máxima del tsunami, la fuerza de las corrientes de agua cerca de la costa y la altura en la costa. Esta información es utilizada para responder en caso de emergencia a mitigar el impacto en las regiones más propensas.

Capítulo 3: Metodología, materiales y equipos

Para la ejecución de un estudio geomorfológico en el que interactúan dos ambientes como son la tierra y el agua denominado zona intermareal, se necesita de insumos y procesos que sean esenciales y que puedan combinarse entre sí a través de una serie de procedimientos bajo un criterio que permita proyectar resultados que puedan utilizarse con fines científicos como lo es la simulación de inundaciones causadas por tsunamis.

3.1. Materiales y equipos

Los equipos y materiales empleados fueron: computadoras, memoria USB, disco duro externo, impresora, tintas de impresión y resmas de papel.

El equipo que se utilizó fue una computadora perteneciente al proponente y una computadora perteneciente al Proyecto SIA 0569-13 ubicada en la Red de Observación del Nivel Medio del Mar de Costa Rica (RONMAC), la misma posee la licencia del programa ComMIT® y ArcGIS® versión 10.2. Esta computadora contaba con Windows 10, procesador Intel® Corei7, memoria RAM de 8 Gb y sistema operativo de 64 bits.

La computadora del proponente contaba con Windows 10, procesador Intel® Corei7, memoria RAM de 32 Gb y sistema operativo de 64 bits. El software Civil3D® se obtuvo de una licencia para estudiante en Autodesk®, Microsoft Office® la licencia es del proponente.

Por consiguiente toda la información y los resultados fueron procesados en el laboratorio destinado al Proyecto SIA 0569-13 en RONMAC y en el domicilio del proponente.

3.2. Administración de las técnicas de medición y representación de la Tierra usadas

A continuación se describen los procesos llevados a cabo para la recopilación y evaluación de los datos LiDAR y batimétricos, los cuales en conjunto permitieron efectuar el estudio de la zona intermareal requerida para la estimación de las áreas más propensas a una inundación por tsunami.

3.2.1. LiDAR

La información de partida son los datos provenientes del vuelo LiDAR efectuado entre noviembre y diciembre de 2012 por la empresa española Stereocarto sobre la formación costera en la que se asienta la ciudad de Puntarenas. Los datos son propiedad de la CNE y se obtuvieron para fines científicos.

Los siguientes insumos fueron obtenidos del vuelo LiDAR y sirvieron de base para desarrollar el presente proyecto de graduación dentro del marco del Proyecto SIA 0569-13 (ver Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1 Insumos LiDAR para desarrollar el proyecto de graduación

Tipo de Archivo	Descripción
LAS	Formato estándar para la nube de puntos LiDAR.
DSM	Formato estándar que contiene la clasificación de elevaciones con características naturales y construidas en la superficie de la Tierra.
DTM	Formato estándar que contiene la clasificación de elevaciones del terreno desnudo.
ECW	Formato estándar para imágenes con bandas RGB

Fuente: Elaboración propia.

Del conjunto de insumos LiDAR recibidos se debió efectuar una selección del tipo de archivo a utilizar en la parte terrestre, insumo contra insumo se analizaron las ventajas y desventajas en información, las cualidades para una adecuada manipulación en software, el tamaño de los archivos base que permitieron establecer el producto deseado y consecuentemente se analizó la funcionalidad para posteriormente ser combinado con datos obtenidos de una fuente y técnica de producción diferente como lo es la batimetría.

El archivo que fue seleccionado de la técnica LiDAR presentó los insumos más ventajosos para analizar el comportamiento del terreno natural a lo largo y ancho de la flecha litoral ya que sólo contenían datos de elevaciones de valores topográficos, los cuales ya habían sido clasificados y se le habían retirado los valores de elevación de por ejemplo el techos, la copas de árbol, cables de postes eléctricos, entre otros. Seleccionar el archivo ya clasificado generó beneficios en tiempo de manipulación de información.

El tamaño de compilación de cada archivo generado del vuelo LiDAR por lo general fue considerable, aunado a ello el área del presente estudio fue extenso. La manipulación de los archivos seleccionados se efectuó con Civil3D, al dato seleccionado se le estudió visualmente el comportamiento de la elevación, la ubicación espacial se verificó con la posición geoespacial según la proyección CRTM05, el comportamiento también se analizó sistematizando por rangos la elevación.

Pese a la cantidad de datos LiDAR disponibles, el área en estudio se debió complementar con datos de batimetría. En otras palabras, la batimetría debió ajustarse a las zonas donde LiDAR no contaba con datos espaciales del comportamiento de la variable de elevación. Ya que en la campaña de producción de datos no se contó con equipos LiDAR que emitirán pulsos láser capaces de atravesar el agua (metodología que tampoco hubiese sido factible ya que los pulsos deben ser seguros a la vista, por encontrarse en zona poblada).

3.2.2. Batimetría

La información de partida fueron los datos preparados por el Dr. Mario Fernández Arce del Programa de Información Científica y Tecnológica Satelital al Servicio de Prevención y Mitigación de los Desastres (PREVENTEC) de la Universidad de Costa Rica (UCR), y que se fundamentaron en datos que constituyeron dos cartas náuticas existentes: la del Golfo de Nicoya y la de Puntarenas.

Sintetizando la información aprovechable, de los datos preparados por el Dr. Mario Fernández Arce se contó con los siguientes insumos para desarrollar el presente trabajo de graduación dentro del marco del Proyecto SIA 0569-13 (ver Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2 Insumos Batimétricos para desarrollar el proyecto de graduación

Tipo de Archivo	Descripción
SONDAS.DAT	Formato tabulado con profundidades del Golfo, convertidas de sondeos a datos del nivel medio del mar.
COSTAS.DAT	Formato vectorial con la línea de costa alrededor del Golfo.
ISLAS.DAT	Formato vectorial con la línea de costa alrededor de las islas del Golfo.

Fuente: Elaboración propia.

Del conjunto de insumos batimétricos recopilados se debió realizar una selección del tipo de archivo a manipular; el criterio de elección estuvo basado en una comparación de los datos utilizables para este proyecto, es decir insumo contra insumo se estudiaron las ventajas y desventajas en información, las condiciones para una apropiada aplicación en el software, el volumen de los archivos base que permitieron construir el producto deseado y consecuentemente se examinó la funcionalidad para después ser combinados con datos LiDAR.

Para la selección de los datos batimétricos se escogió el insumo que contuviera únicamente valores del suelo marino, ya que el propósito fue construir un producto análogo en conjunto con los datos LiDAR. En la selección de dichos datos se debió contemplar los que ofrecieron la mayor cantidad de datos de profundidades, además que abarcaran el área de forma homogénea y que se ajustaran a los lugares donde se carecía de soluciones LiDAR. Por lo tanto, los datos batimétricos funcionaron como engranaje para complementar la información LiDAR, que por su naturaleza ofreció cuantiosa información, pero inexistente en la zona intermareal al encontrarse en parte cubierta de agua.

A diferencia de los datos LiDAR, los archivos batimétricos fueron más sencillos de manipular, ya que el volumen de información fue más reducido. Los archivos mencionados en el Cuadro 3.2 contribuyeron a brindar el comportamiento del terreno natural en el fondo marino del Golfo y a delimitar el área de estudio de la zona intertidal.

La manipulación de los datos batimétricos, al igual que los datos LiDAR dependió del estándar de formato utilizado con que se almacenó el insumo. La manipulación del archivo previo a su combinación se efectuó con Civil3D sin embargo, no representó mayor inconveniente ya que las fuentes de información habían sido guardadas en formatos para tabulación.

3.3. Evaluación de la calidad de los datos disponibles

Para alcanzar el correspondiente objetivo general se debió efectuar una comprobación de los datos a combinarse. En particular el atributo a ser mayormente verificado fue la elevación, pues el modelo numérico de simulación de tsunamis se basó en esta variable, y la información que se divulgará estará conforme a lo que se estudió en este proyecto.

Verificar el conjunto de los datos conllevó dos aspectos: primero, analizar las especificaciones relacionadas a la incertidumbre alcanzada en los datos LiDAR y datos batimétricos, y segundo se comprobaron mediante pruebas específicas que tan representativos eran los valores de la elevación con la realidad.

Primero, la evaluación de las incertidumbres obtenidas para las mediciones LiDAR implicó estudiar los datos, al ser solicitados mediante una contratación administrativa, se consultó el pliego de requerimientos que la CNE estableció en su momento.

Por lo tanto para lograr evaluar la calidad de los datos LiDAR en este proyecto fue necesario consultar las exactitudes obtenidas en los datos o investigar las tolerancias autorizadas en el Cartel de Licitación, en la que se indicara expresamente la exactitud horizontal y vertical de los datos, además del sistema de referencia utilizado.

Para conocer e interpretar las incertidumbres de los datos batimétricos se debió ir más atrás y estudiar la fuente de publicación de los archivos, pues los datos batimétricos disponibles para este proyecto son extraídos de información oficial adaptada por PREVENTEC-UCR.

Segundo, para poder evaluar la calidad de los datos se efectuaron pruebas específicas utilizando datos oficiales no relacionados al proyecto. De esta manera la evaluación fue teórica pero contribuyó a discutir o evidenciar con números que tan representativo fue la campaña LiDAR con respecto al nivel de referencia que se ocupó para la simulación numérica de tsunamis. Se efectuó una propagación de errores a una muestra de valores LiDAR utilizando como datos teóricos las elevaciones de BM del IGN que alguna vez existieron en la zona.

3.4. Elaboración del MDE

Esta etapa consistió en describir la geomorfología de la zona intermareal de la ciudad de Puntarenas y zonas próximas mediante la agrupación de todos los insumos seleccionados independientemente en un solo elemento: el MDE. La fusión o agrupación de los datos LiDAR y batimétricos se efectuó mediante la interpolación de todas las elevaciones.

La fusión de los datos se alcanzó a partir de que la información fuese cien por ciento compatible entre sí. La compatibilidad se obtuvo con el software Civil3D, con él se realizó una normalización o estandarización de los formatos con que se contaba. En la actualidad la mayoría de los desarrolladores de software para usos topográficos, geoespaciales o de ingeniería ya han adaptado las extensiones de datos de esas técnicas de medición a los sistemas.

El método de interpolación de las elevaciones con que se elaboró el MDE debió explotar al máximo las características de los datos con que se contaba, haciendo prevalecer el valor de cada muestra. Además, el método de interpolación debió estar compuesto por un algoritmo automatizado ya que ejecutarlo manualmente por ejemplo se imposibilitó debido a la densidad de información existente.

Se utilizó el software Civil3D debido al fácil acceso, al método de interpolación de elevaciones, a la adaptabilidad para manipular archivos extensos, a que ya se tenía una base teórica y práctica de conocimientos para el uso, también porque ofrecía toda una gama de herramientas y recursos para realizar las actividades y tareas que involucraron los objetivos proyectados.

Para la elaboración del MDE el algoritmo del software utilizó el método de interpolación vectorial TIN. Justificado según la necesidad de respetar el comportamiento de cada dato de la muestra y de acuerdo a las condiciones expuestas por algunos autores desarrollados en el Marco Teórico.

Si bien es cierto, citaciones sobre técnicas como LiDAR o la batimetría que utilizan fuentes de sensores, sonares o fotogrametría y que producen millares o millones de muestras cuyos resultados no son comúnmente relacionados al método de interpolación TIN debido a la estructura de datos, no fueron considerados para la metodología propuesta, pues se deseó rescatar otros beneficios que si otorga el método TIN.

Se optó por utilizar el modelo de interpolación TIN debido a que los productos se utilizaron posteriormente para efectuar simulaciones numéricas de tsunamis y producción de mapas de prevención de riesgos para la población puntarenense, los cuales precisaban de una fuente confiable de información. Para la construcción del TIN se basó en la recomendación máxima de normalización, que puede variar según los recursos de hardware disponibles. Se

establece de entre 10 a 15 millones de nodos como el tamaño más grande para un MDE de tipo TIN, esto debido a cuestiones de rendimiento y facilidad de uso ocasionado por la compleja estructura de datos (Olaya, 2014).

Para crear el MDE según los objetivos citados y mitigando la complejidad en estructura de datos, primero se debió trabajar el segmento terrestre por una parte y la submarina por otra y segundo fusionarlos hasta que fuesen compatibles. La división de datos evitó afectar los procesos que realizaba el hardware utilizado, ya que la capacidad de disco y RAM fueron empleadas al cien por ciento por el software debido a la naturaleza de la densidad de información a manipular.

Al trabajar datos LiDAR y batimétricos individualmente primero se quiso reconocer la información y el formato nativo que presentaba cada técnica, posteriormente se debió exportar los resultados a un formato estándar: el Extensible Markup Language (XML). En un paso siguiente se fusionó los sólidos conformados para ambas partes, así se produjo todo un procedimiento de mitigación que alivió la manipulación de datos y la generación de resultados en el software.

Las diferencias de formato entre los archivos aportados por el Proyecto SIA 0569-13 se eliminaron con el proceso de normalización de formatos implementado que priorizó aplicar un estándar de almacenamiento. El formato XML contuvo características como amplia capacidad, versatilidad de manipulación y una extensión de archivo interpretable para otro software de ser necesario.

Para definir el MDE en el software, cuando se fusionó mediante las herramientas de Civil3D un elemento con otro, sólo debió tenerse certeza de cual elemento actualizó al otro. Es decir, para este caso el XML batimétrico era un complemento de la parte terrestre establecida mediante LiDAR. Por consiguiente para que el sólido resultante fuera congruente en su conformación y que la zona de empate estuviese continua sin ningún tipo de discrepancia en los valores de la elevación, los límites de la superficie definida a partir de datos LiDAR debieron respetarse y la superficie de batimetría no debió sobreponerse a los datos de información LiDAR. Únicamente debió rellenar información donde no existiesen valores.

El siguiente diagrama sintetiza las actividades para la elaboración del MDE ver Figura 3.1.

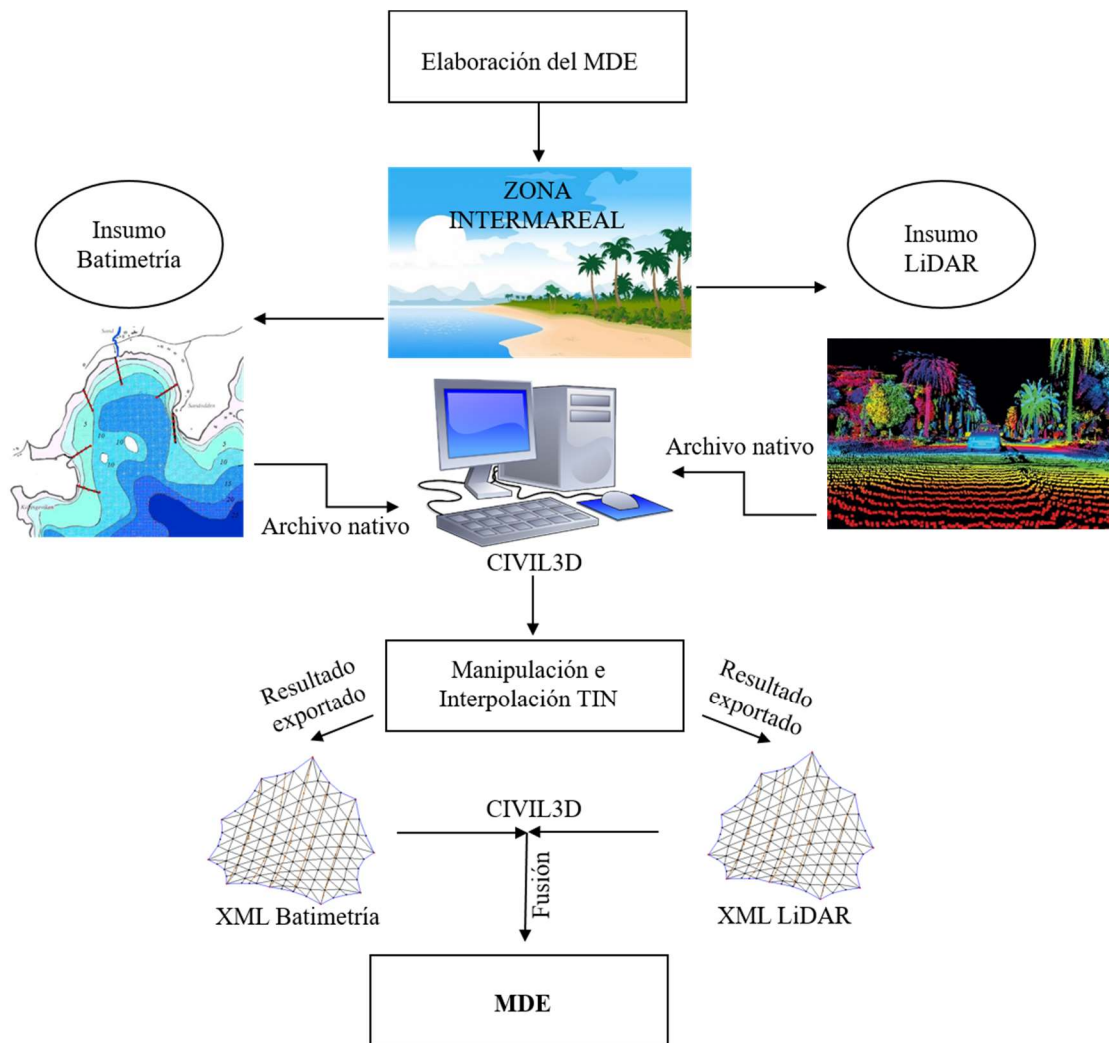


Figura 3.1 Diagrama de flujo de elaboración del MDE
Fuente: Elaboración propia.

3.5. Conversión de información del MDE a malla de valores

El modelo numérico de simulación de tsunamis necesitaba de una alta resolución espacial topográfica y batimétrica del sitio, para obtener resultados congruentes. Esa información se extrajo del MDE y se tabuló en un archivo que contuviera los datos de ubicación y elevación de la zona intermareal (coordenadas) en un archivo denominado para el presente proyecto de graduación como matriz de profundidades, la cual fue una malla de coordenadas que fragmentaba el MDE mediante una cuadrícula. Cuyo objetivo era caracterizar la geomorfología del fondo marino y el relieve del terreno por zonas.

La conversión de la información consistió en usar el MDE para producir nueva información, en Civil3D se creó una grilla de elementos vectoriales de puntos y se exportaron en formato de tabulación. Se indicó un punto de origen, un ángulo de rotación, una distancia de separación en eje “X” y “Y” e indicando un punto de finalización, el cual debió abarcar

toda el área de estudio y fijarse diagonalmente al punto de origen, de forma que el área establecida quedara homogéneamente cubierta.

Al realizarse la definición del espacio de trabajo, el software efectuó un algoritmo en el que automáticamente insertó puntos en sentido izquierda-derecha, de abajo hacia arriba, sobre el área que abarcó la superficie. El espaciamiento entre puntos se conformó con la distancia establecida y el sentido de inserción de puntos debido al ángulo de rotación fijado. El área de trabajo fue extensa, por lo que completar el proceso para establecer puntos conllevó muchas horas.

Los puntos tomaron las coordenadas originales sobre la cuadrícula, al realizarse por la opción de superficie, cada punto tomó el valor de la elevación que modeló la interpolación del software. En otras palabras, los puntos adquirieron los valores de coordenadas de Este, Norte y Elevación del sistema de referencia del MDE, el cual ya estaba ligado a los datos LiDAR y batimétricos.

3.6. Conversión de información del MDE a entidades vectoriales de líneas

Derivado del procedimiento de retroalimentación del que se hace mención en los objetivos del proyecto, al establecerse el MDE de la zona intermareal, también se extrajo su información a través de otro método diferente al descrito con la malla de valores, pero con el mismo objetivo de caracterizar la geomorfología del fondo marino y relieve del terreno.

Bajo el mismo concepto de producir datos nuevos a partir del MDE considerando mantener la alta resolución espacial y congruencia con la realidad, se planificó utilizar las curvas de nivel producidas por la interpolación generada con el TIN para aplicarse en la simulación de tsunamis como datos topográficos de entrada.

Del MDE se exportaron los “curvados” derivados de la interpolación producida por el software, los curvados correspondían a intervalos de isolíneas a cada un metro (1 m) en la parte próxima al perfil de playa y la parte que abarcaba los datos LiDAR. Y de intervalos a cada cinco metros (5 m) para la parte externa del Golfo, definidas conforme a los datos batimétricos. Seguidamente, a través de Arcmap se realizó la conversión del formato del archivo nativo al formato shapefile.

3.7. Adaptación de los datos topográficos para la simulación numérica de tsunamis

Para usar los datos topográficos en la simulación numérica de tsunamis, la malla de valores y las entidades vectoriales de líneas se les transformó el sistema de coordenadas planas de referencia. La manipulación implicó transformar desde la proyección oficial del país: CRTM05 a valores de coordenadas geodésicas de latitud y longitud en el elipsoide WGS 1984, ver Figura 3.2.

Para convertir las coordenadas de la malla de valores se utilizó una plantilla de transformación de coordenadas planas a geodésicas. La conversión del sistema CRTM05 al sistema de coordenadas geodésicas (latitud, longitud) de las entidades vectoriales de línea en formato shapefile se efectuó mediante las herramientas de proyecciones y transformaciones del software Arcmap.

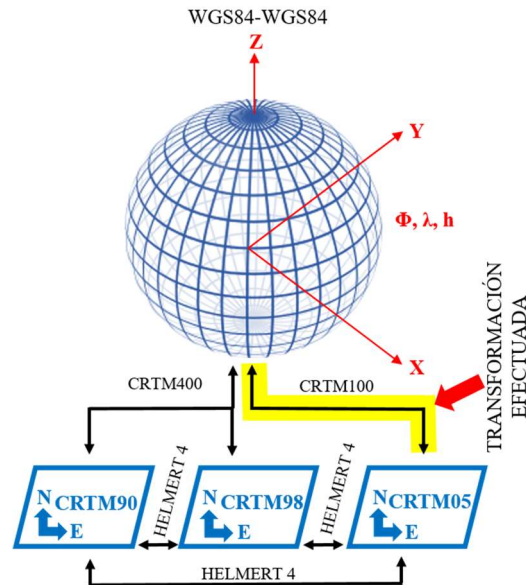


Figura 3.2 Transformación de los datos topográficos para la simulación numérica de tsunamis
Fuente: Elaboración propia.

El software para modelado numérico de inundación por tsunamis requería que los datos de entrada contuvieran las coordenadas en latitud, longitud, así como la profundidad/elevación, sin embargo el archivo de salida del MDE generado no era compatible con el archivo de entrada de ComMIT, para lo cual se debió realizar la conversión de los valores indicado.

3.8. Generación de un modelo numérico de simulación de tsunami

Para poder determinar las zonas de inundación de un posible tsunami y a partir de eso estimar el daño potencial, se empleó un modelo numérico de inundación por tsunami, considerada una de las técnicas más confiables para el estudio de estos fenómenos.

Para el Proyecto SIA 0569-13 en general y por consiguiente para la flecha litoral de Puntarenas se utilizó la técnica de simulación numérica desarrollada en Community Model Interface for Tsunami, (ComMIT, por sus siglas en inglés).

Respecto a ComMIT, es una interfaz diseñada en torno al Method Of Splitting Tsunamis (MOST), que es el modelo numérico de tsunamis desarrollado para los países del Océano Índico con el apoyo de UNESCO, el Organismo de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID, por sus siglas en inglés) y la Administración Nacional

Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) (CNE & UNA, 2014).

ComMIT ha sido escrito en el lenguaje de programación Java y se caracterizó por ofrecer una plataforma que mostró los resultados del modelo numérico mediante una interfaz gráfica de usuario. A partir de la información topográfica desarrollada en este proyecto de graduación, que fue aportada a los académicos del Proyecto SIA 0569-13 precisamente para llevar a cabo la simulación de tsunamis se definieron las denominadas mallas de batimetría, los parámetros sísmicos fueron fijos y se establecieron conforme al modelado numérico.

ComMIT proporcionó al Proyecto SIA 0569-13 un modelo numérico de tsunamis y su propagación, estimando una inundación a partir de información sobre la topografía del fondo del mar y la tierra; las condiciones iniciales y de límite, información específica sobre el intervalo de tiempo y la duración del modelo.

La conversión de valores del MDE descrita en el Punto 3.7 permitió establecer tres mallas anidadas de datos topográficos: una malla externa de baja resolución denominada “A”, una malla intermedia de resolución media denominada “B” y una malla interna de alta resolución denominada “C”.

Los parámetros del modelo conocidos como fuentes unitarias, fueron configurados por los académicos del Proyecto SIA 0569-13 en el software ComMIT definiendo el plano de la falla sísmica (origen de la fuente generadora) y la magnitud, elementos requeridos para provocar el tsunami que se deseó simular en la corrida del modelo, ver Figura 3.3.

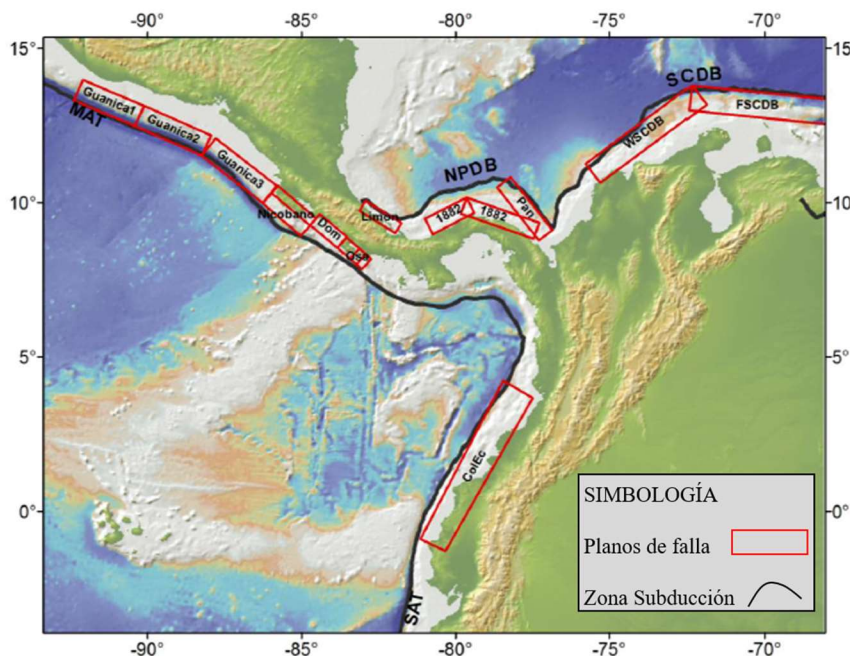


Figura 3.3 Ejemplos de planos de falla sísmica para la simulación numérica
Fuente: COI, (2018).

A partir de los parámetros definidos por académicos del Proyecto SIA 0569-13 y los datos topográficos generados se pudo ejecutar la simulación, a continuación se muestran algunos elementos de la interfaz empleada por ellos.

ComMIT primero simuló el tiempo de viaje (en horas) y la altura máxima del tsunami en todo el océano. Con la información que se desprendió de aquí se pudo discriminar entre las fuentes sísmicas con más incidencia para la flecha litoral de Puntarenas, ver Figura 3.4. El color representó la amplitud de onda máxima en metros y mostró cómo la energía del tsunami tendió a alejarse de la zona de subducción en forma de “dedos” y “lóbulos” extendiéndose de forma perpendicular a la ruptura.

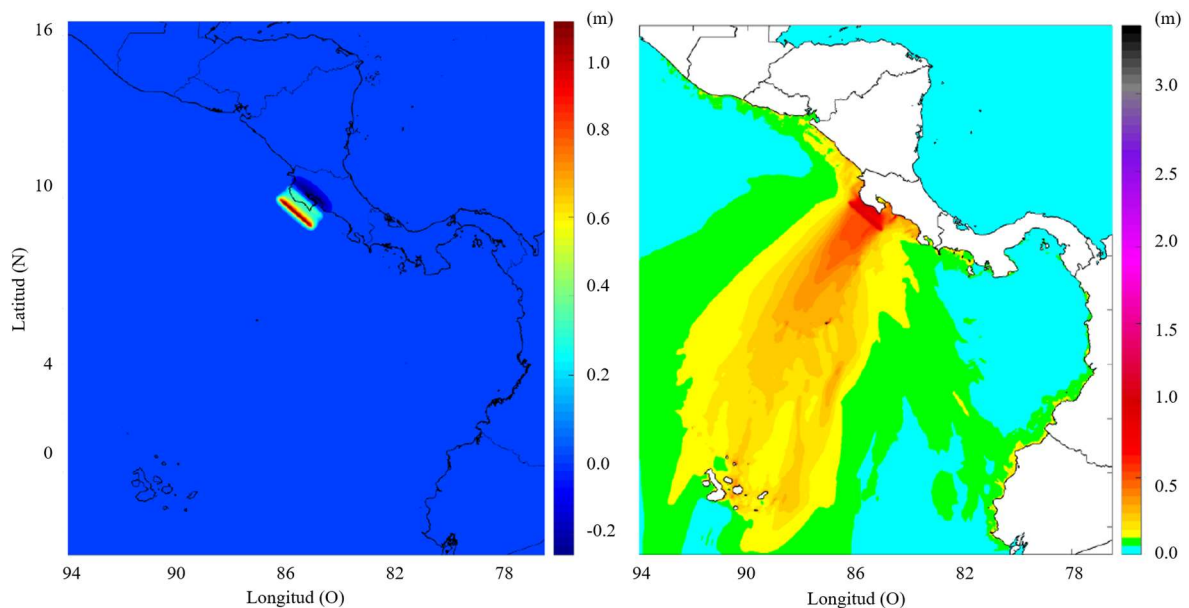


Figura 3.4 Condición inicial de la simulación de ComMIT
 Zona ruptura (izquierda), propagación de tsunami (derecha)
 Fuente: COI, (2018).

La Figura 3.4 involucra el segmento de Nicoya y Cóbano-Herradura, la extensión de la ruptura del terremoto de 1990 en la entrada del Golfo de Nicoya, con una longitud total de 180 km y Mw 8,0. Con el conocimiento técnico del plano de falla sísmica los académicos del Proyecto SIA 0569-13 pudieron interpretar el comportamiento de la ruptura (valores negativos representan hundimiento de la zona y positivas levantamiento) y que el tsunami posterior afectaría a Costa Rica y la costa sur de Nicaragua. De ahí se determinó el usar grillas más finas para estudiar el efecto de esta fuente dentro del golfo de Nicoya y la flecha litoral de Puntarenas (COI, 2018).

Los académicos del Proyecto SIA 0569-13 seguidamente obtuvieron la información elemental para confeccionar los mapas de evacuación requeridos para el proyecto, ya que ComMIT proporcionó los resultados de la amplitud del tsunami, la velocidad y la serie de

tiempo, mediante una secuencia de animación para cada fuente sísmica. El panel principal indicó la amplitud de onda sobre los contornos de la batimetría y topografía del fondo del mar (definidos por el MDE) en sombras de color rojo y azul en tonalidad clara y oscura. La profundidad y la amplitud de onda en la ubicación de la serie de tiempo se mostraron en la parte superior y sirvieron para determinar la amplitud de onda en un lugar e intervalo de tiempo determinado, ver Figura 3.5.

