

Metodología de análisis del riesgo por contaminación de agroquímicos: cuenca del Río San Blas, Costa Rica

Risk analysis methodology for agrochemical contamination: San Blas River Basin, Costa Rica

Ricardo Morales Vargas

Chemical Engineer, Environmental Health Protection Directorate, Ministry of Health, Costa Rica

ricardomoralescr@yahoo.com

Recibido: 04 abril 2013 Aceptado: 08 mayo 2013

RESUMEN

Objetivo: Establecer parámetros edafológicos e hidrogeológicos de la cuenca; y físico-químicos de fertilizantes y plaguicidas, que pudieran servir para el análisis del riesgo de su infiltración.

Materiales y Métodos: Se realizó una investigación exploratoria de campo y gabinete para caracterizar hidrogeológicamente la cuenca. Se analizaron las concentraciones de plaguicidas y nitratos en aguas subterráneas y superficiales. Se consideraron algunas características de vulnerabilidad intrínsecas del acuífero, y otras relacionadas con la retención de contaminantes en suelos. Se determinó el coeficiente de distribución suelo/agua y el factor de retardo para seis sustancias de alto uso y se estimó su riesgo relativo hacia aguas subterráneas. El coeficiente de correlación de Pearson permitió estudiar distintos parámetros de los suelos y su relación con la concentración de nitratos en aguas subterráneas.

Resultados: Las aguas subterráneas en zonas agrícolas muestran concentraciones de nitratos de dos a tres veces las concentraciones halladas en aguas para consumo humano. Se detectó glifosato en canales de irrigación agrícola. Los parámetros químicos del suelo más fuertemente correlacionados con la concentración de nitratos en aguas subterráneas fueron: a) capacidad de intercambio catiónico, b) relación aluminio: sílice, c) % de retención de nitratos y d) pH del suelo en agua destilada. La concentración de nitratos en aguas subterráneas se relacionó directamente con el porcentaje de materiales finos (% arcillas + % limos) en los suelos.

Discusión: Se proponen parámetros para la evaluación del riesgo en acuíferos aluviales en la costa Pacífica de Costa Rica donde predomina el uso agrícola. Se considera que la terbutilazina, ametrina, carbendazim, diuron y nitratos representan amenaza importante al acuífero.

Palabras clave: acuífero, riesgo, vulnerabilidad, plaguicidas, nitratos, Costa Rica (fuente: DeCS, BIREME)

ABSTRACT

Objective: To establish soil and hydrogeological parameters for the basin; as well as fertilizer and pesticide physical and chemical parameters that could be used to analyze their risk of percolation.

Materials and methods: A field and literature survey was conducted to characterize the basin from a hydrogeological standpoint. The concentration of nitrates and pesticides in groundwater and surface water was analyzed. Some of the intrinsic vulnerability characteristics of the aquifer were considered, in particular those related to adsorption and retention of contaminants and those related to chemical characteristics of the soil. The distribution coefficient and retardation value were determined for six agrochemicals of high use in the basin, in order to establish their relative risk to groundwater. The Pearson correlation coefficient was calculated for nitrate concentration in groundwater and the diverse soil parameters considered.

Results: Groundwater in agricultural areas has two to three times the nitrate concentration relative to that of groundwater in wells for human consumption. Glyphosate was found in agricultural irrigation canals. The soil chemical parameters more strongly related to contaminant (nitrates) in groundwater were: a) cation exchange capacity, b) aluminum/silicon ratio, c) % soil nitrate retention, and d) soil pH using distilled water. The sum of fines (% clay + % silt) was found to directly relate to groundwater nitrate concentration.

Discussion: Parameters are proposed for risk analysis in alluvial aquifers in the Pacific coast of Costa Rica, where agricultural use is predominant. Terbutylazine, ametryn, carbendazim, diuron and nitrates represent an important threat to the aquifer.

