

Vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas en Costa Rica.

Estudio preliminar



Informe ejecutivo

Clemens Ruepert

Luisa E. Castillo

Viria Bravo

Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET)

Jorge Fallas

Instituto Internacional en Conservación y Manejo de Vida Silvestre (ICOMVIS)

Escuela de Ciencias Ambientales (EDECA)

Heredia, octubre 2005

Índice de contenido

1	Introducción	1
1.1	<i>Presentación</i>	1
1.2	<i>Justificación</i>	1
1.3	<i>Aguas subterráneas y plaguicidas</i>	2
1.4	<i>Objetivo y propósito</i>	8
1.5	<i>Metodología y forma de trabajo</i>	8
2	Recopilación de la información	13
2.1	<i>Información básica</i>	13
2.2	<i>Asesoramiento</i>	18
3	Selección del área de muestreo	21
3.1	<i>Base de datos dentro del ambiente SIG</i>	21
3.2	<i>Vulnerabilidad de pozos</i>	21
3.3	<i>Aplicación del modelo de simulación de la lixiviación</i>	24
3.4	<i>Selección de las áreas de muestreo</i>	25
4	Evaluación de la calidad del agua subterránea	27
4.1	<i>Estrategia de muestreo y parámetros de interés</i>	27
4.2	<i>Muestreo</i>	28
4.3	<i>Análisis químicos y microbiológicos</i>	30
4.4	<i>Control de calidad</i>	31
4.5	<i>Resultados de los análisis</i>	31
5	Logros y divulgación	39
5.1	<i>Mapas, bases de datos</i>	39
5.2	<i>Talleres y presentación de resultados</i>	39
6	Continuidad del proyecto y recomendaciones	41
7	Conclusiones	43
8	Bibliografía	45

Anexos

- I. Contenido del disco compacto
- II. Resumen de los métodos para los análisis de plaguicidas

Reconocimiento

Este informe es el resultado de tres años de labor del Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET) con apoyo del Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (TELESIG) de la Universidad Nacional. Fue financiado por la Fundación Costa Rica-Estados Unidos (CRUSA) y la Agencia de la Cooperación Sueca de Investigación Científica (SAREC).

Agradecemos la colaboración en servicios, información (verbal y documental como datos, mapas, fotos y bases de datos) y permisos de muestreo, que fue brindada por:

- Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA)
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE)
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)
- Ministerio de Salud (MINSA)
- Laboratorio Nacional de Aguas y Dirección de Obras Rurales, Acueductos y Alcantarillados (AyA)
- Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)
- Instituto Geográfico Nacional (IGN)
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN)
- Dirección General de Aviación Civil, Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT)
- Secretaria Técnica Nacional Ambiental (SETENA)
- Acueductos rurales de la Zona Atlántica
- Empresas de la Zona Atlántica
- Propietarios individuales
- Personas particulares

Reconocemos especialmente la labor de:

- El Laboratorio Nacional de Aguas de AyA, por su apoyo en la realización de análisis químicos y microbiólogos, a través del Dr. Darner Mora, del Lic. Luis Zúñiga y de la Dra. Carmen Valiente.
- El Programa Nacional de Calidad de Aguas del US Geological Survey en Denver, por la asesoría del Dr. Mark Sandstrom, del Dr. William Battaglin y de la Dra. Lauren Hay.
- La Universidad de Florida, por la asesoría del Dr. Arthur Hornsby.
- La Universidad de Wageningen en Holanda, a través del apoyo del Dr. Jetse Stoorvogel y de Jasper Ampt.

1 Introducción

1.1 Presentación

El presente documento es el informe ejecutivo del proyecto “Vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas en Costa Rica; Estudio preliminar”. El proyecto inició en abril del 2001 y concluyó su etapa de campo en julio del 2004. Se espera que la información generada contribuya al manejo adecuado de los recursos hídricos subterráneos. El informe consta de dos partes: una escrita y otra con información adicional en forma digital disponible en el disco compacto adjunto.

En el primer capítulo de este documento se incluye el motivo del estudio y el contenido general del trabajo. En el segundo capítulo se describe la recolección de la información base y el asesoramiento de expertos. El capítulo tres contempla: la base de datos en Sistema de Información Geográfica, el análisis de la vulnerabilidad de pozos, el modelo de lixiviación de plaguicidas, y la selección de las áreas específicas de muestreo. En el cuarto capítulo se trata la evaluación de la calidad del agua subterránea, en el quinto capítulo se presentan los logros y en el sexto capítulo se plantean elementos para el seguimiento del trabajo. Y se termina con algunas conclusiones.

1.2 Justificación

El agua es un recurso vital y el impacto de las actividades humanas (urbanas, industriales y agrícolas) generan cada vez una mayor conciencia sobre su uso. En particular existe preocupación por los riesgos de contaminación asociados al alto uso de plaguicidas en cultivos extensivos. Ello ha generado diferentes estudios en zonas agrícolas. El IRET lleva más de 10 años en la investigación de la problemática ambiental generada por el uso de plaguicidas en la agricultura. Varios informes y artículos sobre el uso de plaguicidas y el posible impacto sobre el ecosistema acuático han sido publicados (Castillo et al., 2000; MINAE, 2002). Pero estos resultados corresponden a proyectos de investigación que se han enfocado principalmente sobre las aguas superficiales. En Costa Rica un porcentaje importante del agua potable proviene de aguas subterráneas, sin embargo hay pocos estudios sobre la calidad del agua potable en zonas de uso intensivo de agroquímicos. Tampoco hay datos sobre la posible infiltración de plaguicidas en los acuíferos en áreas agrícolas.

Con estas consideraciones se desarrolló el presente estudio piloto sobre vulnerabilidad de aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas en la zona atlántica del país. Este estudio suministra información sobre contaminación de pozos y de aguas subterráneas por infiltración de plaguicidas en una región agrícola del país. Se espera que esta facilite mayor y mejor vigilancia, monitoreo, protección y manejo de las áreas identificadas como vulnerables; así como también aporte elementos sustantivos para la toma de decisiones relacionadas con la protección de las cuencas y para la definición de políticas en relación con el uso de plaguicidas en esas regiones y con el otorgamiento de permisos para la construcción de pozos.

Para llegar a una protección real de las aguas subterráneas es necesario primero generar información sobre cambios en la calidad del recurso que pongan en riesgo el ambiente y la salud humana. Estos datos deben proveer una base sólida para la definición de las nuevas políticas respecto a la protección y al manejo del agua. Es aquí donde radica la importancia del presente trabajo.

1.3 Aguas subterráneas y plaguicidas

Agua subterránea en Costa Rica

El agua superficial y el agua subterránea se utilizan, entre otros, como fuentes de abasto a la población y a las actividades económicas (Espinoza et al., 2004). Según Reynolds et al. (2002) más del 80% de la población nacional se abastece con agua subterránea. El agua subterránea es un recurso importante, relativamente fácil y barato de extraer. En general tiene una buena calidad y no requiere mayor tratamiento adicional para ser usada (Espinoza et al., 2004). Por lo tanto los acuíferos son los mejores reservorios de agua de buena calidad y representan un patrimonio para el desarrollo futuro de Costa Rica (IFAM, 2004).

En Costa Rica, igual que en otras regiones del mundo, el uso descontrolado del agua y el poco control sobre las actividades que afectan este recurso ha provocado un deterioro de su calidad. Esta problemática ha sido ampliamente discutida en el ámbito nacional y ha resultado en una serie de iniciativas y de propuestas para un manejo más integral del recurso hídrico. Entre otras propuestas a la “Estrategia Nacional para el Manejo Integral del Recurso Hídrico” del MINAE (2004), a “El Estado de las Aguas Continentales en Costa Rica” en el Décimo Informe sobre el Estado de la Nación (2004), a “La Agenda Ambiental del Agua en Costa Rica” (Segura et al., 2004) y finalmente al proyecto de “Ley de Recurso Hídrico” (Comisión Permanente Especial de Ambiente, 2005).

Agua subterránea y sus amenazas

Los aspectos que amenazan las aguas subterráneas pueden dividirse en dos grupos. Por un lado existen los problemas relacionados con la disponibilidad del recurso causados por el deterioro de las zonas de recarga, mas que todo en ciertas zonas de Guanacaste por efecto de la deforestación, por el cambio en el uso del suelo y por el aumento considerable de la extracción (Estado de la Nación, 2004). Por otro lado están los problemas asociados con la calidad de las aguas subterráneas, específicamente la vulnerabilidad¹ de los principales acuíferos a infiltraciones de aguas residuales y de agroquímicos (Segura et al., 2004; Estado de la Nación, 2004; Minae, 2004; Espinoza, 2004). Uno de los elementos más significativos es la tendencia creciente observada en las concentraciones de nitratos de varios acuíferos, ocasionada por el uso de fertilizantes nitrogenados en las actividades agrícolas intensivas y por los efectos de la infiltración de las aguas fecales de los tanques sépticos ampliamente utilizados en áreas con alta permeabilidad. Entre los acuíferos afectados se encuentran el Barva y el Colima Superior, ciertos pozos privados ubicados en Moravia, Tibás y San José y los acueductos de Paraíso, San Isidro de Atenas y Bolsón-Ortega en Nicoya (Espinoza et al., 2004; Reynolds y Fraile, 2002). Recientemente se han presentado casos de contaminación de pozos por sustancias orgánicas volátiles como derivados de hidrocarburos (gasolina) y otros compuestos (La Nación, 2005; Reynolds, 2005).

En general, ciertas instituciones, organizaciones no gubernamentales y habitantes de las áreas rurales, han mostrado su preocupación por la calidad del agua, proveniente de fuentes subterráneas, que se utiliza para consumo humano. Mas del 80% de la población se abastece con agua de origen subterráneo (Reynolds et al., 2002). En un diagnóstico realizado por el Laboratorio Nacional de Aguas del AyA en 2002 se estimó que el 42% de la población rural, con agua suministrada por los más de 2000 acueductos rurales, no cuenta con agua potable de buena calidad (Espinoza, et al., 2004). Es decir, el agua no cumple los requisitos físico-químicos y microbiológicos mencionados en el “Reglamento para la Calidad del Agua Potable” N°32327-S (La Gaceta, 2005).

¹ En este informe se usó para vulnerabilidad o susceptibilidad de aguas subterráneas a la contaminación el riesgo de alteración negativa de su calidad natural debido al impacto humano o natural como definición.

Como se menciona en el Informe del Estado de la Nación (2004), el uso de plaguicidas conforma una amenaza para la calidad de las aguas subterráneas. No obstante, los datos sobre la presencia de plaguicidas en Costa Rica son escasos (Castillo et al., 1997). Algunos estudios fueron realizados en cultivos específicos como banano (Abarca y Ruepert, 1992; Rodríguez, 1997), arroz (Robinson, 1993) y helechos y plantas ornamentales (Mo, 2001). El Laboratorio Nacional de Aguas del AyA realizó entre 2000 y 2003 un estudio de la presencia de plaguicidas organofosforados en varias fuentes de agua potable y acueductos (AyA, 2004). En general estos estudios son limitados tanto en número de muestras, como en plaguicidas analizados y no permiten llegar a conclusiones generales sobre un posible deterioro de la calidad de aguas subterráneas, ni hacer inferencias a otras zonas del país.

Como parte de la certificación ambiental ISO 14000 y a requisitos del Ministerio de Salud, ciertas empresas agrícolas ejecutan un control de calidad de las aguas de sus pozos y, probablemente, disponen también de resultados de análisis de plaguicidas, sin embargo estos datos normalmente no están disponibles para la investigación.

Se puede concluir que existe poco control y vigilancia sobre la calidad del agua potable de los sistemas rurales (Defensoría de los Habitantes, 1998; Espinoza et al., 2004) y sobre la calidad de las aguas subterráneas, sobre todo en lo referente a su contenido de sustancias orgánicas como plaguicidas (Estado de Nación, 2004).

El “Reglamento para la Calidad del Agua Potable”(La Gaceta, 2005) incorpora los valores máximos permisibles para un número limitado de plaguicidas. Hasta el momento no se ha podido llegar a un control adecuado en el cumplimiento de estos límites. Estos valores vienen de las guías de la Organización Mundial de Salud (WHO, 2004) y son derivados de evaluaciones de la toxicidad humana de las sustancias individuales, por lo que no fueron desarrollados con el objetivo de proteger las fuentes de agua potable. En el país no existe ninguna normativa en relación con la presencia de plaguicidas en aguas subterráneas, a diferencia de la Unión Europea (UE) donde se ha definido un valor riguroso máximo permisible para plaguicidas en aguas potables proveniente de fuentes subterráneas de 0,1 µg/L para plaguicidas individuales y 0,5 µg/L para el total de plaguicidas presentes. Para la UE la prevención de la contaminación de las aguas subterráneas es de importancia fundamental y las plaguicidas no deben estar presentes en estas aguas, por lo cual existe una propuesta de directriz en el seno del parlamento Europeo para establecer un máximo permitido general para aguas subterráneas de 0,1µg/L (CCE, 2003).

El MINAE (2004) destaca en su plan de manejo del recurso hídrico la necesidad de un mejor conocimiento sobre la evolución de la calidad del agua en los acuíferos y sus posibles amenazas, además del establecimiento de sistemas de control, de seguimiento, de monitoreo, de regulaciones y de normativas.

Plaguicidas en aguas subterráneas

El uso agrícola, forestal o urbano de plaguicidas puede resultar en la dispersión ambiental de estas sustancias. Las aplicaciones de plaguicidas pueden generar *contaminación no puntual* o *contaminación difusa* del agua subterránea por la infiltración o lixiviación del plaguicida a través del subsuelo debido al movimiento del agua, incluso años después de ser aplicado. Además, el manejo de desechos líquidos de plaguicidas, los accidentes con plaguicidas, el manejo inadecuado de recipientes, el lavado de equipo, los derrames, las fugas en sistemas de almacenamiento de plaguicidas (por ejemplo, bodegas o aeropuertos de fumigación) pueden resultar en *contaminación puntual* de aguas subterráneas.

En los últimos dos décadas, gran cantidad de estudios en el mundo ha mostrado la presencia de plaguicidas en aguas subterráneas (Barbash y Resek, 1996). Según la USGS el 75% de los 83 plaguicidas analizados (que incluye algunos productos de degradación) fueron encontrados en muestras de pozos

ubicados en zonas agrícolas. Particularmente (61%), en pozos pocos profundos en áreas agrícolas (Kolpin et al., 1998; Gilliom, 2001). Isenbeck-Schröter et al. (1998) informa sobre la presencia de plaguicidas en aguas subterráneas de acuerdo con estudios ejecutados en varios países de la UE, algunos con alto uso de plaguicidas, Holanda entre ellos. Batista et al. (2002) y Cerejeira et al. (2003) indicaron la presencia de varios plaguicidas en pozos en zonas agrícolas importantes de Portugal. Un amplio estudio de plaguicidas en pozos de California (Troiano et al., 2001) encontró que pozos rurales y domésticos tienen un potencial de riesgo más grande de contaminación por plaguicidas. Algunas razones para ello son la cercanía a las áreas de aplicación y la poca profundidad de los pozos. En Dinamarca fueron cerrados cerca de 100 pozos de un total de 8.000 usados en el abastecimiento nacional de agua por el incremento en la detección de plaguicidas en las aguas (Nygaard et al., 2004). Estos hechos indican la importancia de identificar los acuíferos más vulnerables a la contaminación por plaguicidas y buscar las soluciones respectivas.

Los datos existentes sobre contaminación por plaguicidas, de acuíferos en zonas tropicales y subtropicales, son muy dispersos. En los acuíferos kársticos de Barbados, se detectaron los herbicidas ametrina y atrazina, usados en la caña de azúcar, en concentraciones cercanas a 3 µg/L (Wood y Chilton, 1995). Carbofuran y su metabolito fueron encontrados en aguas subterráneas no muy profundas en Sri Lanka (Foster y Lawrence, 1995). En Tailandia se encontró la presencia de varios plaguicidas en pozos de zonas con plantaciones de arroz y de caña de azúcar (Thapinta y Hudak, 2002). En un estudio en Hawai se detectó la presencia de los herbicidas bromacil y hexazinona, usados en los cultivos de piña y caña de azúcar en el 8% y en el 22% de los 36 pozos investigados, respectivamente (Li et al., 2001). También, en Hawai en otro estudio se confirmó la persistencia y la lixiviación de estas dos sustancias en los suelos en donde se cultiva la piña (Zhu y Li, 2002). En aguas subterráneas poco profundas bajo campos de golf en Florida se detectaron concentraciones bajas de varios plaguicidas (Swancar, 1996).

En general los plaguicidas que más han sido encontrados en las aguas subterráneas son: los del grupo de herbicidas como las triazinas y sus metabolitos, los fenoxiácidos (como 2,4-D), la bentazona, el diuron y el bromacil. En general las concentraciones son bajas y no superan 1 µg/L (Kolpin et al., 1998).

La presencia de plaguicidas en aguas subterráneas ha llevado, en varios países, a la implementación de medidas para reducir el riesgo de contaminación. Por un lado, esto ha resultado en la ejecución de estudios para entender mejor los procesos que afectan el transporte y la estabilidad de ciertos plaguicidas en los subsuelos. En los Estados Unidos gran parte de estos estudios son coordinados por la US Geological Survey (USGS). Dinamarca implementó un programa² extenso de 10 años para evaluar el riesgo de lixiviación de 28 plaguicidas en seis sitios agrícolas (Geus, 2003). Por otra parte, esta preocupación ha resultado en la definición de políticas para restringir el uso y las emisiones de plaguicidas hacia al ambiente, para la prohibición y restricción de sustancias críticas y para la definición de concentraciones máximas permitidas en aguas subterráneas (CCE, 2003).

Para investigar la lixiviación de plaguicidas al agua subterránea se deben, entre otros aspectos, determinar las concentraciones de los residuos de plaguicidas en muestras de agua, análisis costosos por la complejidad analítica de identificar y cuantificar a niveles bajos una gama amplia de plaguicidas, que incluya a los plaguicidas actualmente utilizados y a sus metabolitos más importantes (Foster et al., 2000). De la misma forma, puede ser difícil establecer conclusiones debido a la poca disponibilidad de información sobre el uso real de plaguicidas en los distintos cultivos, a la aplicación de varios plaguicidas simultáneamente por cultivo y a los conocimientos limitados sobre la formación de metabolitos.

² “Danish Pesticide Leaching Assessment Programme” (PLAP)

Si un plaguicida llega finalmente al agua subterránea se debe a la interacción entre las propiedades intrínsecas de estas sustancias y factores tales como el uso de tierra, el tipo de suelo, el clima y las condiciones hidrogeológicas (Foster et al., 2000; Worrall y Kolpin, 2004). La cantidad de plaguicidas que llega al agua subterránea depende de la capacidad asimilativa del suelo y del tiempo de tránsito a través de la zona no saturada³ (ver figura 1). Es por eso que la presencia de un plaguicida en el agua subterránea indica, la mayoría de las veces, un uso durante prolongados períodos de tiempo. En el cuadro 1 se resumen las características más importantes que controlan la lixiviación de plaguicidas.