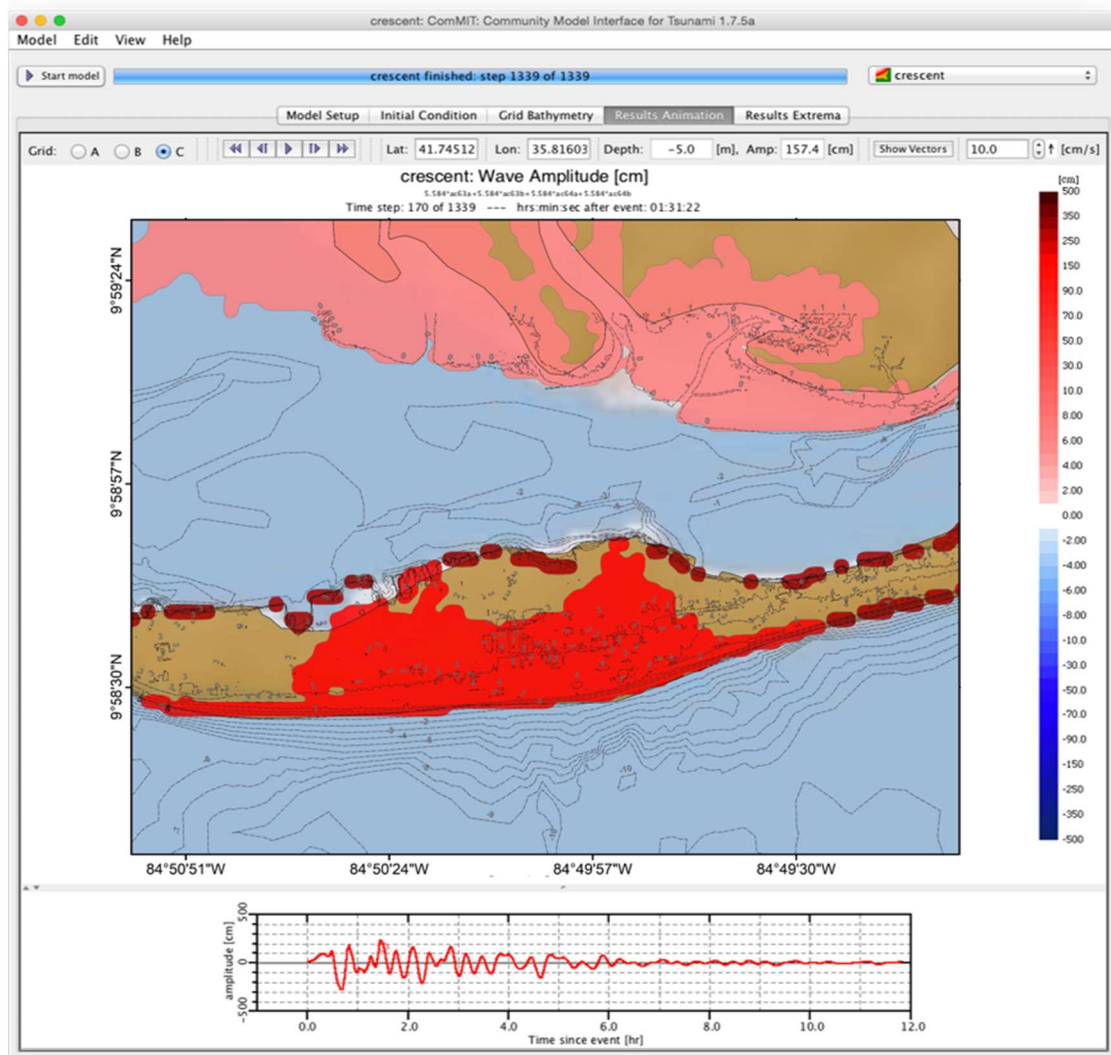


Figura 3.5 Animación de los resultados de la simulación de ComMIT

Fuente: NOAA, (2015).

3.9. Simulación de los tipos de tsunamis mediante modelado numérico

En el Proyecto SIA 0569-13 la información topográfica acompañada de los parámetros de las fuentes sísmicas se usaron como principales datos de entrada para la simulación en el modelo numérico. En la Figura 3.6, se observa gráficamente la definición

de algunos conceptos relacionados con tsunamis, además que el modelo numérico facilita describir y definir el límite de las zonas a inundarse y la altura máxima de la inundación.



Figura 3.6 Esquema de inundación de un tsunami en la costa

Fuente: COI, (2013).

Aunque la topografía de una costa pueda influenciar mayormente qué partes se inundarán en caso de tsunami, existen otros efectos como refracción y resonancia, que sólo pueden ser observados realizando simulaciones numéricas, y que justifican la realización de éstas como generadoras de conocimiento científico aplicado a la prevención de desastres.

Para este estudio, se simularon los tsunamis causados por 45 escenarios sísmicos (ver Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3 Clasificación de tsunamis simulados mediante el modelo numérico

Tipo Fuente	Cantidad tsunamis	Magnitud (Mw)	Clase tsunami
Ficticia	30	Hasta 9,3	Distante
Histórica	10	Entre 7,9 y 9,2	Distante y Regional
Local	5	Entre 7,6 y 8,5	Local

Fuente: Elaboración propia, a partir de la recopilación de datos de Convenio CNE-UNA, (2014).

Las fuentes se ratificaron con la reunión de expertos denominada “Riesgo de tsunamis en América Central: eventos históricos y fuentes potenciales” donde se identificaron las fuentes creíbles de tsunamis que podrían impactar significativamente las costas del Pacífico y el Caribe de América Central y que se podrían usar en el modelado de tsunamis, mapeo de evacuación, planificación y ejercicios (COI, 2018).

Capítulo 4: Resultados

Producto de la selección de un formato de archivo LiDAR apropiado y la combinación con datos batimétricos a través de un software apto para armonizar la información mediante una interpolación de los valores, se obtuvo un MDE y de él una malla de puntos con coordenadas tridimensionales, además de una capa vectorial de líneas con la elevación correspondiente, resultados principales de este proyecto.

Como punto y aparte se muestra el uso de esos resultados topográficos en la simulación numérica de tsunamis y se menciona acerca de la información preventiva a divulgarse a partir de este estudio geomorfológico de la zona intermareal.

4.1. Insumos de partida

Los insumos provienen de dos escenarios distintos, la tierra y el agua. LiDAR registró datos en la parte terrestre de la lengüeta de Puntarenas y batimetría en las profundidades de las aguas del Golfo de Nicoya.

4.1.1. Selección del dato LiDAR óptimo

El tipo de archivo LiDAR se seleccionó al comparar insumos de acuerdo a ventajas y desventajas de información, rápida manipulación, tamaño archivo base de información y funcionalidad para combinarse con fuentes de información de otra naturaleza. Según el siguiente cuadro comparativo (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1 Comparación entre las fuentes de información LiDAR disponibles

Tipo de Archivo	Ventajas para un MDE	Desventajas para un MDE	Manipulación/tamaño	Funcionalidad
LAS	-Información de carácter crudo. -Mayor densidad de información por área. -Formato vectorial de los valores topográficos.	-Información no clasificada. -No facilita establecer un MDE pues considera todas las elevaciones donde LiDAR registró datos. -Complejidad para extraer información útil.	-Manipulación compleja, debido a su densidad. -Tamaño promedio de archivo: 23,5 Mb -Formato de lectura compatible con software de creación de MDE y lectura en SIG.	-Es apto pues contiene la misma referencia espacial para sistema de coordenadas que los datos batimétricos.

Tipo de Archivo	Ventajas para un MDE	Desventajas para un MDE	Manipulación/tamaño	Funcionalidad
DTM	-Información clasificada. -Formato vectorial de los valores topográficos. -Se considera elevaciones únicamente referidas al terreno. -Tamaño de archivos reducido.	-Menor densidad de información por área. -Información con una manipulación previa.	-Manipulación apta debido a su clasificación. -Tamaño promedio de archivo: 5,5 Mb. -Formato de lectura compatible con software de creación del MDE y lectura en SIG.	-Es apto pues contiene la misma referencia espacial para sistema de coordenadas que los datos batimétricos.
DSM	-Tamaño de archivos reducido. -Formato vectorial para valores topográficos (puntos).	-Información clasificada pero no apta para un MDE. -Valores de elevación no correspondientes solo al terreno natural. -Menor densidad de información por área.	-Manipulación apta debido a su clasificación. -Tamaño promedio de archivo: 5,4 Mb. -Formato de lectura compatible con software de creación del MDE y lectura en SIG.	-Es apto pues contiene la misma referencia espacial para sistema de coordenadas que los datos batimétricos.

Tipo de Archivo	Ventajas para un MDE	Desventajas para un MDE	Manipulación/Tamaño	Funcionalidad
ECW		-Información de tipo raster. -Datos no contienen información sobre elevaciones. -No se facilita establecer un MDE pues su formato ha sido concebido para fines cartográficos.	-Manipulación apta debido a su clasificación y tamaño. -Tamaño promedio de archivo: 3,3 Kb. -Formato de lectura compatible con software de creación del MDE y lectura en SIG.	-Es apto pues contiene la misma referencia espacial para sistema de coordenadas que los datos batimétricos.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la información del Cuadro 4.1 dos fuentes de información ofrecieron más insumos favorables y presentan menos desventajas, por lo tanto ofrecieron más variables para optar por seleccionarse para elaborar el MDE, los Gráfico 4.1 y Gráfico 4.2 ilustran mediante datos estadísticos los resultados.

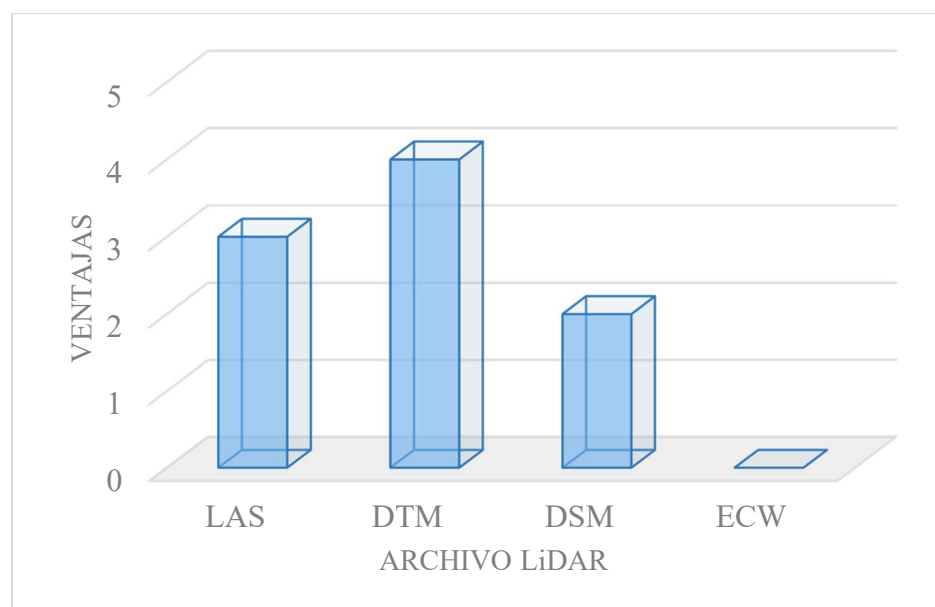


Gráfico 4.1 Comparación de ventajas entre fuentes LiDAR según Cuadro 4.1

Fuente: Elaboración propia.

El formato DSM (*Digital Surface Model*) y el formato ECW (*Enhanced Compression Wavelet*) se descartaron emplear debido a que no ofrecían ventajas según los objetivos proyectados. El formato LAS (*LASer*) ofreció más ventajas en cuanto a fuente de información (ya que son el formato estándar), sin embargo integralmente no fue la mejor opción para el enfoque deseado, ya que la información debería manipularse antes de poderse aplicar.

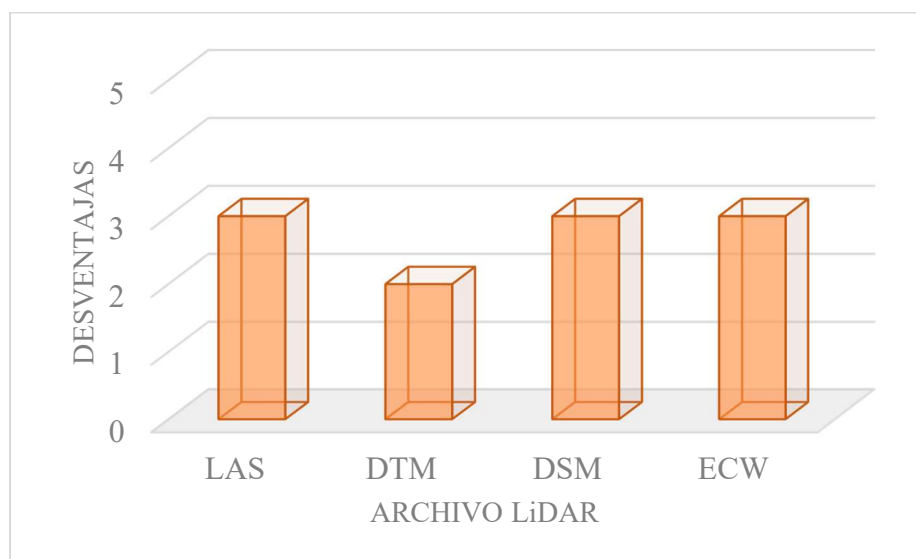


Gráfico 4.2 Comparación de desventajas entre fuentes LiDAR según Cuadro 4.1

Fuente: Elaboración propia.

El formato DTM (*Digital Terrain Model*) fue el que se aplicó en el presente proyecto de graduación para realizar la combinación con la fuente batimétrica y su correspondiente fusión de datos a través de un MDE.

Posterior a la comparación entre insumos se determinó que todos los archivos de la medición LiDAR emplearon los siguientes sistemas de referencia espacial (ver Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2 Referencia espacial de datos LiDAR

Fuente Información	Coordenadas planimétricas	Elevaciones
Archivos LiDAR	Referidas a la proyección CRTM05.	Cero altimétrico referido Datum Vertical Global.
	Elipsoide WGS84.	Modelo Geoide EGM2008.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos DTM se limitaron posterior a la elección para poder establecer el MDE, ya que en la contratación de la CNE se abarcó gran parte del litoral Pacífico Central de Costa Rica, en la Figura 4.1 se puede observar la extensión cubierta de los datos pertenecientes al Proyecto SIA 0569-13.

El conjunto de archivos DTM estuvo almacenado en un directorio específico establecido de la siguiente manera:

- Dirección de almacenaje: Puntarenas LiDAR\02_VUELO_LIDAR\DTM
- En ese directorio se encontraban guardados 507 archivos en formato ASC File (.asc)
- Como se indica en el Cuadro 4.3 los archivos DTM tenían un tamaño promedio de 5.5Mb, conjuntamente la carpeta poseía un tamaño de 285000 Mb o 2,85 Gb.
- Cada archivo se denominó: 000001.asc, 000002.asc, donde el último dígito aumentaba consecutivamente y en forma ascendente un valor hasta el archivo 000507.asc.
- Para poder limitar los archivos a usarse, se debió desplegar la información en una plataforma SIG.

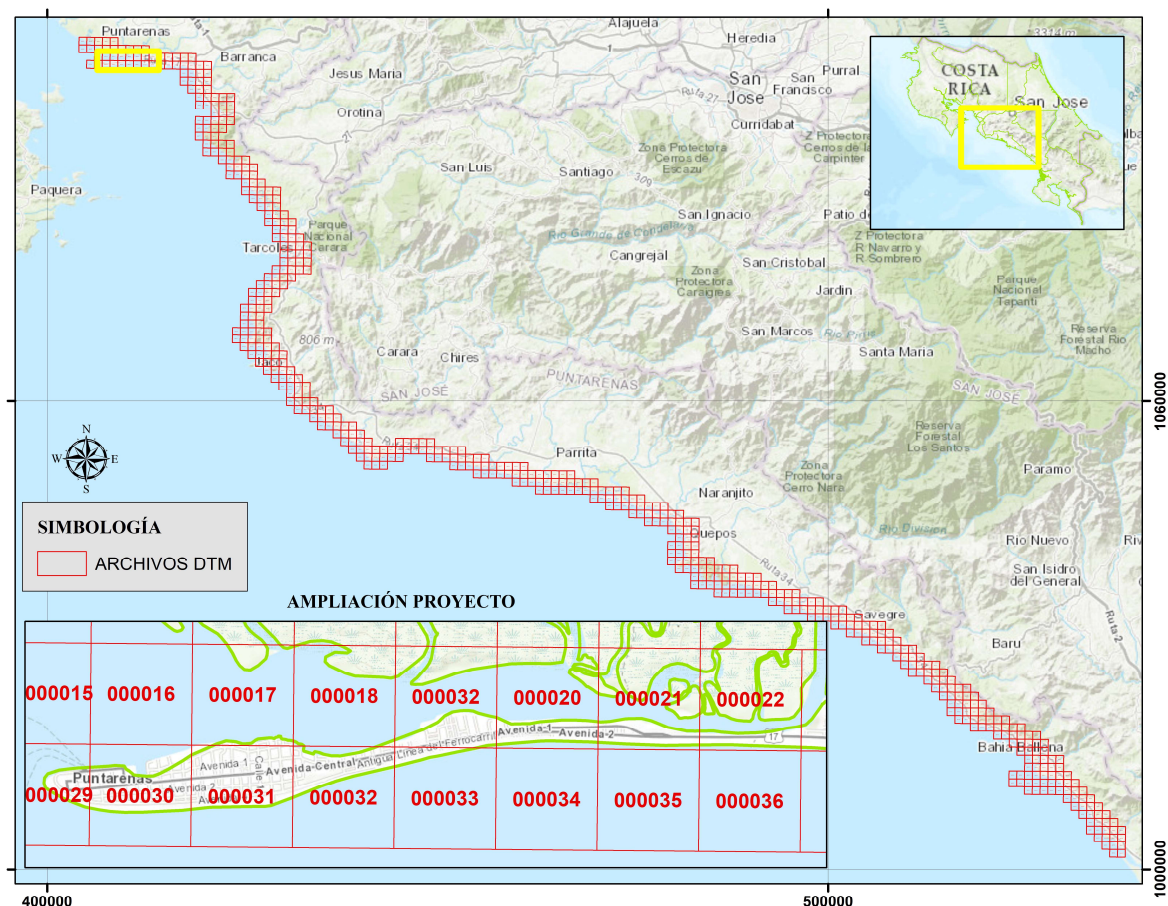


Figura 4.1 Extensión de archivos DTM del Proyecto SIA 0569-13

Fuente: Elaboración propia, a partir de Arcmap®.

Mediante una plataforma SIG se determinó que los archivos que abarcaban la fecha litoral de Puntarenas correspondían de acuerdo a lo indicado en el Cuadro 4.3.

Cuadro 4.3 Archivos DTM utilizados para crear el MDE

Archivo DTM	Tamaño (Kb)
000016.asc	5790
000017.asc	5583
000018.asc	5403
000019.asc	5328
000020.asc	5412
000021.asc	5222
000022.asc	5082
000023.asc	5061
000033.asc	5874
000032.asc	5632
000031.asc	5299
000030.asc	5410
000029.asc	5819

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Selección del dato batimétrico óptimo

Los insumos de la información batimétrica se recopilieron y almacenaron en dos directorios. El primero se denominó CR006 relacionado a la carta de navegación Golfo de Nicoya a escala 1:100.000, Edición 1 agosto 1984. El segundo se denominó CR003 y compuesto de la carta de navegación Puntarenas a escala 1:12.500, Edición 20 marzo 1976 (CNE & UNA, 2014). El tipo de archivo usado a partir de los directorios se derivó de la comparación de insumos del siguiente cuadro comparativo (ver Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4 Comparación entre las fuentes de información batimétrica disponibles

Tipo de Archivo	Ventajas para un MDE	Desventajas para un MDE	Manipulación /tamaño	Funcionalidad
COSTA. DAT	-Contiene georeferenciada y la localización de la línea de la costa en dirección Oeste-Este. -Formato vectorial para valores topográficos (líneas).	-Se asignó la profundidad cero a la línea de costa. -No contiene más datos en formato vectorial para definir elevaciones del fondo acuático.	-Formato de lectura compatible con software de creación del MDE y lectura en SIG. -Tamaño promedio de archivo: 97 Kb.	-No es apto pues archivo contiene coordenadas geodésicas (latitud, longitud) para la localización de la costa.

Tipo de Archivo	Ventajas para un MDE	Desventajas para un MDE	Manipulación /tamaño	Funcionalidad
SONDAS. DAT	-Contiene datos que determinaron la localización de cada una de las profundidades indicadas en la carta. -Los valores de profundidad se encuentran georeferenciados. -Formato vectorial (puntos) y tabulados (.XLS) para los valores topográficos. -Tamaño de archivos reducido.	-Datos heterogéneamente distribuidos: más densos en la parte cercana a la costa y más reducidos en la parte media del Golfo de Nicoya.	-Formato de lectura compatible con software de creación del MDE y lectura en SIG. -Tamaño del archivo: 201 Kb.	-Es apto pues contiene la misma referencia espacial para sistema de coordenadas que los datos LiDAR.
ISLAS. DAT		-Es un archivo digital con un contorno de las islas del Golfo Nicoya. -Se asignó la profundidad cero al contorno de islas. -No contiene datos en formato vectorial para definir elevaciones del fondo acuático.	-Formato de lectura compatible con software de creación del MDE y lectura en SIG. -Tamaño del archivo: 5 Kb.	-No es apto pues archivo contiene coordenadas geodésicas (latitud, longitud) para la localización de las islas.

Fuente: Elaboración propia.

El Gráfico 4.3 ilustra mediante datos estadísticos los resultados tras comparar las ventajas y desventajas para los insumos de información batimétrica.

El formato SONDAS.DAT fue el que se aplicó en el presente proyecto de graduación para realizar la combinación con la fuente LiDAR, ver Figura 4.2.

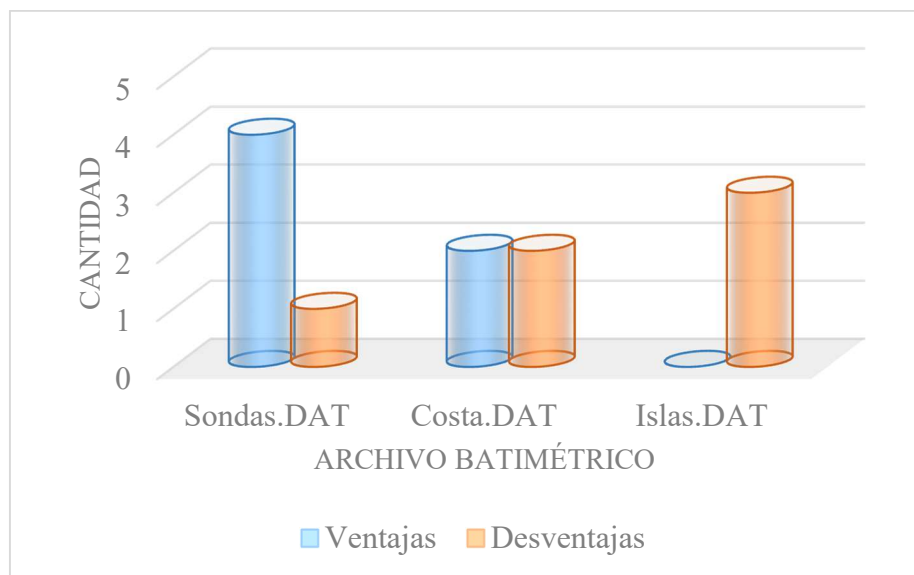


Gráfico 4.3 Comparación de ventajas y desventajas entre fuentes batimétricas según Cuadro 4.4

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al archivo SONDAS.DAT y las características citadas en el Cuadro 4.4; cumplió idealmente para usarse en la construcción del MDE. Ya que es un archivo con un tamaño pequeño de almacenaje, es un formato estandarizado, lo que indica que puede ser leído por múltiples software de diseño o plataformas SIG.

Posterior a la comparación entre insumos se determinó que todos los archivos de batimetría emplearon los siguientes sistemas de referencia espacial, ver Cuadro 4.5.

Cuadro 4.5 Referencia espacial de datos batimétricos

Fuente información	Coordenadas planimétricas	Elevaciones
Archivo SONDAS.DAT	Referidas a la proyección CRTM05. Elipsoide WGS84.	Cero altimétrico referido Datum Vertical local. Elevaciones referidas al nivel medio del mar.

Fuente: Elaboración propia.

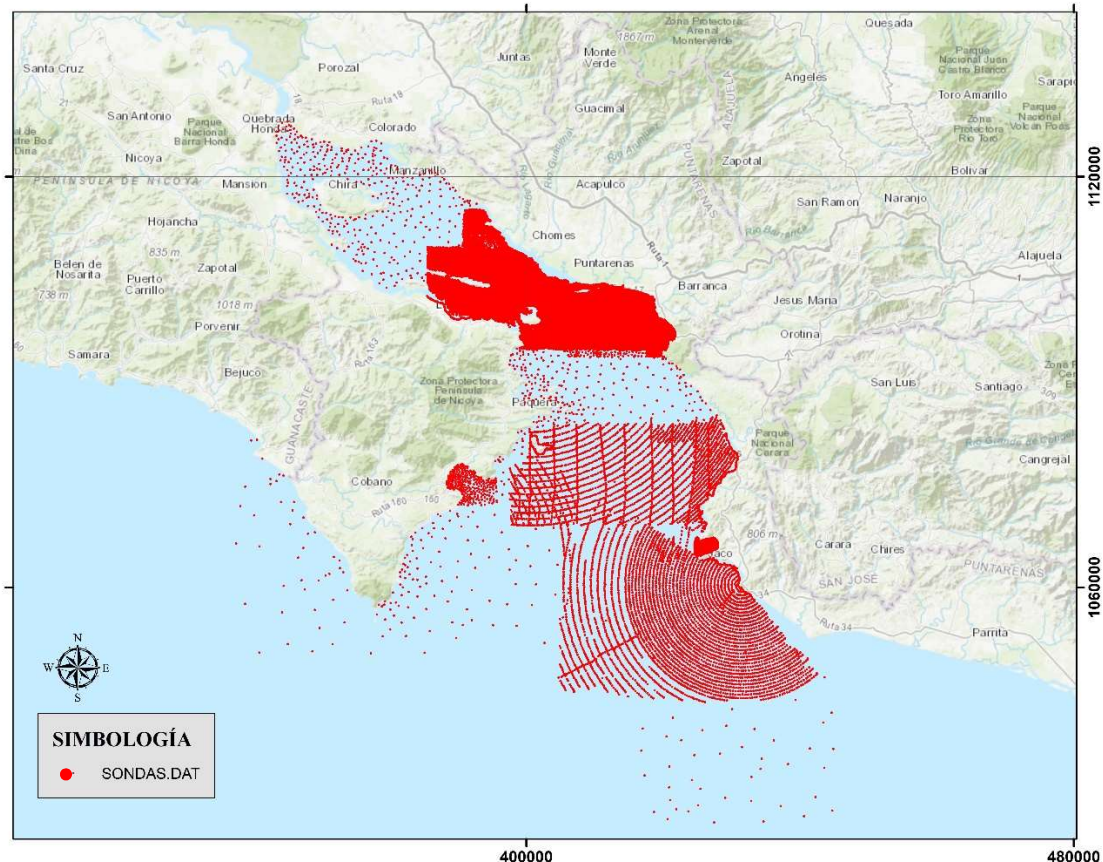


Figura 4.2 Extensión de archivos SONDAS.DAT

Fuente: Elaboración propia, a partir de Arcmap®.

4.2. Investigación de exactitudes de datos batimétricos

Se efectuó el estudio de la carta náutica de Puntarenas a escala 1:12.500. La carta presentó sondeos de 0 m a 20 m cada 0,1 m, de 21 m a 30 m cada 0,5 m y en adelante a cada metro, ver Figura 4.3. Los sondeos fueron reducidos al nivel promedio de bajamares de sicigias para seguridad de la navegación marítima.

Las sicigias suceden cuando la Luna o la Tierra se ubican en medio formando una alineación de los astros con el Sol, correspondientes con las fases de luna llena y nueva, ocasionando una ausencia de mareas y el nivel más bajo del mar. Para obtener la elevación referida al nivel medio del mar a cada valor del archivo SONDAS.DAT se le debió sumar el valor promedio de bajamares según lo indicado en el Cuadro 4.6.

De acuerdo a las mediciones registradas por el mareógrafo de Puntarenas, las medias de pleamar (marea máxima ocasionada por la subida del nivel del agua, llegando más allá de la rivera normal) y de bajamar correspondieron a 2,80 m, de forma generalizada (Lizano O., 2010). Con dicho valor se determinó la amplitud del mar y por consiguiente el nivel medio del mar al dividir esos 2,80 m entre 2, conformando el grado cero de la amplitud del mar

mediante el factor de corrección de 1,40 m, el cual se sumó a cada sondeo de la carta náutica para obtener las elevaciones referidas al nivel medio del mar del archivo SONDAS.DAT, ver Figura 4.4.

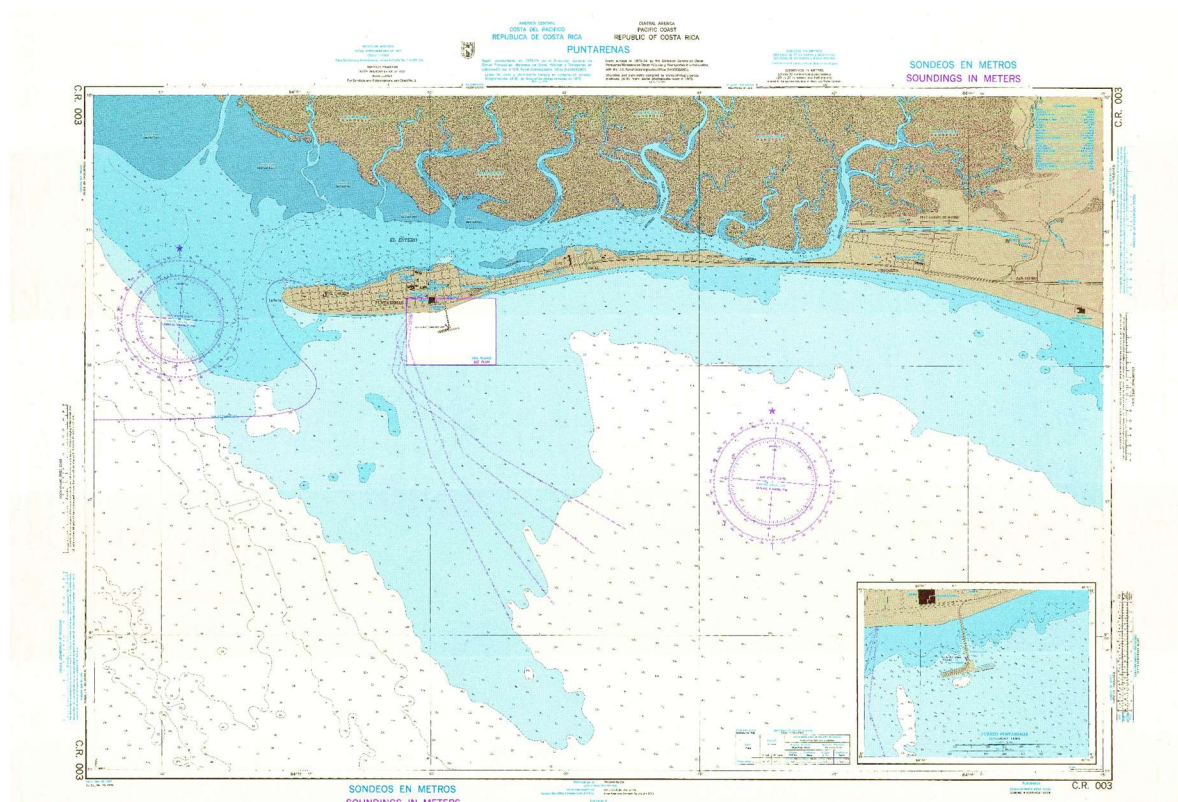


Figura 4.3 Carta náutica Puntarenas a escala 1:12.500

Fuente: IGN, (1976).

Cuadro 4.6 Niveles de referencia para la batimetría

Año	Descripción
1941	El Instituto Carnegie establece los mareógrafos de Puntarenas y Limón.
1946	El IGN y El Servicio Geodésico Interamericano (IAGS, por sus siglas en inglés) empezaron a establecer Red Vertical de Costa Rica.
1951	Se definió el Datum vertical de Costa Rica, en el mareógrafo de Puntarenas.
1956	Se estableció la línea nivelación Puntarenas-Barranca.
1967	El IAGS efectuó un ajuste de los valores para que el datum vertical coincidiera con el nivel medio del mar.
1974	Se efectuó el levantamiento de la carta náutica Puntarenas a escala 1:12,500, con valores reducidos al nivel promedio de bajamares de sicigias.
2006	Investigaciones oceanógrafo Dr. Omar Lizano corroboran que el nivel medio del mar en Puntarenas, esta 1,40 m más arriba del promedio de bajamares de sicigias.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Lizano O. , 2010), (IAGS, 1970), (IGN, 2013).

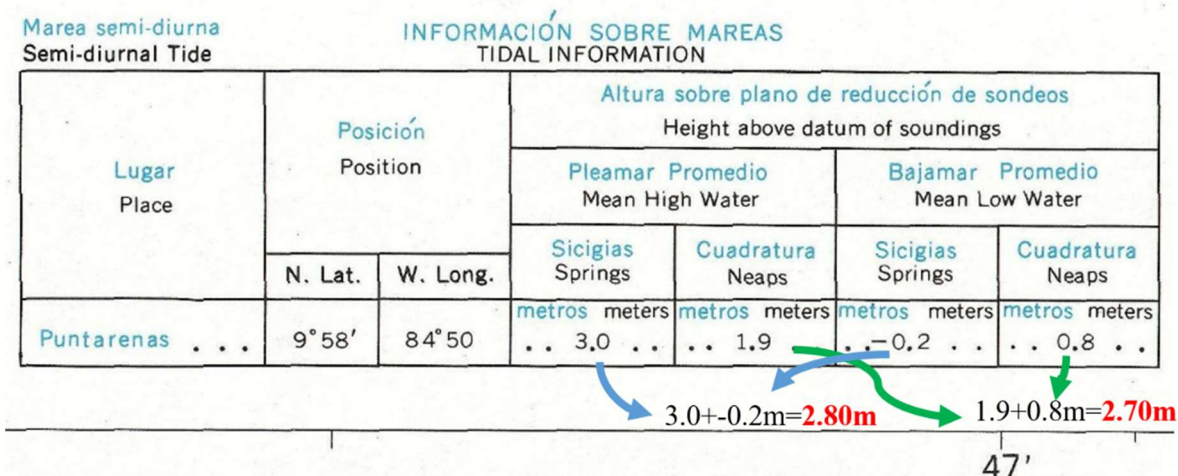


Figura 4.4 Medias de pleamar y bajamar de la carta náutica Puntarenas a escala 1:12.500

Fuente: IGN, (1976).