Keywords: aquifer, risk, vulnerability, pesticides, nitrates, Costa Rica (fuente: MeSH/NLM)

Los agroquímicos, por sus características físico-químicas, se distribuyen en aire, agua, suelo y biota, por lo que las vías de exposición de un organismo a las sustancias pueden ser múltiples, y dependen de la permanencia de las sustancias en el ambiente así como de la forma química que las hace biodisponibles en mayor o menor grado. Algunos estudios han apuntado al riesgo de contaminación por plaguicidas en el acuífero Tempisque, (1, 2), una zona que presenta una presión poblacional importante por el recurso hídrico y que es de importancia para el país, pues drena casi el 10% del territorio, y la mitad del terreno de Guanacaste (1). Este estudio pretende analizar el riesgo de contaminación del acuífero Tempisque por plaguicidas y fertilizantes, utilizando como zona piloto la cuenca del Río San Blas (Figura 1). El proyecto se ubica en una zona del acuífero aluvial Tempisque, región sensible donde se observan bosques, pastos y charrales, pero que también tiene un desarrollo agroindustrial entre cuyos cultivos predomina el melón y la caña de azúcar. La cuenca se encuentra entre las coordenadas CRTM 05 1153967 y 1162500 (Latitud Norte) y 316035 y 327069 (Longitud Este).

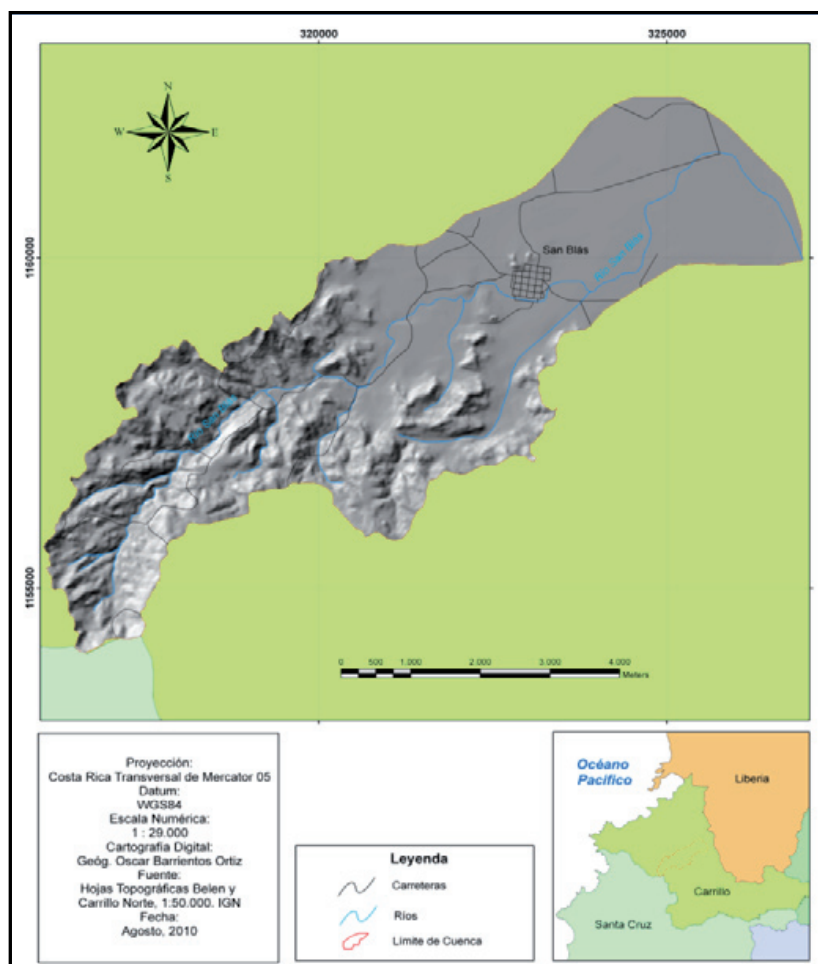
Los plaguicidas son considerados como la forma más costo-efectiva para controlar plagas como insectos y hierbas (3). Sin embargo, su movilidad en el ambiente y su toxicidad los hacen sustancias peligrosas que pueden llegar a contaminar suelos, aire y agua (4). Muchos plaguicidas presentan una alta persistencia en el ambiente dada su estabilidad química, y pueden generar también efectos tóxicos de importancia como mutagenicidad y carcinogenicidad, además de los efectos agudos que generalmente vemos como la mortandad de especies que no eran el blanco intencionado. Con relación a la salud humana es importante considerar que los efectos tóxicos de los plaguicidas pueden ser de índole aguda y crónica, y además pueden afectar a individuos que debido a sus condiciones de pobreza, mala nutrición u otras enfermedades están en riesgo especial. Dentro de los efectos crónicos de los plaguicidas se citan los trastornos neurológicos, efectos reproductivos, cutáneos, cáncer, alteraciones oftalmológicas, neumonitis y fibrosis pulmonar, trastornos del sistema inmunitario, efectos teratogénicos, lesiones