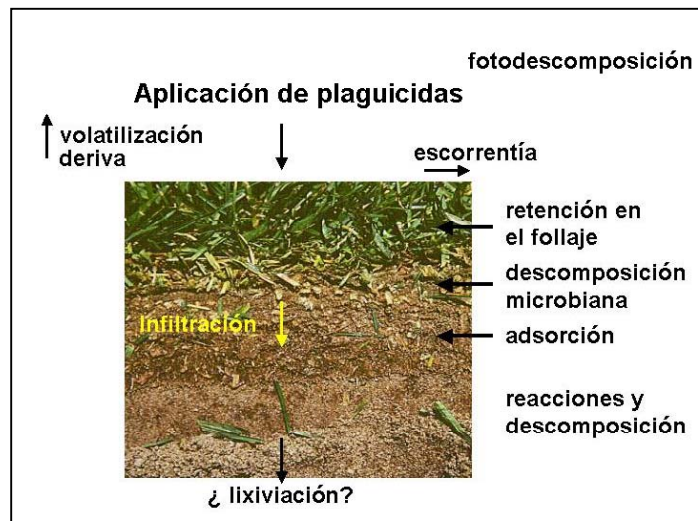


Figura 1: Destino de plaguicidas en el subsuelo.

Cuadro 1: Factores que afectan a la lixiviación de plaguicidas

riesgo de lixiviación	Factores determinantes ámbito menos ----- más	riesgo de lixiviación
- ++	propiedades de plaguicidas persistencia en el suelo adsorción en el suelo	+ --
- +	condiciones del sitio precipitación profundidad del nivel freático	+ -
+ -	prácticas agrícolas frecuencia del labrado riego	- +
+ + - -	aplicación de plaguicidas sobre suelo o incorporado en el mediante riego sobre el follaje dosis	++ ++ + +
+ ++ --	propiedades de suelo contenido de materia orgánica contenido de arcilla macro porosidad (fisuras)	- -- ++

+ (+) aumenta el riesgo de lixiviación (más riesgo)

- (-) reduce el riesgo de lixiviación (menos riesgo)

Cuadro basado en Foster et al. (2000)

El plaguicida es transportada verticalmente por el agua al infiltrarse al subsuelo; su movilidad en el suelo depende de la adsorción a la materia orgánica o a la arcilla presente. Otro factor importante es la susceptibilidad de la sustancia a la degradación por procesos químicos o biológicos en el suelo. Nor-

³ la zona no saturada o la zona vadosa es la región del subsuelo en que los poros están parcialmente llenos con agua.

malmente estos procesos juegan un papel importante en la capa superficial del suelo agrícola; “el horizonte A” (ver figura 1). Las sustancias que pasan esta primera capa y que llegan a la zona no saturada con menos materia orgánica y arcilla tienden a una movilidad y a una persistencia más altas. Los subsuelos con capas o fisuras con alta porosidad (p.ej. formaciones fracturadas consolidadas) crean flujos preferenciales y que permiten un desplazamiento vertical de los contaminantes más rápido, lo que se traduce en movilidades mayores.

Estimación de la lixiviación de plaguicidas

Existen varios modelos que simulan el transporte y el destino de plaguicidas a las aguas subterráneas. Modelos que varían, en complejidad y objetivos, de modelos simples, como índices y clasificaciones de tamizado, hasta modelos de simulación muy compresivos que toman en cuenta la heterogeneidad del ambiente modelado. Los modelos matemáticos de lixiviación de plaguicidas son cada vez más usados para estimar el riesgo ambiental del uso de plaguicidas para el agua subterránea.

Los modelos de índices calculan el potencial relativo de un plaguicida de lixiviarse basado en sus características tales como adsorción, movilidad y degradación (la vida media) en el suelo. Los índices permiten identificar las sustancias más problemáticas y prioritarias, por ejemplo para ser incluidas en programas de monitoreo. El índice GUS (Groundwater Ubiquite Score) desarrollado por Gustafson (1989) y el índice potencial relativo de lixiviación, RLPI (Relative Leaching Potential Index) desarrollado por Hornsby (1995) pertenecen a este tipo y se basan en la adsorción de la sustancia al suelo (usando su coeficiente de reparto K_{oc}) y en la degradación de la sustancia en el suelo (usando su vida media en el suelo). En combinación con un sistema de información geográfica de uso de suelos y uso de plaguicidas se puede valorar preliminarmente una vulnerabilidad a una escala regional.

Los modelos de simulación matemáticos simples se basan principalmente en la movilidad vertical, la adsorción y la degradación del plaguicida en la parte no saturada del suelo (Di y Aylmore, 1997). Los variables principales del suelo son la cantidad de materia orgánica y la densidad aparente, y para el transporte vertical se usa una recarga promedio. El modelo calcula la fracción restante y el tiempo de transporte del plaguicida en un perfil de suelo. La disponibilidad de una base de datos de suelo en un sistema de información geográfica (SIG) le permite simular la lixiviación del plaguicida a una escala espacial.

Los modelos más complejos distinguen más variables importantes que definen mejor el transporte de plaguicidas en el suelo como el tipo de suelo, el cultivo, el clima, la presencia de macroporos, la formación de metabolitos etc. Además, hay modelos que valoran también la parte saturada del suelo. En Europa se ha formado un grupo de coordinación, llamada FOCUS, del uso de modelos de destino ambiental de los plaguicidas y que ha resultado en una serie de validaciones de los diferentes modelos (Garratt et al., 2002).

El uso en la práctica de los modelos más compresivos depende, lógicamente, de la disponibilidad de datos, que en general son limitados en el entorno de los países en desarrollo.

Vulnerabilidad de aguas subterráneas

La combinación de factores tales como el uso de la tierra y las variables del suelo con las condiciones hidrogeológicas, ha sido conocido como la vulnerabilidad (susceptibilidad) de las aguas subterráneas a ser afectadas por un contaminante antropogénico (Worrall y Kolpin, 2004; Foster et al., 2002; NRC, 1993).

El concepto de *vulnerabilidad* de agua subterránea se ha usado como una herramienta que permite identificar áreas en donde existe un mayor riesgo de *contaminación no puntual*, que podría llevar a una mayor protección de los acuíferos. En el caso de los acuíferos se ha definido la *vulnerabilidad intrín-*

seca como una función de las características hidrogeológicas. Estos factores determinan, por un lado, la capacidad de infiltración de contaminantes y, por otro, la capacidad de atenuación de los estratos encima de los acuíferos (la zona no saturada). Dos métodos que generan un índice de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y tienen la ventaja de permitir el mapeo de la vulnerabilidad a un nivel regional a través del sistema de información geográfica son el “Drastic” y el “GOD”⁴ (Foster et al., 2002).

El método Drastic requiere datos de siete características hidrogeológicas: la profundidad al acuífero, la recarga neta, el tipo de acuífero, el tipo de suelo, la topografía o pendiente, el impacto de la zona no saturada y la conductividad hidráulica, sobre ellas se aplica una ponderación por cada variable de forma independiente (Aller et al., 1987; Foster et al., 2002). Aunque algunos autores opinan que existe interacción entre los parámetros (Foster et al., 2002).

El método GOD es más fácil de aplicar porque requiere menos datos: la profundidad del agua subterránea, la ocurrencia del sustrato suprayacente, el grado de confinamiento hidráulico del acuífero y las características texturales de los suelos.

Ambos modelos han sido aplicados en carácter preliminar en Costa Rica para estimar la vulnerabilidad de los acuíferos a nivel nacional (Fallas, 2003⁵) y a nivel del Valle Central (J.W. Perez, SENARA, comunicación, personal, 2005). Fallas (2003) estimó a una escala de 1:200.000 que un 22,3% del territorio nacional posee una vulnerabilidad muy alta y un 51,5% una vulnerabilidad alta. La aplicabilidad de ambos modelos en Costa Rica puede ser limitada todavía por la falta de datos detallados hidrogeológicos y edafológicos.

No obstante, como indican Worrell y Kolpin (2004), estos métodos (Drastic y GOD) no toman en cuenta las características de transporte de los plaguicidas por lo que son menos apropiados para la evaluación de la vulnerabilidad para plaguicidas. Barbash y Resek (1996) indican que el modelo de Drastic tiene un valor limitado en predecir contaminación de aguas subterráneas.

Modelos matemáticos más complejos de lixiviación de plaguicidas integrado con bases de datos digitalizados de suelo y otros datos ambientales en un ambiente de un sistema de información geográfica han sido desarrollados en los últimos años para la predicción de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, por ejemplo a nivel del estado de Iowa en los EEUU (Eason et al., 2004). Otro ejemplo es el modelo de distribución-espacial GeoPEARL aplicado en Holanda (Tiktak et al., 2003).

Según Worrall y Kolpin (2004) en su reciente estudio sobre vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación por plaguicida es importante tomar en cuenta la interdependencia y la interacción entre los plaguicidas y las características del área de estudio como uso de suelo, tipo de suelo, clima y las propiedades del acuífero. Los modelos de hoy en día deben ser correlacionados con datos sobre la presencia actual de plaguicidas en aguas subterráneas. En otro estudio reciente en el sur de Inglaterra Worrall y Besien (2005) estiman la vulnerabilidad por plaguicidas basada en datos de presencia de plaguicidas obtenidos en programas de monitoreo de varios años en pozos y nacientes. Los mapas generados indican que la vulnerabilidad varía a niveles distintos de escala: entre sitios vecinos, entre acuíferos y entre la misma unidad de acuífera.

⁴ GOD: significa en inglés Groundwater hydraulic confinement, Overlaying strata, Depth to groundwater table

⁵ El artículo y la charla presentada por Fallas están incluidos en el CD de este informe.

1.4 Objetivo y propósito

El objetivo general del proyecto fue obtener datos científicos de un área específica de la región Atlántica, con el fin de evaluar el riesgo de contaminación por plaguicidas de las fuentes subterráneas de agua (pozos o nacientes). Así mismo se desarrolló un instrumento, basado en el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y que facilita a los gobiernos locales y a otras instituciones la protección de los acuíferos.

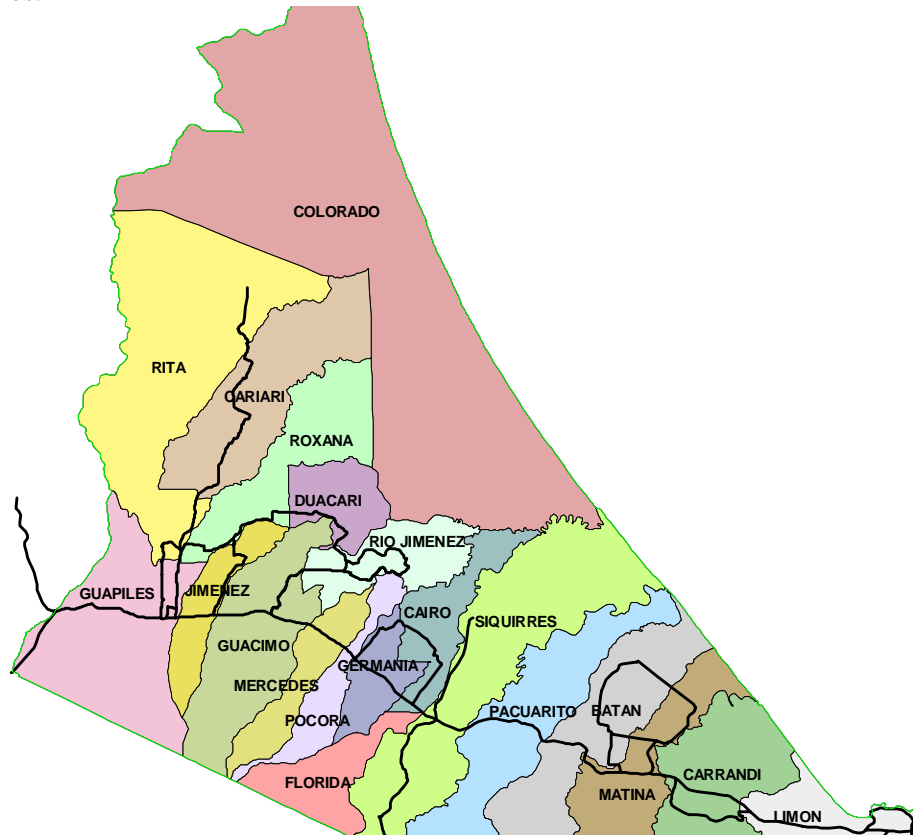


Figura 2: Área de estudio.

1.5 Metodología y forma de trabajo

Este estudio se ejecutó en la zona Atlántica, caracterizada por una alta producción de banano y por una creciente producción de piña. En esta zona el IRET ha desarrollado amplia experiencia tanto en estos cultivos como en otros. Se recolectó información sobre el manejo del banano y el uso de plaguicidas. Se utilizaron además los datos generados hasta 1998 por el Programa REPOSA (“Research Program on Sustainability in Agriculture”) del CATIE, de la Universidad Agrícola de Wageningen, Holanda y del MAG, para una parte de esa zona. Los datos de REPOSA incluyen aspectos biofísicos (suelo, uso de suelo, etc.) de la zona en formato digital en SIG en el ambiente de ArcView (Bouman et al., 2000).

Otras instituciones estatales también cuentan con datos importantes de la zona. El SENARA posee la base de datos de pozos registrados y los expedientes de cada uno de ellos. También el AyA aportó, entre otros, información de la ubicación de los acueductos rurales y los resultados de análisis físico-químicos de las aguas realizados previamente a este estudio (no se analizaron plaguicidas).

El proyecto se dividió en tres fases principales con traslape en la ejecución de ellas. Un resumen de la metodología aplicada se presenta esquemáticamente en la figura 3.

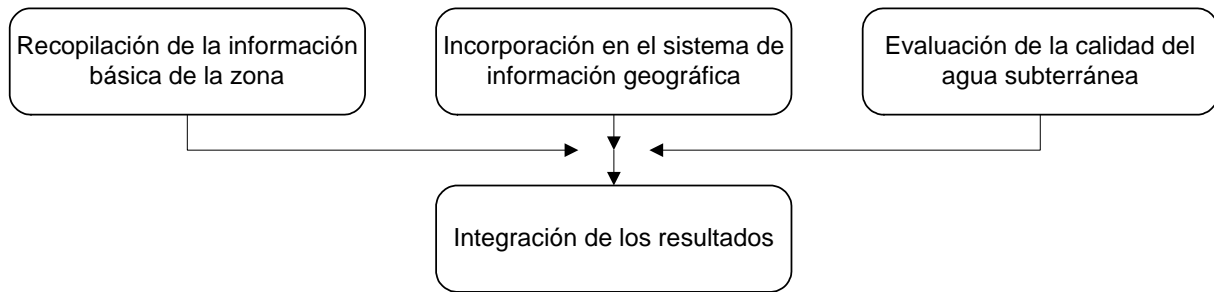


Figura 3: Resumen de la metodología.

La primera fase fue una recopilación de la información básica de la zona. A saber:

- Características y cartografía de la zona: uso de la tierra, áreas de cultivos, tipo de suelos, precipitación, recarga, identificación de fuentes puntuales como los aeródromos de fumigación, entre otros;
- Uso de plaguicidas en los diferentes cultivos y las características de ellos;
- Datos sobre el uso del agua subterránea, pozos existentes, acueductos rurales y otros.

Las fuentes primarias de información consultadas fueron las bases de datos de instituciones del estado, del IRET y de REPOSA, principalmente (ver sección 2.1). Esta información permitió hacer la primera selección de áreas, de plaguicidas y de pozos críticos.

Para apoyar la selección de las áreas de muestreo, se contó con la visita de expertos del Departamento de Aguas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Geological Survey, USGS) ubicado en Denver y del Departamento Científico de Suelos y Aguas de la Universidad de Florida en Gainesville (ver sección 2.2). Con estas personas se organizó un seminario sobre “Vulnerabilidad de aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas” en la UNA. Asimismo se intercambiaron experiencias y se valoró la información recopilada hasta el momento de su visita. Además se hicieron visitas al campo y se analizó en conjunto la definición de los criterios de vulnerabilidad.

La segunda fase fue la incorporación de la información recopilada en una geobase digital mediante el sistema de información geográfica (SIG) en formato ArcView. Esta labor la ejecutó el Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (TeleSig) del Instituto Internacional en Conservación y Manejo de Vida Silvestre (ICOMVIS) de la UNA. Con la información en SIG se realizaron traslapes de diferentes capas para valorar su utilidad en la identificación de zonas vulnerables.

La geobase digital fue creada mediante el uso de las bases de datos detalladas anteriormente y de la cartografía tanto analógica como digital, recopilada en las instituciones. Con las diferentes capas de datos que conforman la geobase se realizó un análisis espacial y se generó un atlas digital específico para la determinación de la vulnerabilidad en la zona de estudio.

El procedimiento utilizado para crear la geobase de datos fue: la visualización y la selección de atributos, la verificación de exactitud geográfica, la creación de mosaicos digitales, la reclasificación y finalmente, la realización del análisis espacial mediante técnicas de sobreposición, de disolución de límites, de unión de tablas y de unión espacial.

Con base a la información recopilada de los pozos registrados, la selección de ciertos criterios y la opinión de expertos se clasificaron los pozos por su vulnerabilidad a la contaminación por plaguicidas, con el fin de seleccionar una serie de *pozos críticos* (ver sección 3.2).

Para la selección de las áreas más susceptibles (*áreas críticas*) a la infiltración de plaguicidas se aplicó el modelo de simulación simple de transporte y de destino de los plaguicidas en el subsuelo desarrollado por Di y Aylmore (1997). Se utilizó como insumo al modelo de lixiviación la clasificación del subsuelo (hasta 1,2 m) disponible en la zona y se estimó el comportamiento de algunos plaguicidas en la parte superior del suelo (ver sección 3.3)

Para la selección de las *áreas de muestreo* se usó la información aportada por la geobase, el mapa de pozos críticos, la información sobre uso de plaguicidas en los cultivos y el modelo de lixiviación de plaguicidas, así como el criterio de los expertos.

En esta fase se recibió apoyo de Jasper Ampt, estudiante de la Universidad de Wageningen, Holanda para la aplicación del modelo. Otras estudiantes de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional (Lisi Rivera y Paola Acosta) también realizaron su proyecto de graduación en el contexto provisto por este proyecto y aportaron insumos específicos en esta fase.

La tercera fase fue la *evaluación de la calidad de las aguas* en pozos y nacientes seleccionados en las áreas de muestreo. El trabajo de campo y de muestreo fue ejecutado en su totalidad por el IRET (capítulo 4).

Durante el muestreo se presentó un inconveniente: ciertas compañías bananeras no otorgaron los permisos de muestreo en sus pozos. El IRET los solicitó formalmente, realizó presentaciones y gestionó cartas de confidencialidad, pero estas empresas se abstuvieron de participar e incluso de contestar en la forma debida. Se solicitó el apoyo al MINAE, quienes asignaron funcionarios debidamente acreditados para que acompañaran a los investigadores a realizar los muestreos. Sin embargo, estas compañías siempre negaron el acceso a los pozos.

Los análisis de residuos de plaguicidas los realizó el Laboratorio de Análisis de Residuos de Plaguicidas de la Universidad Nacional (LAREP). El Laboratorio Nacional de Aguas del AyA colaboró con los análisis físico-químicos y microbiológicos de las muestras tomadas en los acueductos rurales. Algunos análisis químicos y microbiológicos fueron realizados, mediante contratación de servicios, en otros laboratorios de la Universidad Nacional o de la Universidad de Costa Rica.

El resultado de estas fases fue integrado para establecer una propuesta metodológica para ser aplicada en el análisis de riesgo de contaminación de aguas subterráneas por plaguicidas. En la figura 4 se presenta un cuadro sinóptico del enfoque aplicado.

Las empresas y los acueductos rurales fueron informados de los resultados obtenidos de su propio pozo o nacimiento. Las áreas de conservación Tortuguero y Amistad Caribe del MINAE (ACTO y ACLA-C) contribuyeron con la organización de dos talleres. En estos participaron personeros de las instituciones gubernamentales de la zona relacionados con el manejo y la protección del recurso acuático (ver disco compacto). Además, se organizó una reunión en Siquirres con funcionarios de los centros regionales del Ministerio de Salud, MINAE, MAG, del AyA, y con los responsables de los acueductos rurales de Milano y de Cairo para informarles sobre los resultados del estudio.