4.3. Investigación de exactitudes de datos LiDAR

La determinación de exactitudes se efectuó mediante indagaciones a diferentes actores involucrados con la contratación directa 2012CD-000164-00200 Captura de datos en la franja costera entre Puntarenas y el Parque Marino Ballena y desembocadura del Río Pirris – Parrita.

La contratación tuvo el objetivo de ofrecer estudios espaciales que ofrecieran información muy precisa del terreno, tanto sobre zonas inundables, como propensas a deslizamientos. Y de esta manera poder iniciar procesos de gestión del riesgo, que incluyeran limitaciones en el uso del suelo, detección de amenazas, desarrollo de sistemas de alerta temprana, entre otros.

En la información de la licitación se estableció un control de calidad de los datos LiDAR, el cual se cumplió y respetó, pues en el presente proyecto de graduación se emplean los resultados recibidos y aprobados bajo esos estándares.

Según la licitación 2012CD-000164-00200 el control de calidad se efectuó en tres fases diferentes, previo a la aprobación de los datos usados en este proyecto, ver Cuadro 4.7.

Cuadro 4.7 Control de calidad de datos LiDAR

Control	Tipo de Control	Descripción
1	Control de calidad en el cálculo de la trayectoria.	Estadísticamente se mostró la estimación del valor de la precisión en el cálculo DGPS y la estimación del valor de la precisión en el cálculo del sistema GPS + INS.

Control	Tipo de Control	Descripción
2	Control relativo entre líneas de vuelo.	A partir de las pasadas 1 y 2 del vuelo se analizó el valor de la diferencia de cota entre pasadas contiguas asegurando que no se superara la tolerancia fijada en 0,15 m. Así definiendo un modelo de elevación coherente.
3	Control Absoluto.	Se realizó un control absoluto de toda la zona, mediante una comparación con puntos de cota o cartografía disponible.

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Comprobaciones teóricas realizadas a valores de la elevación

Se utilizaron los datos DTM y se compararon con elevaciones de los BM de la línea de nivelación de primer orden de Costa Rica denominada Puntarenas-Barranca (sin efectuar nuevas mediciones). La línea de nivelación perteneció a una publicación del IGN, la correspondiente medición se efectuó entre febrero y julio de 1967, ver Figura 4.5.

Distancia real existente entre dos BM				Lectura de "espalda y frente"				Factor de corrección o ajuste al valor observado			
1 of 1											
LINE						ORDER FIRST		COMPUTATION OF LEVELS (TM 2-227)			
PROJECT PUNTARENAS to BARRANCA						ORGANIZATION		CLOSURE (METERS) (FEET)			
16.E.31											
LOCATION Costa Rica						LENGTH OF LINE (KMS.) (MILES)		CORRECTION PER (KM.) (MILE)			
								Link 31' + 0.076 082 779			
SECTION	LENGTH km	DIST. FROM B.M. Tibm 7, m. km.	F B	Observed DIFFERENCE feet meters	Ortho. and Corr. DIFF. meters	MEAN DIFFERENCE	B. M.	ORTHOMETRIC OBS. ELEV. feet meters	CORR. meters	ADJ. ELEV. feet meters	REMARKS
Tibm 7							Tibm 7			3.9411	
Tibm P-1	0.86			- 0.3734			Tibm P-1			3.5677	
Tibm CF-6	0.37			- 0.3674			Tibm CF-6			3.2003	
Tibm CF-5	0.27			+ 1.3146			Tibm CF-5			4.5149	
Tibm CF-2	0.27			- 0.8066			Tibm CF-2			3.7083	
Tibm CF-1	0.01			+ 0.0578			Tibm CF-1			3.7661	
7-A-8	0.06	0.06		+ 0.1665			7-A-8	4.1076	+ 0.0	4.1076	
B-1	1.38	1.44		- 1.1620			B-1	2.9456	+ 0.1	2.9457	
B-2	1.60	3.04		+ 1.3888			B-2	4.3344	+ 0.3	4.3347	
B-3	1.90	4.94		- 1.1362			B-3	3.1982	+ 0.5	3.1987	
B-4	0.86	5.80		- 0.4310			B-4	2.7672	+ 0.6	2.7678	
9-A-10	1.18	6.98		+ 0.8001			9-A-10	3.5673	+ 0.7	3.5680	
B-5	0.78	7.76		- 0.3067			B-5	3.2606	+ 0.7	3.2613	
10	1.85	9.61		+ 1.5590			10	4.8196	+ 0.9	4.8205	
10-A-11	1.69	11.30		+ 6.1008			10-A-11	10.9204	+ 1.1	10.9215	
11	2.23	13.53		+ 16.7508			11	27.6712	+ 1.3	27.6725	Sum of BM 16.35 16.41 16.118
COMPUTED BY				DATE		CHECKED BY		DATE			
Nombre de cada BM				Distancia que existente entre el nodo o primer vértice de la línea de nivelación y un BM en específico		Valor de elevación determinada en campo		Valor real y publicado de elevación		15	

Figura 4.5 Línea de nivelación Puntarenas-Barranca

Fuente: IGN, (1967).

Para estimar la posición de cada BM se usaron las fichas de información de la línea, se ubicaron acorde al croquis y a los valores de las columnas Length y Dist From en Arcmap, tomando como sistema de referencia el usado por los archivos LiDAR, ver Figura 4.6.

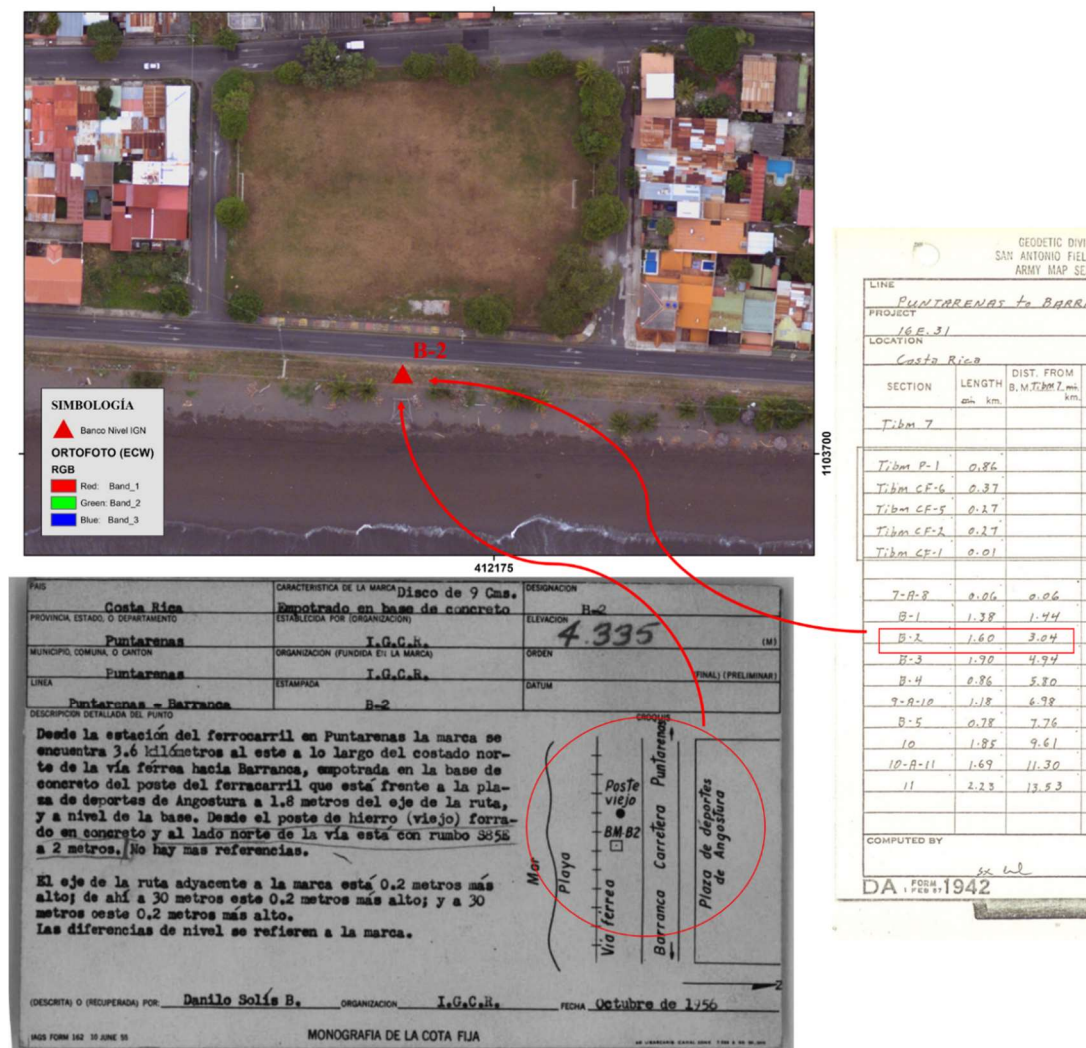


Figura 4.6 Método para ubicar los BM en el sistema de coordenadas de LiDAR

Fuente: IGN, (1967) y elaboración propia, a partir de Arcmap®.

Con los archivos DTM y ECW entregados al proyecto y la posición estimada del BM se logró determinar una cantidad “n” de observaciones con elevaciones equivalentes para el área donde debió ubicarse, de acuerdo a la ubicación en el archivo DTM LiDAR (ver Figura 4.7).

Se determinaron las diferencias al cuadrado entre cada observación y la elevación del BM, con la cantidad de observaciones se estimó el promedio de las diferencias para el conjunto de observaciones y el error medio cuadrático (EMC) del promedio, mediante una propagación de errores, utilizando una elevación teórica con los BM, ver Gráfico 4.4, Gráfico 4.5 y Cuadro 4.8.

Cuadro 4.8 Comparación entre valores de elevaciones LiDAR y nivelación directa

Nom. BM	Elev. de la marca (m)	Descripción	Corrección para referir nivel al terreno (m)	Elev. referida al terreno (m)	Elev. Promedio de DTM	Dif. (m)	EMC (m)
7	3,9411	*	0,0	3,9411	4,35	0,41	0,17
P-1	3,5677	Empotrada en kiosco parque bajo techo, parque sobresale 1.5m del terreno.	-1,5	2,0677	2,65	0,58	0,26
6	3,2003	*	0,0	3,2003	3,53	0,33	0,19
5	4,5149	Empotrada en malecón, sobresale 1.20m del terreno.	-1,2	3,3149	3,84	0,52	0,23
2	3,7083	*	0,0	3,7083	4,07	0,36	0,16
1	3,7661	*	0,0	3,7661	4,03	0,27	0,10
7-A-8	4,1076	*	0,0	4,1076	4,16	0,05	0,03
B-1	2,9457	*	0,0	2,9457	2,88	0,07	0,04
B-2	4,3347	*	0,0	4,3347	4,45	0,12	0,07
B-3	3,1987	Empotrada en cortina de concreto destruida que servía de protección a torre eléctrica, sobresalía 0.3m del terreno.	-0,3	2,8987	2,79	0,11	0,06
B-4	2,7678	*	0,0	2,7678	3,04	0,27	0,16
9A10	Fuera área estudio.						
B-5							
10							
10A11							
11							

Fuente: Elaboración propia.

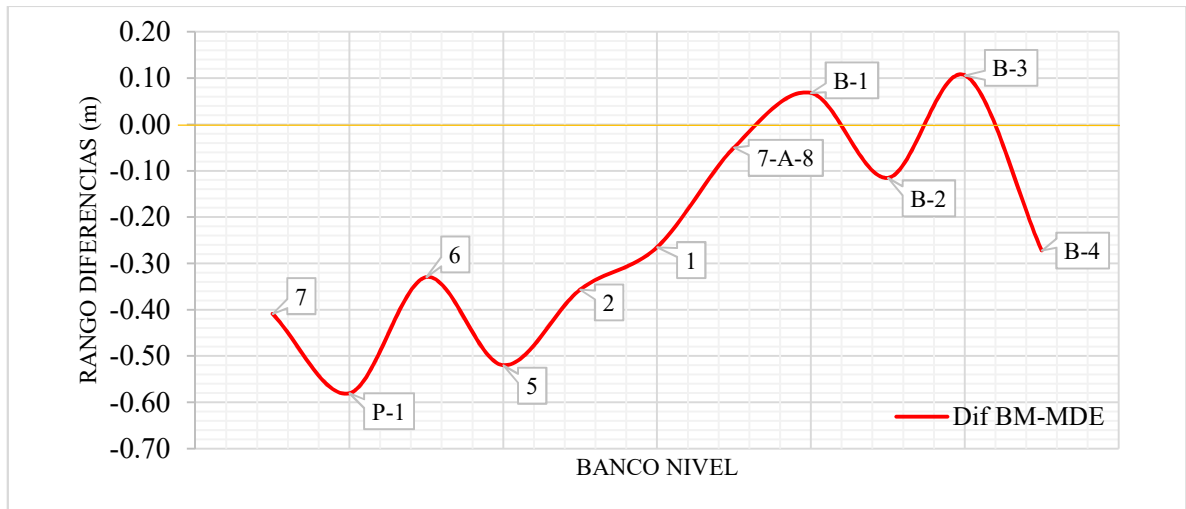


Gráfico 4.4 Comparación entre diferencias de valores de elevaciones LiDAR y elevaciones de nivelación directa publicada por el IGN

Fuente: Elaboración propia.

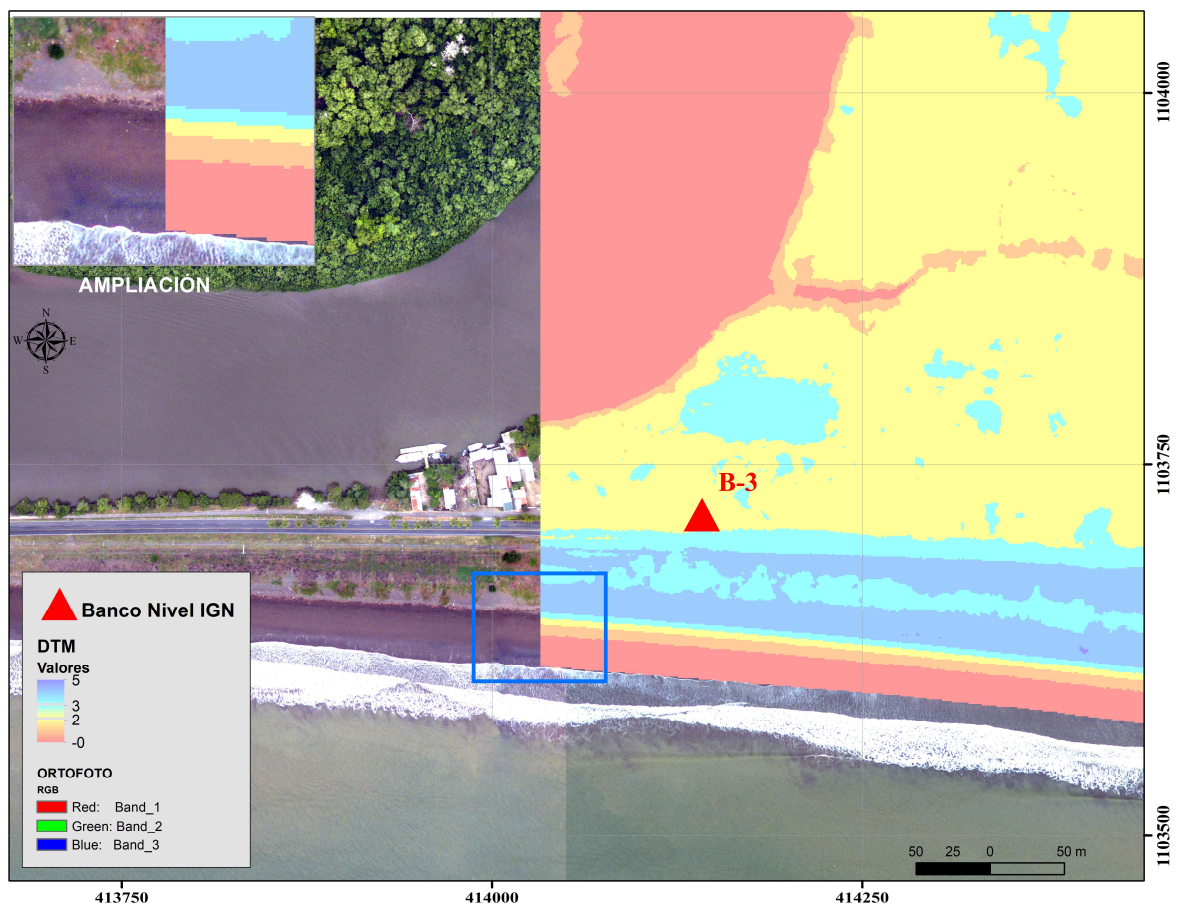


Figura 4.7 Método para extraer valores del archivo DTM y compararlos con BM

Fuente: Elaboración propia, a partir de Arcmap®.

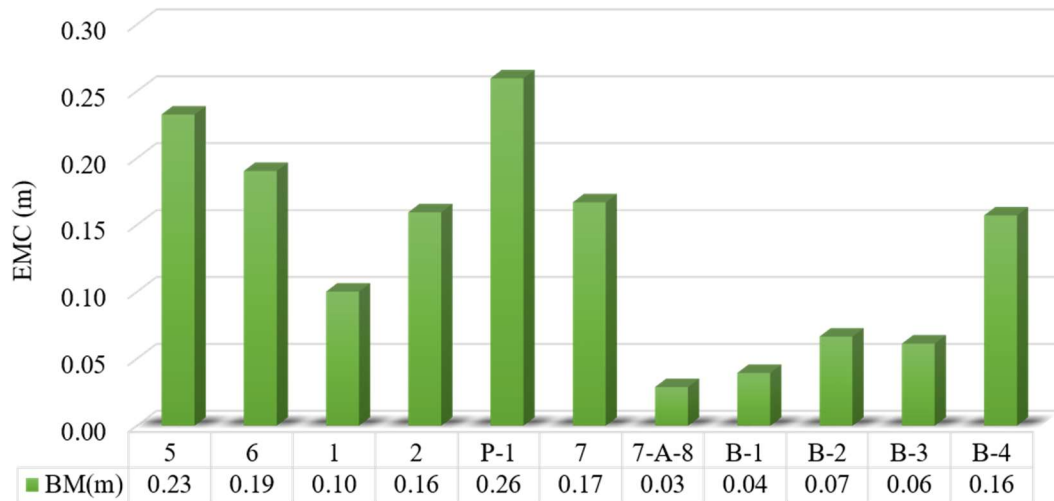


Gráfico 4.5 Comparación de EMC obtenidos de valores de elevaciones LiDAR y elevaciones de nivelación directa

Fuente: Elaboración propia, a partir de Google Earth®.

4.5. Manipulación de datos DTM para establecer el MDE

EL MDE se construyó con el software Civil3D versión 2016, la construcción se hizo por etapas, iniciando con la incorporación de los datos terrestres individualmente.

Cada uno de los archivos mencionados en el Cuadro 4.3 se insertaron en Civil3D, mediante una visualización por rango de elevaciones. Los estilos se pueden definir para varias opciones y en la Figura 4.8 se muestra otros estilos disponibles.

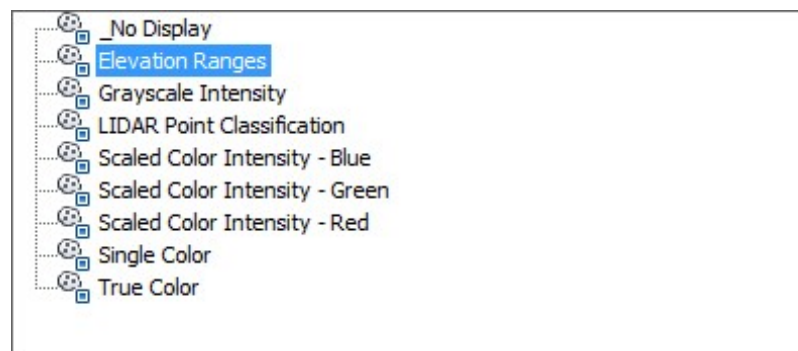


Figura 4.8 Estilos de visualización para los archivos DTM en Civil3D

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

Se fijó y trabajó con una cantidad de siete rangos específicos para los intervalos de elevación debido a la necesidad de visualizar con detalle la topografía plana del sitio (ver Figura 4.9).

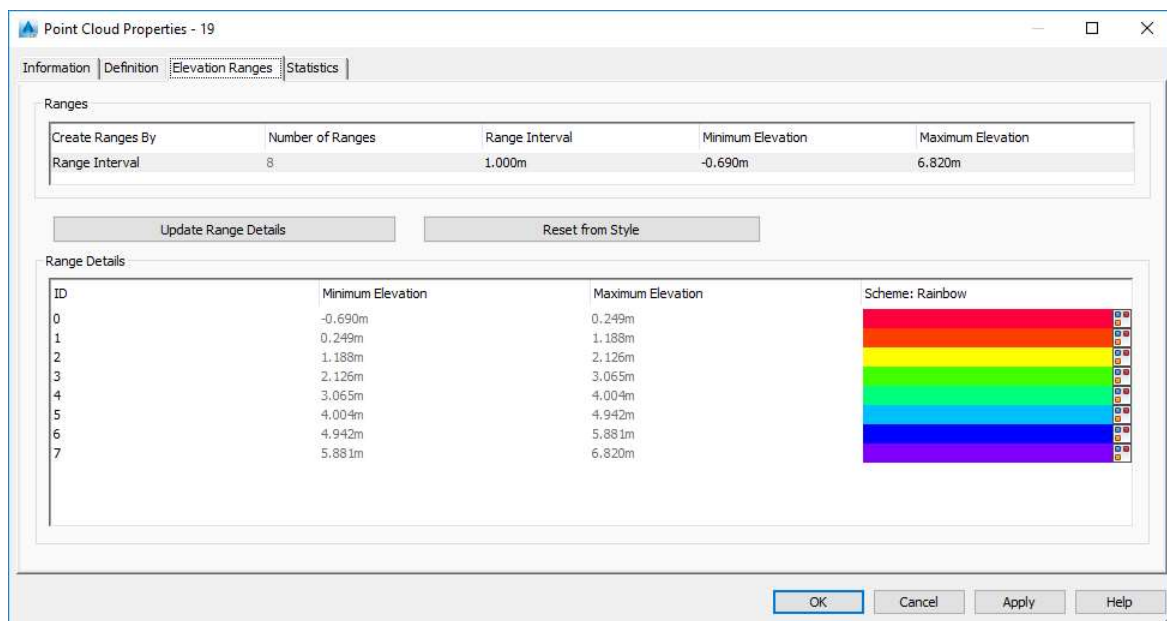


Figura 4.9 Visualización por rango de elevación para los archivos DTM en Civil3D

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

En la Figura 4.9 se detallan los datos configurados para poder visualizar los rangos de elevación, en la pestaña Información de la Interfaz se especificó datos básicos en relación al archivo, en ese lugar no se completó información. En Definición “por defecto” se indicaron los datos de sistema de referencia usado en el archivo y dibujo, además de la dirección donde se ubicó el archivo que definió la nube de puntos. En Rangos de Elevación, se establecieron los intervalos de elevación mencionados. La pestaña Estadísticas de la interfaz brindó información numérica de la nube de puntos, ya sea el número máximo de puntos, las coordenadas mínima y máxima, además de la elevación mínima y máxima.

Para cada uno de los archivos insertados se procedió de esa forma, es decir insertando el archivo ASC FILE (.asc) a través de las opciones de nubes de puntos del menú de Puntos y visualizándolo por rangos de elevación en el espacio de dibujo para facilitar el proceso de interpolación y creación del MDE.

Los rangos que determinó el software (ilustrado mediante la Figura 4.10) permitieron interpretar a partir de datos de elevación como está compuesta geomorfológicamente la zona, el color predominante fue el rojo, indicando elevaciones de valor cero, consecuentemente relacionados con los cuerpos de agua. Los valores en color azul mostraron los puntos con mayor elevación, ubicándose en la carretera principal que da acceso a la ciudad. A su vez

entre los valores de 2 m a 3 m (rango intermedio y colores verdes) se localizaron las construcciones.

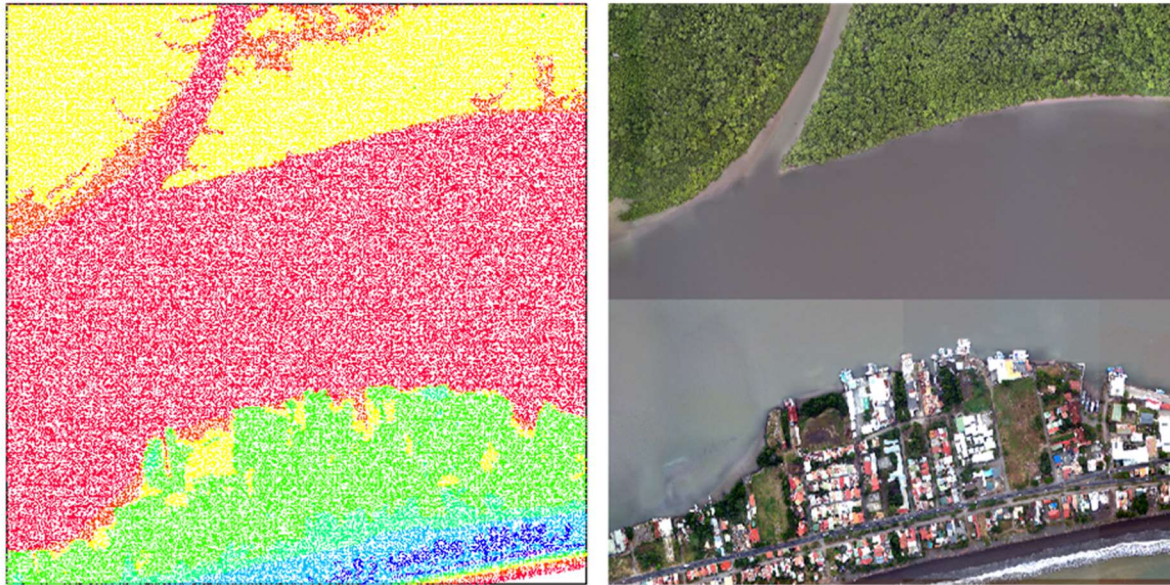


Figura 4.10 Comparativa entre ortofoto y la visualización por rangos de elevación de los archivos DTM producidos en Civil3D

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

El siguiente paso para el proceso de interpolación y creación del MDE de la parte terrestre fue efectuar la interpolación de tipo TIN a cada uno de los datos DTM mediante las herramientas de creación de superficies de Civil3D, ver Figura 4.13.

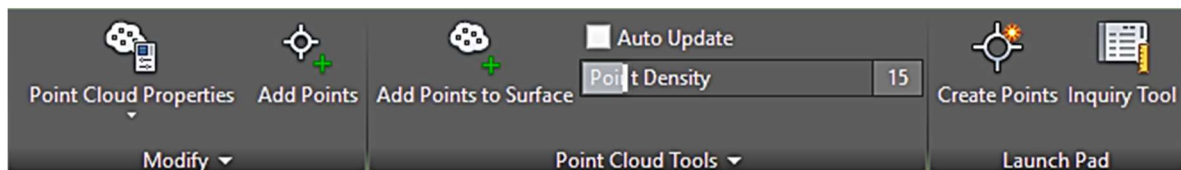


Figura 4.11 Herramientas de Civil3D para la generación de la interpolación TIN

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

La interpolación TIN de cada superficie se obtuvo con la aplicación de agregar puntos a la superficie, por su traducción del inglés, al clicar la interfaz gráfica de la nube de puntos (ver Figura 4.13). Antes de generarse la interpolación automática se configuraron parámetros, en la ventana ejecutada por la aplicación mencionada, debió indicarse datos en tres pestañas de la interfaz, ver Figura 4.12.

En la primera pestaña denominada Opciones de Superficie, se asignó el nombre de la superficie, se agregó la descripción y se definió un intervalo de curvas de nivel para interpretar mejor el comportamiento del terreno, los intervalos pueden cambiarse posteriormente si se quisiese. Opciones de Región, es la segunda pestaña de la ventana, se utilizó para definir la superficie, es decir se indicó que a partir de la nube de puntos se realice

la interpolación. La pestaña Resumen, hace mención de la nube de puntos y cómo estuvo constituida, también se dio una pequeña reseña de la superficie a crearse, ver Figura 4.12

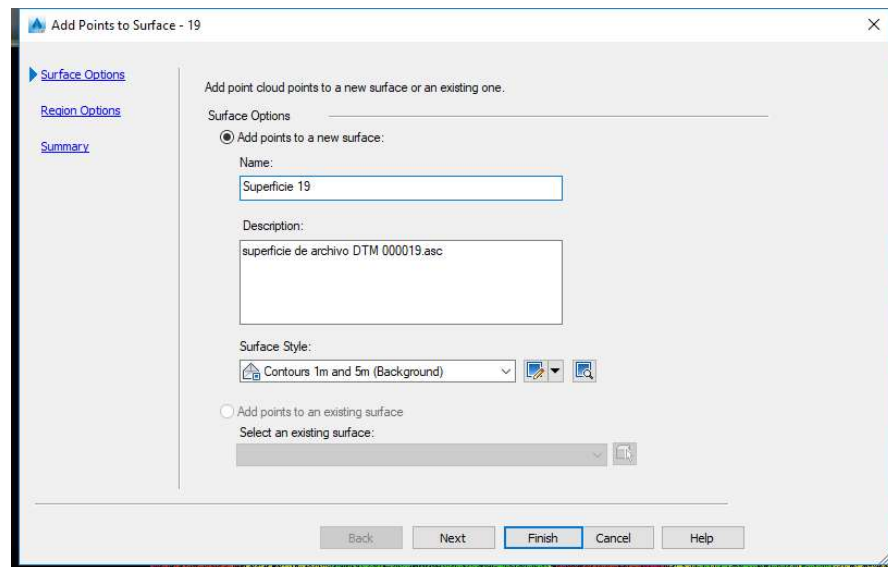


Figura 4.12 Definición de parámetros para generar la interpolación TIN en archivos DTM
Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

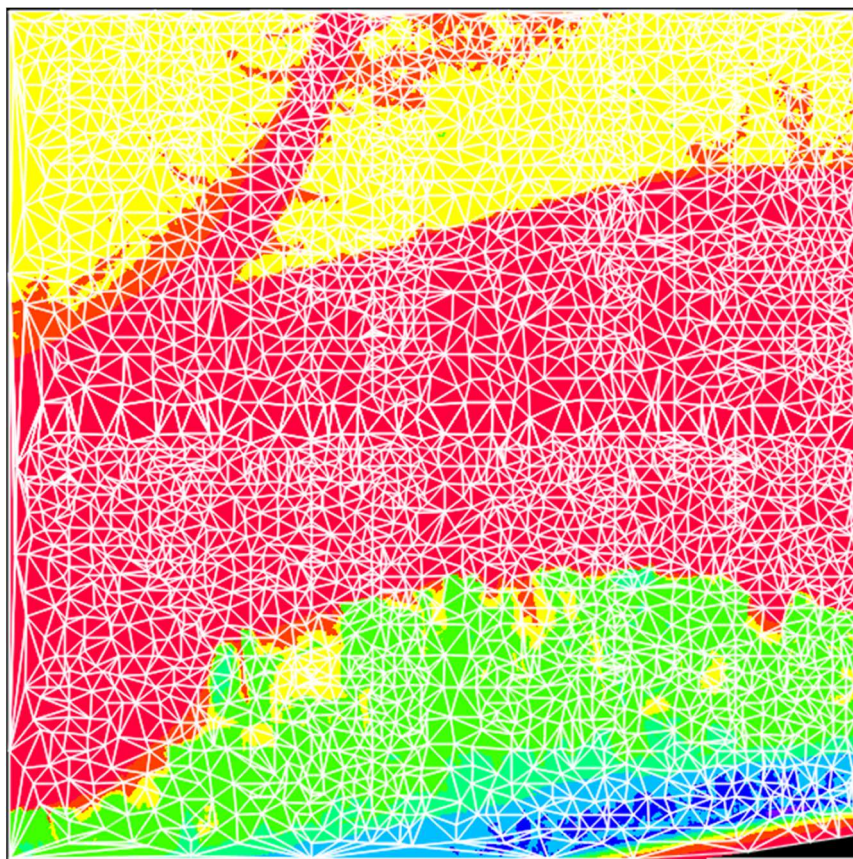


Figura 4.13 Interpolación TIN generada a partir de cada archivo DTM
Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

Posterior a la interpolación TIN de cada archivo DTM se verificó manualmente la malla de triángulos adosados, pues el método de interpolar y según las investigaciones de varios autores que ilustran a la interpolación TIN puede modelar erradamente formando los llamados “ojos de buey” muy conocidos en la cartografía y exclusiva de topografías muy planas sin cambios bruscos de nivel en el terreno. La verificación se hizo mediante las aplicaciones de la barra de menú que editan, eliminan, agregan y modifican las redes de triángulos adosados con los que se basa esta técnica.