hepáticas y cistitis hemorrágica (5).

Recientemente se ha dado importancia a los efectos en el sistema hormonal en diversas especies, generalmente observables sólo de forma transgeneracional. Un estudio realizado en Costa Rica sobre DDT (6) indicó que aunque se dejó de aplicar para el control de la malaria en los años 80, fue detectado en el 2005 en muestras ambientales y de sangre en niños.

Según indican Rao & Hornsby, (http://manatee.ifas.ufl.edu/lawn_and_garden/master-gardener/gardening-manatee-style/p/pesticide-behavior.pdf), la persistencia de una sustancia química es el tiempo que la sustancia permanece en el ambiente sin sufrir un cambio, y generalmente se expresa como la vida media en días, o período para alcanzar un 50% de la concentración o cantidad original. La persistencia se establece para aire, agua, suelo o sedimento. Ésta se relaciona con varias características físico-químicas de las sustancias, así como del ambiente mismo.

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río San Blas, Carrillo, Guanacaste



Fuente: elaboración propia, con base en Hoja Topográficas Belén y Carrillo Norte, 1:50 000, IGN.

Entre los parámetros relacionados con la sustancia, y que se han estudiado están los relacionados con el grado de adherencia entre la sustancia y el medio; así como aquellos que se relacionan con la degradabilidad de la sustancia. En relación con el medio, los parámetros con influencia más citados en la literatura incluyen: humedad del suelo, contenido de arcilla, contenido de materia orgánica en el suelo, potencial de reducción-oxidación, contenido de hidróxidos, capacidad de intercambio catiónico, pH y temperatura (7). La importancia relativa de estos parámetros del medio y de la sustancia son los que controlan el grado en que las sustancias puedan estar presentes en aguas superficiales y aguas subterráneas.

En un estudio realizado en varios estados de los EEUU por el United States Geological Service (USGS), con el fin de evaluar el riesgo de los plaguicidas en aguas subterráneas y establecer medidas de control para su autorización, se detectaron plaguicidas en 95% de las muestras de aguas superficiales y en 50% de los pozos muestreados. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) reporta que el uso de plaguicidas ha generado la presencia de al menos 46 sustancias distintas en aguas subterráneas y 76 en aguas superficiales (3).

Tanto por su movilidad potencial, su toxicidad, así como por su presencia comprobada en los distintos segmentos del ambiente, se hace necesario recomendar prácticas para su manejo adecuado en la zona de estudio y normar las concentraciones de estas sustancias en el ambiente, a fin de proteger la salud humana y la salud ambiental. Algunos estudios en Costa Rica (6,8) que han intentado caracterizar el riesgo por toxicidad de las sustancias, o bien proponer estrategias para la reducción de su impacto, son un punto de partida para el presente estudio. El documento de Rodríguez-Brenes, (<http://www.ots.ac.cr/bnbt/21649.html>) ya ha abordado la contaminación por plaguicidas en el río Tempisque y la amenaza ha sido también mencionada por ONGs y autores que trabajan en el campo ambiental, (1, 2); sin embargo no existe un programa de monitoreo de estos compuestos en el Acuífero Tempisque.