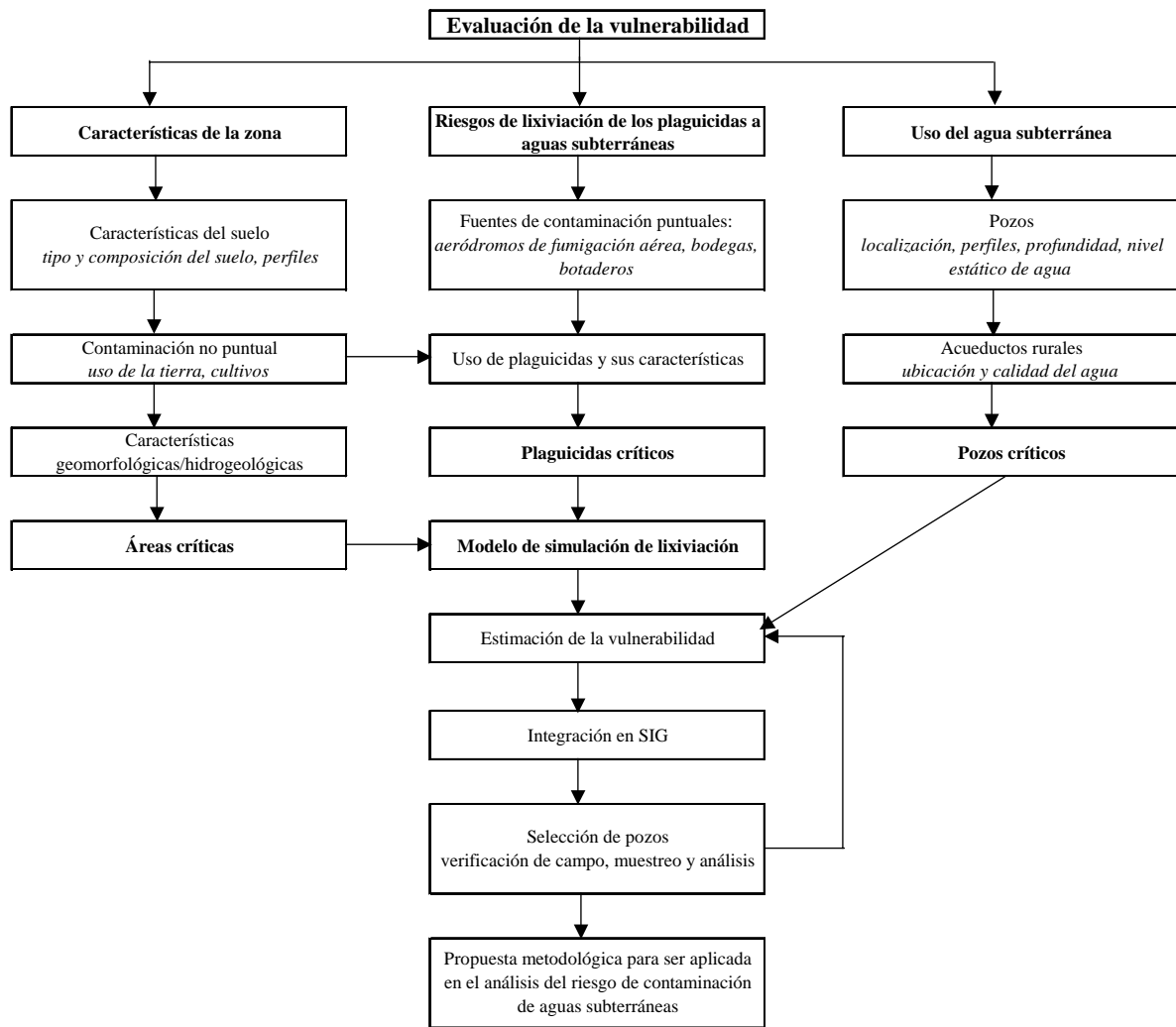


Figura 4: Cuadro sinóptico del enfoque aplicado en el estudio.

2 Recopilación de la información

En esta sección se incluye dos aspectos del estudio: por una lado la recolección de información básica de la zona y, por otro, el apoyo de los expertos de los EEUU. Este proceso permitió hacer la primera selección de las áreas, plaguicidas y pozos críticos.

2.1 Información básica

Los datos recopilados fueron básicamente sobre: tipo y características de suelos, uso del suelo, hidrogeología, geomorfología, climatología, acueductos, pozos, análisis existentes de aguas subterráneas, cultivos, aeródromos, etc. Una parte de la información fue facilitada (en forma documental o digital) por las instituciones, otra parte fue conseguida mediante la revisión de expedientes, de informes y de otro material bibliográfico. Un resumen de la información recopilada y su origen se encuentra en el cuadro 2.

Cuadro 2: Fuentes de información consultada para caracterizar el área de estudio

Origen	Tipo de información	Referencia
Características de la zona		
CORBANA	Publicación anual con estadísticas bananeras	Corbana
ICE	Geográfica digital de geomorfología, de clima, de tipo de vegetación y de ríos. Digital de precipitación y datos de descarga	
IGN	Geográfica digital con hojas cartográficas 1:50.000	
IMN	Digital con datos meteorológicos	
ITCR	Atlas digital de Costa Rica 2001 y 2004	ITCR,2001;ITCR,2004
MAG	Geográfica digital de uso y capacidad de uso del suelo. Documental y geográfica digital de uso, de capacidad de uso del suelo, muestreos y descripción de perfiles	Acón y Asociados, 1991 Tahal y Asociados
MINAE*	Base Geográfica Digital Terra (1997-98) Cartografía digital 1:25.000 con capas de curvas de nivel, ríos, vías, poblados y fotografías aéreas 1:40.000	CENIGA-MINAE
MIN SALUD	Listas de fincas de banano, con sus áreas y ubicación mediante entrevistas con funcionarios de las oficinas regionales	
REPOSA	Base Geográfica Digital y documental: uso de la tierra, tipo de suelos, características geomorfológicas y geohidrológicas, datos climatológicos, estructura de las fincas, de población y de cultivos	Stoorvogel et al., 1995 Bouman et al., 2000
TELESIG	Imágenes de satélite, modelo digital de elevación elaborado a partir de curvas de nivel cada 100 m	LANDSAT 7, 06-2001
Plaguicidas		
Aviac. Civil	Ubicación de los aeródromos de fumigación y las compañías de fumigación	Aviacion Civil
IRET	Uso de plaguicidas en los diferentes cultivos (periodo de 20 años) Características físico-químicas y ambientales	IRET,1999; Exttoxnet; Hornsby etal. 1996
Agua subterránea**		
AyA	Documental con listas de acueductos abastecidos por: pozos, perfiles de pozos, nacientes; análisis de calidad del agua de pozos del AyA	
SENARA	Revisión de los expedientes de los pozos registrados en la zona, sus características y sus perfiles: ubicación, antigüedad, uso, profundidad, caudal, nivel estático y dinámico	SENARA
TELESIG	Información digital de distribución de acuíferos, zonas de recarga y de riesgo de inundación	

* Convenio UNA-MINAE

** La Dirección de Protección al Ambiente Humano del Min. de Salud cuenta con los reportes de operación de empresas bananeras, sin embargo no se logró obtener acceso a estos datos.

La información colectada tanto cartográfica como documental, se incorporó en bases de datos de Excel y ArcView GIS 3.3 para su respectivo análisis. Con ella, se generaron productos adicionales de valor importante para la investigación e instituciones académicas en general. Entre ellos se podría citar el convenio que se concretó entre la UNA y el MINAE, para el intercambio de información geográfica digital, después de dos años de negociación. Como primer fruto de este convenio, el MINAE donó a la UNA, el día 29 de abril del 2003, a través del Centro Nacional de Información Geográfica Ambiental (CENIGA), fotografías aéreas escala 1:40.000 y cartografía escala 1:25.000 de aproximadamente el 70% del territorio nacional. Cabe destacar que esta información fue generada dentro del Convenio RECOPE-MINAE con una inversión de US\$ 3 millones y que a la UNA se le facilitó sin costo alguno.

Uno de los insumos mas importantes utilizados en este estudio fue el sistema de información geográfica generado por el programa REPOSA (Bouman et al., 2000) que contiene datos hasta el 1998 sobre la parte física y humana de la Zona Atlántica.

Cultivos y uso plaguicidas

Los cultivos seleccionados en el estudio, para los cuales se recopiló información de plaguicidas, fueron: banano, piña, plantas ornamentales y pastos. Se consideró para esta decisión que las áreas plantadas fueran superiores a las 1.000 hectáreas, la producción y las proyecciones para el crecimiento en el futuro. Otros cultivos existentes en la zona, como arroz, tubérculos y palmito, también fueron valorados, pero tanto el área de cultivo como la producción son relativamente bajos. No hay datos actualizados y completos sobre el uso de tierra en la zona.

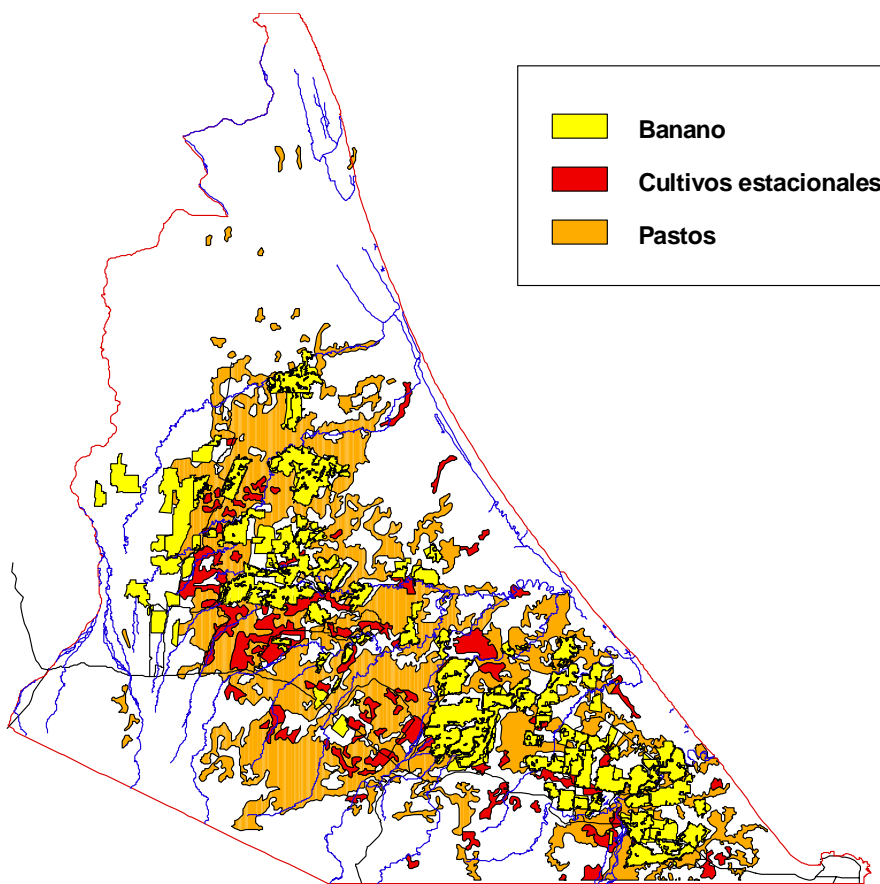


Figura 5: El uso de suelo en la zona, datos del 1997 (Bouman et al., 2000).

La información sobre uso de plaguicidas se compiló con base en estudios anteriores realizados por el IRET. Estos datos abarcan un periodo de más de 20 años, vienen de fuentes diversas de información y son complementados mediante diagnósticos de campo.

Las características ambientales, determinantes en la estimación del riesgo de lixiviación de plaguicidas, provienen del Manual de Plaguicidas, Guía para América Central (IRET, 1999), del libro “Pesticide Properties in the Environment” (Hornsby et al., 1996) y de otras bases de datos disponibles en Internet (entre otros Exttoxnet⁶ y PAN⁷). El tipo de información recopilada de los plaguicidas se resume en el cuadro 3. En el disco compacto se incluye una base de datos con características físico-químicas y ambientales de plaguicidas (“Pesticide Properties Database”).

Cuadro 3: Tipo de información recopilada sobre los plaguicidas

Tipo de información	Variables
Uso de plaguicidas por cultivo	Tipo de plaguicida Cantidad aplicada Forma de aplicación (ver figura 6) Frecuencia de aplicación
Características físico-químicas y ambientales	Adsorción en el suelo (coeficiente de reparto, K_{oc}) Persistencia en el suelo (vida media) Formación de metabolitos Volatilización



Figura 6: Ejemplos de formas de aplicación de plaguicidas en banano (izq) y piña (der).

En el cuadro 4 se muestra la información del uso de plaguicidas en los cultivos más importantes en la zona de estudio y se presenta el índice potencial de lixiviación RLPI, mencionado en la sección 1.3. El RLPI define la atenuación relativa de cada plaguicida en un suelo y, por lo tanto, su potencial para lixivarse al agua subterránea. El valor se calcula al dividir el coeficiente de adsorción en el suelo (usando el coeficiente de reparto K_{oc}) entre la vida media en el suelo por diez. Valores pequeños indican un potencial más grande de lixivarse. El uso de plaguicidas en los diferentes cultivos y su poten-

⁶ Exttoxnet Pesticide Information Profiles (PIPs): <http://exttoxnet.orst.edu/pips/ghindex.html>

⁷ PAN Pesticides Database: <http://www.pesticideinfo.org/Index.html>

cial relativo de lixiviación fueron usados para definir los *plaguicidas críticos* (ver figura 4) y para ver cuales tenían preferencia incluirlos en los análisis químicos.

Cuadro 4: Cultivos importantes de la zona, el uso de plaguicidas y su potencial de lixiviación

Cultivo (área cultivada estimada, 2002)	Grupo de plaguicidas	Forma de aplicación y dosis	Plaguicidas (los más comunes, actualmente)	Índice potencial relativo de lixiviación (RLPI) ***
Banano (30 x 10 ³ ha *)	Fungicidas	<i>Aplicación aérea</i> , 20-30 kg i.a./ha anual (en total entre 20 y 40 aplicaciones anuales)	Aceites agrícolas Bitertanol Clorotalonil Difenoconazole Mancozeb Propiconazole Tridemorf	>2000 199 460 130 285 59 290
	Fungicidas	<i>Aplicación post cosecha</i> , usados solo en la planta empacadora	Imazalil Tiabendazole	266 62
	Nematicidas	<i>Aplicación sobre suelo</i> , alrededor de las plantas (2 a 3 aplicaciones anuales)	Carbofuran Etoprofos Terbufos	4 28 1000
	Insecticidas	<i>Una bolsa plástica</i> que protege el racimo	Clorpirifos	>2000
	Herbicidas	<i>Aplicación foliar</i> alrededor de las canales de drenaje en ciertas ocasiones	Glifosato	>2000
Piña (2.400 ha **; cultivo inició en la zona en 2000)	Herbicidas	<i>Aplicación al suelo</i> , (2-4 kg i.a./ha) presiembra, postsiembra, mediante aspersorios colocados en el aguilón del tractor	Ametrina Bromacil Diuron	50 5 53
	Fungicidas	<i>Aplicación post cosecha</i> , usado solo en la planta empacadora	Triadimefon Triadimenol	115
	Nematicidas /insecticidas	<i>Aplicación foliar o al suelo</i> mediante aspersorios colocados en el aguilón del tractor	Carbofuran Diazinon Etoprofos	4 250 28
Plantas ornamentales/ flores (1.000 ha*)	Herbicidas	Manual	Atrazina 2,4-D Diuron Glifosato Paraquat Picloram	16 20 53 >2000 >2000 1
Pasto (102 x 10 ³ ha)	Herbicidas	<i>Sobre el follaje</i> Manual o mediante aspersorios colocados en el aguilón del tractor.	2,4-D Glifosato Picloram	20 >2000 1

* datos de Corbana, 2003

** datos de comunicación personal funcionario Min. de Salud Siquirres y productores en la zona

*** El índice potencial relativo de lixiviación (RLPI) indica el potencial de la sustancia para lixiviar al agua subterránea, valores pequeños indican un potencial más grande de lixiviar. Los valores son tomados de la "Pesticide Properties Database" (ver disco compacto).

Históricamente, en el cultivo de banano se han usado otros plaguicidas. Uno de ellos fue el nematicida DBCP, usado en los años setenta; un líquido que fue inyectado al suelo y con un índice potencial relativo de lixiviación (RLPI) de 3. Otros nematicidas comunes fueron el aldicarb (RLPI=10) y el oxamil (RLPI=62).

Uso del agua subterránea

En relación con el uso del agua subterránea en el área de estudio se utilizaron los datos de los pozos registrados en SENARA y los datos facilitados por el Departamento de Operación de Sistemas y Acueductos Rurales del AyA sobre los pozos perforados por el AyA. Estos últimos no están registrados en SENARA desde de 1995.

Hasta 2002 SENARA tiene registrado un total de 451 pozos ubicados en la zona de estudio. De ellos, poco más de un 50% cuentan con el informe de la perforación que aporta información sobre el perfil litológico, la profundidad de extracción del agua, características de la construcción y de la protección del pozo. El AyA suministró los perfiles de 44 pozos ubicados en la zona. Toda esta información fue incorporada en una base de datos y los perfiles disponibles, tanto de AyA como del SENARA, fueron digitalizados (ver disco compacto).

Figura 7: Pozo y tanque Acueducto Rural, El Progreso, Cariari (SENARA-RS09).



En el cuadro 5 se resumen algunos datos del inventario de los pozos. Como se puede observar, el mayor número de pozos fue perforado en los últimos 15 años y, aproximadamente, un 50% de ellos se encuentran en el ámbito de 21 a 50 metros de profundidad.

Cuadro 5: Algunos datos de los pozos identificados en la zona del estudio (hasta 2002)

	SENARA		AyA
<i>Número total de los pozos registrados</i>	451	100%	44
<i>Número de pozos con un perfil de perforación</i>	265	65%	44
<i>Numero de pozos clasificados conforme a su antigüedad</i>			
1965-79	21	4,6%	
1980-89	90	19,0%	
1990-hasta la fecha	333	73,8%	44
no hay datos	7	1,5%	
<i>Número de pozos clasificados conforme a su profundidad</i>			
1-10 m	10	2,2%	
11-20 m	58	12,9%	
21- 50 m	188	41,7%	29
mas de 50 m	86	19,1%	15
no hay datos	109	24,2%	
<i>Tipo de usuario</i>			*
AyA	19	4,2%	
Bananera	299	66,3%	
Empresa fumigadora	2	0,4%	
Empresa con otro cultivo	22	4,9%	
Industria	21	4,6%	
Urbano/público	12	2,7%	
No hay datos	76	16,8%	

* no se sabe cuántos de los pozos perforados por el AyA están en uso.

La figura 8 presenta la ubicación de pozos tanto del registro de SENARA como del de AyA. Obsérvese que se encuentran distribuidos por toda la zona de estudio, pero en Pocora y sus alrededores la densidad es menor.