Cada uno de los archivos citados se sometió a un proceso de edición de triángulos adosados, basado en un escrutinio de la suavidad con que estuviesen trazadas las curvas de nivel producto de la modelización (ver Figura 4.14).

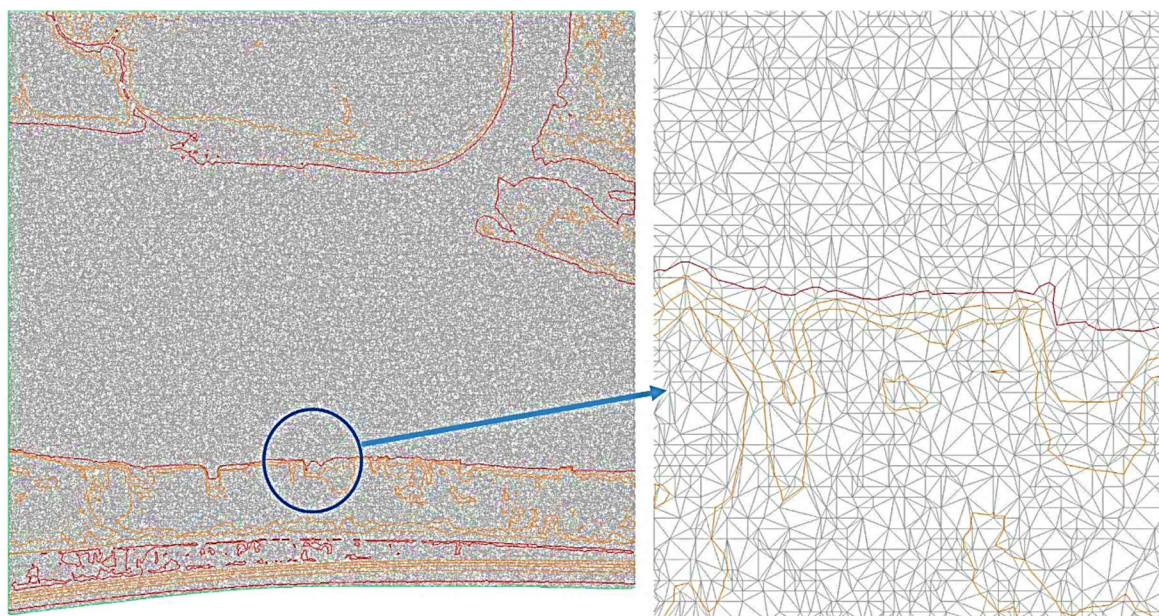


Figura 4.14 Edición de la interpolación TIN generada por Civil3D

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

Cada superficie (generada de los DTM) se almacenó en un directorio específico posterior a la edición de triángulos, en formato XML, cada archivo se denominó de igual manera que el archivo DTM original, esto para distinguir con facilidad su origen (ver Figura 4.15).

Los archivos XML se almacenaron en el directorio denominado XML Editados, representaron superficies sobre las cuales se efectuaron labores de “carpintería” entendiéndose como un proceso de revisión de la correcta unión entre los segmentos de los triángulos adosados con el valor de elevación más correspondiente, según indica la teoría.

PC > SAUL Mobile 3.0 (F:) > SAUL > _Tesis - Anteproyecto > RESULTADOS > 2 MDE > XML EDITADOS				
Name	Date modified	Type	Size	
000016.xml	13/09/2016 02:58 ...	XML Document	19,454 KB	
000017.xml	13/09/2016 02:56 ...	XML Document	19,421 KB	
000018.xml	13/09/2016 02:53 ...	XML Document	19,406 KB	
000019.xml	13/09/2016 02:51 ...	XML Document	19,365 KB	
000020.xml	13/09/2016 02:49 ...	XML Document	17,892 KB	
000021.xml	13/09/2016 02:48 ...	XML Document	17,872 KB	
000022.xml	13/09/2016 02:46 ...	XML Document	17,948 KB	
000023.xml	13/09/2016 02:44 ...	XML Document	33,364 KB	
000029.xml	13/09/2016 02:41 ...	XML Document	28,551 KB	
000030.xml	13/09/2016 02:38 ...	XML Document	26,117 KB	
000031.xml	13/09/2016 02:36 ...	XML Document	22,275 KB	
000032.xml	13/09/2016 02:32 ...	XML Document	25,194 KB	
000033.xml	13/09/2016 02:30 ...	XML Document	11,674 KB	

Figura 4.15 Almacenamiento de archivos que conforman la interpolación TIN de los datos DTM

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

Geográficamente cada archivo seleccionado se ubicó espacialmente según lo mostrado en la Figura 4.16 en donde la relación del tamaño de archivo creado estuvo correlacionado con la extensión terrestre cubierta.

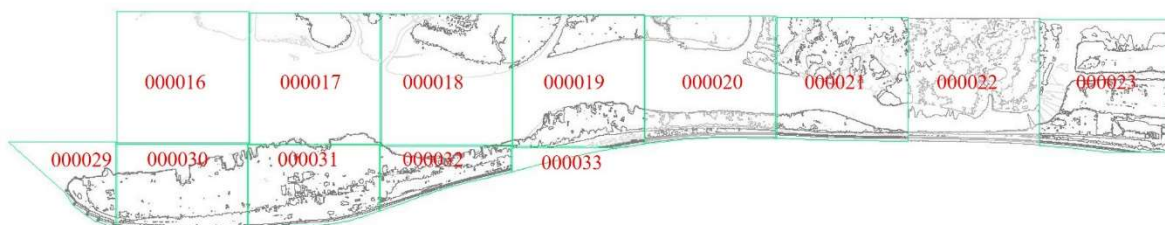


Figura 4.16 Visualización de archivos XML que contienen la interpolación TIN elaborada

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

En relación al archivo final relacionado a este ítem, se obtuvo al unir los archivos XML resultantes e individuales de la interpolación TIN de datos DTM en un solo elemento, almacenándose igualmente en formato XML. La unión se efectuó a través de las herramientas de producción y edición de MDE con que cuenta el software empleado.

El archivo conjunto de la interpolación de datos terrestres puede observarse en la Figura 4.17.

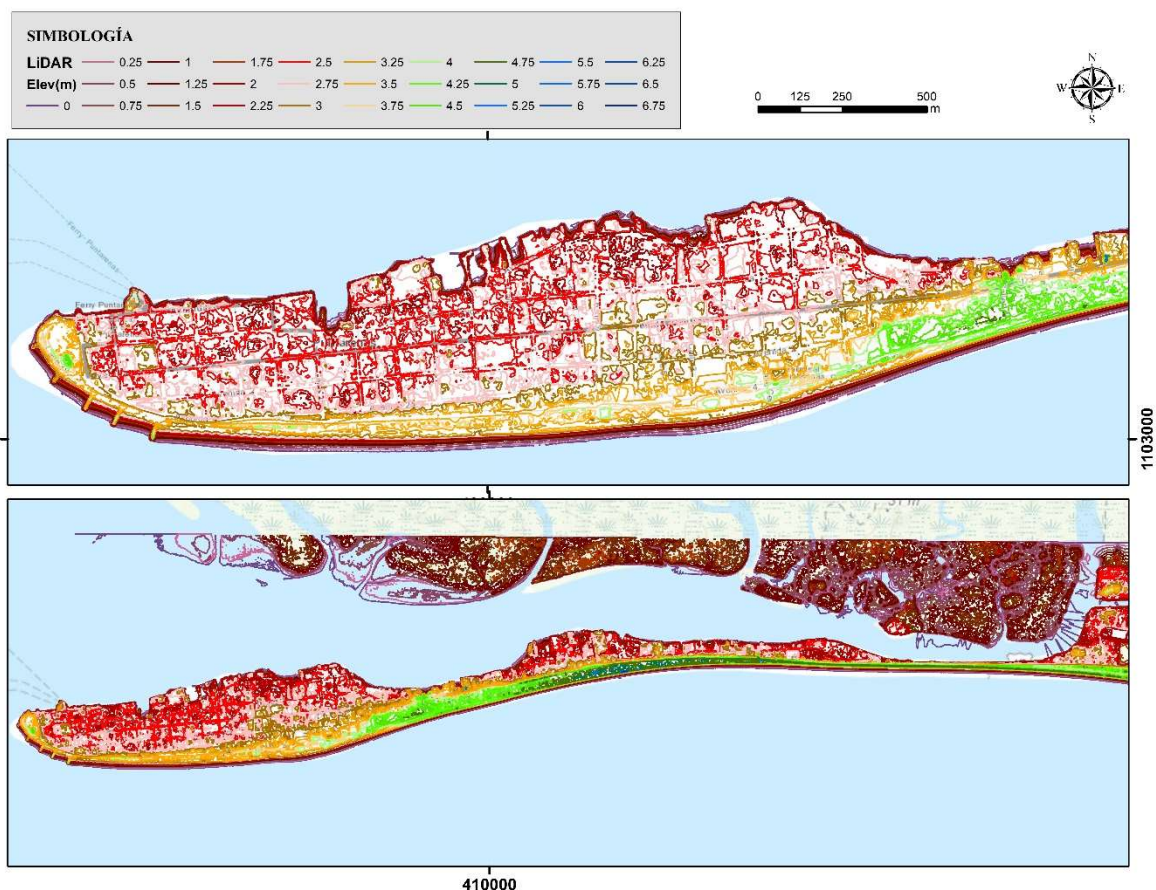


Figura 4.17 Visualización del archivo final con la interpolación TIN de la parte terrestre
Fuente: Elaboración propia, a partir de Arcmap®.

4.6. Manipulación de datos SONDAS.DAT para establecer el MDE

El MDE de la parte acuática se construyó con el software Civil3D versión 2016. El archivo de batimetría necesitó un menor grado de manipulación para obtener los valores en el formato pretendido.

El archivo SONDAS.DAT requirió un trabajo de ordenamiento preliminar para poder ser interpretado en Civil3D. Se hizo un ordenamiento en un archivo de texto, tabulando los datos por filas y columnas, en cada fila se acomodó el número de punto, el valor de su coordenada planimétrica de este, de norte, su elevación y una nomenclatura o código de batimetría.

Depurado el archivo se insertó en el software, con la aplicación de puntos mediante la importación de archivos de texto ordenados por: punto, norte, este, elevación, descripción y separado por espacios.

Con los datos de SONDAS.DAT se aplicó el procedimiento para generar la interpolación TIN en un archivo independiente. Las actividades variaron de acuerdo al procedimiento usado en los archivos DTM.

Primero, se estableció un contorno de delimitación llamado línea frontera, con base en los datos LiDAR y abarcando todo el espacio de los batimétricos ver Figura 4.18.

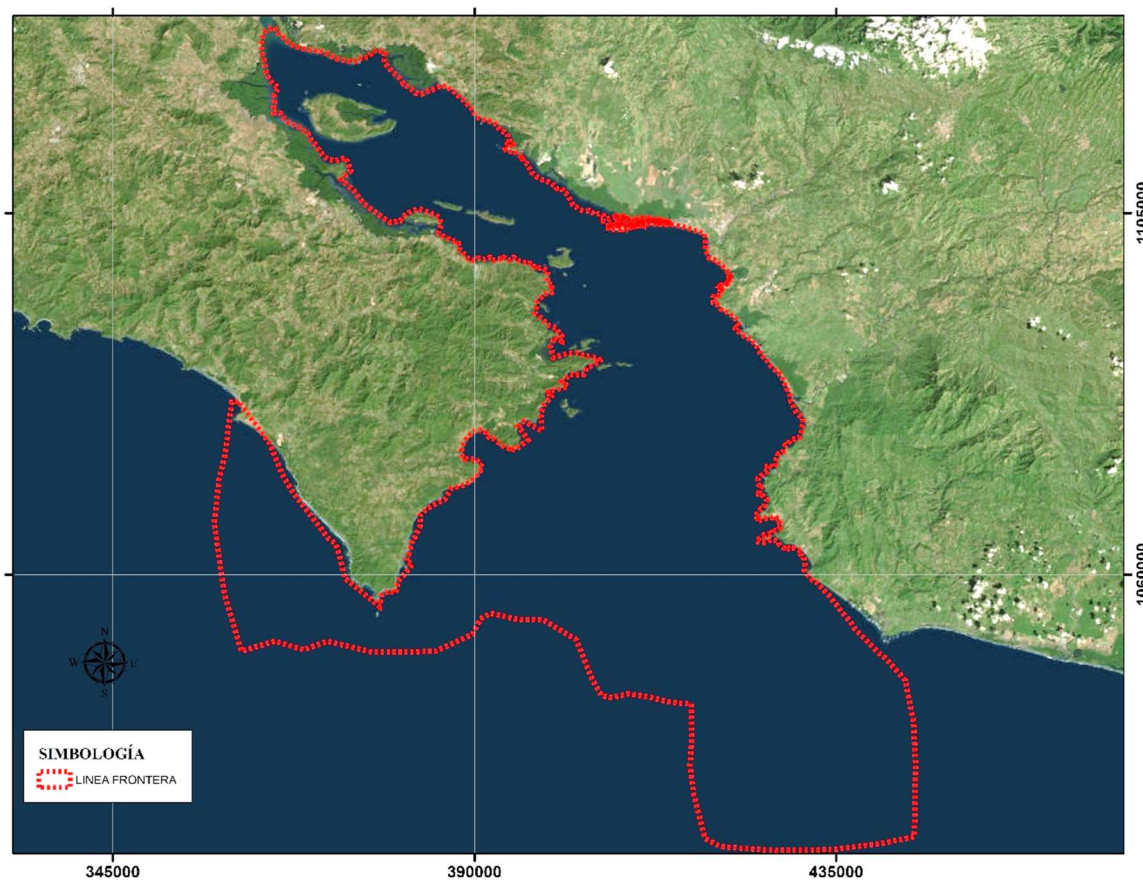


Figura 4.18 Delimitación de la línea frontera de la batimetría

Fuente: Elaboración propia, a partir de Arcmap®.

La línea frontera fue un polígono que delimitó el área que contenía los datos acuáticos, sobre los cuales se generó la interpolación TIN. El polígono poseía un área de traslape con los datos terrestres de la flecha litoral, pues la línea que define el límite de la información se trazó con base en los datos LiDAR y no con los batimétricos. Esto para que se formase un área en común, que fuera superpuesta y permitiera al Civil3D fusionarlas mediante las herramientas de edición para interpolaciones, buscando no perder valores de los datos de campo de la fuente más densa, ver Figura 4.19.

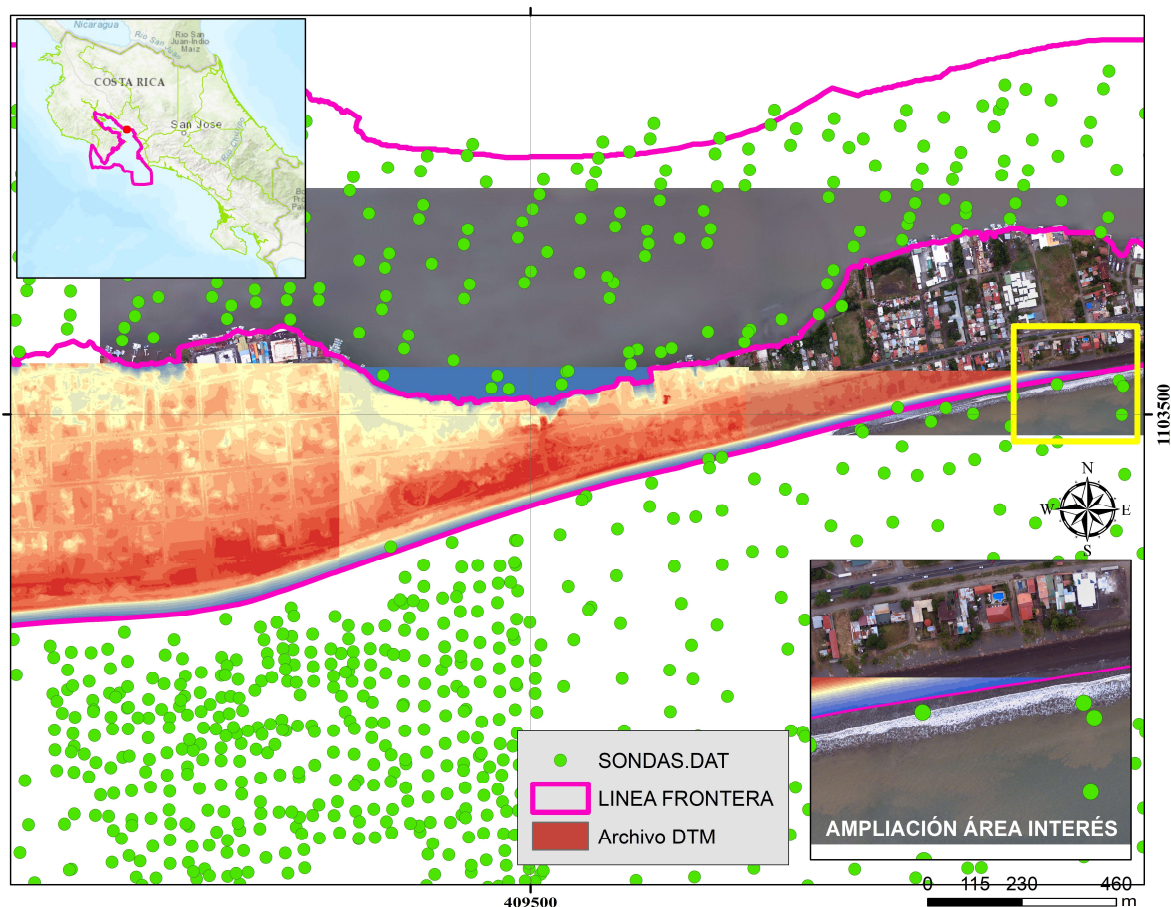


Figura 4.19 Delimitación de flecha litoral con la línea frontera a partir de datos LiDAR

Fuente: Elaboración propia, a partir de Arcmap®.

Si el polígono se hubiese trazado sobre los puntos batimétricos y no sobre los datos LiDAR cuando se fusionen ambas superficies (acuática y terrestre) la batimetría caería sobre un segmento de datos LiDAR actualizando sus valores. Estos son menos densos y no necesariamente llegan al borde del agua como si lo hace LiDAR. Produciendo resultados no congruentes pues entre ambas fuentes se estaría extrapolando datos ya que la batimetría absorbería la franja límite de LiDAR con datos derivados y no reales.

Manipulado el contorno que abarcarían los datos SONDAS.DAT se definió la superficie a interpolar mediante TIN. Desde el menú de superficies del software a través de la opción de crear superficie a partir de agregar grupos de puntos y contorno de delimitación ver Figura 4.20.

Teniendo la interpolación TIN de la parte acuática se efectuó el proceso de revisión los triángulos adosados, de igual manera que con los datos DTM de la parte LiDAR. Depurada la información se exportó el resultado final en formato XML a una carpeta específica de resultados.

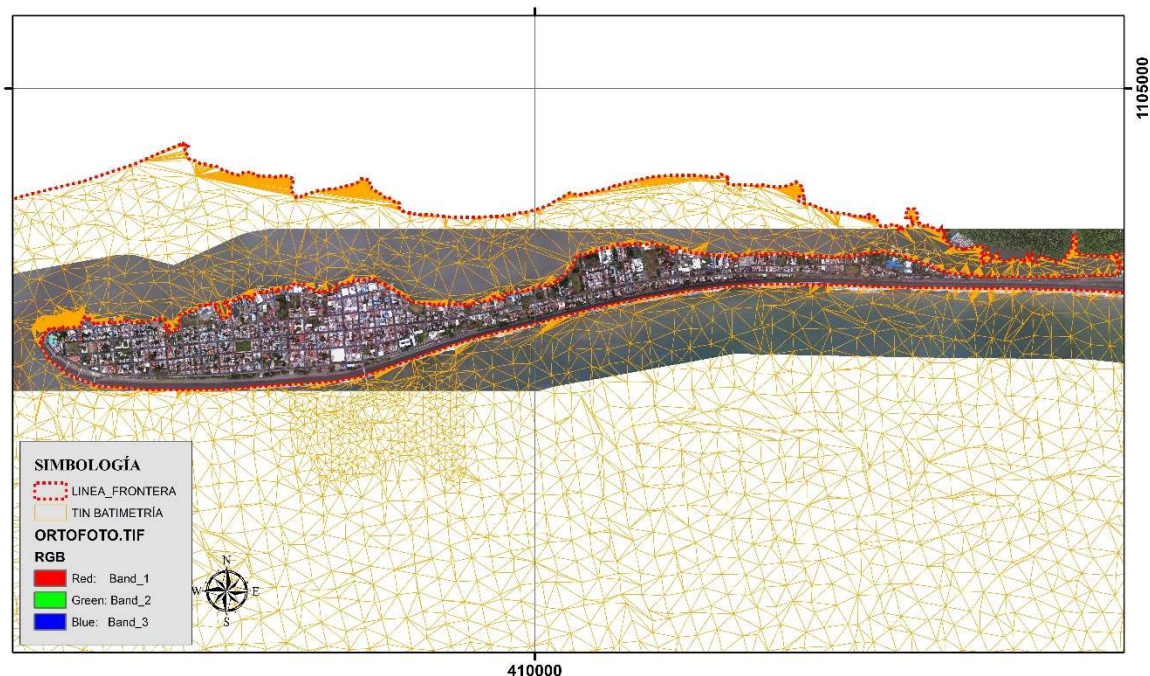


Figura 4.20 Ampliación de un sector de la interpolación de los datos batimétricos

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

4.7. Fusión de fuentes de información acuática y terrestre

La fusión de las fuentes de información se efectuó igualmente con el software Civil3D versión 2016. Utilizando los 2 archivos en formato XML preparados independientemente y sobre los cuales se efectuaron las interpolaciones de la parte terrestre y acuática.

Para efectuar la combinación se utilizaron las herramientas del software, propiamente con la aplicación de insertar y con la opción de importar, se trajeron los XML definidos (ver Figura 4.21).

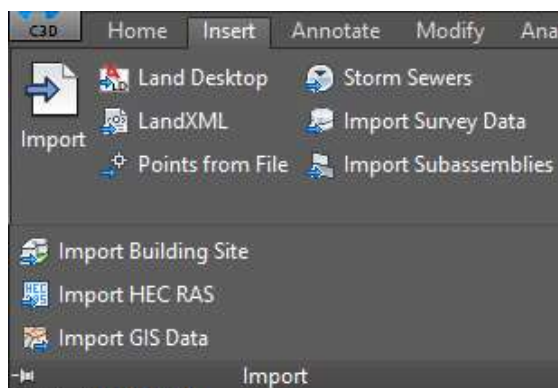


Figura 4.21 Herramientas del software para la fusión de datos TIN

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

Para combinar las fuentes de información se usaron las mismas herramientas de edición y pegado de superficies utilizadas en las actividades 4.5, 4.6. Con ellas se unió y creó una nueva modelización en la que se respetaron los triángulos adosados preexistentes (ver Figura 4.22).

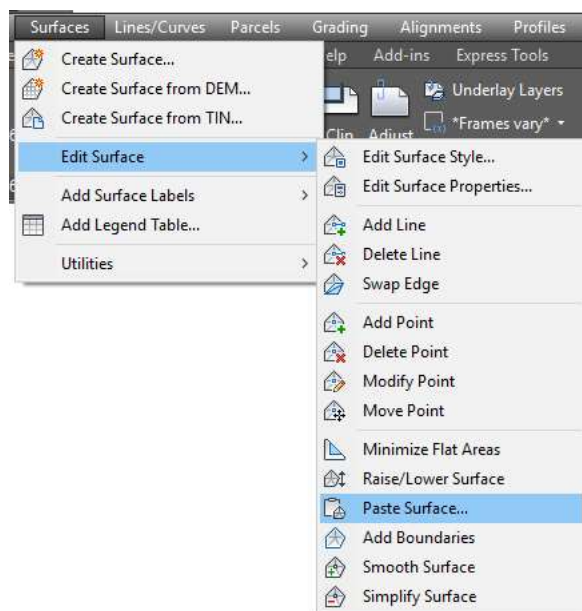


Figura 4.22 Herramientas del software para unir dos o más archivos de superficie

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

A la superficie terrestre se le “pega” la superficie acuática, ya que la batimetría solo actualizó datos donde LiDAR no ofreció resultados, el sector de LiDAR mantuvo todos los valores mientras que la batimetría se actualizó en la parte en común para poder efectuar la unión de escenarios (terrestre y acuático) ver Figura 4.23.

El Cuadro 4.9 ilustra el tamaño de archivo XML generado con los datos DTM, el archivo XML generado a partir de SONDAS.DAT y el archivo correspondiente a la fusión de ambos.

Cuadro 4.9 Tamaño de archivos de la interpolación TIN antes y después de fusionarse

Archivo XML	Fuente	Tamaño TIN almacenado
MDE Parte Acuática	SONDAS.DAT	13 076 KB
MDE Parte Terrestre	DTM de LiDAR	300 521 KB
MDE Combinado	Archivos TIN generados	216 902 KB

Fuente: Elaboración propia.

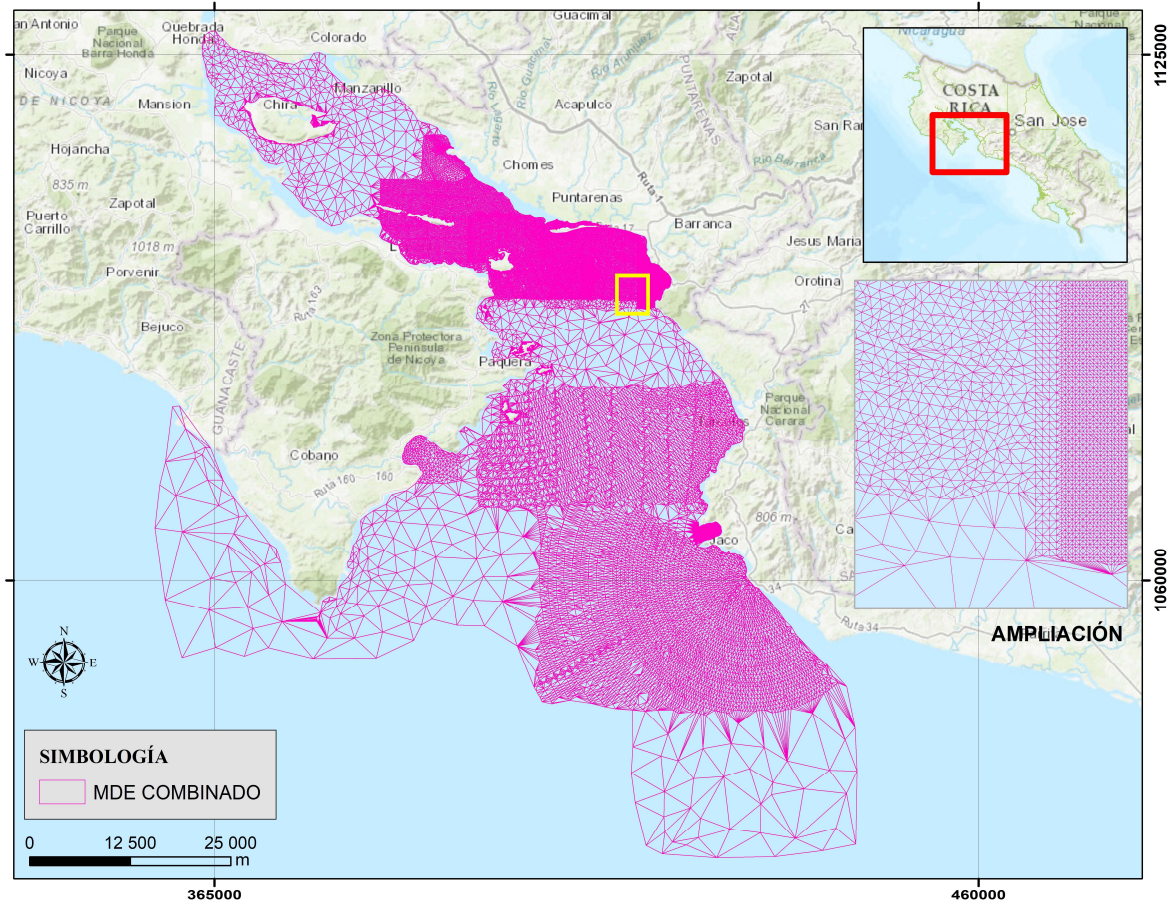


Figura 4.23 TIN del MDE definitivo

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D® y Arcmap®.

4.8. Generación de la malla de valores

La generación de la malla de valores se realizó a partir de la definición de la grilla de puntos sobre el MDE combinado, utilizando las herramientas de creación de puntos y exportación de elementos del software Civil3D (ver Figura 4.24).

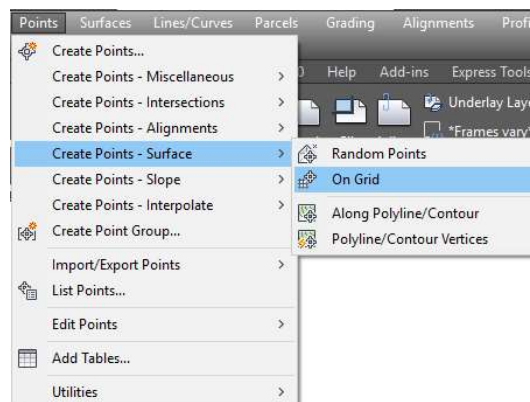


Figura 4.24 Herramientas del software que permiten generar una cuadrícula de puntos

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

Los parámetros utilizados para conformar la grilla corresponden a los valores mostrados en el Cuadro 4.10.

Cuadro 4.10 Valores a utilizar en el software de trabajo para generar una malla de puntos

Parámetro	Descripción
Origen	Se definió un punto base picando o insertando coordenadas.
Rotación de la grilla	0 grados.
Espaciamiento de la grilla en X y Y	30 m.
Punto final del área que conforma la grilla	Se especificó la ubicación superior derecha para la cuadrícula picando en la interfaz la posición correspondiente.

Fuente: Elaboración propia.

Al ingresar esos datos el software generó puntos en todo el espacio señalado, asignando el valor correspondiente de elevación del MDE de acuerdo a una determinada posición (ver Figura 4.25).

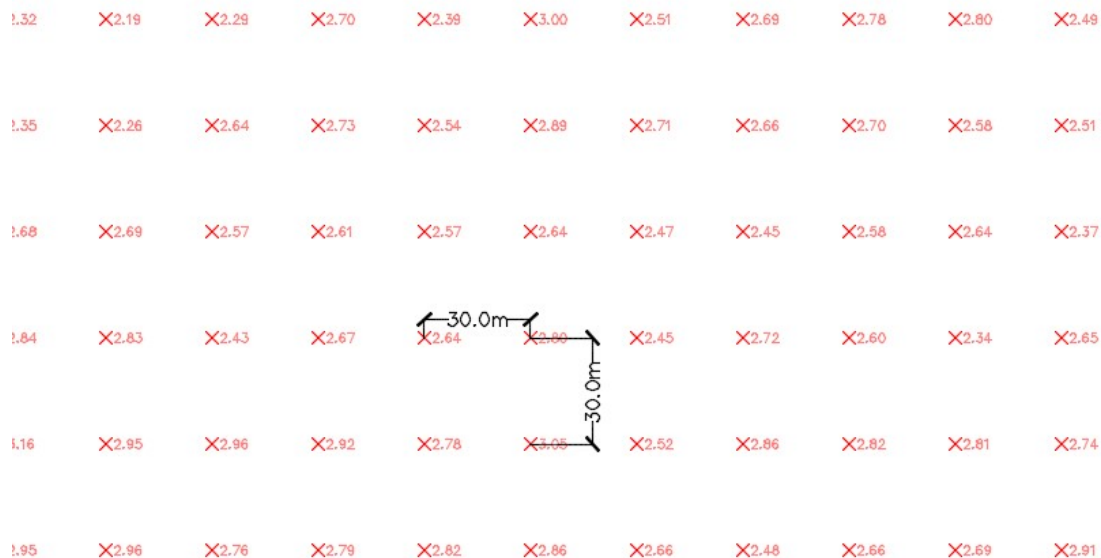


Figura 4.25 Muestra de malla de puntos generada con Civil3D

Fuente: Elaboración propia, a partir de Civil3D®.

La grilla generada, obtuvo una cantidad de 3 045 440 (tres millones cuarenta y cinco mil cuatrocientos cuarenta puntos) puntos separados cada 30 m (ver Figura 4.26).