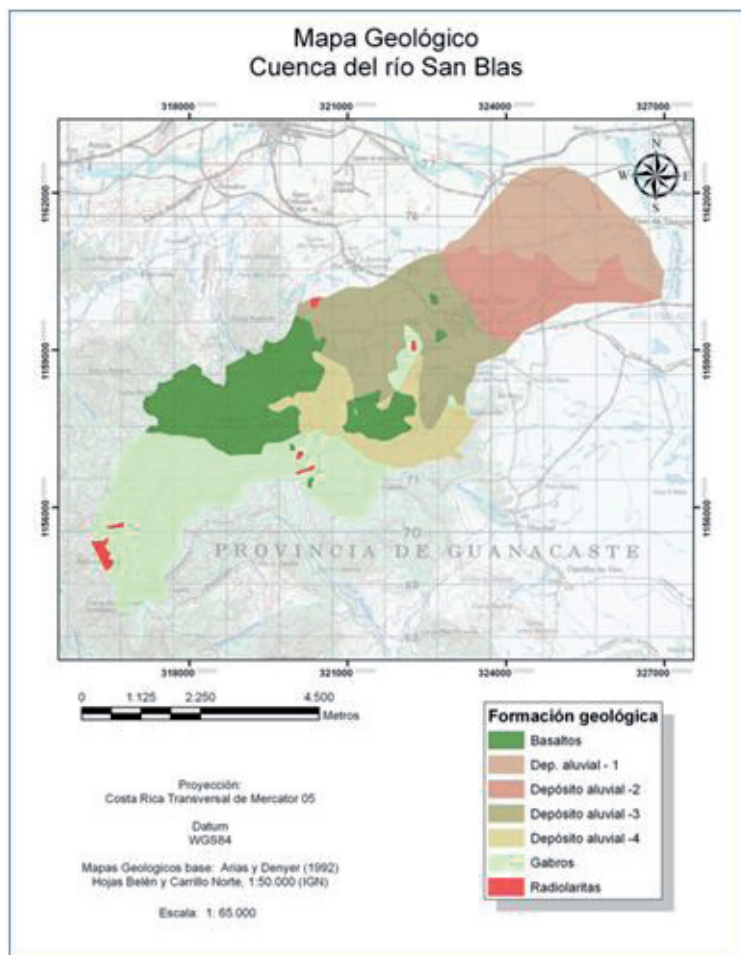
Así, se plantea como objetivo del presente estudio, proponer una metodología para el análisis del riesgo de contaminación para un grupo seleccionado de agroquímicos de alto potencial de infiltración y lixiviación aplicados en la zona de estudio, que considere tanto las características de la zona saturada y la zona no saturada, a fin de recomendar medidas preventivas que disminuyan

el impacto de dichas sustancias sobre el suelo y recurso hídrico, protegiendo la salud y el ambiente.

Geología regional y características de los suelos

A comienzos del Terciario, esta zona estuvo sumergida, constituyendo un vasto golfo, que incluye el actual Golfo de Nicoya, evidenciado en los paleo-arrecifes de Barra Honda, datados del Paleoceno al Eoceno. Al emerger este territorio durante la orogénesis Pliocena que erigió la Cordillera Volcánica de Guanacaste, se transformó en una zona pantanosa, donde el Río Tempisque inició el dibujo del paisaje. (1, 9). En el sector entre Sardinal y el Río Las Palmas (10), donde se ubica la cuenca del río San Blas, se describe el relleno aluvial, subyacente por basaltos intrusivos y radiolaritas del Complejo de Nicoya. En el mapa geológico (Figura 2) de la zona de estudio se observan básicamente dos zonas: la parte alta de la cuenca del río San Blas formada por basaltos y gabros del complejo de Nicoya; y la parte baja por depósitos aluviales, los que para fines del presente estudio se clasificaron según el tipo de suelo.