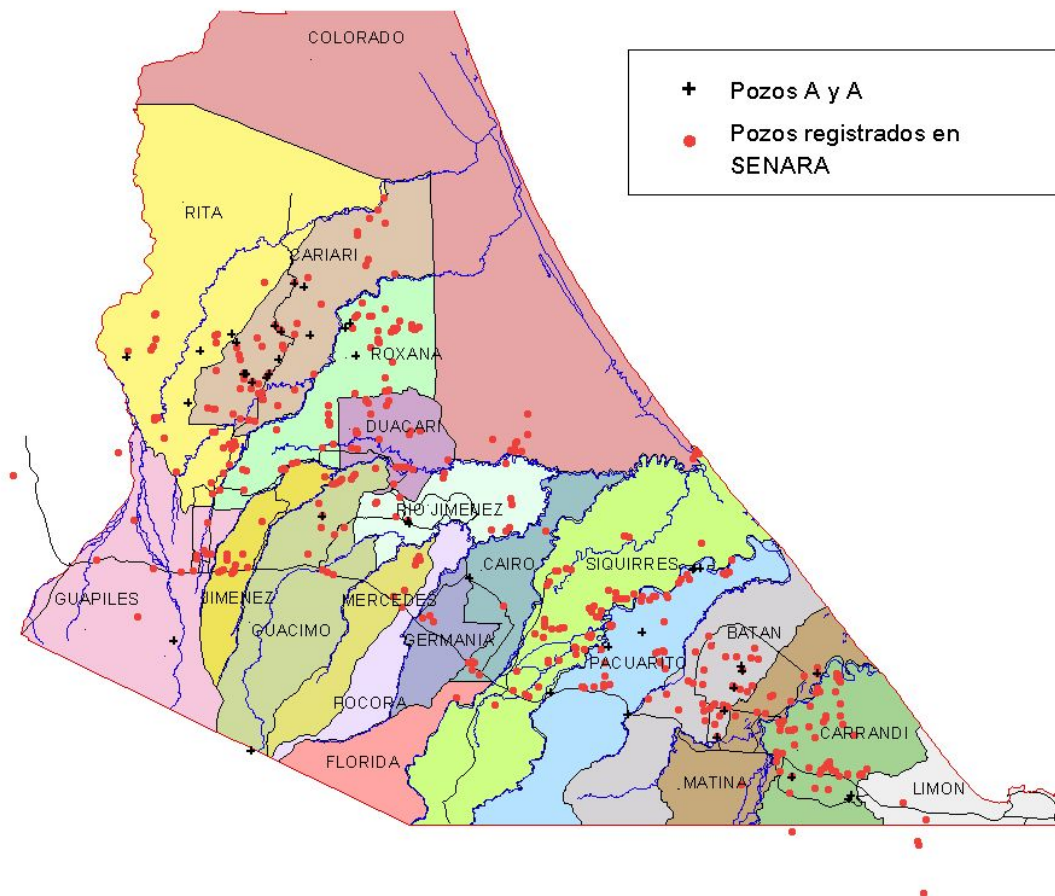


Figura 8: Ubicación de los pozos identificados en la zona.

2.2 Asesoramiento

Durante la ejecución del proyecto se contó con la participación de cuatro expertos vinculados al tema de plaguicidas y contaminación de aguas subterráneas (ver cuadro 6). Con ellos se realizaron sesiones de trabajo, en las que se discutió ampliamente sobre los factores más importantes a considerar para la determinación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, se intercambiaron experiencias y se efectuaron reconocimientos de campo. También se aprovechó la visita de estos expertos para realizar una charla y un taller. Este último contó con la presencia de más de 80 personas de instituciones públicas, privadas y empresas involucradas en el manejo, la protección y el aprovechamiento del recurso hídrico.

Las presentaciones de estos expertos están disponibles en el disco compacto.

Cuadro 6: Expertos de los EEUU que visitaron Costa Rica en el marco del proyecto

Nombre	Fecha	Institución	Título de la charla
Dr. Arthur Hornsby	13-16 de mayo 2002	Department of Soil and Water Science, University of Florida, Gainesville	Decision support systems for crop production and water quality protection
Dr. William Battaglin	24-27 de junio 2002	National Hydrologic Research Coordinator, US Geological Survey, Denver	The occurrence of pesticides in US water resources: studies of surface- and ground-water vulnerability
Dr. Mark Sandstrom	24-27 de junio 2002	National Water Quality Laboratory (NWQL), US Geological Survey, Denver	Determination of pesticides in water-quality studies: sample collection, analysis and quality-control samples
Dra. Lauren Hay	24-27 de junio 2002	National Research Program, Water Resources Division, US Geological Survey, Denver	Current and future prospects in watershed modelling

La primera visita fue del Dr. Arthur Hornsby de la Universidad de Florida. El es catedrático emérito del Departamento de Ciencias del Suelo y Agua y experto en calidad del agua del Servicio de Extensión de Florida. Su programa de extensión y de investigación se enfoca en el impacto sobre la calidad del agua por el uso de plaguicidas y el desarrollo y la implementación de sistemas de apoyo a la decisión para minimizar los impactos adversos.

El Dr. Hornsby habló sobre los factores que afectan el movimiento de los plaguicidas en el suelo, citó, por un lado, las características intrínsecas de las sustancias (coeficiente de adsorción y persistencia) y, por otro lado, las propiedades del medio (textura, materia orgánica, porosidad, etc.). Además explicó el uso, en el estado de Florida, del índice relativo para estimar el potencial de los plaguicidas de lixiviarse (RLPI, ver cuadro 4).

La segunda visita fue de tres investigadores de USGS en Denver, Colorado. Los tres participan en proyectos de investigación de la USGS vinculados con la contaminación de aguas superficiales y subterráneas por plaguicidas en los EEUU. Ellos participaron en el seminario “Vulnerabilidad de aguas subterráneas a contaminación por plaguicidas” junio 2002 con presentaciones relacionadas con la problemática del uso de plaguicidas en cultivos y con el posible riesgo de contaminación de aguas subterráneas.

El Dr. Battaglin presentó datos sobre el uso de plaguicidas y su tendencia en los Estados Unidos, citó la presencia de herbicidas y sus metabolitos en el agua en áreas de cultivo de maíz (Midwest) y abarcó aspectos como la susceptibilidad, la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación de acuíferos por plaguicidas. Presentó estudios de caso de plaguicidas en aguas, para cuatro áreas en los EEUU, donde usaron modelos, sistemas de información geográfica y mapas de vulnerabilidad.

El Dr. Sandstrom habló sobre los aspectos importantes de muestreo, de análisis y de control de calidad para la determinación de plaguicidas en estudios de calidad de aguas. Además discutió sobre los métodos modernos que se aplican en el Laboratorio Nacional de Calidad de Aguas (NWQAL) y los resultados del Programa Nacional de Calidad de Aguas (“NAWQA Program”⁸) que ha coordinado la USGS nacionalmente en los EEUU, durante los últimos 15 años.

La Dra. Hay profundizó sobre los aspectos actuales y futuros de la modelación hidrológica de cuencas. Citó las recientes investigaciones sobre la integración de modelos para pronósticos atmosféricos con la modelación hidrológica para estimar, entre otros, la escorrentía en las cuencas.

⁸ <http://water.usgs.gov/nawqa/>

En agosto del 2004, se hizo una visita al “National Water Quality Laboratory” de la USGS en Denver para discutir con el Dr. Mark Sandstrom los resultados obtenidos en la parte de la evaluación de la calidad de las aguas subterráneas. El Dr. Sandstrom brindó la oportunidad de confirmar algunas muestras con los equipos analíticos de su laboratorio (más detalle en sección 4.5). Esta visita se aprovechó para participar con un poster en el “9th Symposium on the Chemistry & Fate of Modern Pesticides” en Vail, Colorado organizado por personal de la USGS.

3 Selección del área de muestreo

3.1 Base de datos dentro del ambiente SIG

La geobase digital fue creada mediante el uso de las bases de datos detalladas anteriormente (ver sección 2) y de la cartografía tanto analógica como digital, recopilada en las instituciones. Con las diferentes capas de datos que conforman la geobase se realizó un análisis espacial y se generó un atlas digital específico para la determinación de la vulnerabilidad en la zona de estudio.

El procedimiento utilizado para crear la geobase de datos fue: la visualización y la selección de atributos, la verificación de exactitud geográfica, la creación de mosaicos digitales, la reclasificación y finalmente, la realización del análisis espacial mediante técnicas de sobreposición, de disolución de límites, de unión de tablas y de unión espacial. Los datos están disponibles en el disco compacto para ser visualizados mediante los programas ArcView GIS o ArcExplorer. Los archivos generados en la geobase son de tipo “*shape*” en ArcView y están mencionados en el anexo I.

3.2 Vulnerabilidad de pozos

La selección de los *pozos críticos* se realizó con base en variables determinantes de vulnerabilidad a contaminación por plaguicidas. Para cada variable se definieron los ámbitos para las clases. En el cuadro 7 se presentan las variables, las clases y la calificación respectiva.

Con base en el criterio de expertos se determinó un valor de importancia para cada variable y, se asignó una calificación con base en la estimación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas en relación con el uso de plaguicidas. Al respecto:

- Para *uso cobertura* se consideró como más riesgoso el cultivo en el que se usan plaguicidas más tóxicos, persistentes y solubles, así como la cantidad aplicada y la frecuencia y forma de aplicación.
- En la *antigüedad del pozo*: se consideraron como pozos más riesgosos los más viejos, tanto por el tiempo de exposición más prolongado, como por el deterioro causado por los años en su estructura.
- Con respecto a la *profundidad del pozo* se han clasificado los pozos menos profundos con mayor riesgo, por su cercanía con la superficie, el contaminante debe recorrer una distancia menor para llegar a él.
- En la *protección del pozo* se consideraron como más vulnerables los que no tenían construida ninguna estructura que sirviera como barrera para la infiltración de contaminantes.
- En la *clase textural* del suelo alrededor del pozo se asignaron como más vulnerables los suelos con partículas con tamaños más grandes (suelos livianos) por permitir una mayor percolación del agua. Se tomó como un promedio de la textura entre los trayectos de 0-3 m y 3-10 m.
- En cuanto al dato de *inicio de la primera rejilla* se consideró la extracción del agua de un pozo a un nivel menos profundo (más cercana a la superficie) como más riesgosa.
- Para el *nivel estático* en el pozo se consideró que con niveles menos profundos de aguas freáticas un contaminante puede llegar más fácilmente al agua del pozo.

En la figura 9 se muestra un ejemplo de un perfil litológico de un pozo y se indican las variables usadas para la clasificación de la vulnerabilidad de los pozos.

Cuadro 7: Criterios de vulnerabilidad para la calificación de los pozos

VARIABLES DETERMINANTES (en orden de importancia)	CLASES	Calificación*
1. Uso cobertura **	banano, ornamentales	10
	pasto	4,5
	agricultura mixta	3
	urbano	3
	bosque secundario/terreno abandonado	1
	aeropuerto de fumigación	10
2. Antigüedad del pozo	antes de 1980	10
	1980 a 1989	6,5
	1990 a la fecha	4
3. Profundidad del pozo	de 10 m o menos	10
	de 11 a 20 m	7
	de 21 a 50 m	4
	más de 50 m	0
4. Protección del pozo	con grava alrededor del tubo ciego, al inicio	10
	sin grava al inicio	0,5
5. Textura alrededor del pozo***	arenosa, arenosa franco gruesa, franco arenosa y todas las clases con material grueso	10
	franco arcillosa arenosa, arenosa franco fina	9
	arcillosa, arcillosa limosa, arcillosa arenosa	4,5
	limosa, franco limosa	1,5
6. Inicio primera rejilla	6 m o menos	10
	de 6,1 a 20 m	5
	mas de 20 m	0
7. Nivel estático del pozo	pozo artesiano ⁹	0
	2 m o menos	10
	de 2 a 5 m	8
	más de 5 m	2

* Cuando faltaba información de la variable, se asignó un valor de 7.

** En el uso cobertura inicialmente no se consideró el cultivo de piña, porque el avance de este cultivo en la zona era incipiente. Por ser un cultivo con alto uso de agroquímicos debería tener una calificación de 10.

*** La textura alrededor del pozo se clasificó como el promedio en los trayectos 0-3 m y 3-10 m.

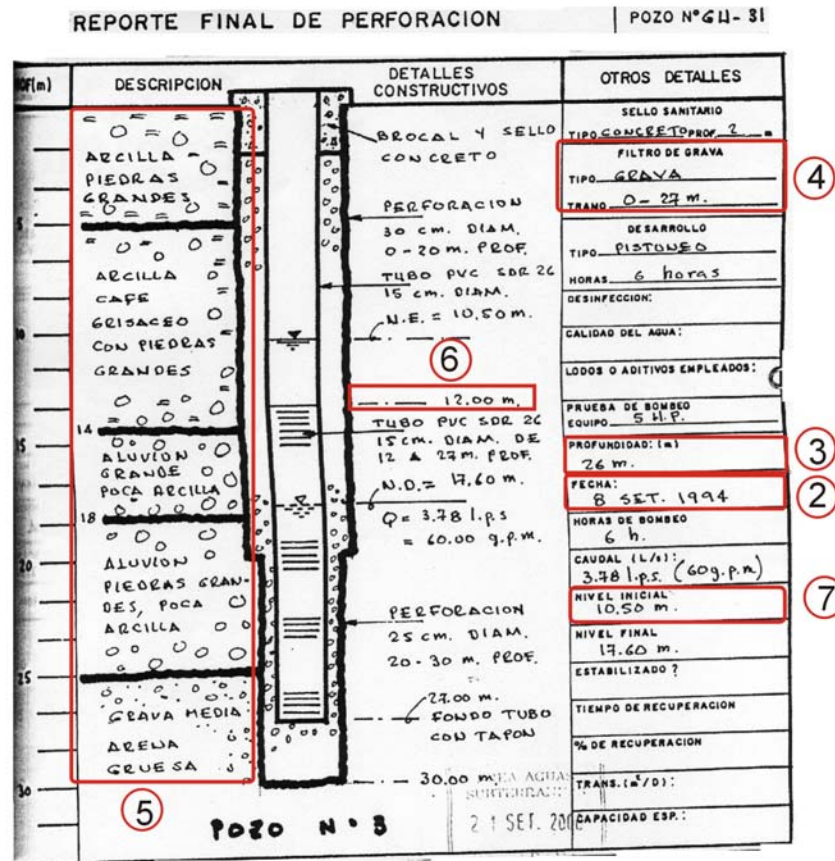
Entre las clases de la variable *uso cobertura* no se había considerado el cultivo de piña, porque inicialmente no se conocía el avance de este cultivo en la zona. Sin embargo, durante la ejecución del trabajo de campo se conocieron las proyecciones de plantación de las empresas, el manejo agronómico y el uso de plaguicidas; razones suficientes para incluir este cultivo en el muestreo. La piña como *uso cobertura* debería tener una calificación de 10.

El hecho de que en parte de la zona de estudio exista una mayor probabilidad de inundación significa que los pozos ubicados en estas áreas, tienen también un alto riesgo de recibir aguas superficiales, sobre todo si no están bien protegidos. Aun así, este aspecto no fue considerado como un criterio específico pues hace falta mayor información acerca de las condiciones reales de cada pozo. En cambio sí fue considerado para seleccionar las áreas críticas.

La vulnerabilidad total de cada pozo corresponde al promedio de los valores obtenidos en cada categoría.

⁹ Es un pozo, generalmente profundo, situado en un acuífero confinado (entre dos capas subterráneas impermeables) en el que el nivel del agua se eleva por encima del nivel del suelo.

Este análisis fue aplicado para la base de datos que incluye los pozos registrados en SENARA y el uso de cobertura actual en el sitio donde está ubicado cada pozo. Se excluyeron del análisis los pozos que no tenían perfil. Los pozos del AyA no se incluyeron porque la información no estaba disponible en el momento del análisis. En los casos en que faltaban datos de alguna variable, se utilizó un valor de 7. El valor más alto corresponde a la mayor vulnerabilidad.



(los números con círculos corresponden a las variables mencionadas en el cuadro 7)

Figura 9: Ejemplo del perfil litológico de un pozo y las variables de vulnerabilidad.

Los resultados están resumidos en el cuadro 8, y la figura 10 muestra la ubicación de los pozos conforme a su vulnerabilidad. Nótese que los más críticos están ubicados en forma aleatoria en la zona de estudio.

Cuadro 8: Clasificación de la vulnerabilidad de los pozos de la zona registrados en SENARA

Pozos	Puntaje	Número	%
Pozos total registrados		451	
Pozos con perfil		285	100
Muy vulnerables	8 - 10	15	5,3
Vulnerables	6 - 7,9	157	55,1
Menos vulnerable	4 - 5,9	101	35,4
"No" vulnerable	< 4	12	4,2

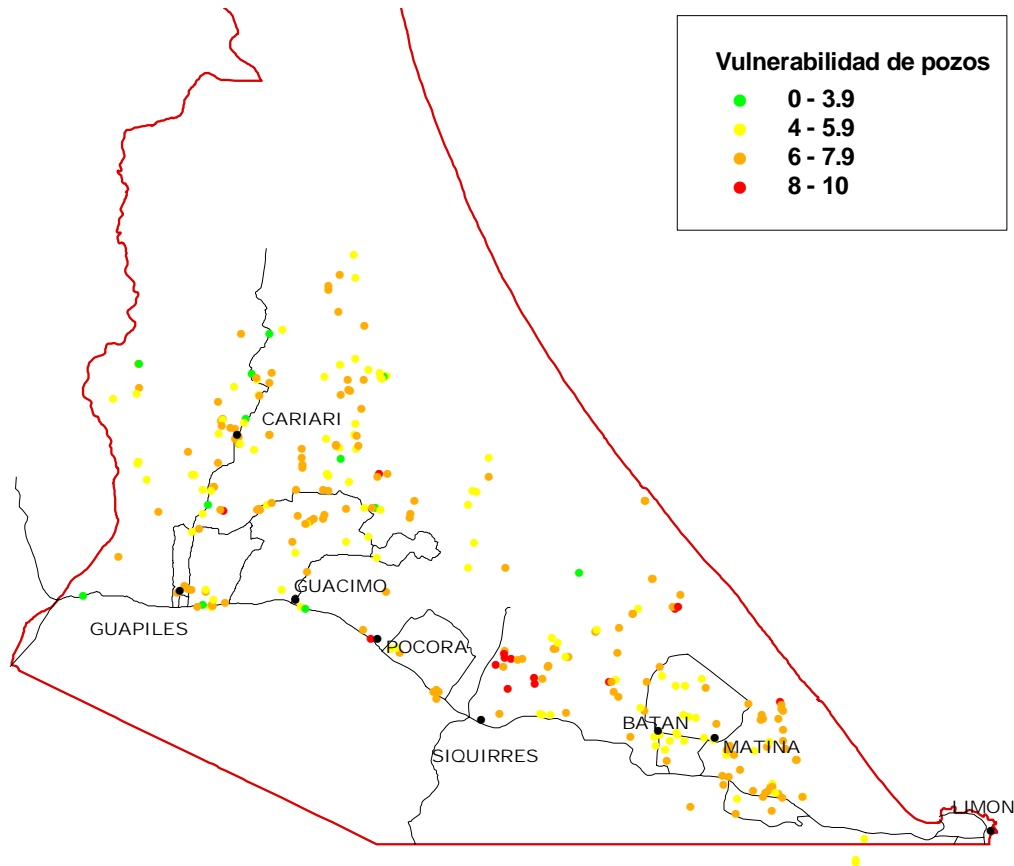


Figura 10: Mapa con los pozos según sus criterios de vulnerabilidad.