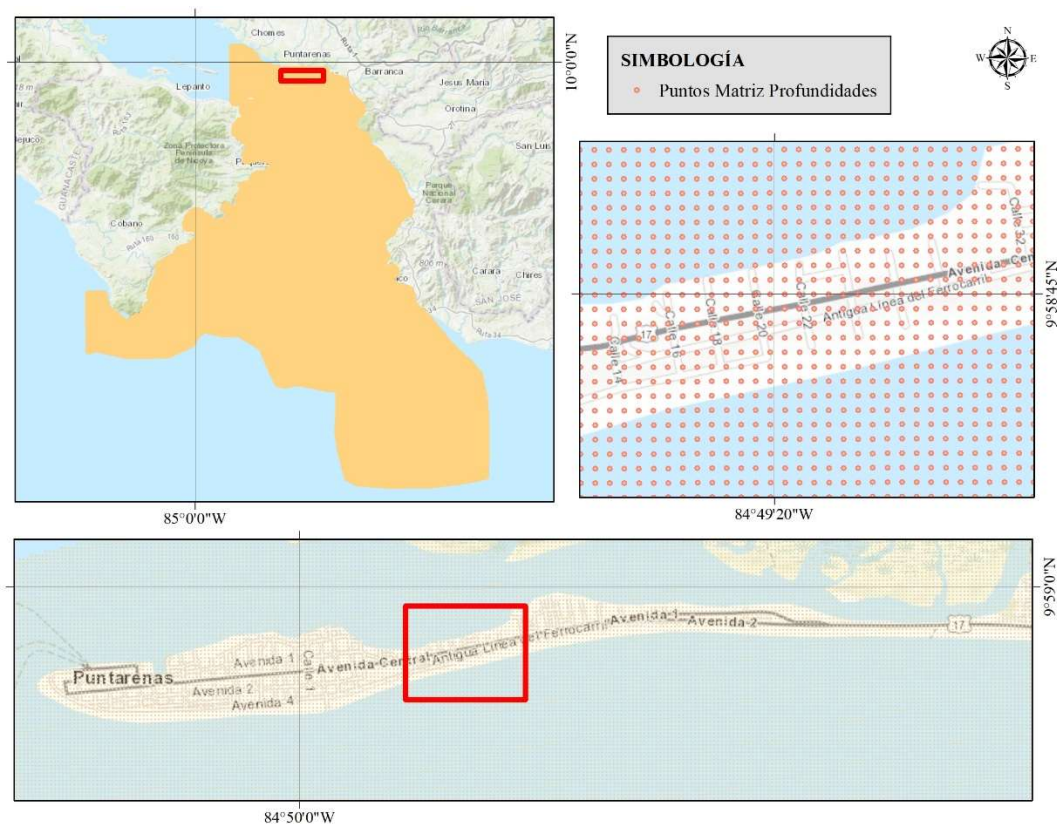


Figura 4.26 Visualización de la malla de puntos que conforman una matriz de profundidades
Fuente: Elaboración propia, a partir de Arcmap®.

La malla de valores o matriz de profundidades se obtuvo al exportar el conjunto de puntos a un formato de tabulación de valores. Los datos son ordenados por número de punto, las coordenadas y la elevación correspondiente, además de un código de identificación de punto, establecido como TN cuyo significado es punto de terreno natural (ver Figura 4.27).

batimetria cada 30x30m.txt - Notepad

File	Edit	Format	View	Help
1	1100730.6800	406334.1862	-14.0014	"tn"
2	1100730.6800	406364.1862	-13.5059	"tn"
3	1100730.6800	406394.1862	-12.2382	"tn"
4	1100730.6800	406424.1862	-10.9764	"tn"
5	1100730.6800	406454.1862	-9.7241	"tn"
6	1100730.6800	406484.1862	-8.9586	"tn"
7	1100730.6800	406514.1862	-8.6771	"tn"
8	1100730.6800	406544.1862	-8.3887	"tn"
9	1100730.6800	406574.1862	-7.9218	"tn"
10	1100730.6800	406604.1862	-7.4548	"tn"
11	1100730.6800	406634.1862	-7.2070	"tn"
12	1100730.6800	406664.1862	-10.3623	"tn"
13	1100730.6800	406694.1862	-9.2630	"tn"
14	1100730.6800	406724.1862	-8.1306	"tn"
15	1100730.6800	406754.1862	-6.9982	"tn"
16	1100730.6800	406784.1862	-6.0977	"tn"
17	1100730.6800	406814.1862	-6.0016	"tn"

Figura 4.27 Visualización de puntos que conforman la matriz de profundidades
Fuente: Elaboración propia, a partir de Notepad®.

4.9. Revisión de los datos topográficos usados y combinados

Los académicos del Proyecto SIA 0569-19 realizaron una simulación preliminar de un escenario de tsunami con la información de la malla de valores. Para que la corrida fuera satisfactoria las coordenadas se convirtieron a valores de latitud y longitud referidas a WGS84, pues ComMIT emplea esta referencia espacial.

Los 3 045 440 puntos que componían la matriz de profundidades fueron convertidos mediante una plantilla de conversión de coordenadas planas a elipsoidicas o geodésicas descargada del Centro Nacional de Procesamiento de Datos GNSS (CNPDG) de la Escuela de Topografía Catastro y Geodesia (ETCG) de la UNA, ver Figura 4.28, Figura 4.29.

PUNTO	NCRTM	ECRTM	LATITUD		LONGITUD	
			°	'	°	'
TN	1 031 665.7496	424 460.6636	9	19	84	41
TN	1 066 053.6785	419 162.4249	9	38	84	44
TN	1 084 407.4651	408 914.1862	9	48	84	49
TN	1 104 630.6800	407 864.1862	9	59	84	50

Figura 4.28 Planilla de trasformación de coordenadas utilizada para convertir la matriz de profundidades

Fuente: <http://www.cnpdg.una.ac.cr/index.php/download/software/transformaciones-cr>

```
PUNTOS 30X30.txt - Notepad
File Edit Format View Help
9.95357661049652 -84.8542427588319 -14.0014
9.95357730941013 -84.8539691764543 -13.5059
9.95357800809993 -84.8536955940564 -12.2382
9.95357870656592 -84.8534220116385 -10.9764
9.95357940480811 -84.8531484292003 -9.7241
9.95358010282649 -84.8528748467420 -8.9586
9.95358080062106 -84.8526012642636 -8.6771
9.95358149819183 -84.8523276817650 -8.3887
9.95358219553879 -84.8520540992462 -7.9218
9.95358289266193 -84.8517805167074 -7.4548
9.95358358956128 -84.8515069341483 -7.207
9.95358428623681 -84.8512333515692 -10.3623
9.95358498268853 -84.8509597689700 -9.263
9.95358567891645 -84.8506861863507 -8.1306
9.95358637492056 -84.8504126037112 -6.9982
9.95358707070086 -84.8501390210517 -6.0077
9.95358776625735 -84.8498654383721 -6.0016
9.95358846159004 -84.8495918556724 -5.9717
9.95358915669891 -84.8493182729526 -5.9831
9.95358985158398 -84.8490446902128 -5.9904
9.95359054624524 -84.8487711074529 -6.0197
9.95359124068269 -84.8484975246730 -5.7668
9.95359193489633 -84.8482239418729 -5.4854
9.95359262888616 -84.8479503590529 -5.7529
9.95359332265218 -84.8476767762128 -6.3132
9.95359401619439 -84.8474031933527 -6.5566
9.95359470951280 -84.8471296104726 -6.8
9.95359540260739 -84.8468560275725 -6.9738
9.95359609547818 -84.8465824446523 -7.0415
```

Figura 4.29 Puntos transformados que conforman la matriz de profundidades

Fuente: Elaboración propia, a partir de Notepad®.

Los datos mostrados en la Figura 4.29 fueron convertidos satisfactoriamente mediante la rutina de transformación, los valores se emplearon para ejecutar la corrida preliminar en el ComMIT. Los resultados mostraron una inundación baja para los peores escenarios a simular. Ante ello, las elevaciones de la matriz de profundidades se mapearon para poder analizar objetivamente la situación existente, véase Figura 4.30.

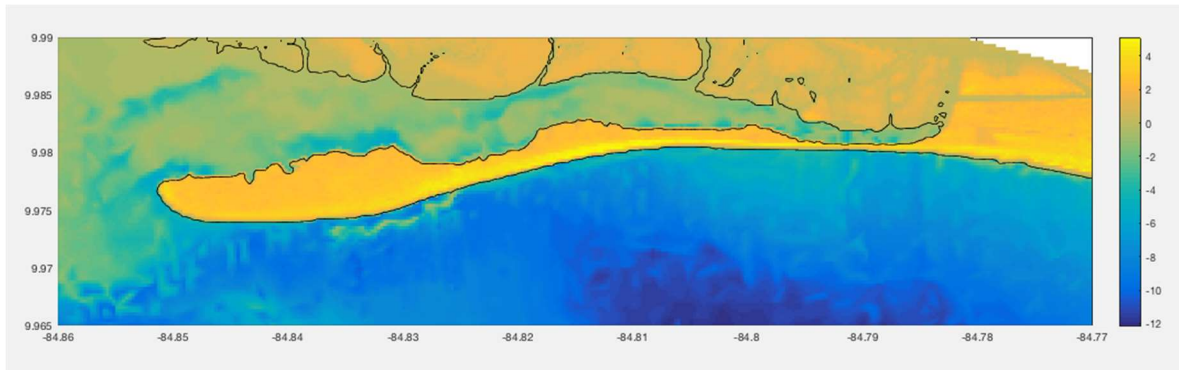


Figura 4.30 Ploteo de elevaciones en MatLab para validación de la información

Fuente: Elaboración propia, a partir de MatLab®.

Al emplear la matriz de profundidades y derivar de esos datos un MDE de tipo raster el rango de elevaciones en la flecha litoral apenas superó 4 m cuando anteriormente se conocían zonas con valores mayores a 5 m. En la parte de la zona intermareal se dejó de percibir que el perfil de la playa siguió prolongándose por debajo del nivel de agua, a su vez se observaron muchas crestas y depresiones, en lugar de verse una pendiente constante.

La clasificación por rangos de colores para representar las elevaciones existentes fue muy suavizada y sintetizada, evidenciando una pérdida de detalle respecto a los archivos originales (ver Figura 4.17, Figura 4.20, Figura 4.23).

La revisión de los datos determinó no usar la matriz de profundidades como datos topográficos de entrada en la simulación numérica de tsunamis, debido a los resultados preliminares mostrados, se optó por efectuar las actividades que se muestran a continuación.

4.10. Mejoramiento y afinamiento de los datos topográficos mediante elementos vectoriales

Se utilizó como archivo base el MDE obtenido en el apartado 4.7 Fusión de fuentes de información acuática y terrestre.

Del MDE se extrajo información por contornos de la elevación, los cuales correspondieron a líneas con una determinada elevación, deducida de la interpolación TIN ejecutada por el Civil3D.

Los elementos vectoriales se obtuvieron con el software al dividir o fragmentar el MDE mediante un comando específico, separando los triángulos adosados, los nodos, las curvas de nivel y curvas batimétricas.

El comando empleado fue explotar, al realizar esta acción los objetos componentes pueden manipularse en otros software al ya no estar correlacionados, ver Figura 4.31, Figura 4.32.

Al fragmentar los elementos que conforman el MDE se alivió el tamaño de compilación y se almacenaron los elementos vectoriales en formato DWG, (DraWinG por sus siglas en inglés) interpretable para los software SIG.

El mejoramiento y afinamiento de los datos topográficos se basó en el uso de líneas con elevaciones distintas. Requeridas para conformar las mallas de batimetría en el software ComMIT con adecuada resolución y fidelidad en la representación del terreno.

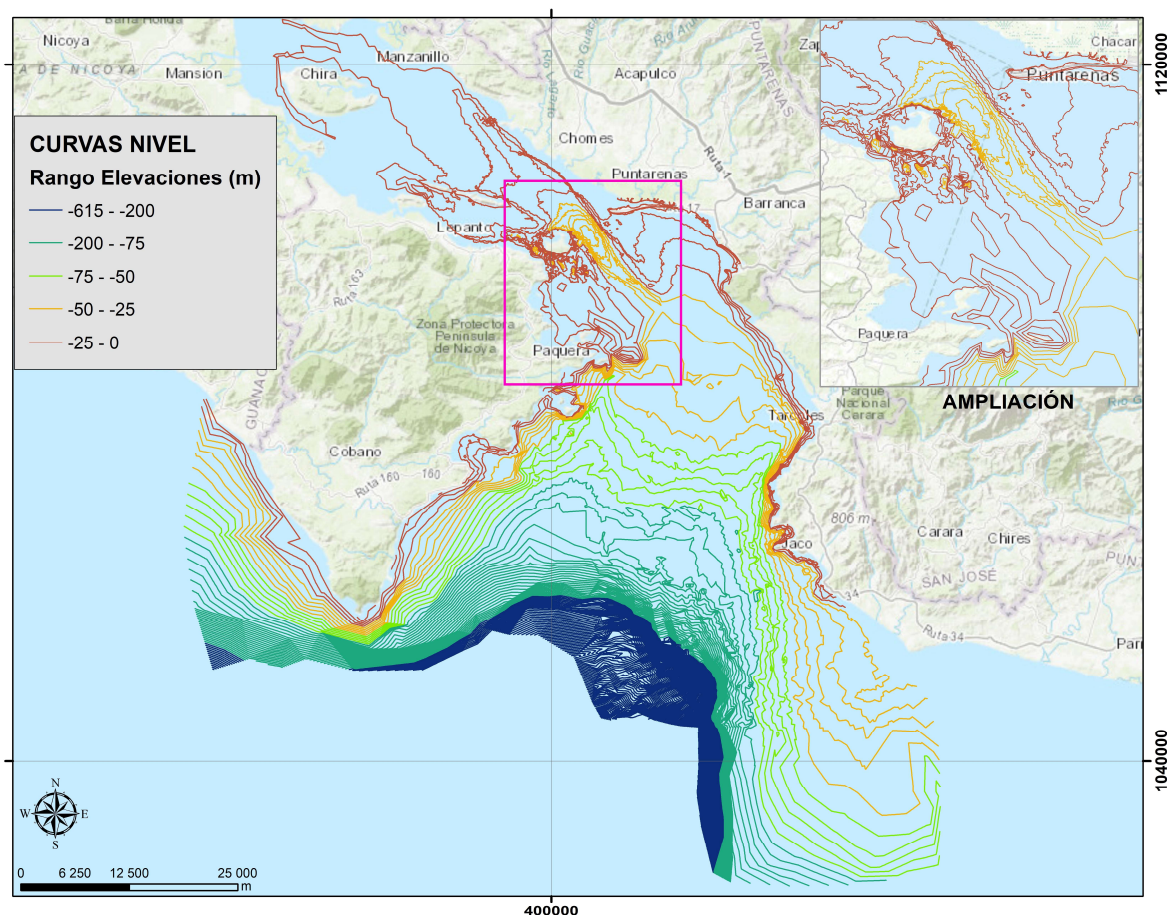


Figura 4.31 Isolíneas e isóbatas extraídas del MDE

Fuente: Elaboración propia, a partir de Arcmap®.

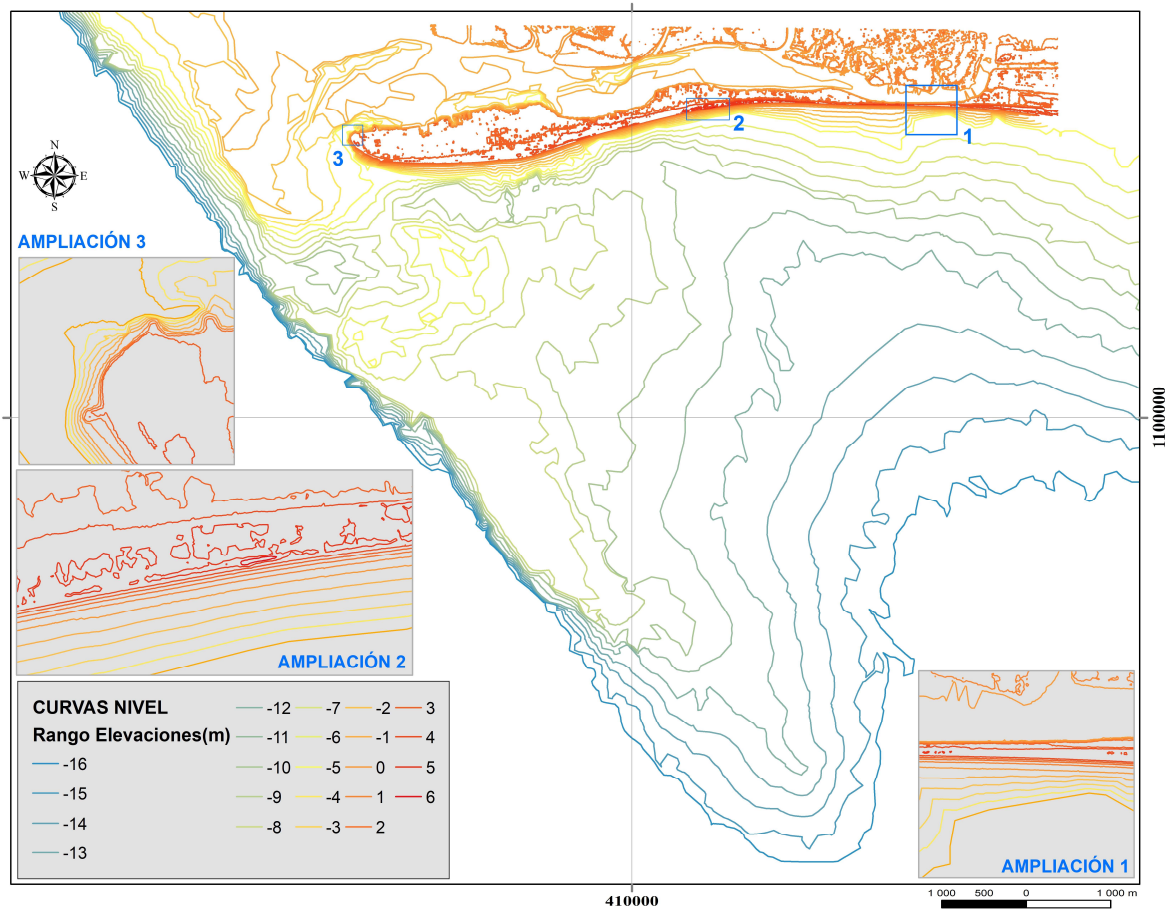


Figura 4.32 Detalle de isolíneas e isóbatas en la zona intermareal de la ciudad Puntarenas
Fuente: Elaboración propia, a partir de Arcmap®.

4.11. Aplicación del modelo numérico de simulación de tsunami

Las mallas de batimetría (externa, intermedia e interna) requeridas para la simulación de tsunamis se alimentaron de la siguiente manera, ver Cuadro 4.11 y Figura 4.33.

Cuadro 4.11 Composición de las mallas de batimetría de ComMIT

Malla	Resolución	Origen	Descripción
A: Externa	Baja	ComMIT	Cartas náuticas digitalizadas.
B: Intermedia	Media	Usuario	Extraídos del MDE, una relación de cada 5 m en curvas auxiliares y 25 m en curvas índices, abarcando todo el Golfo de Nicoya.
C: Interna	Alta	Usuario	Extraídos del MDE, valores de 6 m hasta los -15 m, con intervalo de curvas cada 1m en curvas auxiliares y 5 m en curvas índices.

Fuente: Elaboración propia.

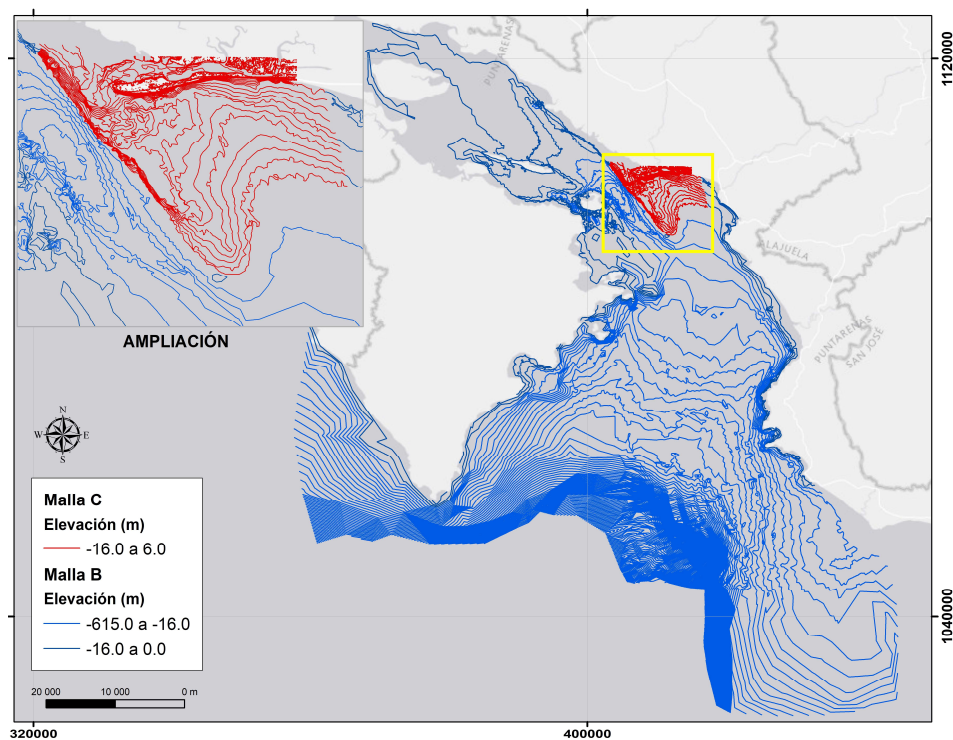


Figura 4.33 Composición de las mallas de batimetría de ComMIT

Fuente: Elaboración propia, a partir de Arcmap®.

Los resultados de los 45 escenarios sísmicos establecidos para el Proyecto SIA 0569-13 se agruparon mediante la suma de eventos lejanos, la suma de eventos locales, además de dos de los casos más relevantes (peores) en el campo local. Con el fin de contemplar todas las posibilidades de arribo de tsunamis para los futuros mapas de evacuación y localizar las zonas sin riesgo de inundarse, ver Cuadro 4.12 y Figura 4.34.

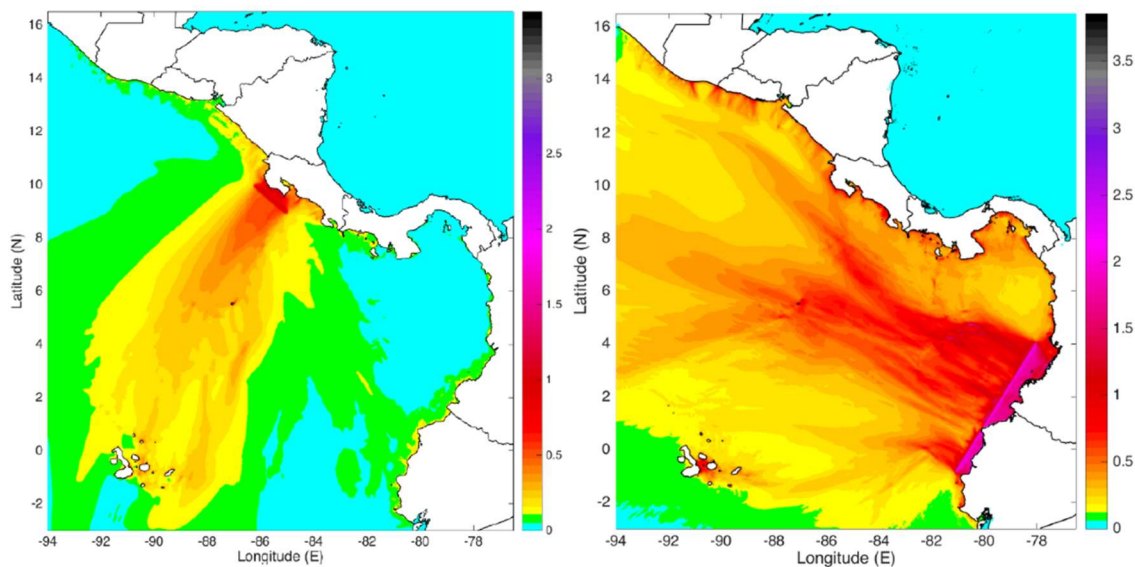


Figura 4.34 Condición inicial de la simulación de ComMIT para caso local y regional

Fuente: Proyecto SIA 0569-13 (2018).

Cuadro 4.12 Resultados de la simulación numérica de ComMIT

Clase tsunami	Descripción	Magnitud (Mw)	Altura de Inundación /Tsunami	Límite de Inundación (run-up)
Distante	Resultado de la suma de 30 casos	variable	0,212 m	Elev. aprox de 2,25 a 4,50 msnm
Regional	Resultado de la suma de 10 casos	variable	0,556 m	Elev. aprox de 2,75 a 5,00 msnm
Segmento Nicoya (local)	Un evento	7,8	0,556 m	Elev. aprox de 2,75 a 5,00 msnm
Segmento Nicoya a Segmento Cóbano - Herradura (local)	Un evento en Nicoya que se extiende en el bloque hasta Cóbano	8,5	0,568 m	Elev. aprox de 3,00 a 4,75 msnm

Fuente: Elaboración propia, a partir de ComMIT®.

El modelo de simulación numérica fue validado usando los registros históricos del mareógrafo de Puntarenas con que contó el Proyecto SIA 0569-13 (ver Figura 4.35).

Se utilizaron 2 eventos sísmicos históricos de carácter local: el terremoto de Osa del 5 de diciembre de 1941, 7,3 Mw y el terremoto de Nicoya del 5 de octubre de 1950, 7,8 Mw.

Además de 4 eventos históricos distantes: el terremoto de Kamchatka, Rusia del 4 de noviembre de 1952, 9,0 Mw, el terremoto de las islas Andreanof, Alaska, Estados Unidos del 9 de marzo de 1957, 8,6 Mw, el terremoto de Chile del 22 de mayo de 1960, 9,5 Mw y el terremoto de Colombia del 12 de diciembre de 1979, 7,9 Mw.

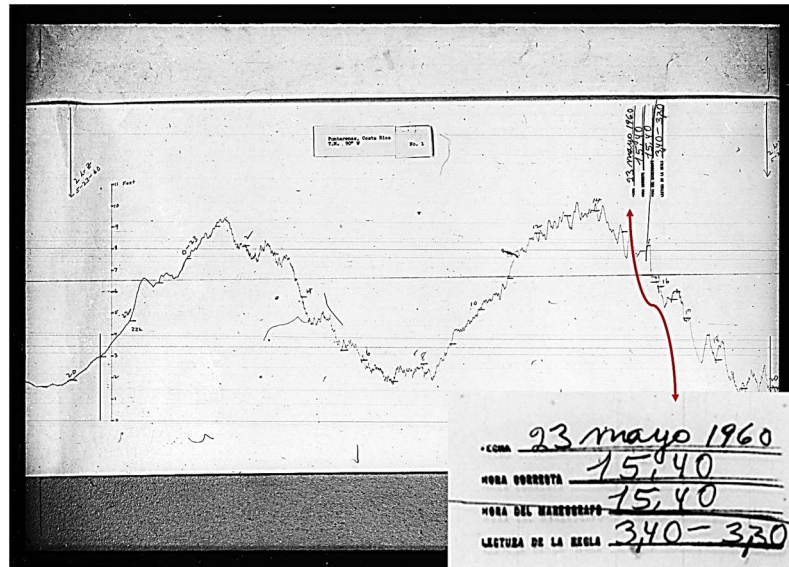


Figura 4.35 Ejemplo de registro de mareógrafo de Puntarenas para el año 1960
Fuente: IGN, (1960).

Los resultados para el Proyecto SIA 0569-13 sobre la simulación numérica en ComMIT se resumen e ilustran a continuación mediante contornos que delimitan las áreas terrestres estimadas a inundarse, ver Figura 4.36, Figura 4.37, Figura 4.38, Figura 4.39.

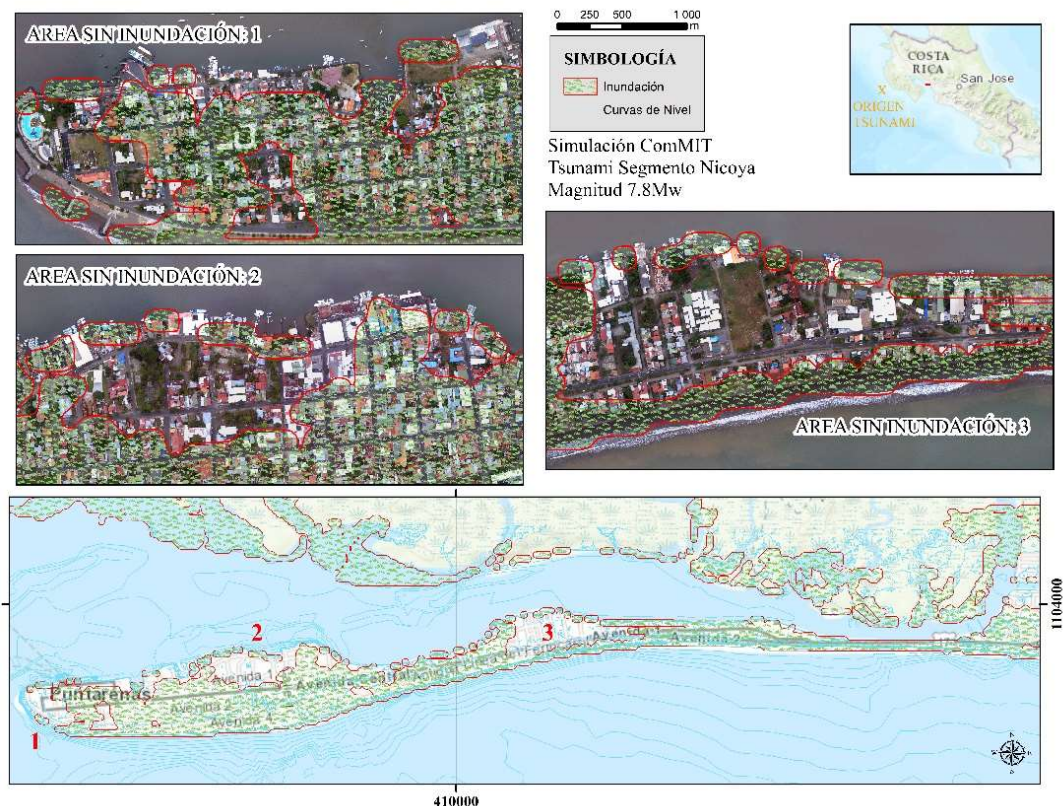


Figura 4.36 Resultado de simulación de tsunami con fuente generadora en Nicoya
Fuente: Elaboración propia, a partir de ComMIT®, Arcmap®.

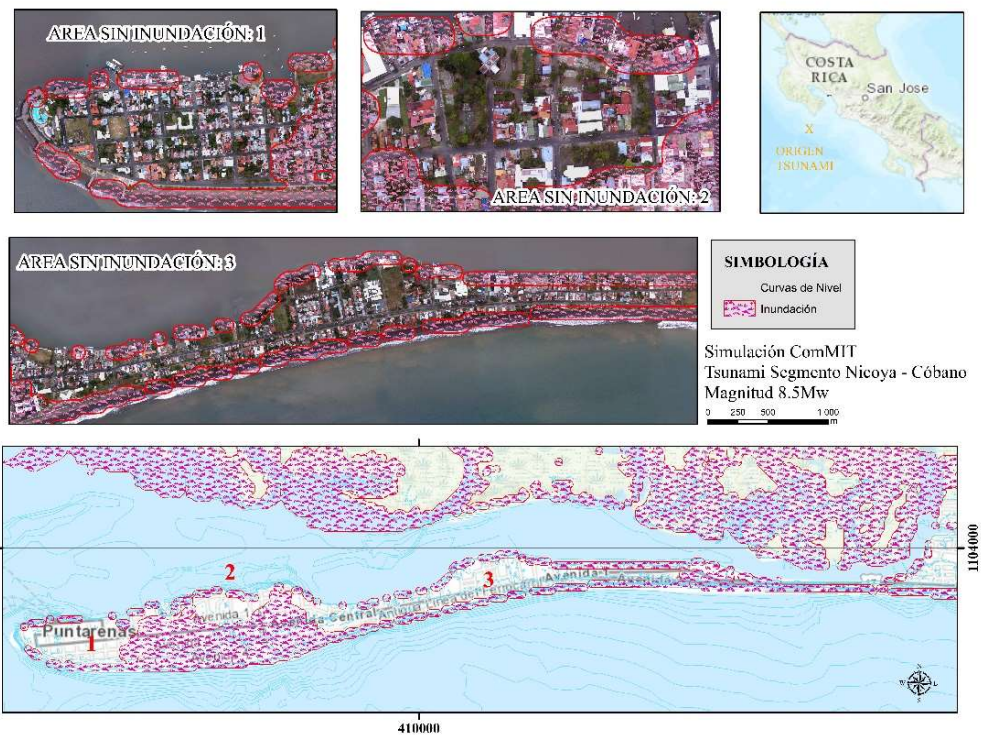


Figura 4.37 Resultado de simulación de tsunami con fuente generadora en Nicoya-Cóbano

Fuente: Elaboración propia, a partir de ComMIT®, Arcmap®.