Figura 2. Mapa geológico cuenca del río San Blas



Nota: Dep. aluvial 1 = Vertisoles; Dep. aluvial 2 = Molisoles; Dep. aluvial 3 = Inceptisoles; Dep. aluvial 4 = Alfisoles

Fuente: elaboración propia

En la cuenca del Tempisque se encuentran principalmente cinco tipos de suelos u órdenes taxonómicas; y estos comprenden alrededor de 20 subgrupos (1). En la figura 3, de la cuenca del río San Blas se observan estos órdenes, a excepción de los entisoles. A continuación se hace una breve descripción de éstos:

Alfisoles: Son suelos húmedos de relieve plano u ondulado, profundos y se encuentran en materiales de origen volcánico recientes (rocas básicas). Se localizan en las cercanías de Santa Cruz en la margen derecha del Tempisque, y al sur y norte de Cañas en la margen izquierda (1). En la zona de estudio, se observan en la parte alta de la cuenca solamente y corresponden al 52,5 % de su área.

Entisoles: Están distribuidos por toda la cuenca del Tempisque y es el segundo orden geográficamente más diseminado. Son de origen mineral, poco desarrollados y poco profundos. Se encuentran típicamente en zonas escarpadas. Son comunes en grandes extensiones dadas las condiciones de erosión eólica, el sobreuso ganadero y el tipo de material originario, tobas (1). Estos no se observan en la cuenca del Río San Blas.

Inceptisoles: Son los de mayor cobertura en la cuenca del Tempisque. Tienen un perfil más avanzado que los entisoles, pero menos que los otros órdenes en la cuenca. Son suelos profundos de texturas variadas y se localizan cerca de Bagaces, Cañas, Liberia y Nicoya, así como en las márgenes de los ríos (1), encontrándose en la parte media de la cuenca del río San Blas, correspondiendo al 19,9 % de su área.

Mollisoles: Los mollisoles son muy fértiles, dada su composición natural alta en nitrógeno y otros nutrientes. Son profundos, oscuros y de estructura granular. Se encuentran alrededor de Filadelfia, en la margen derecha del Tempisque, al norte del Parque Nacional Palo Verde, y al sur de Cañas en la margen izquierda del Tempisque. En la zona de estudio se encuentran en la parte baja de la cuenca del río San Blas y representan un 11,3 % de la cuenca.

Vertisoles: Son los llamados “sonsocuites”, y tienen un mayor grado de arcilla en la zona. Por ende se pueden expandir y comprimir; y en época de lluvias tienden a agrietarse, y permanecer secos durante casi 90 días, dadas las características climatológicas. Se encuentran en los cauces aluviales en las partes bajas del río Tempisque y Río Bebedero, (1) así como en la parte baja de la cuenca del río San Blas. Conforman un 16,3 % de la cuenca del San Blas.

MATERIALES Y MÉTODO

Se realizó inicialmente, con base en estudios previos, una caracterización hidrogeológica de la zona no saturada y de la zona saturada, así como del uso del suelo, cultivos y plaguicidas utilizados mediante consulta a bases de datos del Servicio Nacional de Riesgo y Avenamiento (SENARA), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), y entrevistas a funcionarios del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

Se localizaron fuentes secundarias para identificar los principales plaguicidas de uso agrícola en Costa Rica para los cultivos de la zona del Tempisque, como una primera manera de circunscribir el ámbito de estudio. Se utilizó la base de datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería sobre sustancias agrícolas autorizadas en Costa Rica para conocer los usos y cultivos aprobados para cada plaguicida.

A través de entrevistas estructuradas a productores agrícolas se consultó sobre las prácticas agrícolas en la zona (épocas de aplicación, plaguicidas y cantidades aplicadas).

Para la selección de las sustancias de interés se utilizó la Puntuación de Ubicuidad en Aguas Subterráneas (GUS) y el Índice de Potencial de Lixiviación (IPL) y se seleccionaron seis plaguicidas de interés con valores GUS e IPL que representan el mayor riesgo, buscando incluir distintas familias químicas. Estos índices se calcularon a partir de bases en datos o correlaciones publicadas sobre las propiedades físico-químicas (11). Se realizó un muestreo y análisis químico para seleccionar sitios donde estas sustancias (plaguicidas) sean detectables en aguas. Se realizaron los siguientes ensayos para 5 pozos aguas abajo de las zonas de aplicación y en aguas superficiales:

1. Análisis de residuos de plaguicidas por extracción líquido/líquido y determinación por cromatografía de gases.
2. Análisis de plaguicidas ácidos y neutros en agua por extracción en fase sólida y determinación por cromatografía líquida de alta resolución.
3. Análisis de residuos de carbamatos en agua por extracción líquido/líquido y determinación por cromatografía líquida de alta resolución.
4. Análisis de residuos de paraquat, glifosato, etoprofos y carbendazin.