3.3 Aplicación del modelo de simulación de la lixiviación

Para la selección de las áreas más susceptibles (*áreas críticas*) a la infiltración de plaguicidas se aplicó de acuerdo a lo mencionado en la sección 1.5 el modelo de simulación simple de transporte y de destino de los plaguicidas en el subsuelo (la zona no saturada), basado en Di y Aylmore (1997). Este modelo considera un flujo vertical que pasa por la zona no saturada del suelo hasta una profundidad de 1,2 m y toma en cuenta la adsorción y la degradación de los plaguicidas en las diferentes capas presentes en este trayecto. Para los cálculos se utilizó la información de la base de datos de suelos generada por REPOSA (Bouman et al., 2000), que cuenta con datos sobre densidad aparente, humedad y cantidad de materia orgánica.

El modelo fue aplicado para algunos plaguicidas usados en el área de estudio que poseen características ambientales relevantes; como por ejemplo la capacidad para la adsorción en el suelo y la persistencia en él de acuerdo a lo discutido en la sección 2.1. El potencial de lixiviación, que corresponde a la fracción del plaguicida que pasa por el perfil, fue estimado para bromacil, carbofuran, clorotalonil y oxamil, dentro de las diferentes unidades de suelos identificadas en la zona.

La figura 11 muestra el resultado de la simulación para el herbicida bromacil. Las áreas con un potencial más elevado tienen un mayor riesgo de que esa sustancia pase por el perfil del subsuelo. Según el modelo las áreas con mayor riesgo de infiltración de plaguicidas son los alrededores de las comunidades de Pocora, Siquirres, Matina y Tortuguero.

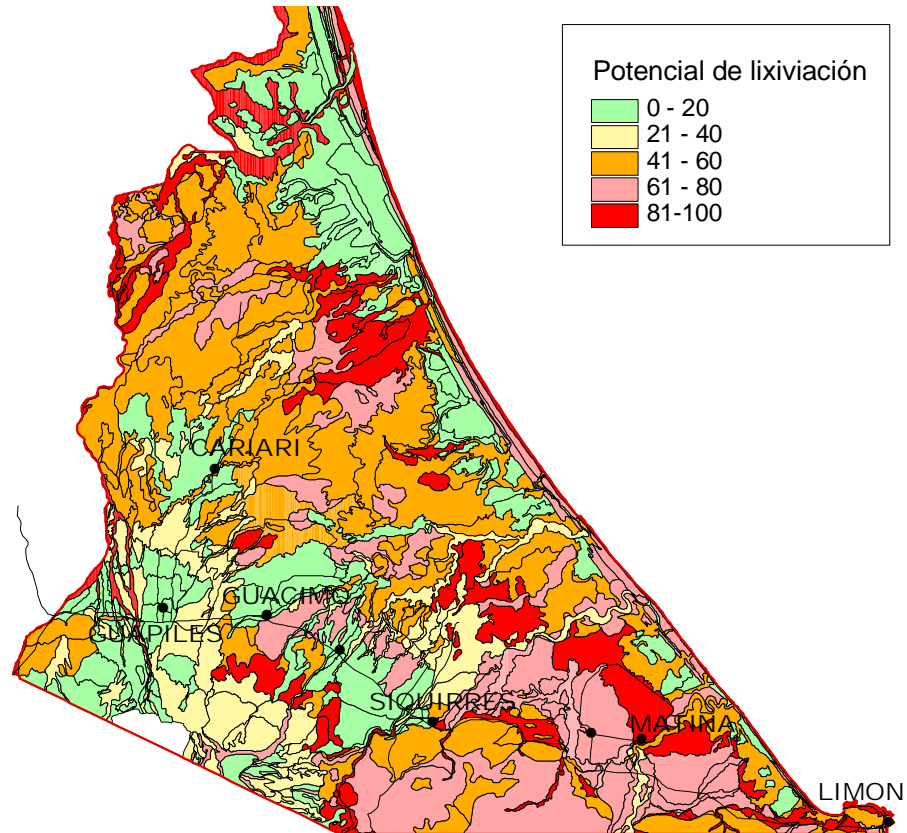


Figura 11: Potencial de lixiviación para bromacil.

3.4 Selección de las áreas de muestreo

Con base en lo anterior se seleccionaron como áreas de muestreo principalmente los cantones Pococí, Guácimo, Siquirres y Matina. Dentro de cada uno de estos cantones se identificaron los pozos críticos de acuerdo a su puntaje de vulnerabilidad, 70 pozos fueron clasificados más vulnerables en las áreas con un potencial alto de lixiviación.

4 Evaluación de la calidad del agua subterránea

4.1 Estrategia de muestreo y parámetros de interés

De acuerdo con la selección de las áreas de muestreo, definida en el capítulo anterior, se escogieron pozos ubicados en fincas bananeras y aeródromos de fumigación. El acceso a algunos de los pozos seleccionados fue negado por los dueños de algunas empresas, a pesar de la solicitud ante la Comisión Ambiental Bananera y de la declaración del compromiso de confidencialidad con respecto a la identidad de las fincas muestreadas. Incluso con el apoyo del MINAE y la participación de sus funcionarios en nuestras giras, no se lograron los permisos de muestreo.

Para el muestreo en sitios críticos como aeródromos de fumigación, Aviación Civil otorgó un permiso oficial, lo que facilitó el acceso a algunos de los pozos en el Aeródromo de Batán, pero no en el pozo de la compañía Standard Fruit Company. Una situación similar se presentó en el aeródromo de fumigación ubicado en Roxana de Guápiles: aquí el acceso fue negado totalmente. De lo anterior se informó a Aviación Civil pero no fue posible obtener más apoyo, porque jurídicamente ellos no tienen forma de presionar a la empresa para realizar un muestreo. A través del Ministerio de Salud, Región Siquirres se logró en una segunda visita obtener la muestra del pozo faltante en el aeródromo de Batán. Otras empresas transnacionales y nacionales de banano y piña en la zona sí otorgaron permisos para el muestreo.

Por los problemas de acceso se tuvo que hacer cambios en la estrategia definida de muestreo en el transcurso del proyecto. Algunos de ellos contemplaron tomar muestras en sitios públicos, como escuelas, dentro de las áreas seleccionadas, ampliar el número de acueductos rurales en la muestra y además tomar muestras en pozos artesanales de casas. A pesar de los inconvenientes encontrados en el desarrollo del trabajo de campo, los muestreos fueron realizados en los cuatro cantones de interés y en un número que excede la cantidad proyectada.

La selección de los plaguicidas analizados se basó en la identificación de plaguicidas críticos usados en la zona (capítulo 3) y por la capacidad analítica del Laboratorio de Análisis de Residuos de Plaguicidas (LAREP). Para los análisis de los plaguicidas se aplicaron métodos que permiten analizar un barrido de diferentes plaguicidas. Los grupos plaguicidas analizados, los límites de cuantificación y los métodos aplicados se resumen en el cuadro 9; más detalle se encuentra en el anexo II. En general se trató de obtener límites de detección suficientemente bajos, alrededor de 0,1 µg/L, que son necesarios para muestras ambientales de esta índole (aguas subterráneas y aguas potables). Sin embargo, el grupo de los herbicidas fenoxiácidos fue analizado con un límite superior a 1 µg/L. No todos los plaguicidas críticos podían ser incluidos por razones de la disponibilidad del equipo analítico. Sustancias como el nematocida carbofurán, del grupo carbamatos, solamente se analizó en algunas muestras. Tampoco fueron incluidos productos importantes de degradación (“metabolitos”) de plaguicidas tales como el metabolito AMPA del glifosato, herbicida de uso generalizado.

Cuadro 9: Resumen de los métodos aplicados para los análisis de plaguicidas

Grupos	Extracción	Análisis	Limite de cuantificación en µg/L*
Plaguicidas barrido: insecticidas, fungicidas, herbicidas (ver anexo II)	Líquida - líquida	GC-ECD/NPD/FPD/MS**	0,02-0,3
Herbicidas: carbaril, bromacil, diuron, ametrina, atrazina, terbutilazina	Fase sólida (SFE)	HPLC-PDA***	0,1-0,4
Herbicidas fenoxiácidos	Líquida - líquida	HPLC-PDA***	1-2
Dichlorobromopropano (DBCP)	Micro extracción líquida-líquida	GC-ECD**	0,03

* Limite de cuantificación representa la concentración mínima de la sustancia que puede ser cuantificada y reportada fiablemente por el laboratorio.

** GC: cromatografía de gases; ECD: detector de captura de electrones; NPD: detector nitrógeno fósforo; FPD: detector fotométrico de llama; MS: detector de masas.

*** HPLC: cromatografía líquida; PDA: detector de arreglo de diodos.

Un grupo de extractos de muestras fue enviado para su confirmación al laboratorio de la USGS en Denver y al laboratorio Omegam en Holanda.

Además de los plaguicidas, se analizaron en una parte de las muestras las concentraciones de nitrato y la presencia de coliformes. La presencia de elevadas concentraciones de nitratos en aguas subterráneas pueden indicar lixiviación de fertilizantes o la presencia de lixiviados de tanques sépticos. Asimismo, la presencia de coliformes en agua tomada de un pozo indica una contaminación microbiológica causada por ejemplo por un mal manejo del pozo o por la existencia de un tanque séptico cercano.

Se estableció un acuerdo de colaboración con el Laboratorio Nacional de Aguas del AyA, que brindó su apoyo con los análisis de las muestras provenientes de los acueductos rurales. Además, se contrataron los servicios del Laboratorio de Aguas de la Facultad de Microbiología de la UCR, para los análisis microbiológicos y los servicios del Laboratorio de Análisis y Servicios Químicos de la UNA (LASEQ) para los análisis de nitrato.

4.2 Muestreo

En total se realizaron en el proyecto 32 giras en el período de enero 2002 hasta julio 2004, en las que se recolectaron muestras de aguas provenientes de fuentes subterráneas en 100 puntos de muestreo. En el muestreo se incluyeron pozos, pozos artesanales y nacientes de empresas agrícolas de banano, piña y ornamentales, de fincas ganaderas, aeródromos de fumigación, industrias, escuelas, casas y acueductos rurales, algunos del AyA y otros de asociaciones comunales. Los puntos de muestreo fueron registrados con GPS para luego obtener un nuevo mapa de muestreo.

Los puntos de muestreo están resumidos en el cuadro 10 y en la figura 12 se muestra su ubicación. En el cuadro 11 se indica cuales de los pozos muestreados están registrados en SENARA y como es su clasificación de vulnerabilidad de acuerdo con el calculo de la sección 3.2. Otra información complementaria se encuentra en el disco compacto.

En los casos en donde se detectó la presencia de coliformes o plaguicidas se procedió a un segundo muestreo y en algunos casos mas, para verificar los resultados; en total en nueve sitios se repitió el muestreo.

Cuadro 10: Sitios de muestreo

Sitio	Nº pozos	Nº pozos artesanales	Nº nacientes	número total muestreado
Acueductos rurales	22		4	26
Acueductos del AyA	5		2	7
Aeródromos	5			5
Casas	1	10		11
Escuelas	3	1		4
Fincas bananeras	30			30
Fincas ganaderas	1	1		2
Fincas ornamentales	4			4
Fincas piñeras	7		1	8
Industrias y otros	3			3
Total	81	12	7	100



Figura 12: Ubicación de los sitios de muestreo.

En el campo se registraron las principales características de los puntos de muestreo y se midieron temperatura, pH y conductividad de la muestra. Se formó también un archivo fotográfico de todos los sitios visitados.

Cuadro 11: Datos sobre los pozos muestreados

Sitio	Nº de pozos total muestreados	Nº de pozos registrados SENARA	Nº de pozos con cálculo de vulnerabilidad	Nº de pozos vulnerables *
Acueductos rurales	22	5	4	1
Acueductos del AyA	5	3	2	2
Aeródromos	5	3	0	0
Casas	1	0	0	0
Escuelas	3	1	1	1
Fincas bananeras	30	22	18	15
Fincas ganaderas	1	0	0	0
Fincas ornamentales	4	3	3	2
Fincas piñeras	7	6	6	5
Industrias y otros	3	3	3	2
Total	81	46	37	28

* número de pozos clasificados como muy vulnerables o vulnerables (un puntaje de vulnerabilidad mayor o igual que 6, ver cuadro 8)

En los acueductos con un sistema de cloración se midió la presencia de cloro libre con un equipo de campo. Para los análisis microbiológicos se realizó, antes de la toma de muestras, una esterilización completa de la llave. En general se trató de tomar las muestras lo más cercano posible a los pozos, antes del sistema de cloración, utilizando cuando existía una llave para toma de muestra (ver figura 13). En los casos donde el sistema no contaba con una llave, se tomó la muestra de una tubería de desfogue, de la tubería que va al tanque, de la que sale del tanque o, como última opción, en una casa cercana al pozo. Normalmente se dejó correr el agua suficiente tiempo (más de 10 minutos) con la bomba del pozo trabajando para asegurar la toma de agua fresca.



Figura 13: Toma de muestra de agua entre el pozo y el tanque (Acueducto Rural El Limbo).

En el caso de las nacientes se tomaron las muestras en los tanques de captación o de unión. Para los acueductos rurales se llenó un formulario del AyA para realizar una valoración de la vulnerabilidad general del sitio del pozo. En su totalidad las muestras se trasladaron a los laboratorios para sus respectivos análisis en un plazo inferior a las 24 horas después de efectuado el muestreo.

4.3 Análisis químicos y microbiológicos

En el cuadro 12 se indican los parámetros analizados por los laboratorios y la cantidad de muestras analizadas por cada parámetro. Los métodos aplicados para los análisis de plaguicidas y sus límites de cuantificación están resumidos en el anexo II.

Cuadro 12: Número de muestras analizadas, parámetros y laboratorios

Parámetros	Laboratorio	Número de muestras analizadas
Plaguicidas barrido: insecticidas, fungicidas, herbicidas	LAREP-UNA	119
Herbicidas: carbaril, bromacil, diuron, atrazina, terbutilazina	LAREP-UNA	100
Herbicidas fenoxiácidos: 2,4-D, dicloroprop, bentazon, MCPP	LAREP-UNA	19
Dichlorobromopropano (DBCP)	LAREP-UNA	45
Nitrato	LASEQ-UNA**	65
Nitrato o físico químico*	Laboratorio Nacional de Aguas, AyA	22
Metales*	Laboratorio Nacional de Aguas, AyA	13
Coliformes totales y fecales	Laboratorio Microbiología de Aguas-UCR**	44
Coliformes fecales *	Laboratorio Nacional de Aguas, AyA	22
Bacterias patógenas *	Laboratorio Nacional de Aguas, AyA	20

* Principalmente las muestras tomadas de los acueductos rurales

** Como prestación de servicios

4.4 Control de calidad

Para controlar la calidad del muestreo y de los análisis de plaguicidas se ejecutaron una serie de controles. Entre otros se llevaron muestras de agua al campo como referencia (muestras blanco de campo), se hicieron adiciones de plaguicidas a muestras en el campo, se tomaron muestras en duplicado y se hicieron pruebas de recuperación en el laboratorio.

Para efectos de confirmación de los plaguicidas encontrados algunos de los extractos obtenidos en los análisis de plaguicidas fueron analizados en el laboratorio Omegam en Amsterdam, Holanda y en el laboratorio NWQL de USGS en Denver. En estos laboratorios se aplicaron técnicas analíticas confirmatorias mediante cromatografía de gases con detección de masas (GCMS) y cromatografía líquida con detección de masas (LCMS). Los resultados obtenidos coincidieron favorablemente. Como se mencionó anteriormente, cuando se detectaron plaguicidas en una muestra, se realizó al menos un muestreo adicional en el mismo punto.

4.5 Resultados de los análisis

El resumen de los resultados de los análisis de residuos de plaguicidas, de los análisis microbiológicos y de nitratos se encuentra en el cuadro 13.

Cuadro 13: Resumen de los resultados de los análisis en las muestras de agua

Parámetros	Encontrado	Observaciones
Plaguicidas	13 muestras positivas de las 100 muestras tomadas por primera vez	en total 23 muestras positivas en todas las muestras tomadas (incluyendo repeticiones)
Bromacil	18 muestras positivas (incluyendo duplicados) de 0,5 a 20 µg/L	en 2 nacientes y 6 pozos cerca o dentro de cultivos de piña
Clorotalonil	4 muestras positivas (0,07 – 0,2 µg/L)	2 muestras más con trazas
Propiconazole	1 muestra positiva (0,2 µg/L)	muestra tomada en pozo de un aeródromo
Triadimefon	1 muestra positiva	encontrado en una muestra que también presentaba bromacil
Otros plaguicidas	Ningún otro plaguicida analizado fue detectado en las muestras	
Coliformes fecales	66 muestras analizadas 26 muestras indicaron aguas no potables * (39%)	la mayoría en pozos particulares
Bacterias patógenas	20 muestras analizadas 12 muestras positivas	
Nitrato	84 analizadas concentración máxima de 18 mg NO ₃ ⁻ /L 14 muestras > 5 mg NO ₃ ⁻ /L	niveles superiores a 5 mg NO ₃ ⁻ /L* fueron encontrados en pozos dentro de o cercanos a fincas de banano, piña u ornamentales

* presencia de coliformes fecales

** 5 mg NO₃⁻/L corresponde a 10% del valor máximo permitido en agua potable.

Plaguicidas

El compuesto que aparece con más frecuencia en las muestras fue el herbicida bromacil. Esta sustancia fue confirmada por los laboratorios de la USGS y Omegam. Su presencia fue corroborada mediante la repetición de muestreos. Las nacientes en que se detectó el bromacil suministran el agua para los acueductos rurales de Milano y Cairo, ambos cerca de Siquirres. Las concentraciones encontradas en las aguas de estas nacientes se presentan en el cuadro 14. Este compuesto se detectó también en muestras de pozos ubicado en las cercanías de los dos acueductos, tanto dentro como fuera de las fincas que cultivan piña. La figura 14 presenta el detalle de las concentraciones de bromacil encontradas en los dos acueductos y puntos mencionados en los que se tomó al menos dos muestras en cada uno.

Cuadro 14: Concentraciones de bromacil encontradas en muestras de agua tomadas en dos acueductos rurales cerca de Siquirres (en µg/L)

Acueducto Milano			Acueducto El Cairo		
Fecha de muestreo	Naciente principal	Naciente secundario	Tanque de captación	Fecha de muestreo	Naciente
31-01-03			3,5	26-02-03	0,4 / 0,7
21-05-03	4	2,5	3	14-04-03	0,4
				29-05-03	0,5
06-07-04	<0,1			06-07-04	0,6

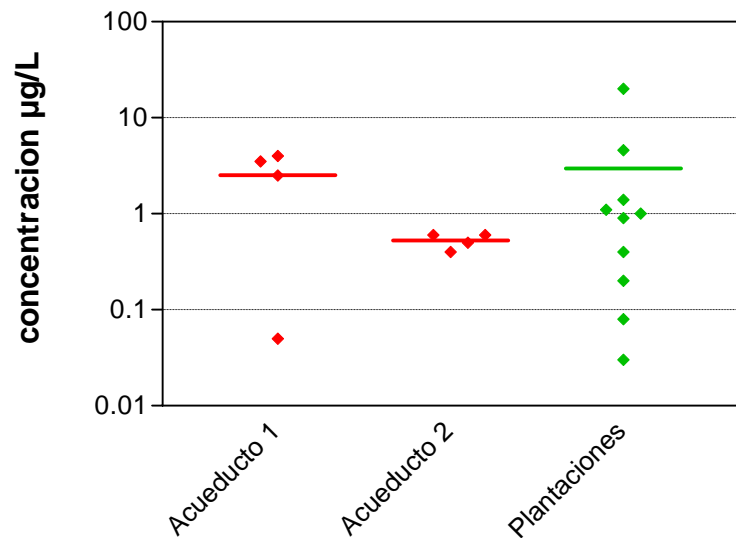


Figura 14: Concentraciones de bromacil encontradas en aguas subterráneas en los diferentes sitios de muestreo.