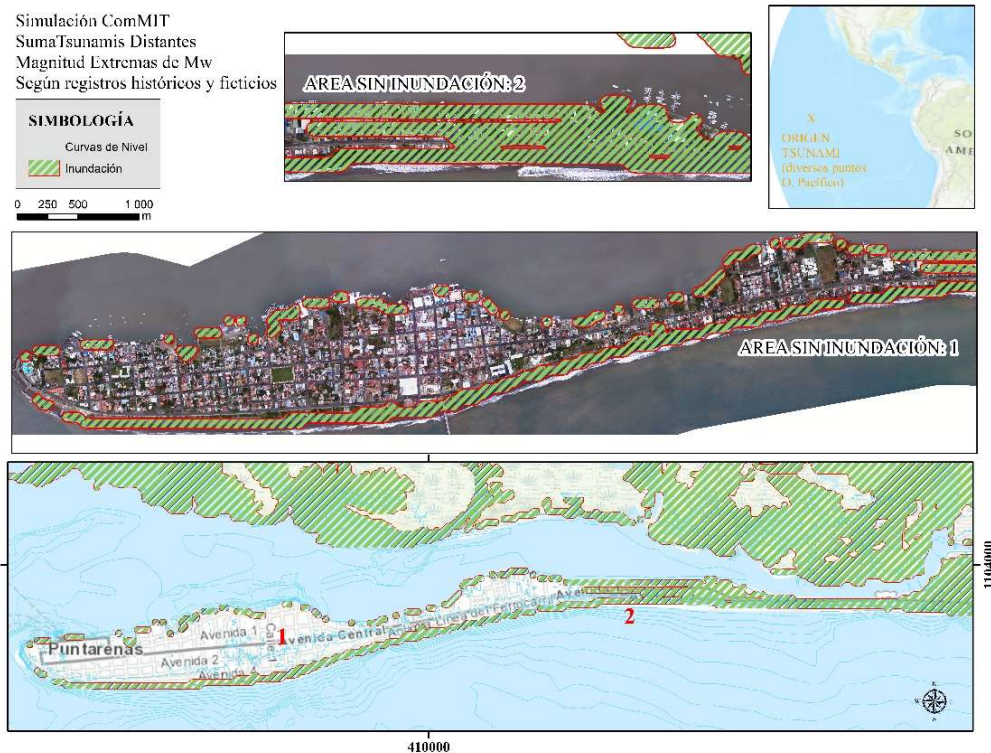


Figura 4.38 Resultado de simulación de tsunami con fuentes generadoras lejanas

Fuente: Elaboración propia, a partir de ComMIT®, Arcmap®.

Simulación ComMIT
SumaTsunamis Cercanos
Magnitud Extremas de Mw
Según registros históricos y ficticios

SIMBOLOGÍA

Curvas de Nivel
Inundación

0 250 500 1 000
m

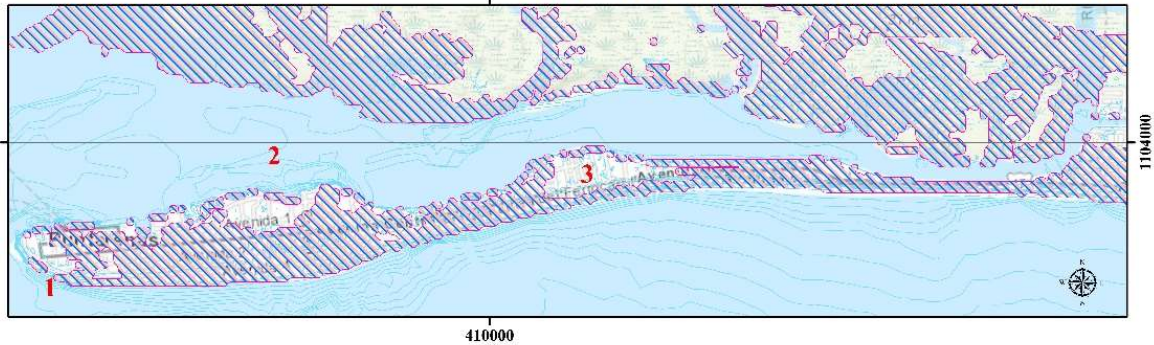


Figura 4.39 Resultado de simulación de tsunami con fuentes generadoras cercanas

Fuente: Elaboración propia, a partir de ComMIT®, Arcmap®.

Las zonas de inundación mantuvieron correlación con el comportamiento de la topografía del lugar, la propagación proliferó en los sectores con elevaciones menores, ver Figura 4.40.

La Figura 4.40 simboliza los resultados de las simulaciones numéricas enumeradas en el Cuadro 4.12 en relación a los límites de inundación o run-up. Por lo tanto se representaron las curvas de nivel obtenidas del MDE y sobre ellas se sobrepuso el polígono en color celeste que se ha exportado de los resultados de ComMIT, el cual delimita espacialmente las zonas cubiertas por los hipotéticos tsunamis.

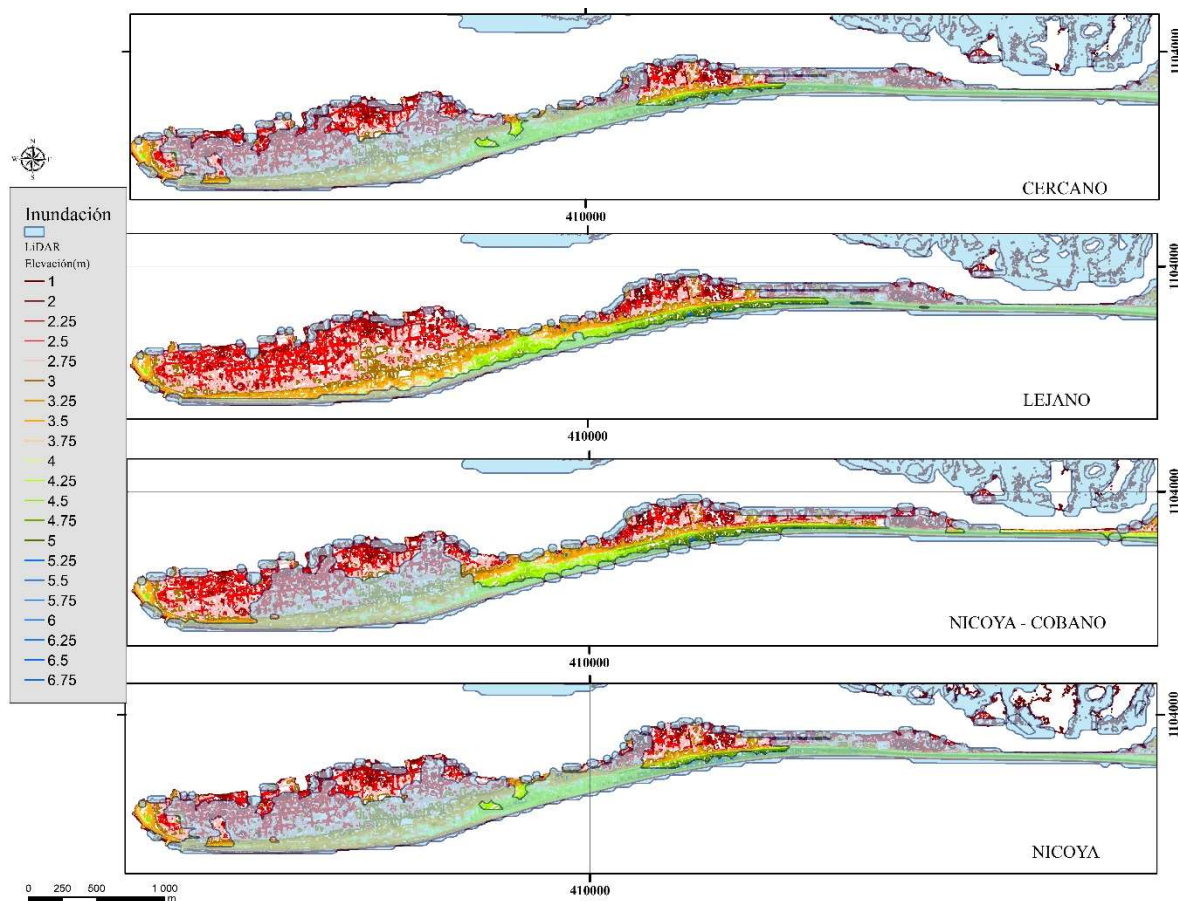


Figura 4.40 Resultado de la propagación de la suma de tsunamis simulados

Fuente: Elaboración propia, a partir de ComMIT®, Arcmap®.

Las áreas terrestres estimadas a inundarse consisten en el área en la que la energía del tsunami se desplazó horizontalmente hasta los límites denominados run-up.

Verticalmente el desplazamiento del agua dependía de la topografía del terreno, la cual disminuye el volumen de agua a medida que aumenta la pendiente del terreno. Para los escenarios estimados a inundarse correspondió la altura de inundación o tsunami según lo indicado en la Figura 4.41.

La Figura 4.41 simboliza los resultados de las simulaciones numéricas enumeradas en el Cuadro 4.12 en relación a las alturas de inundación. Se representó la conformación de la flecha litoral y sobre ella se superpuso la imagen raster en la que se efectuó la simbolización por rangos de elevación de la simulación numérica según lo que se ha exportado de los resultados de ComMIT. Delimitándose espacialmente las alturas de tsunami según sea la zona de análisis.

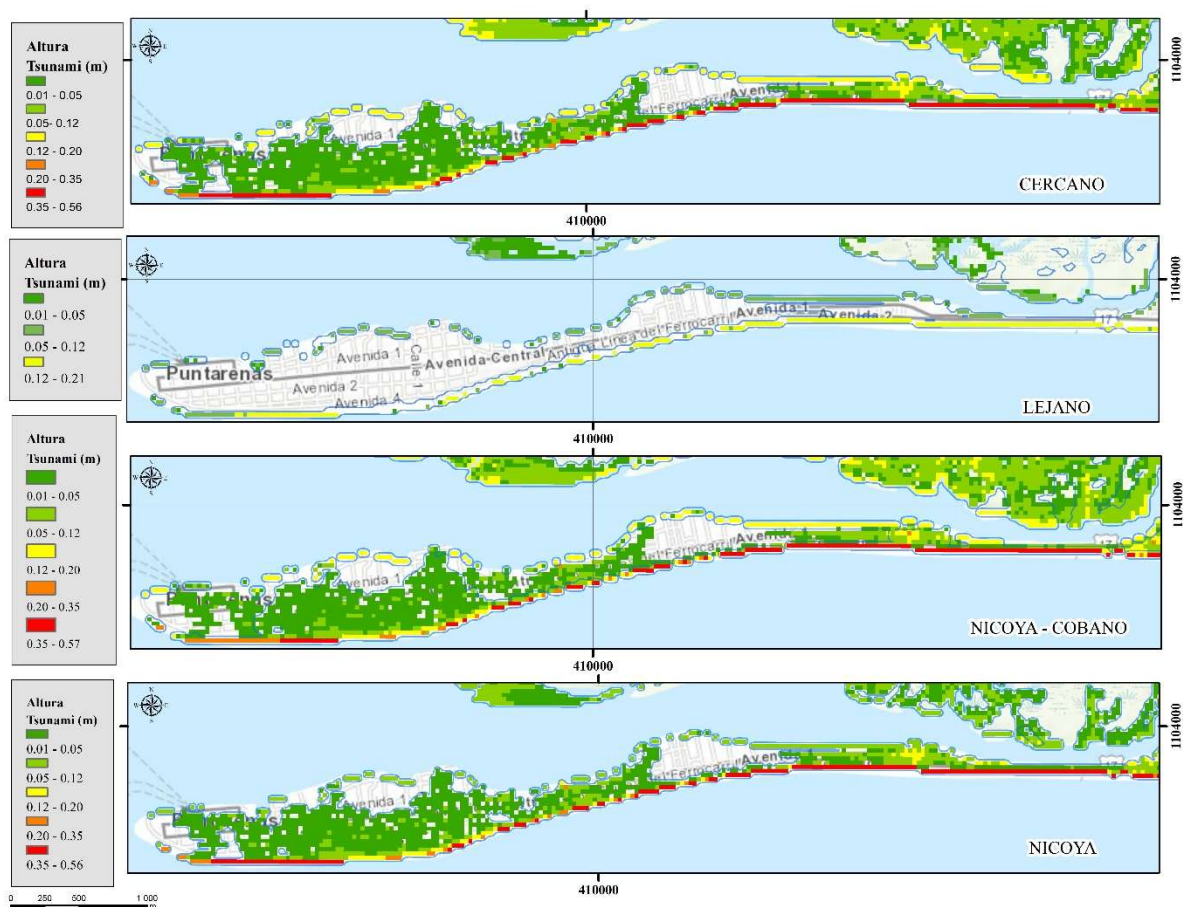


Figura 4.41 Resultado de alturas de tsunamis simulados
Fuente: Elaboración propia, a partir de ComMIT®, Arcmap®.

4.12. Algunas muestras de la emisión de los mapas de evacuación producidos a partir de la validación efectuada

El Proyecto SIA 0569-13 se encuentra en proceso de elaboración de los mapas de evacuación, los investigadores del proyecto los producen a partir de un SIG estimando las rutas más eficientes y los puntos de reunión más cercanos para cada sector del área de evacuación, de acuerdo a un procedimiento previo formulado. Posteriormente antes de realizar la publicación acuden a las comunidades para trabajar con los habitantes mediante talleres participativos. A futuro los resultados del Proyecto SIA 0569-13 se planean incorporar al Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), para lo cual se ha empezado a gestionar las reuniones correspondientes.

Capítulo 5: Análisis de Resultados

1. La técnica LiDAR es una variante de medición y representación de la topografía que capturó en un momento dado del tiempo como está compuesto un ambiente terrestre. La técnica tomó un registro tridimensional de la localización de todos los objetos presentes respecto a una referencia espacial, convirtiendo la elevación de cada elemento en un atributo o variable a representar con mucho detalle.
2. Para poder describir la geomorfología de la zona intermareal se requirió evaluar cada dato LiDAR mediante una comparación acerca de cuál información era más apta, más manipulable y con una funcionabilidad mayor para estudiar forma de la Tierra y la representación que se pretendía.
3. Con la manipulación de los insumos LiDAR se determinó que la técnica se compone de archivos LAS, DTM, DSM y ECW. Los datos LAS fueron el archivo base que contenía el registro de toda la información. Los archivos DTM y los archivos DSM fueron derivaciones de información LAS, mientras que los archivos ECW consistieron en imágenes aéreas, producidas de las campañas de medición.
4. De acuerdo a los resultados del Cuadro 4.1 para estudiar (en plenitud de condiciones) geomorfológicamente el lugar, los archivos LAS no fueron datos de entrada aptos, ya que requieren de una administración preliminar y derivación de solo los valores representativos al ser información cruda y sin clasificación.
5. Los archivos DSM comparados en el Cuadro 4.1 presentaron valores de elevación para un determinado “plano” abarcando distintos rangos ya que enfatizaron tanto elevaciones del terreno como de alturas de objetos, los resultados son producto de una clasificación de los valores y tampoco fueron los datos de entrada aptos para crear el MDE.
6. Para producir el MDE los archivos LiDAR denominados DTM fueron los seleccionados, ya que fue el formato más ventajoso de utilizar cuando se necesitó trabajar con valores topográficos del terreno únicamente. A su vez los archivos LAS y DSM también pudieron usarse pero sobre ellos antes debería ejecutarse un procedimiento denominado clasificación para obtener solo valores topográficos del terreno.
7. Respecto a la limitación de la cantidad de archivos DTM usados, se efectuó un filtro que correspondió a una operación manual en la que visualmente se localizó aproximadamente el área de estudio a través de una plataforma SIG, usando una referencia del contorno de Costa Rica. Por tal motivo los archivos empleados fueron seleccionados de acuerdo a un criterio del operador y procurando cubrir la formación costera de la flecha litoral.
8. Los datos LiDAR permitieron enriquecer el estudio de la geomorfología al centrarse en la descripción de la forma del relieve, brindando un vínculo con la realidad y representación del ambiente mediante elevaciones. Contribuyeron a estudiar la forma de la superficie terrestre a partir de datos numéricos, colocados de manera que pudieron ser vistos, examinados o juzgados con detenimiento. El grado de detalle de la información

ocasionó que se generaran múltiples archivos para abarcar el área, por eso fue necesario delimitarlos con claridad.

9. Para los resultados batimétricos expuestos; la técnica de medición ofreció como insumo base el formato de nubes de puntos, para estas no se efectuaron clasificaciones pues se limitan a solo valores de profundidades del fondo marino.
10. Se utilizaron los dos directorios batimétricos de información establecidos para este proyecto de graduación. El CR003 compuesto a partir de la carta de navegación Puntarenas a escala 1:12.500 debido a que el área de estudio es la zona intermareal de la ciudad de Puntarenas. El directorio CR006 compuesto a partir de la carta de navegación Golfo de Nicoya a escala 1:100.000 porque contribuía con información de relleno para detallar el resto del Golfo. Sin embargo para la parte próxima a la flecha litoral se utilizó solo el archivo SONDAS.DAT del directorio CR003 como insumo batimétrico dominante.
11. La selección del dato óptimo de batimetría se evaluó mediante el Cuadro 4.4 donde se determinó que el archivo SONDAS.DAT era el único que aportaba beneficios en sus características. Ya que proporcionaba un volumen mayor de datos y podía apreciarse con facilidad su sistema de referencia asociado y proyección cartográfica utilizada.
12. La investigación de los datos batimétricos usados contribuyeron a interpretar que los valores de la carta náutica se les debió efectuar una corrección para estar referidos al nivel medio del mar, ya que la carta náutica utilizó como datum el nivel promedio de bajamares.
13. El caso ideal sería haber podido efectuar una campaña de medición de batimetría, para comprobar los valores de elevación del MDE y analizar qué tan representativos eran de la realidad, mediante una propagación de errores; asumiendo como observaciones un grupo de elevaciones del fondo marino del Golfo derivadas de SONDAS.DAT próximas a la localización de un sondeo de batimetría actual. Sin embargo, no se realizó por la limitación de acceso a un bote para efectuar las mediciones. Ante este escenario se debió asumir los datos del archivo SONDAS.DAT y lo indicado en la carta náutica como “adecuado” para combinarse con los datos LiDAR y modelar la zona intermareal.
14. En cuanto a las exactitudes obtenidas de los datos LiDAR, según la contratación directa 2012CD-000164-00200 la tolerancia máxima permitida de la elevación fue de 0.15 m. Esto quiere decir que los datos con que se trabajó respetaron el requerimiento, pues la información fue validada posterior a la campaña de medición y puesta en uso. Se intentó indagar más al respecto, pero no fue posible obtener más documentación oficial. Es importante mencionar de acuerdo a las investigaciones de múltiples autores, las incertidumbres teóricas (al momento de hacer esta medición en 2012) estaban alrededor de 0,15 m en la vertical y 0,50-1,00 m en la horizontal, pero mejorándose y rondando 0,15 m en horizontal para configuraciones de terrenos planos como fue en esta ocasión.
15. Ante la necesidad de tener más confiabilidad en la información terrestre se efectuaron comprobaciones a los valores de elevación del MDE, asemejando lo indicado en el documento de la contratación. Las elevaciones de LiDAR fueron originadas y convertidas

a partir de un modelo de geoide global. La línea de nivelación directa y de primer orden Puntarenas–Barranca refirió su altura a un nivel medio del mar de cierto periodo en el tiempo.

16. El nivel medio del mar corresponde con el geoide, definido teóricamente como una superficie equipotencial donde la gravedad es igual en cualquier punto. Los datos LiDAR debieron ser convertidos para estar referidos al geoide, utilizando modelos geoidales para realizar la modificación de elevaciones. Las elevaciones de LiDAR en este proyecto fueron asociadas a los valores del modelo EGM2008. De esta forma los BM y los insumos LiDAR fueron comparables entre sí.
17. La comparación entre datos se hizo determinando las diferencias matemáticas alcanzadas entre las elevaciones de los BM y las elevaciones de datos LiDAR. Ambas se encontraron en dos épocas distintas para cuando los datos fueron representativos de la realidad, sin embargo, en materia de antecedentes fue la mejor fuente de información adquirida a compararse. Se determinaron desviaciones estándar entre cada valor de elevación de los BM y una muestra de datos de elevación del MDE, cercanos a la ubicación más probable del BM según la localización efectuada. La comparación se hizo con el motivo de conocer que tanto diferían las elevaciones del modelo, la relación con las exactitudes alcanzadas, la variabilidad o dispersión de las muestras y el valor más probable del terreno.
18. Mediante la propagación de errores realizada, las elevaciones de los BM se asumieron como teóricas, ya que no se realizaron mediciones topográficas sobre ellas, ni se determinó en campo su existencia o destrucción a la fecha. Provocando que las elevaciones de los puntos de control fueran únicamente valores de referencia.
19. Del MDE se extrajeron un conjunto de observaciones representativas para compararse con cada BM (mínimo quince puntos para un radio de hasta 10 m). La cantidad de observaciones dependió del área donde pudo localizarse el BM según los insumos recopilados y de que tanto variaría la elevación en el sector. Del conjunto de observaciones se estimó un promedio con su respectivo error medio cuadrático.
20. Los mejores EMC se obtuvieron para los BM 7-A-8, B-1, B-2, B-3, localizados en la parte media de la flecha litoral a lo largo de la línea férrea. Los BM teóricamente se encontraban consecutivos abarcando una longitud de 4,94 km, significando que de la comparación realizada los valores interpolados con mayor precisión en el MDE se encontraron en dicho sector, ya que la menor dispersión de la media aritmética se localizó ahí, alcanzado 0,03 m, 0,04 m, 0,07 m y 0,06 m respectivamente.
21. Por el contrario los mayores valores de EMC de la comparación efectuada se localizaron en el centro de la ciudad, con un rango de entre 0,17 m a 0,26 m. Recordando que los valores son teóricos ya que no existió forma de constarlos. Una suposición podría ser que el mayor crecimiento demográfico ocasionó una variación en la composición terrestre del sitio, ocasionando que las elevaciones cambiaran entre el lapso de tiempo que se monumentaron los BM y el barrido del terreno con la medición LiDAR. Significando que el valor más probable del terreno cambiara entre ambas épocas comparadas.

22. En relación a la manipulación de los datos, existió una dependencia con el software usado. Los diferentes puntos detallados permitieron pasar de los insumos LiDAR o batimétricos a un archivo que modeló las elevaciones de la zona intermareal. Se evidenció la relevancia de contener herramientas para la visualización, para la administración y para la producción de datos nuevos.
23. Civil3D ofreció herramientas para insertar los archivos de la técnica LiDAR, contribuyó a visualizarlos por intensidad de color, por rangos de elevación o por clasificaciones, utilizando en este proyecto una visualización de rangos. Con los insumos y a partir del interpolador de tipo TIN modeló la elevación obteniendo el MDE de la parte terrestre.
24. Civil3D ofreció herramientas para insertar los archivos SONDAS.DAT de la batimetría, para este caso el archivo fue un documento tabulado con valores numéricos, del insumo se efectuó la interpolación TIN de los valores y se obtuvo el MDE de la parte acuática. La utilidad del software se evidenció en que a partir de fuentes de información diversas se obtuvo un archivo de trabajo de idénticas características sobre el cual se realizaron cálculos matemáticos.
25. Otro beneficio de Civil3D en la parte acuática es que se contó con herramientas para delimitar el área de estudio, la línea frontera mencionada en los Capítulos de Metodología y Resultados se conceptualizó así y fue creada con precisión, exactitud y eficiencia. La línea fue bordeando los límites de los datos DTM de LiDAR, asegurando de esta forma no se perdiera información. Y luego bordeó los límites de SONDAS.DAT en la parte de mar adentro, ambas líneas posteriormente se unieron y conformaron un polígono. Al usar un borde que delimitó la superficie de la parte acuática pero que contempló la ubicación de los últimos valores determinados con la información LiDAR facilitó la fusión de información, porque de esta forma se suavizó el área de interacción y el programa cuando fusionó ambos datos no debió extrapolar los espacios vacíos, pues no los había ya que fueron editados a mano, logrando una transición de suavidad en el MDE y la realidad del perfil de la playa y el estero.
26. La parte terrestre del MDE debió manipularse fragmentadamente, por el motivo de aligerar la capacidad de disco y procesador del hardware utilizado, ya que el tamaño de los archivos es una de las desventajas mayores en la actualidad de la técnica LiDAR. La manipulación fragmentada consistió en generar archivos XML por separado para cada archivo DTM y posteriormente agruparlos en uno solo XML para conformar el segmento terrestre. La parte acuática se confeccionó en una sola desde el inicio, debido al volumen menor de datos batimétricos.
27. La parte acuática al proceder de un solo archivo crudo solo conformó un archivo XML de salida, caso contrario de LiDAR que utilizó diez archivos de salida, y posteriormente se agruparon en uno solo.
28. La conveniencia de la utilización de Civil3D para este proyecto y para cualquiera que abarque estas dos áreas de estudio es la manipulación con los datos, pues contiene herramientas con características ingenieriles, de exactitud, precisión y confianza que facilitan moldear los datos y obtener archivos resultantes que abarcan áreas extensas

contenidas en formatos adecuados. Es decir, presentó herramientas para manipular los archivos.

29. Respecto al proceso que conllevó la fusión de las fuentes acuática y terrestre, como se dijo anteriormente; ambas fuentes de información primero se manipularon por separado, pues obedecían a distintos archivos de origen y para evitar en lo posible aumentar el tamaño del documento de almacenaje. Segundo, cuando se planteó fusionar los datos, el sector de LiDAR debía mantener todos los valores ya que delimitaba el borde del agua, la batimetría contenía datos cercanos al borde de la playa, pero no permitía definir precisamente el límite del cuerpo de agua, por tal motivo a la superficie terrestre se le incorporó la acuática para que en ella se actualizara la parte en común permitiendo efectuar la unión de escenarios.
30. Siendo el formato XML un estándar abierto y flexible utilizado para almacenar, publicar e intercambiar cualquier tipo de información, además de ofrecer portabilidad y utilización de la información a través de distintas plataformas (como Civil3D) también es ampliamente soportado por diversas aplicaciones. En síntesis, los documentos XML usados brindaron características de simple, rápida, precisa, concisa y adecuado tratamiento de datos para aplicarse a la información topográfica.
31. El MDE se convirtió en un mecanismo que almacenó información de todo un entorno y pudo brindar muchas facilidades de trabajo debido al software en que se estableció, tales como: consulta de información, extracción de información, mapeo de información, análisis estadístico de información, entre otros.
32. Efectuando un análisis geomorfológico de los resultados del MDE se confirmó que la flecha litoral de Puntarenas es afectada por la dinámica litoral del golfo en que se encuentra. Las curvas batimétricas ilustraron una interacción entre las corrientes salientes de la desembocadura del río Tempisque y el agua marina entrante por el Golfo. Las curvas hacia la punta de la flecha describieron una región más profunda, formando una especie de canal submarino entre las islas del Golfo y la ciudad, producto de la acción de la desembocadura del río Tempisque. Al este se detallan curvas batimétricas más extendidas simulando el arribo de una ola a la costa, y hacia el centro de la flecha litoral las curvas forman crestas y montes, producto de los sedimentos acumulados debido de la interacción de materiales arrastrados y depositados por ambas fuentes.
33. Geomorfológicamente la flecha litoral contiene un perfil de playa con una pendiente que crece rápidamente, seguidamente se forma una cresta que se extiende a lo largo de toda la formación, posteriormente la flecha se extiende formando una planicie donde el terreno empieza a bajar con una pendiente más suavizada hasta llegar al nivel de agua del estero. Hacia la punta de la flecha existente una pendiente positiva, en el centro de la ciudad entre el muelle y el estero se forma una pequeña loma, en Angostura y El Cocal se encuentran las máximas elevaciones de la formación.
34. En relación a la malla de valores generada ya es un concepto incorporado al modelado numérico de tsunamis de MOST y el uso es propio del modelaje que efectúa ComMIT. La matriz de profundidades se alimentó con datos de índole topográfica, entendiéndose

que para alcanzar esa clase de información se debió elaborar todo un flujo de tareas para convertir información desde el MDE. La matriz de profundidades como ya se mencionó fue un archivo de texto que contenía ordenados coeficientes de elevación de toda la zona intermareal de la ciudad de Puntarenas definiendo una grilla de 30 m de ancho por 30 m de largo.

35. Los valores de la matriz de profundidades se verificaron mediante una simulación preliminar en el programa ComMIT, el modelaje no se estabilizó para los distintos escenarios de fuentes sísmicas, ocasionado por la malla de batimetría usada. Se analizó el comportamiento de la elevación a lo largo de la zona intermareal. Se efectuó una generalización cartográfica buscando construir nuevos datos a partir de los datos fuente, resultando una imagen cartográfica no muy legible, sin concordancia con el MDE y la realidad del lugar. Con una paleta de colores se mostró la variación de las elevaciones por rangos, observándose una generalización “pobre” ya que la expresión gráfica y la legibilidad en los rangos perdió detalle.
36. De acuerdo a la corrida de revisión, las áreas con mayor propensión a inundarse fueron escasas, debido a que los datos topográficos de entrada no delimitaron los cambios de nivel o elevación con claridad, la poca propensión a inundarse se ligó a una baja densidad en la impresión del relieve. En cuanto a referencias espaciales la simulación de tsunamis usó el nivel medio del mar, el cual fue considerado en los sistemas de coordenadas utilizados de este proyecto. Emplear datos con un origen diferente podía ocasionar leves inundaciones, por ejemplo para efectos de zona marítima costera se usan referencias de pleamares más altas y para efectos de predicciones de marea el de bajamares más bajas. Dicho factor no tuvo incidencia al conocerse que los datos de SONDAS.DAT se le aplicó el factor de corrección de 1,40 m para igualar la referencia espacial de LiDAR.
37. La revisión de los datos de la matriz de profundidades permitió determinar que los datos topográficos de entrada para la simulación numérica de tsunamis debían modificarse, porque se perdía detalle con relación a los archivos crudos de referencia, los datos se afinaron mediante otro método para alcanzar resultados más estables en la simulación.
38. Para mejorar la impresión del relieve usado en las mallas de batimetría del modelaje numérico de tsunamis se modificó la representación de puntos por líneas. Así se pudo delimitar más las áreas con variaciones de un nivel a otro, ya que se acentuó mejor el comportamiento y cobertura de las elevaciones a lo largo y ancho de un área con poca pendiente. La representación de las elevaciones por líneas en lugar de puntos, facilitó obtener planos paralelos entre sí, mediante cortes en la superficie del terreno, produciendo una mejor representación de la topografía ya que se delimitó una sección horizontal del relieve en lugar de dividir toda el área en partes iguales.
39. Con la impresión del relieve mediante líneas se pudieron terminar de definir las mallas de batimetría que el ComMIT requería para la simulación numérica de tsunamis. La malla externa de menor resolución constó del uso de datos digitalizados de otras cartas náuticas producto de la etapa del Proyecto SIA 0569-13 donde se hizo el diagnóstico de peligrosidad para definir otras localidades de interés. La malla intermedia e interna utilizó

los datos extraídos del MDE construido en el área donde interesa ver la propagación del fenómeno con máximo detalle.

40. La simulación numérica obtenida del Proyecto SIA 0569-13 fue realizada usando fuentes con distintos lugares de origen, agrupándose en fuentes lejanas y cercanas, los detalles de cada evento se sumaron en un solo resultado para contemplar todos los escenarios posibles ante una fuente generadora distante o regional. Los efectos de los casos especiales (locales) se detallaron individualmente ya que según los resultados mostrados serían las fuentes con más incidencia.
41. De acuerdo a los resultados de la simulación numérica de ComMIT y el MDE elaborado, la influencia de la suma de tsunamis distantes o lejanos sobre la flecha litoral fue total en Angostura e inexistente en la ciudad. Al sobreponer el contorno de inundación sobre las curvas de nivel elaboradas para la parte terrestre la inundación no sobrepasaría el nivel de la playa. El run-up para la suma de casos serían 2,25 m en el faro y hasta 4,50 m en El Cocal. Debido a la geomorfología de la zona intermareal y del Golfo Nicoya, el nivel en Angostura sí sería cubierto ya que es un sector más expuesto a la “energía” de oleaje según el comportamiento mostrado por las isóbatas del MDE. Las alturas de tsunami en la zona inundada alcanzaron 0,21 m como valor máximo posterior a la suma de escenarios.
42. Al sobreponer el contorno de inundación de los tsunamis cercanos sobre las curvas de nivel, toda la playa fue cubierta a diferencia del caso lejano. La ciudad al encontrarse a una elevación menor obtuvo más afectación de la inundación. Para este escenario únicamente se mantuvieron secos la punta de la flecha, el centro de la ciudad en los alrededores del parque central y el barrio El Cocal. Estos son coincidentes con puntos levemente más altos en toda la flecha. En dirección hacia la punta se formó un gradiente positivo, entre el muelle y los alrededores del parque central las curvas de nivel mostraron una pequeña loma de más de 3,50 m de elevación que pareció funcionar como divisoria de aguas de acuerdo al contorno de inundación. En el barrio El Cocal se ubicó la elevación más alta en toda la flecha respecto al nivel medio del mar superior a 5,00 m. Según esta comparación las elevaciones entre 2,75 m y 5,00 m correspondieron al run-up. Se observó una pérdida de energía de los fenómenos en sentido derecha-izquierda. La altura de los tsunamis reflejó esa pérdida de energía, ya que en Angostura la altura fue de 0,56 m y hacia el centro poblacional la altura de inundación fue hasta 0,12 m.
43. Los escenarios locales denominados Nicoya y Nicoya-Cóbano mostraron el mismo comportamiento a grandes rasgos (existiendo pequeñas diferencias), siempre inundándose mayormente Angostura, inundándose el centro de la ciudad pues se encuentra a bajo nivel, manteniéndose seco la punta por su gradiente y la zona del parque central debido quizás a la loma de protección que se asienta delante de ella, el barrio El Cocal y alrededores parecieron ser amortiguados después de la playa por la línea férrea que mantuvo las máximas elevaciones en toda la flecha litoral. Nicoya y Nicoya-Cóbano presentaron las mayores áreas de inundación y los mayores valores de alturas de tsunami, los run-up mantuvieron el comportamiento de ser mayores en Angostura y decrecieron

en la orientación de la punta, producto de la pérdida de energía del fenómeno ocasionado por la pendiente de la topografía.