La presencia de este herbicida tanto en pozos dentro de las fincas de piña como en pozos y nacientes cerca de las plantaciones indica que las aguas subterráneas se han contaminado por el uso de esta sustancia. Por el tipo del estudio no se pueden deducir las causas exactas de esta contaminación ni tampoco su extensión. Se conoce, sin embargo, que el bromacil es uno de los herbicidas usados en el cultivo de piña, sustancia indicada como crítica con base en su índice potencial relativo de lixiviación (ver cuadro 4); es relativamente persistente en suelo y tiene una alta tendencia a la lixiviación. En el recuadro 1 se encuentra mas información sobre este compuesto.

El cultivo de piña ha presentado en la zona Atlántica un incremento del área de siembra en los últimos tres a cinco años. El sistema de cultivo actual incluye la eliminación total de otras coberturas y la exposición del terreno en grandes extensiones. Además, la producción de piña en climas lluviosos requiere suelos muy permeables a fin de evitar el ataque de patógenos en la raíz. Los suelos en las áreas de producción entre el Río Destierro y Reventazón se caracterizan en parte por ser permeables y pedregosos con cantidades limitadas de materia orgánica (Stoorvogel y Eppink, 1995). En el caso de las nacientes del acueducto rural de Milano se observa claramente en todo el perfil del suelo, sobre uno de los tanques de captación, la presencia de material con una textura gruesa (ver figura 15). Este tipo de suelos y posiblemente los flujos laterales locales de la parte superior del acuífero hacia las nacientes cercanas, han causado la llegada relativamente rápida de este contaminante al acuífero.

En el caso del acueducto de Cairo existe probablemente una situación parecida. El flujo del agua que se intercepta viene en parte de las parcelas de piña. Además por la presencia de algunos pozos de extracción de agua en la parcela industrial aledaña al acueducto se puede asumir un aumento de los flujos preferenciales que provienen de las parcelas de piña.

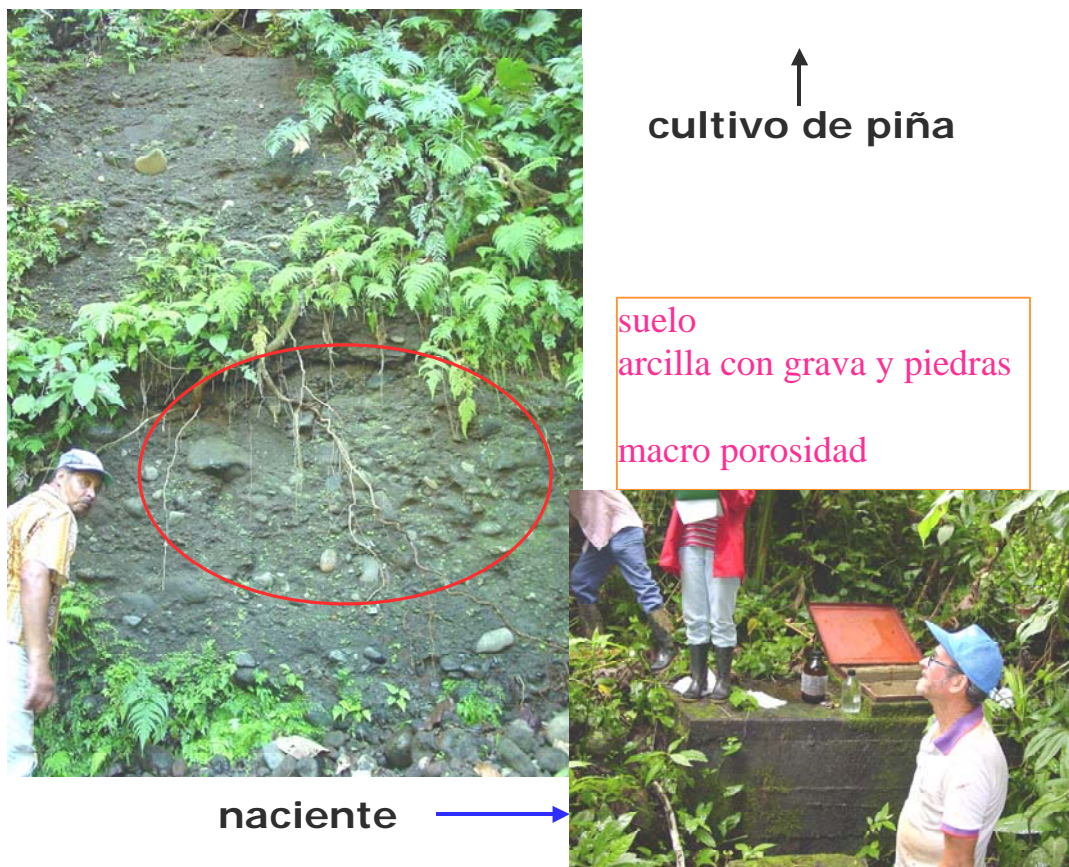


Figura 15: Situación encima de la naciente del Acueducto de Milano.

Recuadro 1: Algunos aspectos importantes del herbicida bromacil

El bromacil es un herbicida para el control de malezas perennes (gramíneas) y es usado en el cultivo de piña al inicio de la siembra en combinación con otros herbicidas como ametrina o diuron. En Costa Rica su uso ha sido autorizado para cítricos y piña.

La sustancia es clasificada como relativamente persistente en el suelo (la vida media es de más de 100 días), presenta una alta tendencia a la lixiviación y ha sido detectado en aguas subterráneas en otros países. En Florida ha sido detectado ampliamente en pozos de aguas potables en las regiones del cultivo de cítricos en concentraciones encima de 90 $\mu\text{g/L}$, que es el valor “lifetime health advisory level” (HAL) definido por la EPA (EPA, 1996; EPA, 2004). La EPA y la OMS no han definido un valor máximo permitido en agua potable. El herbicida ha sido ampliamente encontrado en Hawai en pozos ubicados en áreas de plantaciones piñeras (Zhu y Li, 2002). Estos autores investigaron la presencia de bromacil en la columna de suelo en plantaciones de piña y encontraron residuos de bromacil hasta 15 m de profundidad. En Alemania se detectaron niveles de bromacil de 30 a 148 $\mu\text{g/L}$ en aguas subterráneas y en Los Países Bajos hasta 1,8 $\mu\text{g/L}$ en pozos con una profundidad entre 15 y 40 m (FAO, 2000). En Europa su uso ha sido eliminado en la mayoría de los países ya en los años 90 por su alto riesgo de contaminar las aguas subterráneas (FAO, 2000). Otros estudios en zonas de cultivo de piña en Costa Rica ya habían demostrado la escorrentía de bromacil a las aguas superficiales (Castillo y Ruepert, 2001; Castillo y Ruepert, 2005).

Además, del bromacil también se encontraron otros plaguicidas:

- El fungicida clorotalonil ha sido encontrado principalmente en pozos artesanales, no muy profundos, cerca de fincas de banano. Por la construcción de estos pozos y su protección limitada se piensa que la contaminación podría ser causada por la deriva del plaguicida durante la aplicación aérea.
- La presencia del propicozanole en una muestra tomada en el pozo de un aeródromo fuera de uso durante el muestreo, puede indicar una contaminación de las aguas subterráneas alrededor de este sitio.

Coliformes y otras bacterias patógenas

En los cuadros 15 y 16 se presentan los resultados de los análisis microbiológicos. Las muestras con presencia de coliformes fecales fueron clasificadas como no potables. En tres sitios contaminados se repitió el muestro.

Cuadro 15: Resultados de análisis de coliformes* en muestras de agua de pozos y nacientes recolectadas en la Zona Atlántica, 2003 - 2004

Sitio de muestreo	Número de muestras analizadas	Número de muestras no potables **	% de aguas no potables
Acueductos rurales	21	2	9,5
Acueductos del AyA	3	0	0
Aeródromos	2	0	0
Casas	9	8	89
Escuelas	2	1	50
Fincas bananeras	10	3	75
Fincas ganaderas	1	1	100
Fincas ornamentales	4	3	75
Fincas piñeras	4	3	75
Industrias y otros	3	3	100
Total	59	24	40

* solamente están reportados los resultados del primer muestreo hecho en cada sitio.

** muestras en que se detectó la presencia de coliformes fecales.

Se encontró contaminación de origen fecal humano o animal en un 40% de las muestras analizadas. En el caso de uno de los acueductos rurales contaminados, se realizó un segundo muestreo después de una limpieza del tanque de almacenamiento por parte de los encargados del acueducto y ya no se encontró contaminación fecal.

Cuadro 16: Resumen de los resultados de análisis de bacterias patógenas

Bacterias encontradas	Número de muestras positivas
<i>Aeromonas hydrophila</i>	6
<i>Citrobacter diversus</i>	1
<i>Citrobacter freundii</i>	1
<i>Enterobacter cloacae</i>	1
<i>Enterobacter sp</i>	1
<i>Escherichia coli</i>	1
<i>Klebsiella sp</i>	2
<i>Protues vulgaris</i>	1
<i>Pseudomonas sp</i>	3
Muestras analizadas	20
Total muestras positivas	12

Las muestras para los análisis bacteriológicos patógenos mencionadas en el cuadro 16 fueron tomadas, con una excepción, en acueductos rurales (14) y acueductos del AyA (5), de ellos tres fueron nacientes. Dos de las muestras positivas con *Aeromonas hydrophila* fueron tomadas en nacientes (Milano y 28 Millas). Esta bacteria ha sido detectada en aguas de pozos en el Valle Central (Valiente y Gonzalez, 2002; Valiente y Mora, 2002) y en general en sistemas de distribución de agua potable (WHO, 2004). Se piensa que el crecimiento de esta bacteria ocurre en los sistemas de distribución, sin embargo los factores que afectan su presencia no son muy claros hasta el momento (WHO, 2004). En el caso de este estudio las muestras fueron tomadas lo mas cerca posible de los pozos, por lo que las muestras positivas indican que con bastante probabilidad, la fuente de contaminación esta dentro del pozo.

Sin duda los pozos artesanales que se muestrearon son los mas vulnerables a este tipo de contaminación. En general estos pozos están ubicados cerca de las casas o escuelas, no son muy profundos y pueden estar en las cercanías de tanques sépticos. Además, se observó muchas limitaciones en el estado general del pozo, el mantenimiento y la limpieza. Un estudio en la zona costera de Guanacaste presentó también una contaminación microbiológica generalizada en los pozos artesanales (Calderón et al. 2002). El contacto con agua contaminada con coliformes fecales puede provocar enfermedades especialmente para bebés, niños pequeños y personas con sistemas inmunológicos gravemente comprometidos.

Es importante notar que la gente, en la mayoría de los casos, es consciente de la pobre calidad de su agua y de los riesgos asociados, sin embargo siguen utilizando esta agua porque no hay otras alternativas a su alcance. Dos de los pozos muestreados ubicados en casas están en Saborio de Matina, donde muchas casas no cuentan con los servicios de un acueducto rural. Actualmente el acueducto rural de Venecia esta trabajando para incluir a Saborio dentro de su red de distribución, se espera que la obra esté lista en el año 2006.

En Cultivez de Siquirres, donde se encontró agua contaminada en el pozo de la escuela (ver foto en la portada) y en una casa, existe desde hace varios años un pozo perforado por el AyA. Sin embargo, la comunidad no ha contado con los recursos para poner en funcionamiento el pozo y para instalar la red de distribución.

Nitrato

En la figura 16 se presenta un diagrama de caja (“Boxplot”) con las concentraciones de nitrato por sitio de muestreo. Ninguna de las muestras presentó concentraciones que sobrepasen el valor recomendado de 25 mg NO₃⁻/L en agua potable¹⁰ (La Gaceta, 2005). Todas las concentraciones superiores a 5 mg NO₃/L fueron encontradas en muestras de pozos tomadas dentro o cerca de plantaciones de banano (11 muestras) o de piña/ornamentales (3 muestras). Diez de estos pozos habían sido clasificados como vulnerables. De las 27 muestras tomadas en los acueductos, solamente en dos se encontraron concentraciones encima de 5 mg NO₃⁻/L, el resto tuvo niveles no detectables o muy bajos.

En general, los niveles elevados de nitrato en agua subterránea se detectaron en áreas agrícolas por el uso intensivo de fertilizantes nitrogenados, especialmente en suelos permeables (p.ej. suelos arenosos o formaciones fracturadas) con un nivel freático poco profundo. Para el área de estudio se espera que los niveles inferiores a 5 mg NO₃⁻/L corresponden a la línea base.

El uso de concentraciones de nitrato en aguas subterráneas como indicador para la contaminación por plaguicidas ha sido ampliamente discutido por Barbesh y Resek (1997). De acuerdo con ellos el nitrato no es un indicador confiable para predecir la contaminación por plaguicidas. Los mecanismos de transporte para nitrato son diferentes a los de los plaguicidas (Worrall y Besien, 2005). En condiciones

¹⁰ el valor máximo permitido en agua potable de nitrato es 50 mg NO₃⁻/L que es igual a 11,3 mg N/L .

aeróbicas los procesos de desnitrificación son muy limitados y el nitrato no se degrada, no es retenido y se mantiene transportado por la disolución acuosa. Según Barbesh y Resek (1997), existe una correlación positiva entre concentraciones de plaguicidas y de nitrato en pozos someros.

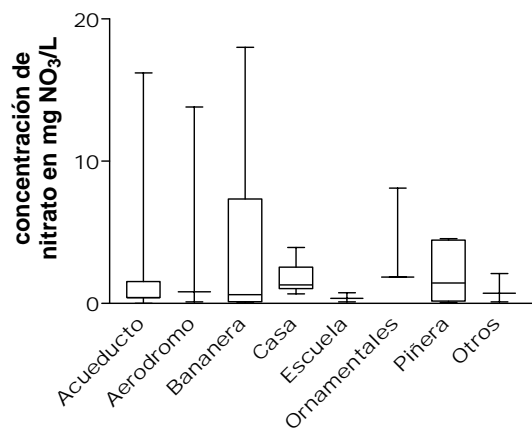


Figura 16: Concentraciones de nitrato encontrados en el agua subterránea agrupadas por tipo de sitio de muestreo

5 Logros y divulgación

5.1 Mapas, bases de datos

Con la firma del convenio de intercambio de información geográfica digital con el MINAE, promovida por este proyecto, nos fue entregada la Base de Datos TERRA en julio 2003. Esta base quedó a disposición de todos los usuarios de la UNA en la Biblioteca Especializada de la Facultad de Ciencias de Tierra y Mar (BIODOC).

Con el acto protocolario de entrega de esta base se impartió un curso de Arc Explorer a los funcionarios de la Facultad de Tierra y Mar de la Universidad Nacional. Este programa es gratuito y permite visualizar la información cartográfica digital, sin necesidad de tener mucho conocimiento en el manejo de este tipo de programas.

La información cartográfica recopilada en las instituciones consultadas y la generada durante el desarrollo del proyecto está accesible en el CD mediante el programa ArcView GIS o ArcExplorer (ver contenido del CD en el anexo I).

5.2 Talleres y presentación de resultados

Se presentaron y discutieron los primeros resultados y conclusiones del proyecto en un taller para los cantones de Pococí y Guácimo, el 10 de noviembre del 2003, en el Área de Conservación Tortuguero (ACTO) del MINAE. En este taller participaron personeros del Ministerios de Ambiente, de Salud, de Agricultura y Ganadería, las Municipalidades y AyA (ver lista de participantes en disco compacto). Con ellos se acordó colaborar en el trabajo que desarrollemos en el futuro y específicamente en lo relacionado con el tema de aguas y plaguicidas.

En otro taller organizado por el Área de Conservación Amistad Caribe (ACLA.-C) del MINAE y la EARTH, en octubre 2004, con participación de empresarios productores de piña y banano, representantes de los ministerios de agricultura, salud y ambiente ubicados en la Zona Atlántica, miembros de las comunidades y académicos de la EARTH. En esta ocasión presentamos una conferencia en la que se divulgaron los resultados del proyecto y la problemática generada alrededor del cultivo de piña.

Además se organizó una reunión con los acueductos rurales involucrados, funcionarios del AyA y de los centros regionales de los ministerios de salud, agricultura y ambiente en las oficinas del Ministerio de Salud en Siquirres para informarles sobre los resultados del estudio y para discutir posibles medidas a tomar.

A la fecha se entregaron los resultados a los acueductos rurales, algunas empresas, escuelas y casas con las recomendaciones pertinentes en cada caso.

Además, los resultados del proyecto fueron presentados en varios encuentros de índole académico dentro y fuera del país:

- Castillo LE. *Pesticide pollution of surface and ground water in tropical agricultural areas*. CICTA 2003, Environmental problems in an Iberoamerican context 5th Iberian Congress and 2nd Iberoamerican on Environmental Contamination and Toxicology. 22-24 septiembre 2003, Porto, Portugal.
- Castillo LE, Ruepert C. *Contaminación por plaguicidas en aguas superficiales en una área de producción piñera en la zona Atlántica de Costa Rica: evaluación biológica y química*. 1 ° Congreso de la Asociación Mesoamericana de Ecotoxicología y Química Ambiental 22 al 26 de marzo de 2004. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua en Jiutepec, Morelos, México.

- Castillo LE y Ruepert C. *La investigación como apoyo a la gestión del recurso acuático: Un caso de estudio en las áreas agrícolas de la zona Atlántica de Costa Rica*. Seminario Internacional CYTED CYTED-XVII : Un Enfoque Integrado para la Gestión Sustentable del Agua, Experiencias en Gestión y Valoración del Agua. 4: 29 - 31 marzo 2004, San José, CR.
- Ruepert C, Bravo V, Fallas J, Solano K, Castillo L. *Ground water vulnerability to pesticide contamination in Costa Rica*. Presentación de póster. The Ninth Symposium on Chemistry & Fate of Modern Pesticides, 16-19 de agosto 2004, Vail, CO, EEUU (ver disco compacto).
- Ruepert C, Bravo V, Fallas J, Solano K, Castillo L. *Vulnerabilidad de agua subterránea por contaminación a plaguicidas en Costa Rica, un estudio piloto en la zona Atlántica*. Presentación oral. VI Simposio Latinoamericano de Química Analítica Ambiental y Sanitaria, 30 de agosto al 2 de septiembre de 2004, Guatemala (ver disco compacto).
- Castillo LE, Ruepert C. *Pesticide impacts in banana and pineapple plantations and adjacent conservation areas in Costa Rica*. Presentación oral. Fourth SETAC World Congress, 13-19 de noviembre 2004, Portland, Oregon EEUU.
- Ruepert C, Castillo L, Bravo V, Fallas J, Solano K. *Vulnerabilidad de agua subterránea por contaminación a plaguicidas en Costa Rica, un estudio piloto en la zona Atlántica*. Congreso CARA: "Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos: Trabajando Juntos para el Futuro", 9-11 de marzo de 2005, Managua, Nicaragua.

6 Continuidad del proyecto y recomendaciones

Este estudio preliminar es un aporte a las políticas definidas por el MINAE en su propuesta “Estrategia Nacional para el Manejo Integral del Recurso Hídrico”(2004). Los datos generados en este trabajo contribuyen a un mejor conocimiento sobre el uso de plaguicidas y sus posibles efectos sobre la calidad del agua subterránea y del agua potable que proviene de pozos y nacientes y, además, dar insumos para el desarrollo de programas de monitoreo de estas sustancias en las aguas.

Este trabajo ya resultó en una propuesta de seguimiento para trabajar con los acueductos de la zona. La propuesta tiene como objetivo general “desarrollar una estrategia de vigilancia, manejo y control de la calidad del agua para acueductos rurales de poblados y procesos agroindustriales y gestión ambiental de empresas en el Caribe de Costa Rica”.

Sin lugar a dudas, es importante continuar con una segunda etapa de investigación del proyecto en la que se amplie el estudio en la misma zona y se aplique la metodología actualizada en otras zonas del país. La región Chorotega es particularmente interesante por el tipo de suelos y por la existencia de áreas de uso intensivo de agroquímicos.

Para una segunda etapa es importante primero señalar algunas de las limitaciones de este estudio preliminar:

- La ubicación de los diferentes cultivos en la zona de estudio no estaba muy claro por la falta de información actualizada del uso del suelo en las instituciones consultadas y la cartografía disponible.
- La clasificación de la vulnerabilidad de los pozos fue basada en el criterio de experto y se fundamentó en la información de los perfiles del 63% de los pozos registrados; sin embargo sería importante tener más claridad sobre la exactitud de la información en los perfiles entregados a SENARA.
- El modelo de simulación de lixiviación aplicado toma en cuenta solamente algunos determinantes de la lixiviación en la parte superior del suelo. Otros aspectos importantes, como por ejemplo, en el caso de bromacil, la existencia de flujos preferenciales en el suelo no están contemplados.
- La estrategia de muestreo no se pudo cumplir por no contar con el debido permiso de acceso a las fincas de banano y piña, por lo cual no se pudo muestrear una cantidad considerada de pozos calificados como vulnerables. En un estudio futuro deberían de incluirse estos pozos, buscando el apoyo previo del Ministerio de Salud. En su defecto puede ampliarse la muestra, usando estrategias de muestreo que compensen esta ausencia de datos. Para ello sería importante también incluir estudios sobre los acuíferos de la zona estudiada incorporando hidrogeólogos al equipo de investigadores.
- Algunos plaguicidas y metabolitos de interés no fueron incluidos en los análisis. En el caso de algunos plaguicidas es necesario bajar aun más los límites de detección actuales.

En este estudio se valoró una combinación de aspectos que pueden contribuir en cierta forma a la vulnerabilidad de agua subterránea por contaminación a plaguicidas tales como el uso de plaguicidas en cultivos intensivos; plaguicidas críticos; áreas críticas y pozos críticos. Estos aspectos se analizaron utilizando la herramienta espacial SIG y se completaron con análisis químicos y biológicos de muestras tomadas de pozos y nacientes. Se encontró una relación bastante clara entre la presencia de un plaguicida crítico (el bromacil) usado en un cultivo específico (piña), en suelos bien drenados y pedregosos.

Entonces se pueden ver factores claves que si contribuyen a la presencia localizada de esta sustancia en las aguas subterráneas como: flujos preferenciales en suelo, captación no adecuada de aguas, un suelo con capacidad limitada de adsorción y el uso de una sustancia relativamente móvil y persistente en suelo.

A pesar de las limitaciones se considera que la metodología fue adecuada (ver diagrama de flujo, figura 4). Para una segunda etapa se recomienda extender la metodología propuesta de manera que una serie de actualizaciones.

Características de la zona: para mejorar la caracterización de la zona se debe entre otros contar con una base de datos mas actualizada del uso de suelo (ubicación de los diferentes cultivos) en la zona, además actualizar y verificar los datos de suelo, y una actualización de los datos hidrogeológicos (utilizando entre otros los perfiles litológicos de las perforaciones) disponibles.

Uso del agua subterránea. Identificar y caracterizar más a fondo el uso del agua subterránea en la zona; clasificando mejor los pozos con datos reales y verificados en el campo (p ej. nivel estático y dinámico, caudal, estado de protección actual, etc). Se recomienda incluir también con más detalle las nacientes y el uso de pozos artesanales.

Riesgo de lixiviación de los plaguicidas. Para el modelo simple de lixiviación usado en este estudio se usó entre otros un valor general para la tasa de recarga. Una mejor estimación de la recarga por unidades de suelo puede resultar en un modelaje más adecuado. También se puede pensar en un modelo mas sofisticado, sin embargo, todo depende de la información disponible.

Investigación de la calidad del agua subterránea. Establecer un programa de monitoreo e incluir en la segunda etapa los sitios de muestreo que faltaron en la primera etapa. Para los análisis de muestras se deben incluir otros plaguicidas críticos, como los carbamatos y los metabolitos de ciertos plaguicidas. Además, se debe intentar de mejorar las técnicas analíticas para bajar los límites de cuantificación.

Estimación de la vulnerabilidad. Valorar como se puede utilizar la forma para estimar la vulnerabilidad del agua subterránea por contaminación aplicado por Worrall y Besien (2005) a plaguicidas usando la presencia o ausencia de plaguicidas en los pozos muestreados.

7 Conclusiones

De acuerdo con la literatura consultada, este trabajo representa un estudio pionero en cuanto a la amplitud del estudio el que se ha investigado ampliamente la presencia de plaguicidas en aguas subterráneas en una zona con agricultura intensiva en el país.

El estudio confirmó la presencia de plaguicidas en aguas subterráneas en la zona de estudio. El plaguicida más encontrado fue el herbicida bromacil usado en el cultivo de piña. Se encontró este herbicida en dos nacientes que suministran agua potable para comunidades cerca de Siquirres y en los pozos cercanos a ellas. Esta sustancia, relativamente móvil y persistente en el suelo, ha causado, en otras partes del mundo contaminación de las aguas subterráneas. Ello ha resultado en la restricción en su uso y hasta en su prohibición en varios países Europeos.

Un aspecto importante a resaltar es que la piña es un cultivo relativamente nuevo para la zona Atlántica, en algunas áreas ronda los cuatro años. Actualmente el área de cultivo en la zona se sigue incrementando fuertemente y se presenta en suelos muy permeables. Si el manejo de plaguicidas, sobre todo el de los herbicidas, no cambia se puede causar una contaminación mas generalizada de las aguas subterráneas y, por tanto, en los pozos de la zona.

Además, se confirmó la vulnerabilidad a la contaminación por coliformes de muchos pozos no profundos y no protegidos, en su mayoría pozos privados artesanales, lo que indica un agua no potable.

El conocimiento de esta situación de riesgo debe alertar a las partes involucradas y facilitar la toma de decisiones en cuanto a la necesidad de ampliar el monitoreo de las aguas subterráneas por la presencia de sustancias críticas en zonas críticas, y de implementar las regulaciones al uso de plaguicidas y a la protección de las aguas subterráneas. Consideramos conveniente y oportuno desarrollar un sistema de vigilancia de la calidad del agua para asociaciones administradoras de acueductos rurales y los departamentos de gestión ambiental de empresas agrícolas. El Laboratorio Nacional de Aguas del AyA ha iniciado, con apoyo del LAREP-IRET, el seguimiento a las tendencias de la contaminación en las dos nacientes mencionadas.

El estudio tuvo una acogida muy favorable entre los encargados de los acueductos rurales porque, hasta ese momento, ellos no contaban con resultados de análisis de residuos de plaguicidas en sus pozos. Así mismo, funcionarios de algunas oficinas regionales de MINAE y Ministerio Salud, de municipios y de AyA expresaron su interés en el estudio. Se considera que es de mucha relevancia continuar con este tema de investigación y se espera obtener fondos adicionales para apoyarlo, así como el compromiso por parte de las instituciones correspondientes para el muestreo de pozos. También es importante aplicar la metodología en otras zonas vulnerables del país como por ejemplo la zona de Guanacaste y de la Península de Nicoya, pues son zonas con una fuerte presión sobre la disponibilidad y la calidad del recurso hídrico subterráneo.

8 Bibliografía

- Abarca L y Ruepert C. 1992. Plaguicidas encontrados en el Valle de la Estrella: Estudio preliminar. *Tecnol. Marcha* 12: 31-38.
- Acón y Asociados. 1991. Manual descriptivo de la leyenda del mapa de asociaciones de subgrupos de suelos de Costa Rica. Escala 1:200.000. Convenio MAG/SEPSA. Programa de Zonificación Agropecuaria. Fondo de Preinversión MIDEPLAN/BIB.
- Barbash JE y Resek EZ. 1996. Pesticides in Groundwater. Distributions, Trends and Governing Factors. In: *Pesticides in the Hydrologic System*. R.J Gilliom (ed), vol. 2. Ann Arbor Press, Chelsea, MI.
- Barbash JE, Thelin GP, Kolpin DW, Gilliom RJ Major. 2001 Herbicides in ground water: results from the National Water-Quality Assessment. *J Environ Qual.* 30(3):831-45.
- Batista S, Silva E, Galhardo S, Viana P, Cerejeira M. 2002. Evaluation of Pesticide Contamination of Ground Water in Two Agricultural Areas of Portugal. *Inter J Environ Anal Chem* 82; 601-609.
- Bouman BAM, Jansen HGP, Schipper, RA, Hengsdijk H, Nieuwenhuysse A. (Eds.) 2000. *Tools for Land Use Analysis on Different Scales, With Case Studies for Costa Rica Series: System Approaches for Sustainable Agricultural Development, Vol.8*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Burkart M, Kolpin DW, Jaquis R, Cole K. 2001. Soil characteristics and agrichemicals in groundwater of the midwestern United States. *Water Sci Technol.* 43(5):251-60.
- Calderón H, Madrigal H, Reynolds J. 2002. Contaminación química y microbiológica del agua subterránea en la zona costera de Guanacaste. En: *Manejo Integrado de Aguas Subterráneas: Un Reto para el Futuro*. Ed. Reynolds J. Editorial EUNED San José. Costa Rica.
- Castillo LE y Ruepert C. 2001. Estudio Preliminar de la Calidad del Agua Superficial en la Zona de Volcán, Buenos Aires de Puntarenas. Informe para la Defensoría de los Habitantes. Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET), Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Castillo LE y Ruepert C. 2005. Pesticide impacts of banana and pineapple plantations and adjacent conservation areas in Costa Rica. *SETAC Globe*, octubre 2005.
- Castillo LE, de la Cruz E, Ruepert C. 1997. Ecotoxicology and pesticides in tropical aquatic ecosystems of Central America. *J Environ Toxic Chem.* 16(1): 41-51.
- Castillo LE, Ruepert C, Solis E. 2000. Pesticide residues in the aquatic environment of banana plantation areas in the North Atlantic Zone of Costa Rica. *Environ Toxicol Chem* 19: 1942-50.
- CCE. 2003. Propuesta de directiva del Parlamento Europeo y del Consejo sobre la protección de las aguas subterráneas de la contaminación COM/2003/0550 final -COD 2003/0210. Comisión de las Comunidades Europeas, Bruselas.
- Cerejeira MJ, Viana P, Batista S, Pereira T, Silva E, Valerio MJ, Silva A, Ferreira M, Silva-Fernandes AM. 2003. Pesticides in portuguese surface and ground waters. *Water Research*, 37(5):1055-1063.
- Comisión Permanente Especial de Ambiente. 2005 Ley de Recurso Hídrico. Expediente N° 14.585 Asamblea Legislativa de La República de Costa Rica.
- Corbana, 2003. Costa Rica, informe anual de estadísticas de exportación de banano. 2002. Corporación Bananera Nacional (Corbana) S.A. San José, Costa Rica.
- Defensoría de los Habitantes 1998. El recurso hídrico una visión integral. En: Informe Anual mayo 1997 a abril 1998. San José, Costa Rica.

- Di HJ y Aylmore, LAG. 1997. Modeling the probabilities of groundwater contamination by pesticides, *Soil Sci.Soc. of Am. J.*, 61: 17-23.
- Eason A, Tim US, Xixi Wang X. 2004. Integrated modeling environment for statewide assessment of groundwater vulnerability from pesticide use in agriculture. *Pest Manag Sci* 60 (2004) 739-745.
- EPA. 1996. Reregistration Eligibility Decision (RED) Bromacil. EPA 738-R-96-013. Office Of Pesticide Programs. Special Review And Reregistration Division. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- EPA. 2004. Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories EPA 822-R-04-005. Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- Espinoza A, Morera A, Mora D, Torres R. 2004. Calidad del agua potable en Costa Rica: situación actual y perspectivas. San José, Ministerio de Salud, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Organización Panamericana de la Salud y Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud.
- Estado de Nación. 2004. Décimo Informe sobre el Estado de la Nación en desarrollo humano sostenible. Barrantes G. "El estado de las aguas continentales en Costa Rica: superficial y subterránea". Informe final.
- Fallas J. 2003. Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en Costa Rica: Una aproximación utilizando el modelo DRASTIC y SIG. Ponencia presentada en III seminario - taller: protección de acuíferos frente a la contaminación: en acuíferos costeros y volcánicos. San José (Costa Rica), CYTED, 8, 9 y 10 de abril del 2003.
- FAO. 2000. Consideration of draft decisions guidance documents for ethylene dichloride, ethylene oxide, maleic hydrazide and bromacil. UNEP/FAO/PIC/ICRC.1/4/Add.4 PIC – Decision guidance document. United Nations Environment Programme, Food and Agriculture, Ginebra.
- Foster S, Chilton J, Moench M, Carc F, Schiffter M. 2000. Groundwater in Rural Development Facing the Challenges of Supply and Resource Sustainability. World Bank Technical Paper No. 463, The World Bank, Washington DC.
- Foster S, Hirata R, Gomes D, D'ELia M y Paris M. 2002. Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. The World Bank, Washington DC.
- Foster SSD y Lawrence AR. 1995. Groundwater Quality in Asia: An Overview of Trends and Concerns. UN-ESCAP Water Resources Journal Series C, 184: 97-110.
- Garratt JA, Capri E, Trevisan M, Errera G, Wilkins RM. 2002. Parameterisation, evaluation and comparison of pesticide leaching models to data from a Bologna field site, Italy. *Pest Manag Sci.* 59(1):3-20.
- GEUS. 2003. The Danish pesticide leaching assessment programme, monitoring results, May 1999 to June 2002. Third report-. Geological Survey of Denmark and Greenland, Danish Institute of Agricultural Sciences, National Environmental Research Institute. Copenhagen, Dinamarca.
- Gilliom RJ. 1997. Pesticides in Ground Water. Fact Sheet FS-244-95 US Geological Survey.
- Gilliom RJ. 2001. Pesticides in the hydrologic system - What do we know and what's next? *Hydrological Processes* 15: 3197-3201.
- Hornsby A, Wauchope GRD, Herner A. 1996. Pesticide Properties in the Environment. Springer-Verlag, New York.
- IRET. 1999. Manual de Plaguicidas: Guía para América Central. 1999. Segunda edición. IRET, EU-NA, Heredia, Costa Rica.

- Isenbeck-Schröter M, Kofod M, König B, Schramm T, Bedbur E, Matthes G. 1998. Auftreten von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässern und im Grundwasser.- Grundwasser, 3,2:57-66
- ITCR. 2000. Atlas de Costa Rica 2000. CD-ROM con Mapas Digitales y Documentación. Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Cartago.
- ITCR. 2004. Atlas Digital de Costa Rica 2004. CD-ROM con Mapas Digitales y Documentación. Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Cartago.
- Jarvis NJ. 2002. The MACRO model (Version 4.3). Technical description.
- Kolpin DW, Thurman EM, Linhart SM. 1998. The environmental occurrence of herbicides: the importance of degradates in ground water. Arch Environ Contam Toxicol. 35(3):385-90
- Kolpin DW, Thurman EM, Linhart SM. 2000. Finding minimal herbicide concentrations in ground water? Try looking for their degradates. Sci Total Environ. 248(2-3):115-22.
- Kolpin DW, Thurman EM, Linhart SM. 2001. Occurrence of cyanazine compounds in groundwater: degradates more prevalent than the parent compound. Environ Sci Technol 35(6):1217-22.
- La Gaceta. 2005. Reglamento para calidad de agua potable. Decreto Ejecutivo N° 32327-S. Diario Oficial La Gaceta, No. 84, 3 de mayo del 2005. Imprenta Nacional, San José, Costa Rica.
- La Nacion. 2005. Aumentan posibles agentes de cáncer en fuentes de agua. Esteban Oviedo. 14-04-05. San José, Costa Rica.
- Li QX, Hwang EC, Guo F. 2001. Occurrence of herbicides and their degradates in Hawaii's groundwater. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 66 (5), 653-659.
- Mideplan. 2003. Plan Regional de Desarrollo 2003-2006, Región Huetar Atlántica, Dirección de Planificación Regional, Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica
- MINAE. 2001. Reducción del escurrimiento de plaguicidas al Mar Caribe. Informe Nacional: Costa Rica, Proyecto GEF/1100-99-04/PNUMA
- MINAE. 2004. "Primera etapa del plan de manejo integral del recurso hídrico: La estrategia nacional para el MIRH. Informe del diagnostico, Documento para discusión" Plan nacional de manejo integral del recurso hídrico (ATN/WP - 8467-cr). Ministerio del Ambiente y Energía, San José
- Mo CL. 2001. Environmental Risk caused by pesticides used in fern and flower farms in Costa Rica. In: Environmental Impact of Leatherleaf Fern Farms in Costa Rica. Ph.D dissertation, University of Wisconsin, Madison. 131 p.
- Mora Alvarado D y Portuguez CF. 2003. Evolución de la cobertura y calidad del agua para consumo humano en Costa Rica período 1989 - 2002. Rev. Costarric. Salud Pública, 12, (22) 29-41.
- NRC. 1993. Ground Water Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty. National Research Council, National Academy Press. Washington DC.
- Nygaard E, Ernstsén V, Jacobsen CS, Jacobsen OH, Juhler RK, Van der Keur P, Olesen SE, Rasmussen J, Rosenberg P, Vosgerau H. 2004. Pesticide leaching in Danish groundwater: identification of vulnerable areas. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 4, 25-28.
- Reynolds J y Fraile J. 2002. Presente y futuro de las aguas subterráneas en el Valle Central. En: Manejo Integrado de Aguas Subterráneas: Un Reto para el Futuro. Ed. Reynolds J. Editorial EUNED. San José, Costa Rica.
- Reynolds J. 1996. Las aguas subterráneas de Costa Rica: Un recurso en peligro. En: Utilización y manejo sostenible de los recursos hídricos. Ed. J. Reynolds, EFUNA, Heredia.