44. Los run-up del escenario Nicoya concernieron a elevaciones superiores a 5,00 m en El Cocal y mayores a 2,75 m en el faro y 3,00 m en el sector del parque central, el resto de la flecha se inundó por completo. Las alturas de tsunami fueron mayores en la playa de Angostura que en el resto de la formación costera, las cuales oscilaron entre 0,20 m hasta 0,56 m. En la parte de la ciudad se alcanzó alturas de inundación de hasta 0,12 m.
45. Los run-up del escenario Nicoya-Cóbano en Angostura fueron de 4,50 m, para este escenario la inundación no sobrepasó por completo. En la parte media de la flecha litoral se localiza el barrio El Cocal, la inundación no superó las elevaciones de la playa, el run-up correspondió a 4,75 m. En el centro de la ciudad la loma de más de 3,00 m de elevación que pareció funcionar como divisoria de aguas para el escenario cercano funcionó de igual manera ya que la inundación sobrepasó la playa y luego se extendió a ambos lados rodeando dicha formación. Por último la inundación hacia la punta donde está el faro inundó hasta la elevación de 3,00 m. En cuanto a alturas de inundación; las máximas alturas siempre estuvieron en la playa alcanzando los 0,57 m, hacia el faro la altura de tsunami fue menor con un rango entre los 0,12 m a 0,20 m, en el centro de la ciudad las alturas de inundación obtuvieron valores inferiores a 0,12 m.

Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Las siguientes conclusiones se han podido obtener a partir del objetivo general y específicos planteados, acompañado de la metodología establecida para lograr su cumplimiento, junto a los resultados respectivos y análisis presentado anteriormente.

1. Se logró mediante el Proyecto SIA 0569-13 recopilar datos concernientes a la flecha litoral de la ciudad de Puntarenas y Golfo de Nicoya, obteniéndose datos LiDAR y batimétricos. Los datos confirmaron como era de esperarse, tener una densidad óptima para poder combinarse y aplicar una modelización topográfica del lugar. Se debe recalcar que para hacer dicha modelización los archivos LiDAR se discriminaron en cuanto al formato a utilizar e inmediatamente se filtraron para utilizar únicamente los que contenían datos del área de estudio. A su vez los datos batimétricos al contener solo una única fuente concreta de información se utilizaron al cien por ciento produciendo datos en casi todo el Golfo de Nicoya. La creación del MDE contempló un área de 3431 km² mediante la combinación de 82 466 puntos de sondas y 1 819 754 puntos LiDAR clasificados.
2. La recopilación de nuevos datos batimétricos mediante campañas de medición no pudo ejecutarse. Significando que no se pudiese comprobar y validar la información indicada en la carta náutica y sondeos utilizados mediante una propagación de errores. El Proyecto SIA 0569-13 pese a contar con equipo de medición batimétrica no pudo programar las visitas en las épocas estimadas, por cuestiones de tiempo con otras giras de mediciones programadas. Para no comprometer el cronograma de actividades de este proyecto de graduación y de la elaboración del modelo numérico se debió excluir esta actividad.
3. La confiabilidad de la información oficial existente en Costa Rica muchas veces resulta insuficiente e inadecuada para aportar insumos en el estudio de fenómenos naturales como por ejemplo tsunamis. Induciendo efectuar nuevas investigaciones en las que se debe partir de cero pues los antecedentes son escasos. El utilizar los datos mencionados en este proyecto fue la alternativa definida que permitió aportar información topográfica para realizar las simulaciones numéricas de tsunamis en Puntarenas. Fusionar los datos LiDAR con que se contó e involucrarlos con datos batimétricos más antiguos fue la alternativa metodológica para compensar ese retardo de información oficial con que cuenta el país, además la dificultad económica que conllevaría producir datos nuevos que fuesen densos y para un área tan extensa fue otro factor siempre a enumerar. Los datos de la parte acuática no condicionaron el mejor escenario de información, pero si permitieron reflejar como estaba compuesta geomorfológicamente la zona litoral. Localizando sus áreas de depresiones, montes, taludes, planicies entre otras formaciones.
4. Desde el punto de vista de generación de información topográfica para el estudio de un determinado ambiente, en este proyecto se logró demostrar que un MDE puede ayudar a describir con fidelidad y exactitud cómo está compuesto geomorfológicamente un sitio,

donde la modelización de elevaciones fue la base para una gran gama de aplicaciones o análisis a futuro. Es ahí donde debe hacerse distinción en cómo se confeccionó, ya que existen muchos algoritmos que ejecutan distintos métodos de interpolación, los cuales contribuyen a diversos propósitos, por consiguiente debe haber una correlación entre los datos de partida y el método de modelización de elevaciones a usarse, para considerar los resultados alcanzados como fidedignos.

5. Los MDE pueden emplearse para diversos fines, por lo que debe hacerse una adecuación a la necesidad particular ya que la resolución, su cobertura y la calidad de los datos dictamina alcances. En lo que respecta al MDE de la zona intermareal de la ciudad de Puntarenas primeramente se evaluó teóricamente con métodos comunes de interpolación antes de utilizar el modelado por interpolación TIN. Por ejemplo se estimó el de malla regular, descartado por no proporcionar beneficios para el manejo de los puntos batimétricos ya que es un método basado en celdas de un mismo tamaño, repercutiendo en el hecho de transformar la batimetría del formato vectorial al raster, ocasionando no gestionar los datos originales. Del mismo modo se valoraron métodos como el IDW o el de curvatura mínima los cuales pese a ser buenos para preservar la calidad de los datos, al efectuar un suavizado de las elevaciones en la superficie, utilizando la técnica cartográfica del vecino más cercano o un factor de ponderación como el número de puntos a manipular, afectarían a los valores de partida, pues no necesariamente se utilizaría el valor de la muestra. También se supuso un método de correlación entre variables como es el kriging pero al considerarse muchos puntos según la naturaleza de la técnica LiDAR y batimétrica; en algunos casos se encontraría el escenario teórico de densidad de valores, lo cual no es apropiado puesto que afectaría la correlación con las semivarianzas que aplica el método. El presente proyecto demostró que por la calidad de los datos y el objetivo debía utilizarse un tipo de MDE construido conforme al aprovechamiento máximo de insumos, usando para ello una compleja estructura de datos que respetara cada valor de la muestra como lo hace el método TIN. Omitiendo la recomendación de múltiples autores que no lo aconsejan por la inestabilidad de manejo y tamaño de almacenamiento, cuando la fuente es densa. De esta forma se reforzó el concepto de que no existe un método de interpolación superior, debido a la importancia que debe hacerse al criterio del operador, ya que los métodos de interpolación se ajustan a los datos y objetivos a cumplir.
6. El Proyecto SIA 0569-13 obtuvo los valores requeridos para efectuar el análisis académico correspondiente que definiría la siguiente etapa de mapas de evacuación y talleres de educación con la población puntarenense. Basándose en los valores topográficos determinados con el MDE construido y ejecutado según las corridas respectivas de los tsunamis en el software ComMIT.
7. Los resultados alcanzados con ComMIT evidenciaron que los parámetros de calidad se mantuvieron a lo largo de las etapas, los contornos de los escenarios lejano, cercano, Nicoya y Nicoya-Cóbano visualmente se ajustaron a las elevaciones deducidas del MDE general, cuando se realizó el mapa con un contorno fino de curvas de nivel a cada 0,25

m con solo el MDE obtenido de LiDAR cada accidente geomorfológico se observó correlacionado al contorno de inundación deducido y validado con ComMIT.

8. Los futuros mapas de evacuación que indicarían las zonas de seguridad así como la información a publicarse en SNIT para la flecha litoral de Puntarenas podrían considerarse como adecuados para la época en que los insumos fueron representativos del ambiente. Ya que a los insumos LiDAR se le indagó y verificó su exactitud, los datos batimétricos se refirieron al nivel medio del mar, ambos insumos se combinaron de forma que se respetó cada dato de la muestra. A los resultados se les aplicó el modelo numérico de tsunamis de MOST, obteniendo áreas y alturas de inundación validadas que conservaron correlación con las áreas de drenaje definidas en el MDE.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda la estrategia de manipulación y estudio de datos utilizados en este proyecto de graduación para distinguir las diferentes variables que condicionan la combinación de datos de la técnica LiDAR y batimetría. Debido a que se muestra cómo partir desde los datos obtenidos del proceso de medición o gestión, hasta la fusión satisfactoria y divulgación de resultados si los insumos son correctamente interpretados.
- En relación a los métodos de interpolación que pueden aplicarse a la topografía, el modelado TIN es óptimo para usarse con datos LiDAR y batimétricos pues los resultados lo demuestran. Al existir una gran correlación entre cada valor de muestra y los registros encontrados en todo el MDE. Sin embargo la estructura compleja del TIN evidenció que las áreas de trabajo deben ser muy bien definidas y vigiladas para conocer si debe contrarrestarse o buscarse una alternativa de interpolación diferente al exceder la normalización máxima sugerida afectando los recursos de hardware.
- Cuando los datos topográficos se utilizan como parámetros de por ejemplo una simulación de tsunamis o para cualquier otro estudio científico, los procedimientos se deben validar y verificar para tener certeza en los resultados emitidos, por consiguiente a un MDE siempre se le debe aplicar datos estadísticos, así se interpreta si la muestra es representativa y ofrece correlación con el fenómeno físico en forma condicional. Ya que ese no cumplimiento puede medirse y determinarse la diferencia entre el estimador y lo que se estima; al utilizar por ejemplo un promedio de los errores de ese estimador mediante un error medio cuadrático.
- Los registros de la técnica LiDAR y la extensa batimetría utilizada consumieron un alto porcentaje de la capacidad del equipo, ante ello se recomienda trabajar con equipos de cómputo que cuenten con discos duros de estado sólido (SSD, por sus siglas en inglés), e instalar los software a utilizarse en ese dispositivo, ya que al no contener platos o discos magnéticos para la memoria, los tiempos de acceso y latencia provocan una mejora de rendimiento en los tiempos de carga de los sistemas operativos. Otros elementos como la memoria interna y RAM, el procesador y la tarjeta gráfica son importantes normalizarlos para que sea un equipo profesional de diseño.

Referencias Bibliográficas

- Bosque, S. (1992). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Ediciones Rialp S.A.
- Burrough, P. (1986). *Principles of Geographical Information Systems for land resources*. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.
- Celada, J. (1999). *Levantamiento batimétrico de Las Salinas de Torrevieja con técnicas combinadas de GPS y ecosonda digital*. Madrid: PFC EUIT Topografía.
- Chacón, S., & Protti, M. (2011). Modeling a tsunami from the Nicoya, Costa Rica, seismic gap and its potential impact in Puntarenas. *Journal of South American Earth Sciences*, 372-382.
- Chance, J. (2000). *LiDAR Microconception*. Luisiana, Estados Unidos: Land Survey Inc.
- CNE. (2017). *Mapas de Amenazas de San José*. Obtenido de https://www.cne.go.cr/index.php/prevenie-desastres-menuprincipal-93/mapas-de-amenazas/cat_view/276-mapas-de-amenazas/286-san-jose/316-san-jose
- CNE, & UNA. (2014). *Uso de una plataforma SIG para la elaboración de mapas de evacuación por tsunami. Etapa 1: desde Bahía*. Heredia, Costa Rica: Departamento Física.
- COI. (2013). *Glosario de Tsunamis*. Paris, Francia: COI/UNESCO-Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).
- COI. (2018). *Tsunami Hazard in Central America: Historical Events and Potential Sources*. UNESCO. Obtenido de http://www.ioc-tsunami.org/index.php?option=com_oe&task=viewEventRecord&eventID=1840
- Cruz, R. (2016). *EDECA*. Obtenido de <http://www.edeca.una.ac.cr/files/SIG12016/Presentacion3.pdf>
- Drewes, H., Sanchez, L., Blitzkow, D., & Freitas, S. (1998). *Documento técnico sobre sistemas de referencia vertical para América del Sur*. Obtenido de http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol19/16_Virla_et_al_2014_Vertic al_Venezuela.pdf
- Dudley, W., & Lee, W. (1988). *Tsunami!* Honolulu, EE UU: Kolowalu Book, University of Hawaii Press.
- Dzurisin, D. (2007). *Volcano Deformation*. Berlin: Die Deutsche Bibliothek.

- Enwright, N. (2017). *Using relative topography and elevation uncertainty to delineate dune habitat on barrier islands*. U.S. Geological Survey. Obtenido de:
<https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5bd119f3e4b0b3fc5ce163e6>
- Fallas, J. (2007). *Modelos digitales de elevación: teoría, métodos de interpolación y aplicaciones*. San José, Costa Rica.
- Felicísimo, A. (1994). *Modelos digitales del terreno, introducción y aplicaciones en ciencias ambientales*. Oviedo: Universidad de Oviedo, Escuela de Minas, Energía y Materiales.
- Forrester, W. (1983). *Canadian Tidal Manual*. Otawwa: The Canadian Hydrographic Service.
- Foxgrover, A., Finlayson, D., Jaffe, B., & Fregoso, T. (2018). *Bathymetry and Digital Elevation Models of Coyote Creek*. U.S. Geological Survey. Obtenido de:
<https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20111315>
- Fuentes, R., Hernandez, R., Jimenez, C., Montilla-Rosero, E., Saavedra, E., & Silva, A. (2014). *Observatorio LIDAR-CEFOP*. Obtenido de
http://www.tigo.cl/documents/sirgas/Poster_LiDAR_Observatorio-LIDAR-CEFOP.pdf
- IAGS. (1970). *Manual de computaciones para levantamientos: Nivelación Diferencial*. Colorado, Estados Unidos: Escuela Cartográfica del Servicio Geodésico Interamericano.
- IGN. (2013). *Implementación de un SIG de las Lineas de Nivelación del IGN Costa Rica*. San Jose.
- INCOP. (2014). *Puntarenas y su Historia*. Obtenido de
http://www.incop.go.cr/la_ciudad_de_puntarenas.php?p=91
- INEGI. (2014). *Modelos Digitales de Elevación (MDE)*. Obtenido de
<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/Preview.aspx>
- INEGI. (2015). *Tecnología LIDAR*. Obtenido de:
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/LiDAR.aspx>
- Lizano, O. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Ciencia y Tecnología*, 52.
- Lizano, O. (2010). Batimetría, modelos de elevación digital y sus aplicaciones. *Azimuth*, 18-21.

- Madrigal, R. (2008). *Información sobre la amenaza de tsunami*. San José, Costa Rica: Comisión Nacional de Emergencia.
- Nielsen, V., & Quesada, M. (2006). *Ambientes Marinos Costeros de Costa Rica*. CIMAR. San José, Costa Rica: The Nature Conservancy (TNC). Recuperado el 13 de Abril de 2017, de http://www.mespinozamen.com/uploads/4/5/7/6/4576162/infome_tecnico_ambientes_marinos_cr-czee_2006.pdf
- NOAA. (2015). *Centro para la Investigación de Tsunamis de la NOAA*. Obtenido de <http://nctr.pmel.noaa.gov>
- Núñez, A., Valbuena, J., & Velasco, J. (1992). La nueva era de la topografía. *Técnica Topográfica*, 52-64.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, España: Victor Olaya.
- Priego de los Santos, J. E., & Porres de la Haza, M. J. (3 de 10 de 2018). *La triangulación de Delaunay aplicada a los modelos digitales del terreno*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: http://www.age-geografia.es/tig/docs/doc1_8.pdf
- Rodríguez, R. (2008). *Aplicación de tecnología LIDAR en levantamientos topográficos de líneas de transmisión*. Heredia: Escuela Topografía Catastro y Geodesia, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- RSN. (2013). *¿Costa Rica está a salvo de los Tsunamis?* Obtenido de <http://www.rsn.ucr.ac.cr/index.php/home/faq/otros-temas/612-es-posible-un-tsunami-en-costa-rica-y-cuales-zonas-se-verian-afectadas> 7-2-15
- RSN. (2014). *¿Qué es un tsunami?* Obtenido de <http://www.rsn.ucr.ac.cr/index.php/home/faq/otros-temas/516-conociendo-los-tsunamis>
- Scheider, A. (1900). *Costas y Montañas*. Barcelona, España: Presa Hermanos.
- Silva, A. (1982). *Fenómeno pleamar establece nivel para zona marítimo terrestre*. San Jose, Costa Rica: Facultad Derecho Universidad Costa Rica.
- Torres, J. (2014). *CNE afirma que no hay alerta de tsunami para Costa Rica tras terremoto en Chile*. Obtenido de <http://www.crhoy.com/cne-afirma-que-no-hay-alerta-de-tsunami-para-costa-rica-tras-terremoto-en-chile-u4l7x/>
- Velasquez, B., Marin, C., & Ordonez, D. (2013). *Análisis de la calidad interpolante de cinco algoritmos en un modelo digital de elevaciones, en función del error medio*

cuadrático. Armenia, Colombia: Universidad del Quindío, programa de Tecnología en Topografía.

Virla, M., Wildermann, E., Hoyer, M., Hernández, J., Álvarez, R., & Medina, H. (24-26 de Noviembre de 2014). *Revisión, estado actual y alternativas para el Control Geodésico Vertical de Venezuela*. Obtenido de http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol19/16_Virla_et_al_2014_Vertical_Venezuela.pdf

Wildermann, E. (2001). *Análisis y comparación de sistemas verticales en Venezuela*. Obtenido de http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol19/16_Virla_et_al_2014_Vertical_Venezuela.pdf

**Anexo 1. Fichas de Bancos de Nivel de la línea de Nivelación Puntarenas-Barranca,
localizados en el área de estudio del Proyecto**

PAIS	Costa Rica	CARACTERISTICA DE LA MARCA	Disco de 9 Cms.	DESIGNACION	
PROVINCIA, ESTADO, O DEPARTAMENTO	Puntarenas	ESTABLECIDA POR (ORGANIZACION)	Empotrado en la acera de cona.	ELEVACION	7
MUNICIPIO, COMUNA, O CANTON	Puntarenas	ORGANIZACION (FUNDIDA EN LA MARCA)	I. G. C. R.	ORDEN	(M)
LINEA	Puntarenas	ESTAMPADA	I. G. C. R.	DATUM	(FINAL) (PRELIMINAR)
Puntarenas - Barranca		7			

DESCRIPCION DETALLADA DEL PUNTO

En Puntarenas la marca se encuentra empotrada al pie de una columna de madera que esta en la esquina noreste de la estación del Ferrocarril Eléctrico al Pacífico a 3 metros al sur del eje de la ruta, y a nivel del piso de la estación. Desde el centro de la plataforma de concreto donde está la torre, está con rumbo oeste a 6 metros; desde la esquina sureste del edificio de la estación con rumbo N25W a 12.1 metros; y desde el poste No. 36, Km. 115 de líneas eléctricas del ferrocarril con rumbo S25W a 7.9 metros.

El eje de la ruta adyacente a la marca está 0.2 metros más bajo; de ahí a 30 metros este 0.2 metros más bajo; y a 30 metros oeste 0.2 metros más bajo.

Las diferencias de nivel se refieren a la marca.

(DESCRITA) O (RECUPERADA) POR: Danilo Solís B. ORGANIZACION: I. G. C. R. FECHA: Noviembre de 1956

PAIS	Costa Rica	CARACTERISTICA DE LA MARCA	Disco de 9 Cms.	DESIGNACION	
PROVINCIA, ESTADO, O DEPARTAMENTO	Puntarenas	ESTABLECIDA POR (ORGANIZACION)	Empotrado en borde de concreto	ELEVACION	P-1
MUNICIPIO, COMUNA, O CANTON	Puntarenas	ORGANIZACION (FUNDIDA EN LA MARCA)	I. G. C. R.	ORDEN	3.5677
LINEA	Puntarenas	ESTAMPADA	I. G. C. R.	DATUM	(FINAL) (PRELIMINAR)
Puntarenas - Barranca		P-1 1956			

DESCRIPCION DETALLADA DEL PUNTO

En Puntarenas en el Parque Victoria la marca se encuentra empotrada en el borde de concreto al extremo sur de la escalinata oeste del kiosco, a 23.3 metros al oeste del eje de la ruta, y a nivel del piso del kiosco. Desde el centro del portón de hierro para entrar al garage de una casa, está con rumbo N45E a 18.9 metros; desde el centro del piso del kiosco con rumbo S40W a 4.7 metros; y desde el centro de la escalinata oeste con rumbo S5E a 2.3 metros.

El eje de la ruta adyacente a la marca está 1.5 metros más bajo; de ahí a 30 metros norte 1.5 metros más bajo; y a 30 metros sur 1.5 metros más bajo.

Las diferencias de nivel se refieren a la marca.

(DESCRITA) O (RECUPERADA) POR: Danilo Solís B. ORGANIZACION: I. G. C. R. FECHA: Noviembre de 1956

PAIS	Costa Rica	CARACTERISTICA DE LA MARCA	Disco de 9 Cms.	DESIGNACION	
PROVINCIA, ESTADO, O DEPARTAMENTO	Puntarenas	ESTABLECIDA POR (ORGANIZACION)	Empotrado en grada de concreto	ELEVACION	6
MUNICIPIO, COMUNA, O CANTON	Puntarenas	ORGANIZACION (FUNDIDA EN LA MARCA)	I. G. C. R.	ORDEN	(M)
LINEA	Puntarenas	ESTAMPADA	I. G. C. R.	DATUM	(FINAL) (PRELIMINAR)
Puntarenas - Barranca		C.F.-6 1947			

DESCRIPCION DETALLADA DEL PUNTO

En Puntarenas la marca se encuentra empotrada en el extremo sur de la 2a. grada de la escalinata en la esquina noreste de la Aduana, a 8.2 metros al sur del eje de la ruta, y a nivel de la grada. Desde la esquina noreste del edificio de la Aduana está con rumbo N60E a 1.7 metros; desde la intersección de la vía férrea y la calle del cuadrante con rumbo S20E a 11.3 metros; y desde el poste de líneas eléctricas del ferrocarril eléctrico al Pacífico, con rumbo S40E a 6.0 metros.

El eje de la ruta adyacente a la marca está 0.6 metros más bajo; de ahí a 30 metros este 0.6 metros más bajo; y a 30 metros oeste 0.6 metros más bajo.

Las diferencias de nivel se refieren a la marca.

(DESCRITA) O (RECUPERADA) POR: Danilo Solís B. ORGANIZACION: I. G. C. R. FECHA: Noviembre de 1956

AGS FORM 162 10 JUNE 55

MONOGRAFIA DE LA COTA FIJA

AL. CONSTRUCCION CANTAL 2104 7.000 0.00 0.00

PAIS Costa Rica	CARACTERISTICA DE LA MARCA Disco de 9 Cms.	DESIGNACION 5
PROVINCIA, ESTADO, O DEPARTAMENTO Puntarenas	ESTABLECIDA POR (ORGANIZACION) I.G.C.R.	ELEVACION 5
MUNICIPIO, COMUNA, O CANTON Puntarenas	ORGANIZACION (FUNDIDA EN LA MARCA) I.G.C.R.	ORDEN (M)
LINEA Puntarenas - Barranca	ESTAMPADA U.S.N. SURVIVY	DATUM (FINAL) (PRELIMINAR)

DESCRIPCION DETALLADA DEL PUNTO

En Puntarenas, avenida Paseo Cortes al costado sur la marca se encuentra empotrada frente a la oficina All América Cables a 9.7 metros del eje de la ruta, y sobresale 1.20 metros del terreno. Desde el centro de un portón de madera para entrar a la oficina está con rumbo S10E a 16.9 metros; desde un árbol de "matapalo" de 0.7 metros de diametro con rumbo N85E a 20.2 metros; y desde el empalme de ejes de las calles del cuadrante con rumbo S60E a 17.4 metros.

El eje de la ruta adyacente a la marca está 1.2 metros más bajo; de ahí a 30 metros este 1.2 metros más bajo; y a 30 metros oeste 1.2 metros más bajo.
Las diferencias de nivel se refieren a la marca.

(DESCRITA O (RECUPERADA) POR: **Danilo Solís B.** ORGANIZACION: **I.G.C.R.** FECHA: **Noviembre de 1956**

MONOGRAFIA DE LA COTA FIJA

PAIS Costa Rica	CARACTERISTICA DE LA MARCA Disco de 9 Cms.	DESIGNACION 2
PROVINCIA, ESTADO, O DEPARTAMENTO Puntarenas	ESTABLECIDA POR (ORGANIZACION) I.G.C.R.	ELEVACION 3.7083
MUNICIPIO, COMUNA, O CANTON Puntarenas	ORGANIZACION (FUNDIDA EN LA MARCA) I.G.C.R.	ORDEN (M)
LINEA Puntarenas - Barranca	ESTAMPADA C.F. 2 1941	DATUM 1969

DESCRIPCION DETALLADA DEL PUNTO

En Puntarenas, avenida Paseo Cortes, costado sur, la marca se encuentra empotrada en el extremo norte de la 2a. grada de la escalinata oeste de la Capitanía del Puerto a 10 metros del eje de la ruta, y sobresale 0.40 metros del terreno. Desde la esquina este del monumento donde están los cañones está con rumbo N70E a 7.5 metros; desde la esquina suroeste de la Capitanía con rumbo N35W a 10.5 metros; y desde la esquina noroeste de la Capitanía con rumbo S20E a 8.6 metros.

El eje de la ruta adyacente a la marca está 0.3 metros más bajo; de ahí a 30 metros este 0.3 metros más bajo; y a 30 metros oeste 0.3 metros más bajo.
Las diferencias de nivel se refieren a la marca.

(DESCRITA O (RECUPERADA) POR: **Danilo Solís B.** ORGANIZACION: **I.G.C.R.** FECHA: **Noviembre de 1956**

PAIS Costa Rica	CARACTERISTICA DE LA MARCA Disco de 9 Cms.	DESIGNACION 1
PROVINCIA, ESTADO, O DEPARTAMENTO Puntarenas	ESTABLECIDA POR (ORGANIZACION) I.G.C.R.	ELEVACION 3.7661
MUNICIPIO, COMUNA, O CANTON Puntarenas	ORGANIZACION (FUNDIDA EN LA MARCA) I.G.C.R.	ORDEN (M)
LINEA Puntarenas - Barranca	ESTAMPADA C.F. 1 1941	DATUM (FINAL) (PRELIMINAR)

DESCRIPCION DETALLADA DEL PUNTO

En Puntarenas a lo largo de la calle, costado sur la marca se encuentra empotrada en la esquina este del monumento donde están montados 4 cañones a 10 metros del eje de la ruta, y sobresale 0.50 metros del terreno. Desde la esquina noroeste de la Capitanía del Puerto está con rumbo S25W a 12 metros; desde la esquina suroeste de la Capitanía con rumbo N55W a 13 metros; y desde el centro de la primera grada de la escalinata oeste de la Capitanía con rumbo S85W a 7.5 metros.

El eje de la ruta adyacente a la marca está 0.3 metros más bajo; de ahí a 30 metros este 0.3 metros más bajo; y a 30 metros oeste 0.3 metros más bajo.
Las diferencias de niveles se refieren a la marca.

(DESCRITA O (RECUPERADA) POR: **Danilo Solís B.** ORGANIZACION: **I.G.C.R.** FECHA: **Noviembre de 1956**

PAIS Costa Rica	CARACTERISTICA DE LA MARCA Hito de concreto	DESIGNACION 7-4-8
PROVINCIA, ESTADO, O DEPARTAMENTO Puntarenas	ESTABLECIDA POR (ORGANIZACION) I.G.C.R.	ELEVACION 4.1076 (M)
MUNICIPIO, COMUNA, O CANTON Puntarenas	ORGANIZACION (FUNDIDA EN LA MARCA) I.G.C.R.	ORDEN 12
LINEA Puntarenas - Barranca	ESTAMPADA 7-4-8	DATUM Doncevid (FINAL) (PRELIMINAR)

DESCRIPCION DETALLADA DEL PUNTO

En Puntarenas a lo largo del costado sur la marca se encuentra colocado en el patio del ferrocarril al Pacifico a 12.5 metros del eje de la ruta, y sobresale 0.25 metros del terreno. Desde la torre de lineas electricas del ferrocarril esta con rumbo N45E a 17.8 metros; desde el centro de la plataforma de concreto donde esta la torre de lineas electricas del ferrocarril con rumbo S80E a 12.4 metros; y desde la esquina noroeste de la casa de empleados del ferrocarril con rumbo S45W a 29.8 metros.

El eje de la ruta adyacente a la marca esta 0.3 metros mas bajo; de ahi a 30 metros este 0.3 metros mas bajo; y a 30 metros oeste 0.3 metros mas bajo.

Las diferencias de niveles se refieren a la marca.

(DESCRITA O (RECUPERADA) POR: **Danilo Solis B.** ORGANIZACION **I.G.C.R.** FECHA **Noviembre de 1956**

MONOGRAFIA DE LA COTA FIJA

PAIS Costa Rica	CARACTERISTICA DE LA MARCA Empotrado en base de concreto	DESIGNACION B-2
PROVINCIA, ESTADO, O DEPARTAMENTO Puntarenas	ESTABLECIDA POR (ORGANIZACION) I.G.C.R.	ELEVACION 4.335 (M)
MUNICIPIO, COMUNA, O CANTON Puntarenas	ORGANIZACION (FUNDIDA EN LA MARCA) I.G.C.R.	ORDEN 12
LINEA Puntarenas - Barranca	ESTAMPADA B-2	DATUM Doncevid (FINAL) (PRELIMINAR)

DESCRIPCION DETALLADA DEL PUNTO

Desde la estación del ferrocarril en Puntarenas la marca se encuentra 3.6 kilómetros al este a lo largo del costado norte de la vía férrea hacia Barranca, empotrada en la base de concreto del poste del ferrocarril que está frente a la plaza de deportes de Angostura a 1.8 metros del eje de la ruta, y a nivel de la base. Desde el poste de hierro (viejo) forrado en concreto y al lado norte de la vía está con rumbo S85E a 2 metros. No hay mas referencias.

El eje de la ruta adyacente a la marca está 0.2 metros más alto; de ahí a 30 metros este 0.2 metros más alto; y a 30 metros oeste 0.2 metros más alto.

Las diferencias de nivel se refieren a la marca.

(DESCRITA O (RECUPERADA) POR: **Danilo Solis B.** ORGANIZACION **I.G.C.R.** FECHA **Octubre de 1956**

MONOGRAFIA DE LA COTA FIJA

PAIS Costa Rica	CARACTERISTICA DE LA MARCA Empotrado en cortina de concreto	DESIGNACION B-3
PROVINCIA, ESTADO, O DEPARTAMENTO Puntarenas	ESTABLECIDA POR (ORGANIZACION) I.G.C.R.	ELEVACION 3.1987 (M)
MUNICIPIO, COMUNA, O CANTON Puntarenas	ORGANIZACION (FUNDIDA EN LA MARCA) I.G.C.R.	ORDEN 12
LINEA Puntarenas - Barranca	ESTAMPADA B-3	DATUM Doncevid (FINAL) (PRELIMINAR)

DESCRIPCION DETALLADA DEL PUNTO

Desde la estación del ferrocarril en Puntarenas la marca se encuentra 5.5 kilómetros al este, a lo largo del costado norte de la vía férrea hacia Barranca, empotrada en la esquina sureste de la cortina de concreto que sirve como defensa a la torre de las lineas eléctricas del I.G.C.R. a 17.6 metros del eje de la ruta, y a nivel de la cortina. Desde la esquina suroeste de la cortina de la torre del I.G.C.R. está con rumbo N 85E a 5.6 metros; desde el poste de hierro de lineas eléctricas del ferrocarril con rumbo N60W a 26.9 metros; y desde un poste de hierro (viejo) forrado en concreto con el numero P-11, Ra. 110 con rumbo N65E a 42.9 metros.

El eje de la ruta adyacente a la marca está 0.1 metros más alto; de ahí a 30 metros este 0.2 metros más alto; y a 30 metros oeste 0.1 metros más alto.