- Robinson T. 1993. Fate and transport of agricultural contaminants from rice paddies. Thesis, University of California, Santa Barbara.
- Rodríguez A. 1997. Comportamiento de agroquímicos en un acuífero somero bajo una plantación bananera en la zona Atlántica de Costa Rica. M.Sc. tesis. Programa de Estudios de Posgrado en Geología con Énfasis en Manejo de Recursos Hídricos e Hidrogeología. Universidad de Costa Rica.
- Segura O, Miranda M, Salas F, Astorga Y, Gutiérrez M, Solano J, Dierckxsens M, Céspedes M. 2004. Agenda del Agua en Costa Rica. CRUSA, EFUNA, Heredia.
- Stoorvogel JJ y Eppink GP. 1995. Atlas de la Zona Atlántica Norte de Costa Rica. Programa Zona Atlántica CATIE-UAW-MAG, Guápiles, Costa Rica
- Swancar A. 1996. Water quality, pesticide occurrence, and effects of irrigation with reclaimed water at golf courses in Florida. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 95-4250. Tallahassee, Florida. 85 p.
- TAHAL. 2000. Estudio de suelos y capacidad de uso de las tierras para la zonificación agropecuaria. TAHAL. Consulting Engineers Ltda. MAG, MIREPLAN.
- Thapinta A y Hudak PF. 2003. Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in central Thailand. *Environ Int* 29(1):87-93.
- Tiktak A, Linden AMA van der, Boesten JJTI. 2003. The GeoPEARL model. Description, applications and manual, RIVM rapport 716601007, Bilthoven, Los Países Bajos.
- Troiano J, Weaver D, Marade J, Spurlock F, Pepple M, Nordmark C, Bartkowiak D. 2001. Summary of well water sampling in California to detect pesticide residues resulting from nonpoint-source applications. *Journal of Environmental Quality* 30:448-459.
- Valiente C y Gonzalez JP. 2002. Calidad microbiológica del agua subterránea en el Valle Central de Costa Rica. 1997-2000. En: Manejo Integrado de Aguas Subterráneas: Un Reto para el Futuro. Ed. Reynolds J. Editorial EUNED San José. Costa Rica.
- Valiente C y Mora D. 2002. El papel del agua para consumo humano en los brotes de diarrea reportados en el período 1999 - 2001 en Costa Rica. *Rev. costarric. salud pública*. 11, (20) p.26-40.
- WHO. 2004. Guidelines for drinking-water quality – Recommendations. Vol. 1. third edition World Health Organization Ginebra. World
- Wood BP y Chilton PJ. 1995. Occurrence and Distribution of Ametryne, Atrazine and its Deethylated Metabolite in Barbados Groundwater. BGS Technical Report WD/95/26: 123-129. British Geological Survey, Nottingham.
- Worrall F y Besien T. 2005. The vulnerability of groundwater to pesticide contamination estimated directly from observations of presence or absence in wells. *J. Hydrology*, 303, 92-107.
- Worrall F, Besien T, Kolpin DW. 2002. Groundwater vulnerability: interactions of chemical and site properties. *Sci Total Environ*. Nov 1;299(1-3):131-43.
- Worrall F y Kolpin DW. 2004. Aquifer vulnerability to pesticide pollution - combining soil, land-use and aquifer properties with molecular descriptors. *J. Hydrology*, 293, (1-4), 191-204.
- Worrall F. 2001. A molecular topology approach to predicting pesticide pollution of groundwater. *Environ Sci Technol*, 35:2282-2287.
- Zhu Y y Li XQ. 2002. Movement of bromacil and hexazinone in soils of Hawaiian pineapple fields *Chemosphere* 49 (2002) 669–674.

Anexo I: Contenido disco compacto

Talleres

Taller “*Vulnerabilidad de aguas subterráneas a contaminación por plaguicidas*”

25 de junio del 2002, Biblioteca “Joaquín García Monge” Universidad Nacional, Heredia.

Resultados del proyecto “Vulnerabilidad de aguas subterráneas a contaminación por plaguicidas en la zona Atlántica”. 10 de noviembre 2003, MINAE-ACTO, Guápiles

Presentaciones/Poster

Vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en Costa Rica

Charla Jorge Fallas, 2002

Decision support systems for crop production and water quality protection

Arthur Hornsby

UNA-Heredia, mayo 2002

The occurrence of pesticides in US water resources: studies of surface- and ground-water vulnerability

William Battaglin

UNA-Heredia, junio 2002

Determination of pesticides in water-quality studies: sample collection, analysis and quality-control samples

Mark Sandstrom

UNA-Heredia, junio 2002

Current and future prospects in watershed modelling

Lauren Hay

UNA-Heredia, junio 2002

Vulnerabilidad de aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas

Clemens Ruepert & Luisa Eugenia Castillo

Taller MINAE-ACTO, Guapiles, noviembre 2003

La investigación como apoyo a la gestión del recurso acuático: Un caso de estudio en las áreas agrícolas de la zona Atlántica de Costa Rica

Luisa Eugenia Castillo & Clemens Ruepert

IV Seminario Internacional CYTED-XVII. Subprograma XVII Aprovechamiento y Gestión de Recursos Hídricos. San José, Costa Rica, del 29 al 31 de marzo de 2004.

Ground Water Vulnerability to Pesticide Contamination in Costa Rica

C. Ruepert, V. Bravo, J. Fallas, K. Solano, L. Castillo

9th Symposium on the Chemistry & Fate of Modern Pesticides. August 16-19, 2004, Vail, Colorado USA

Presentación de poster

Vulnerabilidad de agua subterránea por contaminación a plaguicidas en Costa Rica, un estudio piloto en la zona Atlántica

Clemens Ruepert, Viria Bravo, Jorge Fallas, Karla Solano, Luisa Castillo

VI Simposio Latinoamericano De Química Analítica Ambiental Y Sanitaria, Guatemala, 30 de agosto al 2 de septiembre de 2004

Pesticide impacts in banana and pineapple plantations and adjacent conservation areas in Costa Rica.

Luisa Eugenia Castillo & Clemens Ruepert

Fourth SETAC World Congress, Portland, Oregon EEUU, 13-19 de noviembre 2004

Vulnerabilidad de agua subterránea por contaminación a plaguicidas en Costa Rica, un estudio piloto en la zona Atlántica.

C. Ruepert, V. Bravo, J. Fallas, K. Solano, L. Castillo

Congreso CARA "Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos: Trabajando Juntos para el Futuro", Managua, Nicaragua, 9-11 de marzo de 2005

Informes

Jorge Fallas. *Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en Costa Rica: Una aproximación utilizando el modelo DRASTIC y Sistemas de Información Geográfica.* 2002

Plaguicidas

Base de datos de plaguicidas: "Pesticide Properties Database", Hornsby et al. 1996

Geobase de datos

Como parte del proyecto se elaboró una geobase de datos digital que incluye las siguientes capas; las cuales se encuentran en el subdirectorio Geobase. La geobase de datos contiene archivos en formato vectorial ("Shapes" de ARCVIEW GIS) e imágenes georeferenciadas en formatos TIFF y SID. El sistema de coordenadas de la geobase de datos es Lambert Norte, datum Ocotepaque.

Los autores no asumen ninguna responsabilidad por errores o interpretaciones de los datos derivadas de los mismos. Si usted utiliza alguna de la capa de datos de la geobase de datos favor citar el respectivo autor de los geodatos y no el CD.

Achivo	Descripción	Fuente
vulnerabilidad.apr	Proyecto en Arcview	IRET
Aeropuertos		
aeródromos.pdf	Aerodromos de fumigación Zona Atlántica	Aviación Civil
aeropuertos_atlas2004.dbf	Ubicación aeropuertos	ITCR, 2004
Area de estudio		
area_estudio.shp	Límites del área correspondiente a la geobase de datos.	
hojas_1_50k.shp	Hojas topográficas 1:50.000 Nombre, número y edición.	IGN
cantones.shp	División Política Administrativa	ITCR, 2004
carreteras.shp	Carreteras	REPOSA
centros_poblacion_reposa.shp	Nombre y número de los centros de población.	REPOSA
cuidades.shp	Cuidades grandes en la zona	ITCR, 2004
distritos.shp	División Política Administrativa	ITCR, 2004
poblados_atlas2004.shp	Poblados	ITCR, 2004
vías_1_50k.shp	Categoría y longitud. Carreteras escala 1:50.000.	IGN, Cartografía TERRA, 1998. Datos sin verificación de campo.
zonas_vida_zs.shp	Identificación de zonas de vida, área y perímetro. Zonas de Vida de Holdridge.	Mapa de Zonas de Vida de Holdridge, 1:200.000.
Hidrogeología		
acuiferos.shp	Ubicación acuíferos	
elevacion.shp	Modelo de elevación digital	
geologia_atlas2004.shp	Geología, mapa de geológico de Costa Rica	REPOSA
Imágenes		
B453_ju2001.sid	Imagen de satélite Landsat TM de 2001	LANDSAT 7, 06-2001
T357_24bits.sid	Imagen de satélite Landsat TM	LANDSAT 7, 1997
Modelo_lixiviacion		
potencial_alta_lixiviacion.shp	Modelo de simulación, riesgo alto de lixiviación, aplicado para bromacil	IRET
potencial_lixiviacion-area.shp	Modelo de simulación, potencial de lixiviación, aplica- do para bromacil	IRET

Muestreo -giras		
giras-completa.shp	Ubicación de pozos visitados como parte del trabajo de campo, puntos de GPS	IRET
sitios_muestreo.shp	Sitios de muestreo	IRET
analisis-resumen.shp	Resumen con los resultados por sitio de muestreo	IRET
muestreo fotos-archivo.xls	resumen con las fotos de los sitios de muestreo con enlace a las fotos en JPG	IRET
Si-tios_muestreo_agua_subterranea.xls	descripción de los sitios de muestreo, ubicación, tipo, profundidad	IRET
Pozos-acueductos-AyA		
Pozos AyA-perfiles.xls	lista de los perfiles con enlace a los perfiles en JPG	IRET
acueductos_atlas2004.shp	ubicación de los acueductos rurales en el area del estudio	ITCR, 2004
pozos aya.shp	pozos del AyA, numero, ubicación	AyA y IRET
Pozos-Senara		
Pozos ZA Senara2002-perfiles.xls	Resumen perfiles de los pozos con enlace a los perfiles en JPG	
perfiles-achivo.xls	Resumen perfiles de los pozos con enlace a los perfiles en JPG	
pozo za senara2002-info.shp	Número, ubicación, profundidad, nivel freático, nivel estático, caudal y uso.	SENARA
pozos vulnerables_alta lixiviacion.shp	Pozos, vulnerabilidad	IRET
Pozos ZA Senara2002-vulnerabilidad.xls	Listado de los pozos, número, ubicación, profundidad, nivel freático, nivel estático, caudal y uso, y su calculo de vulnerabilidad.	IRET
pozos za senera2002-vulnerabilidad.shp	Número, ubicación, profundidad, nivel freático, nivel estático, caudal y uso, vulnerabilidad.	IRET
Suelos		
clases_capuso_tahal.shp	clase capacidad de uso de suelos área y perímetro	MAG
drenaje_reposa.shp	Tipo de drenaje	REPOSA
drenaje_tahal.shp	Tipo de drenaje	MAG
inundabilidad_reposa.shp	Inundabilidad	REPOSA
inundacion_tahal.shp	Inundacion	MAG
profundidad_tahal.shp	Profundidad del suelo	MAG
ptos_suelo_reposa.shp	Ubicación, pendiente, drenaje, nivel freático, pedregosidad, uso, limo, arcilla, arena, materia orgánica, Ph, P, Ca, Mg, K, Na, Al, bases saturadas, Zn, Mn, Cu, Fe, B,S, oxalato de Al, oxalato de Fe, profundidad, color, textura y manchas	REPOSA
suelo_reposa.shp	Tipo de suelo, textura, drenaje, formación.	REPOSA
suelos_acon_za.shp	Ubicación, clasificación según gran grupo, clase, familia y tipo. Profundidad, drenaje, fertilidad, área y perímetro. Asociaciones de subgrupos de suelos de Costa Rica. Escala 1:200.000.	Acon y Asociados, 1991.
suelos_tahal.shp	Taxonomía, erosión, topografía, profundidad, textura, pedregosidad, fertilidad, drenaje, inundabilidad y capacidad de uso.	MAG
text_subsup_tahal.shp	Textura	MAG
text_superf_tahal.shp	Textura	MAG
textura_reposa.shp	Textura	REPOSA
unidad_capuso_tahal.shp	Capacidad de uso	MAG
Censo agropecuario		

censo_ganadero.shp	Datos del censo ganadero, ubicación de fincas, tipo y tamaño de hatos, rasas	MAG
Clima_hidro		
est_ppt_reposa.sh	Datos de precipitación total por estación.	REPOSA
Cuencas_rios		
cuencas.shp	Nombre y número de cuencas involucradas, su área y perímetro	TELESIG
rios200_atlas2004.shp	Ríos del área y su longitud	Atlas 2004, ITCR
rios-reposa.shp	Ríos del área y su longitud	REPOSA
rios_1_50k.shp	Ríos y otros cuerpos de agua superficiales, escala 1:50.000	Atlas 2004, ITCR
Hojas topograficas		
marcos_50k.shp	ubicación de los mapas de 1:50000	
agua_fria_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
bonilla_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
chirripo_atlantico_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
colorado_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
guacimo_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
guapiles_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
matina_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
moin_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
parismina_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
rio_cuarto_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
riobanano_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
riosucio_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
tortuguero_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
trinidad_georef_ln.tif	mapa georeferenciada 1:50000	IGN
Uso-cobertura		
uso_cob_84_reposa.shp	Uso-cobertura del suelo para el año 1984 Clasificación, área y perímetro	REPOSA
uso_cob_85.shp	Uso-cobertura del suelo para el año 1985 Clasificación, área y perímetro	MINAE
uso_cob_92.shp	Uso-cobertura del suelo para el año 1992 Clasificación, área y perímetro	IMN-MAG-MINAE
uso_cob_97.shp	Uso-cobertura del suelo para el año 1997 Clasificación, área y perímetro.	IMN-MAG-MINAE
uso_92_atlas-2004.shp	Uso-cobertura del suelo para el año 1992	Atlas 2004, ITCR
banano_reposa_92.shp	Áreas de banano en 1992	REPOSA
banano_zona_atlantica_97.shp	Áreas de banano en 1997	MINAE y REPOSA
banano_reposa_inunda.shp	Áreas de banano y áreas de inundación	REPOSA

Anexo II: Resumen de los métodos para los análisis de plaguicidas

Determinación de residuos de plaguicidas semi volatiles mediante extracción líquida/líquida en muestras de agua

Grupo Plaguicidas barrido: insecticidas, fungicidas, herbicidas

Extracción

La muestra de agua se extrae con tres porciones de diclorometano, se concentra y se cambia a una mezcla de acetona/ciclohexano. El volumen final del extracto es de 1 mL.

Análisis cromatográfico

La determinación de los plaguicidas se realiza mediante cromatografía de gases (GC) con columnas capilares de diferentes polaridades y usando cuatro tipos de detectores: el detector de captura de electrones (ECD), el detector nitrógeno-fósforo (NPD), el detector de fotómetro de llama (FPD) y el detector de masas (MS). Para la identificación y cuantificación de los plaguicidas se inyecta patrones de los diferentes plaguicidas.

Método de referencia

USEPA, Methods for the determination of organic compounds in drinking water, Method # 507 y Method # 508, EPA-600/4-88/039, Cincinnati, July 1991

USEPA, Standardized methods for pesticides analyses of solid materials, SW-846, revision 1, November 1992, Method 3510A, Method 8081, Method 8141A.

Sustancia	Acción biocida	Método	Limite de cuantificación en agua (en µg/L)
Organoclorados			
endosulfán-a	insecticida	GC-ECD	<0,01
endosulfán-b	insecticida	GC-ECD	<0,01
lindano	insecticida	GC-ECD	<0,02
Organofosforados			
clorpirifós	insecticida	GC-FPD/ECD	<0,02
diazinón	insecticida	GC-FPD	<0,05
dimetoato	insecticida	GC-FPD	<0,05
edifenfos	insecticida	GC-FPD	<0,05
etoprofos	insecticida/nematicida	GC-FPD	<0,05
fenamifos	insecticida/nematicida	GC-FPD	<0,2
malatión	insecticida	GC-FPD	<0,05
paration-etil	insecticida	GC-FPD/ECD	<0,03
paration-metil	insecticida	GC-FPD/ECD	<0,03
terbufós	insecticida/nematicida	GC-FPD	<0,05
Piretroides			
bifentrina	insecticida	GC-ECD	<0,05
cihalotrina	insecticida	GC-ECD	<0,05
cipermetrina	insecticida	GC-ECD	<0,1
deltametrina	insecticida	GC-ECD	<0,1
permetrina	insecticida	GC-ECD	<0,2
Conazoles			
ciproconazol	fungicida	GC-ECD	<0,2
difeconazol	fungicida	GC-ECD	<0,2
propiconazol	fungicida	GC-ECD	<0,06
Otros			
bromacil	herbicida	GC-ECD	<0,05
carbofuran *)	insecticida	GC-NPD	<0,05
clorotalonil	fungicida	GC-ECD	<0,04
oxadiazon*)			<0,04
pendimetalin*)	herbicida	GC-ECD	<0,04
propanil	herbicida	GC-ECD	<0,1
vinclozolin*)			<0,2

*) no incluido en todas las muestras

Determinación de residuos de plaguicidas con extracción con fase sólida en muestras de agua

Grupo Herbicidas: bromacil, diuron, ametrina, atrazina, terbutilazina; Insecticida: carbaril

Extracción

Los plaguicidas presentes en la muestra de agua, se extraen haciendo uso de cartuchos de extracción de fase sólida (Isolute SPE ENV +) y se eluyen con metanol.

Análisis cromatográfico

El solvente se concentra y se analiza mediante cromatografía líquida LC con PDA como detector, con las condiciones cromatográficas establecidas. Para la identificación y cuantificación de los plaguicidas se inyecta patrones de los diferentes plaguicidas.

Método de referencia

UNE-EN ISO 11369, junio 1998. Determinación de ciertos agentes para el tratamiento de las plantas. Método por cromatografía líquida de alta resolución con detección UV tras extracción sólido-líquido.

Sustancia	Acción biocida	Método	Limite de cuantificación en agua (en µg/L)
Triazinas			
ametrina	herbicida	HPLC-PDA	<0,2
atrazina	herbicida	HPLC-PDA	<0,1
hexazinona	herbicida	HPLC-PDA	<0,2
terbutilazina	herbicida	HPLC-PDA	<0,1
Otros			
bromacil	herbicida	HPLC-PDA	<0,1
carbaril	insecticida	HPLC-PDA	<0,1
diuron	herbicida	HPLC-PDA	<0,2

Determinación de residuos de plaguicidas fenoxi-ácidos en muestras de agua

Grupo Herbicidas fenoxiacidos: 2,4-D, MCPP, MCPA, dicamba, bentazona

Extracción

Los fenoxiácidos y otros herbicidas se extraen del agua a un pH 2, con acetato de etilo, determinándose mediante cromatografía líquida HPLC, en fase reversa, con una columna C18 y un detector arreglo de diodos (PDA).

Análisis cromatográfico

Los fenoxiácidos y otros herbicidas se extraen del agua a un pH 2, con acetato de etilo, determinándose mediante cromatografía líquida HPLC, en fase reversa, con una columna C18 y un detector arreglo de diodos (PDA).

Método de referencia

Schuster, R.; Gratzfelt-Husgen, A..Analysis of Phenoxy-acid Herbicides and Bentazone by HPLC with Diode-array Detection. Hewlett- Packard, Germany, 1990.

Sustancia	Acción biocida	Método	Limite de cuantificación en agua (en µg/L)
Herbicidas fenoxi-acidos y otros			
dicamba	herbicida	HPLC-PDA	<1
2,4-D	herbicida	HPLC-PDA	<1,5
diclorprop	herbicida	HPLC-PDA	<1
quinclorac	herbicida	HPLC-PDA	<0,4
bentazona	herbicida	HPLC-PDA	<0,4

Determinación de DBCP en muestras de agua

Grupo Diclorobromopropano (DBCP)

Extracción y análisis cromatográfico

50 mL de la muestra es extraída con hexano, la fase orgánica es analizada mediante cromatografía de gases y el detector de captura de electrones (ECD). Para la identificación y cuantificación se inyecta un patrón con diferentes concentraciones de DBCP.

Método de referencia

United States Environmental Protection Agency. *Method 8011.1,2 Dibromoethane and 1,2-Dibromo-3-Chloropropane By Microextraction and Gas Chromatography. Revision 0, July 1992. pags 01-13.*