Las diferencias de nivel se refieren a la marca.

(DESCRITA O (RECUPERADA) POR: **Danilo Solis B.** ORGANIZACION **I.G.C.R.** FECHA **Octubre de 1956**

MONOGRAFIA DE LA COTA FIJA

PAIS Costa Rica	CARACTERISTICA DE LA MARCA Empotrado en Hito de concreto	DESIGNACION B-4
PROVINCIA, ESTADO, O DEPARTAMENTO Puntarenas	ESTABLECIDA POR (ORGANIZACION) I.G.C.R.	ELEVACION 2.7678 (M)
MUNICIPIO, COMUNA, O CANTON Puntarenas	ORGANIZACION (FUNDIDA EN LA MARCA) I.G.C.R.	ORDEN 12
LINEA Puntarenas - Barranca	ESTAMPADA B-4	DATUM Doncevid (FINAL) (PRELIMINAR)

DESCRIPCION DETALLADA DEL PUNTO

Desde la estación del ferrocarril en Puntarenas la marca se encuentra 6.4 kilómetros al este a lo largo del costado norte de la vía férrea hacia Barranca, colocada dentro del cementerio de la Chacarita, 0.4 metros al norte de la tapia sur a 20.1 metros del eje de la ruta, y sobresale 0.05 metros del terreno. Desde el centro del portón de hierro de la entrada este del cementerio está con rumbo oeste a 9.3 metros; desde una palmera en el extremo sur de la fila oeste de palmeras en el cementerio, con rumbo S65W a 7.7 metros; y desde la esquina suroeste de la tumba de la familia Wong con rumbo S15W a 2.3 metros

El eje de la ruta adyacente a la marca está 1 metro más alto; de ahí a 30 metros este 1 metro más alto; y a 30 metros oeste 1.2 metros más alto.

Las diferencias de nivel se refieren a la marca.

(DESCRITA O (RECUPERADA) POR: **Danilo Solis B.** ORGANIZACION **I.G.C.R.** FECHA **Octubre de 1956**

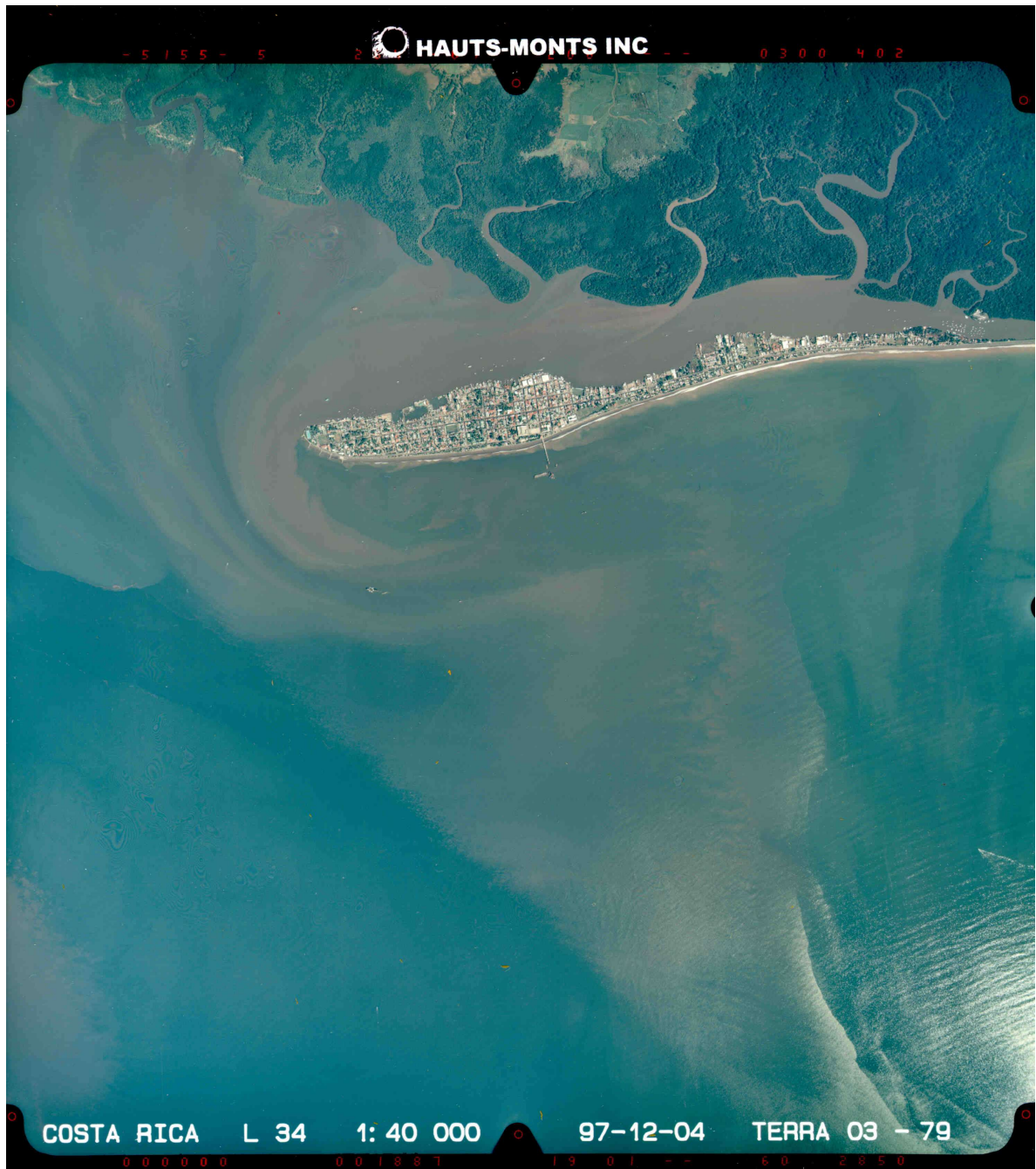
MONOGRAFIA DE LA COTA FIJA

**Anexo 2. Imágenes fotogramétricas históricas de la flecha litoral de Puntarenas,
proyectos CAW y TERRA**









**Anexo 3. Documentación oficial de la licitación 2012CD-000164-00200 Captura de
datos en la franja costera entre Puntarenas y el Parque Marino Ballena y
Desembocadura del Río Pirris-Parrita**



Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y
Atención de Emergencias
Departamento de Proveeduría Institucional

CONSTANCIA-077-2012

AL SER LAS 11 HORAS, DEL DIA 25 de octubre DEL DOS MIL DOCE, EN LA OFICINA DE PROVEEDURÍA SE HACE LA SIGUIENTE constancia :

Se promueve la Contratación Directa 2012CD-000164-00200 "Captura de datos en la franja costera entre Puntaenas y el Parque Marino Ballena y Desembocadura del Río Pirris- Parrita " de conformidad con el artículo 131 inciso "a" del Reglamento de la Ley de Contratación Administrativa, con la Empresa **Aerodiva S.A.**, por un monto total de \$225.000.00 dólares, para un total de Kilómetros cuadrados incluidos en el estudio de 305.

1. DESCRIPCIÓN DEL OBJETO CONTRACTUAL:

Para la Comisión Nacional de Prevención de Riesgo y Atención de Emergencias y el país en general, es de suma importancia contar con estudios espaciales que ofrezcan información muy precisa del terreno, tanto sobre zonas inundables, como propensas a deslizamientos y poder a partir de esta plataforma de información, iniciar procesos gestión del riesgo, que incluyen limitaciones en el uso del suelo, precisión de amenazas, desarrollo de sistemas de alerta temprana y otros.

La región de la franja Costera de Pacífico Central, ha sido severamente afectada por procesos recurrentes relacionados a Mareas extraordinarias, oleaje fuerte, erosión costera . Para algunos investigadores este tipo de efectos pueden estar relacionados al cambio climático. Además se sabe la altísima vulnerabilidad de estas zonas a los tsunamis, tanto lejanos como cercanos.

En esta franja costera se han desarrollado comunidades, actividades turísticas, y otros y la necesidad de regular el uso del suelo sobre la misma lleva a la CNE a tratar de levantar en el mayor detalle posible el perfil topográfico de esta zona.

En esta área, hay muy fuertes presiones por un uso extensivo de viviendas y turístico, y se requiere contar con información muy precisa para que los municipios, tengan herramientas técnicas solidas que les permitan controlar y limitar el uso del suelo, en aquellas áreas que por sus condiciones de vulnerabilidad, no deben ser utilizadas para construcción de obras civiles y otros usos. **Personas beneficiadas con el proyecto:** Se estima que la cantidad de personas beneficiadas con la ejecución de este proyecto es superior a las 75 000 personas.

Teléfono (506) 22-10-28-28, ext. 795 Fax No. 2220-4077/ 2220-0610
Apartado Postal: 5258-1000, San José, Costa Rica
Página Web: www.cne.go.cr Correo electrónico: proveeduria@cne.go.cr



Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y
Atención de Emergencias
Departamento de Proveeduría Institucional

2. **Productos esperados:**

2.1 VUELO DIGITAL

➤ **Primera entrega.**

Permitirá comprobar la geometría del vuelo. Imágenes en formato TIFF.
Coordenadas de los Centros de Proyección en WGS84 y sistema local.

2.2 VUELO LIDAR

➤ **Primera entrega.**

Entrega en Tiempo Real. Permitirá comprobar la geometría del vuelo. Nube de puntos del Lidar bruto.

2.3 CONTROL DE CALIDAD DE DATOS LIDAR

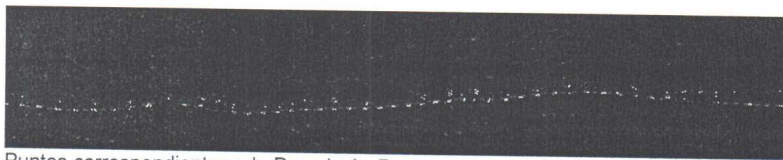
El control de calidad se realiza, en tres fases diferentes:

2.3.1 CONTROL DE CALIDAD EN EL CÁLCULO DE LA TRAYECTORIA.

Estimación del valor de la precisión en cálculo DGPS.--- Estimación del valor de la precisión en cálculo GPS+INS (mostrado en gráficas anteriores).



2.3.2 CONTROL RELATIVO ENTRE LÍNEAS DE VUELO



Puntos correspondientes a la Pasada 1 · Puntos correspondientes a la Pasada 2

Teléfono (506) 22-10-28-28, ext. 795 Fax No. 2220-4077/ 2220-0610
Apartado Postal: 5258-1000, San José, Costa Rica
Página Web: www.cne.go.cr Correo electrónico: proveeduria@cne.go.cr



Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y
Atención de Emergencias
Departamento de Proveeduría Institucional

En el control relativo, se analiza el valor de la diferencia de cota entre pasadas contiguas, asegurando que este no supera la tolerancia fijada en 15 cm. Esto significa que el modelo de elevación es coherente.

2.3.3 CONTROL ABSOLUTO.

Se realiza un control absoluto de toda la zona, mediante la comparación con puntos de cota o cartografía disponible.

3. Tiempo de entrega del trabajo:

Se estima de la siguiente forma. (**Tiempo máximo**)

- Captura de datos, entrega de datos brutos : en tiempo real, entrega de datos finales de cartografía: 45 días naturales.

4. Razonabilidad

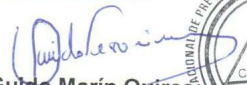
Consideramos que el precio de la oferta es razonable por ser único oferente y principalmente, por no poderlo comparar con otros proveedores de este servicio ya que no existen en el país.

De acuerdo a investigaciones previas, el costo es similar en otros países de la región donde se han realizado levantamientos de esta naturaleza.

5. Conveniencia de la metodología

Debo indicar que según consultas a profesionales de diferentes instituciones involucradas en el proceso, se ha concluido que la forma más apropiada para obtener el mejor resultado de la contratación es por medio de Modelos Digitales de Terreno de Alta Precisión Mediante Tecnología LIDAR.

Se señala como fecha y hora máxima para la recepción de ofertas y recibos de garantía de participación en los casos que proceda, a **las 14:00 horas del día 01 de noviembre de 2012**, en el Departamento de Proveeduría Institucional.


Lic. Guido Marín Quiros
Jefe, Departamento de Proveeduría Institucional



Teléfono (506) 22-10-28-28, ext. 795 Fax No. 2220-4077/ 2220-0610
Apartado Postal: 5258-1000, San José, Costa Rica
Página Web: www.cne.go.cr Correo electrónico: proveeduria@cne.go.cr

Anexo 4. Documentación oficial donde se describe el Proyecto General al que se encuentra vinculado el presente proyecto de graduación

Código: 0569-13 **Estado:** En Formulación

Título: Uso de una plataforma SIG para la elaboración de mapas de evacuación por tsunami. Etapa 1: desde Bahía Santa Elena a Cabo Blanco y ciudad de Puntarenas, Litoral Pacífico Costarricense

Vigencia del 01-Enero-2014 **al** 31-Diciembre-2016

Tipo de Proyecto: Disciplinario

Resumen:

El proyecto tiene como objetivo realizar mapas de evacuación por tsunami para las localidades más vulnerables a lo largo de las costas del NW del país (desde la frontera NW con Nicaragua, hasta Cabo Blanco en el extremo S de la Península de Nicoya) y para la ciudad de Puntarenas. Este proyecto representa una primera fase de un plan nacional, en el que sucesivamente se pretende completar el trabajo en los otros 3 sectores costeros del país (Puntarenas-Golfo de Nicoya y Pacífico Central, Osa y Pacífico Sur y Caribe). En el proceso de generar los mapas de evacuación se generará información útil para la CNE para tomar otras medidas preventivas en el futuro.

Asimismo, el proyecto divulgará la información recopilada y elaborada, a través de capacitaciones, productos cartográficos, memorias y guías que puedan ser distribuidos a los habitantes de la costa, tomadores de decisiones y demás personal público relacionado con el medio.

Justificación:

Los tsunamis son un fenómeno natural ocasionado por una perturbación súbita de la superficie del agua. Su causa más común son los sismos por subducción, aunque también pueden ser causados por erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra submarinos, caída de meteoritos, etc. (Levin and Nosov 2009, p. 3). Su ocurrencia es mayor en el Océano Pacífico aunque hay registros de tsunamis en todos los océanos y en algunos lagos (NGDC/WDS 2013), (Levin and Nosov 2009, p. 1). La mayoría de los tsunamis son apenas perceptibles para la población y sólo ocasionan daños menores en lugares muy cercanos a su origen, sin embargo los tsunamis pueden causar daños de consideración no sólo en su zona de generación sino también en lugares lejanos, inclusive al otro lado del océano (Levin and Nosov 2009, p. 5). Todos los tsunamis son diferentes, ya que sus períodos dependen del fenómeno que los generó, adicionalmente se ven modificados por la batimetría del océano por el que viajan. En el caso de tsunamis generados por terremotos, la mayor parte de la energía liberada por el tsunami está dirigida en dirección perpendicular al rumbo del sismo que los causó y alineada con el centro de la longitud de ruptura (Okal 2009). Como la velocidad de propagación de los tsunamis depende de la profundidad del mar, viajan a altas velocidades en las planicies abisales pero reducen la velocidad conforme se acercan a la costa incrementando su altura. Adicionalmente, ciertos aspectos batimétricos de las regiones costeras pueden causar refracción y resonancia de un tsunami provocando que las alturas de éste varíen grandemente entre playas vecinas (Levin and Nosov 2009, p. 4).

Los mayores tsunamis ocurridos en el siglo XX fueron ocasionados por sismos (Chile 1960 Mw 9.5, Alaska 1964 Mw 9.2, Rusia 1952 Mw 9.0, Colombia 1906 Mw 8.8) (NGDC/WDS 2013). Estos tsunamis causaron muertes muy lejos de su zona de generación, muchas de las cuales se hubieran evitado si las poblaciones hubieran estado preparadas ante la llegada del tsunami. En lo que llevamos del siglo XXI se han dado dos grandes tsunamis, el de Indonesia de 2004 (Mw 9.1) y el de Japón de 2011 (Mw 9.0). El tsunami de Indonesia marcó una cifra histórica de muertes por tsunami: más de 220,000, alrededor de 170,000 de ellas en Indonesia (NGDC/WDS 2013) debido a la ausencia total de sistemas de alerta y preparación en la cuenca del Océano Índico. En el caso de Japón, la magnitud del tsunami fue subestimada (Hoshiba et al. 2011), sin embargo, el buen funcionamiento de los sistemas de alerta japoneses y la buena preparación

de su población redujeron considerablemente la cifra de muertes causadas por dicho tsunami comparadas con las del 2004, a alrededor de 17.000 (NGDC/WDS 2013). Adicionalmente, el Centro de Alerta de Tsunamis del Pacífico (PTWC) y los planes de mitigación de las comunidades en riesgo evitaron que se presentarán muertes fuera de la zona de generación.

La Guía de Preparación para Casos de Tsunami de la Comisión Oceanográfica Internacional (UNESCO 2008) establece cinco pasos para crear un plan de mitigación de riesgos vinculados a tsunamis:

1. Estudio de antecedentes. Contempla factores socioeconómicos y datos topográficos y batimétricos, así como información sobre tsunamis históricos
2. Diseño de un tsunami hipotético. Consideración del peor escenario ocurrido en el pasado y/o el peor escenario con posibilidad de ocurrir en el futuro. Consideración de tsunamis locales y lejanos.
3. Estimación de los daños. Basada en daños por tsunamis anteriores y en uso actual del terreno, datos demográficos, de industria y turismo. Con base a esta se determinan los sitios y rutas de evacuación y zonas de seguridad, así como el tiempo con el que se cuenta para evacuar.
4. Tareas de preparación. Planeamiento urbano y sistema de organización para hacer frente a emergencias.
5. Establecimiento del plan. Señalización, educación continua a la población, coordinación con sector turismo e industria en la región.

Con la información obtenida en los tres primeros pasos se pueden generar mapas de evacuación así como planes de regulación territorial, y se puede decidir la construcción de refugios para tsunamis. Todos estos aspectos forman parte del plan de mitigación de riesgos vinculados a tsunamis.

Los mapas de evacuación por tsunamis no son lo mismo que los mapas de inundación por tsunamis, éstos últimos sólo muestran las áreas eventualmente inundadas por tsunamis. Los mapas de evacuación deben incluir las rutas de evacuación que puedan utilizarse con el tiempo suficiente para alejarse del alcance del tsunami, así como los sitios seguros a los que se puede ir en caso de tsunami. Por lo tanto deben contemplar aspectos socioeconómicos (cantidad de población expuesta, caminos disponibles, posibles refugios, etc.) y aspectos científicos (altura esperada del tsunami y hora esperada de arribo).

En el Handbook of Tsunami Evacuation Planning publicado por el Centro Conjunto de Investigación de la Unión Europea (JRC por sus siglas en inglés) (Scheer et al. 2011) se detalla un procedimiento para elaborar planes de evacuación por tsunami por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que es en el que se basará este proyecto para elaborar los mapas de evacuación.

Como indica la guía de la UNESCO (2008), un mapa de evacuación por sí sólo no es suficiente para evitar muertes por tsunamis. Debe estar acompañado por una rotulación efectiva de las rutas de evacuación y por un sistema de alerta que notifique efectivamente a la población las órdenes de evacuación, así como una educación permanente a la misma sobre lo que se debe hacer en caso de alerta de tsunami. Estos tres últimos aspectos competen a la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) a la cual este proyecto proveerá de las herramientas científicas para hacerlo.

A pesar de contar con más de mil kilómetros de costa, en Costa Rica no se cuenta con mapas de evacuación por tsunami: no se han creado mapas de inundación, no se han delimitado rutas de evacuación ni se han asignado posibles refugios. Todo lo anterior se debe hacer en base a información científica generada por medio de simulaciones numéricas del arribo de tsunamis a nuestras costas, de las cuales se han efectuado muy pocas. Una de ellas simuló uno de los posibles escenarios de un terremoto en Nicoya y la llegada del consiguiente tsunami a Puntarenas (Chacón-Barrantes and Protti 2011). En otra se simuló la llegada de un tsunami a Puntarenas con características similares al de Colombia de 1906, Mw 8.8 además de otros dos escenarios (Ortiz et al. 2001). La limitante para hacer

simulaciones numéricas de tsunamis siempre ha sido la falta de batimetría de resolución fina en la gran mayoría de las costas de nuestro país.

En nuestro país no se registran oficialmente muertes por tsunami, sin embargo esto no quiere decir que no hayan fallecido personas por esta causa ni que no hayan arribado tsunamis a nuestras costas en el pasado (Fernández-Arce and Alvarado-Delgado 2005), (Fernández-Arce et al. 1999), (Fernández-Arce et al. 2000), (Fernández-Arce et al. 1993). Por ejemplo el 20 de enero de 1905 alrededor de las 8pm se reportó el arribo de un tsunami a la Isla del Coco, el cual inclusive arrancó algunas palmeras (Molina 1997). Se tiene muy poca información al respecto pero se cree que fue causado por un sismo ocurrido en la costa del Pacífico Norte de Costa Rica a las 6:23pm del mismo día. Más recientemente, los tsunamis de Japón de 2011 y de Chile de 2010 también han causado variaciones importantes del nivel del mar en la Isla, específicamente en Bahía Wafer, las cuales se han mantenido por alrededor de 24 horas, sugiriendo un posible efecto de resonancia de tsunamis en dicha Bahía.

Otros ejemplos son el tsunami de Nicoya de 1950, el cual estuvo a punto de ahogar a una familia que cruzaba un estero (Protti et al. 2001), y el de Osa de 1854, debido al cual se reporta la destrucción del pueblo de Golfo Dulce (Fernández-Arce and Alvarado-Delgado 2005). También en el Caribe tenemos el caso del tsunami de Limón de 1991, el cual causó variaciones del nivel del mar de alrededor de 2m en las costas del Caribe sur del país.

Todos estos casos son relativamente antiguos o en el caso de Limón, referidos a zonas poco pobladas. Sin embargo, con el desarrollo turístico que han presentado nuestras costas en las últimas décadas y considerando los estragos que causó el tsunami de Indonesia del 2004 entre los turistas que se encontraban vacacionando en Indonesia, Tailandia, India y Maldivas, es muy importante que nuestro país cuente con mapas de evacuación por tsunami, particularmente para ciertas localidades que sean identificadas como de alta vulnerabilidad.

Aunque la topografía de una costa pueda influenciar mayormente qué partes se inundarán en caso de tsunami, existen otros efectos como refracción y resonancia, que sólo pueden ser observados realizando simulaciones numéricas, y que justifican la realización de éstas como generadoras de conocimiento científico aplicado a la prevención de desastres.

Para este proyecto se escogió simular los tsunamis causados por los terremotos de:

- Japón 2011 (tsunami transoceánico)
- Chile 1960 (tsunami regional)
- Alaska 1964 (tsunami regional)
- Colombia/Ecuador 1906 (tsunami regional)
- Nicoya 201X (tsunami local)
- Osa 201X (tsunami local)

Los terremotos recientes de Japón y Chile fueron escogidos porque perturbaron considerablemente el nivel del mar en la Isla del Coco y en otras localidades del Pacífico Norte. El terremoto de Chile de 1960 fue el más grande medido en la historia y aunque no se tienen reportes de las consecuencias del tsunami en nuestro país, nos parece importante incluirlo. El tsunami de Colombia de 1906 causó perturbaciones importantes en el nivel del mar en Bahía Potrero (Molina 1997) y posiblemente en otros lugares de los que no se tiene registro por la fecha. Finalmente los posibles futuros terremotos del segmento de Nicoya y el de Osa de nuestra zona de subducción se escogieron porque anteriores eventos en dichos segmentos tuvieron consecuencias importantes en las costas frente a ellos.

Los mapas de evacuación por tsunami tienen como objetivo primordial el proveer a la población con la información necesaria en caso de una evacuación por tsunami en la que no se cuente con el tiempo suficiente para recibir indicaciones de las autoridades. En los mapas de evacuación se indica cuál es la zona que debe ser evacuada, las rutas para hacerlo y los lugares hacia los que la población se debe dirigir. En el proceso de elaboración de los mapas de evacuación se genera información importante para los gestores de riesgo y las instituciones de respuesta, como por

ejemplo las comunidades más vulnerables, el tiempo que tarda una persona promedio en ir desde cierto lugar hacia un refugio o lugar seguro, ubicación de instituciones educativas, asilos de ancianos, guarderías y otros lugares a los que debe darse prioridad en caso de una evacuación.

Este proyecto consiste en la primera etapa de un plan para crear mapas de evacuación por tsunami para las localidades costeras más vulnerables del país. Para esta primera etapa se escogió la costa oeste de la Península de Nicoya, desde la frontera con Nicaragua hasta Cabo Blanco, debido a que es el segmento de costa del país con la capacidad de generar tsunamis locales de mayor magnitud. En este segmento de la zona de subducción existe una brecha sísmica aún latente; si bien el sismo del 5 de setiembre del 2012 rompió un área grande de dicho segmento, no liberó la totalidad de la energía acumulada. Se estima que dicho sismo liberó aproximadamente la mitad de la energía acumulada desde 1950, desplazando el sector de la zona de acople ubicado bajo la Península, consecuentemente si el sector de la zona de acople que falta por desplazar, ubicado bajo el mar, se desplaza en un solo movimiento sísmico, se podría causar un tsunami en esta región. Adicionalmente se incluye la ciudad de Puntarenas en esta primera etapa debido a sus características únicas que requieren realizar una evacuación vertical en caso de tsunami.

En proyectos sucesivos se continuará con la realización de mapas de evacuación para localidades en el Golfo de Nicoya, en la región Pacífico Central y Sur, así como en la costa Caribe. Se escogió la costa oeste de la Península de Nicoya como la primera etapa debido a la posibilidad de la ocurrencia de un tsunami originado en el segmento de Nicoya de la zona de subducción en los próximos años.

Una vez terminado el proyecto, la Universidad Nacional podrá servir como centro de consulta sobre riesgo de tsunami para futuras construcciones y planes reguladores entre otros.

Objetivo General:

Generar mapas de evacuación por tsunami para las localidades identificadas como las más vulnerables a lo largo de la costa oeste de la Península de Nicoya y para la ciudad de Puntarenas que permitan a las personas que se encuentren en la costa saber hacia dónde ir en caso de tsunami.

Objetivo Específico	Indicadores de Logro
Recopilación de datos topográficos y batimétricos	- Obtención de una base topográfico/batimétrica en formato raster para ser incorporada al proyecto SIG - Base de datos de batimetría y topografía digitales para las costas del país que indique bajo qué condiciones existen esos datos (a quién pertenecen, si están abiertos al público, disponibles mediante convenio entre instituciones o a la venta).
Determinar las localidades de interés	Lista de comunidades consideradas como prioritarias para la elaboración de mapas de evacuación por tsunamis.
Realizar mapas de inundación por tsunami para las localidades seleccionadas	- Mapas de inundación por tsunami. - Series de tiempo sintéticas en las localidades donde se cuenta o se contará con un mareógrafo.

Elaborar mapas de vulnerabilidad física	- Capas SIG. - Mapas de vulnerabilidad
Recopilar información sobre las vías existentes y el terreno.	- Capa SIG de red vial - Capa SIG de uso del terreno
Definir refugios horizontales y verticales y puntos de escape	Lista y ubicación de los refugios y puntos de escape
Elaborar mapas de evacuación	- Capa SIG de la velocidad a la que se puede transitar por cada sector. - Capa SIG de las unidades de tiempo necesarias para alcanzar el refugio más cercano desde cualquier punto de la región siguiendo el camino menos costoso. - Capa SIG de las áreas a las que puede dar servicio cada refugio. - Capa SIG del tiempo necesario para llegar al refugio más cercano desde cualquier parte de la red vial. - Capa SIG del área servida por cada punto de escape de la playa. - Capa SIG del tiempo necesario para llegar a los puntos de escape desde cada punto de la playa. - Capa SIG del tiempo necesario para llegar al refugio más cercano desde cualquier punto de la playa. - Mapas de evacuación por tsunamis.
Divulgar los resultados obtenidos	- Plan de señalización para evacuación por tsunamis. - Charlas a las comunidades. - Artículos científicos.

Estrategia de Gestión:

Durante el primer año identificaremos las localidades más vulnerables ante un tsunami dentro de la zona de estudio y elaboraremos Mapas de Vulnerabilidad para cada una de ellas, los cuales se entregarán a la CNE.

Durante el segundo año se elaborarán los borradores de los Mapas de Evacuación para las localidades mencionadas, los cuales se entregarán a la CNE.

Con dichos mapas se realizarán consultas a las comunidades involucradas para elaborar los Mapas de Evacuación definitivos, los cuales se entregarán a la CNE.

Adicionalmente se elaborarán planes de señalización para las localidades escogidas y se realizarán charlas a las comunidades.

Estrategia de Comunicación:

- CAPACITACIONES: dirigidas a personal público (y eventualmente privado) de entidades relacionadas con la franja costera (CNE, ICT, Cruz Roja, Comité de Bandera Azul, alcaldes, etc.).
- CHARLAS INFORMATIVAS Y DE CONCIENCIACIÓN: dirigidas a empresarios locales y a guías turísticos y demás personal privado relacionado con el turista.
- CHARLAS INFORMATIVAS Y DE CONCIENCIACIÓN: dirigidas a estudiantes de todos los niveles.
- CONFERENCIAS EN UNIVERSIDADES, CNE, ICT, ETC: para divulgar los resultados y crear conciencia en diferentes instancias del Estado.
- PUBLICACIÓN EN REVISTAS CIENTÍFICAS INTERNACIONALES: para dar a conocer en la comunidad científica los avances empíricos en cuanto a las metodologías usadas tanto para prevenir los accidentes por corrientes de retorno, como para disminuir la vulnerabilidad de las poblaciones a los tsunamis. Asimismo se quieren dar a conocer los resultados de propagar los tsunamis mencionados hacia las localidades de interés.

Observaciones:

Este Proyecto se encontrará adscrito al Programa RONMAC, el cual se encuentra en fase de aprobación ya que actualmente es el Proyecto RONMAC (código

El Proyecto se ejecutará con la jornada de 30 horas asignada para Silvia Chacón para el Programa RONMAC.

El Proyecto se ejecutará con una jornada de 10 horas de las 30 asignadas para Isabel Arozarena para el Programa RONMAC.

El Proyecto se ejecutará con una jornada de 5 horas de las 20 asignadas para Alejandro Gutiérrez para el Programa RONMAC.

El Proyecto se ejecutará con una jornada de 10 horas de las 40 asignadas para José Vega para el Programa RONMAC.

Lista de Grupos Meta:

Gran empresa servicios: turismo, comercio, construcción, transporte
Microempresa servicios: turismo, comercio, construcción, transporte
Organismos no gubernamentales
Organizaciones sociales
PYMES servicios: turismo, comercio, construcción, transporte, otros
Sector público (Gobiernos locales (Municipalidades))
Sector público (Otras instituciones u organizaciones)
Sector público (Áreas de conservación ambiental)

Lista de Destinatarios:

Comercio minorista
Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias
Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura (INCOPECA)

Instituto Costarricense de Puertos del Pacífico (INCOP)
Instituto Costarricense de Turismo (ICT)
Ministerio de Obras Públicas y Transporte
Ministerio de Seguridad Pública
Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos
Municipalidad de Carrillo
Municipalidad de Hojancha
Municipalidad de La Cruz
Municipalidad de Liberia
Municipalidad de Nandayure
Municipalidad de Nicoya
Municipalidad de Puntarenas
Municipalidad de Santa Cruz
Pesca
Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC)
Turismo

Descriptores:

EVALUACION DEL RIESGO
MAPAS
OPERACIONES DE RESCATE
RIESGO

Modalidades:

Producto terminado: Principal
Mapas de evacuación por tsunami

Servicios técnicos: Secundaria
- Identificación de localidades más vulnerables ante un tsunami.

Investigación contratada: Secundaria
Simulación por computadora de varios escenarios de tsunami para obtener las alturas esperadas por tsunami para las localidades de interés

Unidad Ejecutora Titular
DEPARTAMENTO DE FISICA.

Áreas temáticas asociadas:
Oceanografía física

Unidad Ejecutora Participante no. 1

**Anexo 5. Datos estadísticos extraídos del MDE obtenido de la fusión de los datos
batimétricos y LiDAR**

Surface Properties - lidar

Information | Definition | Analysis | Statistics

Statistics	Value
General	
Revision number	0
Number of points	1332042
Minimum X coordinate	357603.343m
Minimum Y coordinate	1025705.557m
Maximum X coordinate	444878.807m
Maximum Y coordinate	1128054.124m
Minimum elevation	-618.000m
Maximum elevation	6.820m
Mean elevation	-73.102m
Extended	
2D surface area	3431382323.26sq.m
3D surface area	3432357476.98sq.m
Minimum grade/slope	0.00%
Maximum grade/slope	882077.46%
Mean grade/slope	1.31%
TIN	
Number of triangles	2652323
Maximum triangle area	20943014.56sq.m
Minimum triangle area	0.00sq.m
Minimum triangle len	0.000m
Maximum triangle le...	9009.205m

Aceptar Cancelar Apply Ayuda