Se practicaron análisis químicos de iones mayores en aguas subterráneas y superficiales para clasificar éstas con base en el esquema de Piper, utilizando el software GW Chart Versión 1.25.2.0 (http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/GW_Chart/GW_Chart.html).

En muestras de suelos se determinó la estructura, densidad de matriz, fracción de carbono orgánico, relación carbono/nitrógeno, % arcilla, capacidad de campo y punto de marchitez. A partir de información sobre pozos perforados y las muestras de suelo se determinaron perfiles geológicos en la zona, datos que se utilizaron para realizar el Balance Hídrico de Suelos según la metodología de Schosinsky (12).

En muestras de suelo extraídas de los mismos sitios, y para conocer el riesgo que presentan los nitratos en suelos de infiltrarse a las aguas subterráneas, se analizaron: (http://books.google.co.cr/books/about/Nitrate_Attenuation_Beneath_Two_Coffee_P.html?id=j0T5cQAACA&redir_esc=y):

1. Nitratos extraíbles en agua y en cloruro de potasio (KCl) a fin de conocer el nitrato adsorbido por el suelo.
2. pH de suelos en soluciones de fluoruro de sodio (NaF), KCl, H₂O y cloruro de calcio (CaCl₂) a fin de dilucidar la presencia de fases minerales con capacidad de adsorber nitrato.
3. Aluminio y sílice extraíble con oxalato de amonio para determinar la razón alofano/halloysita.

Mediante pruebas de laboratorio y con base en la norma del American Society for Testing and Materials, ASTM-D4646-03 (<http://www.astm.org/Standards/D4646.htm>), se determinó el coeficiente de distribución (Kd) y se calculó el factor de retardo (R) para cada uno de seis plaguicidas, como indicadores del grado de riesgo de contaminación a las aguas subterráneas.

A partir de la información en la literatura científica, los parámetros que a través del presente estudio se consideraron viables y con mayor capacidad predictiva

sobre las concentraciones en agua y suelos, se presenta un modelo conceptual para análisis del riesgo con base hidrogeológica y toxicológica.

RESULTADOS

Selección de las sustancias agroquímicas de interés.

A continuación se enumeran los plaguicidas de interés inicial y los cultivos en la zona para los que su uso está aprobado oficialmente según bases de datos del MAG, y para los que de manera preliminar se analizó su potencial de lixiviación: Diazinon (arroz, caña de azúcar, melón); Mancozeb (arroz, melón); Clorotalonil (arroz, melón); Terbutilazina (otros cultivos); Etoprofos (caña de azúcar, melón); Carboendazim (arroz, melón); Diuron (caña de azúcar); Carbofuran (arroz, caña de azúcar, melón); Cipermetrina (arroz); Fenamifos (caña de azúcar, melón); Terbufos (arroz); Metamidofos (melón). Asimismo, se logró conocer, con base a entrevistas a empleados de una empresa melonera, con cultivos ubicados en Sardinal y San Blas, los plaguicidas de mayor uso y las cantidades aplicadas (Tabla 1).

La empresa melonera también se dedica al cultivo de la caña de azúcar. No obstante, los datos para plaguicidas utilizados en la caña de azúcar fueron suministrados por otra empresa ubicada fuera de la cuenca del San Blas, pero dentro de la cuenca del Tempisque, en una zona cercana, pues la empresa que se dedicaba a ambos cultivos no contaba con registros fiables de consumo de plaguicidas. Se observa que, la mayor cantidad de ingredientes activos corresponden con herbicidas de distintas familias químicas.

Tabla 1. Plaguicidas utilizados en la cuenca del río San Blas

Plaguicida	Ingrediente	Tipo de plaguicida	Cantidad aplicada	Cultivo
Dithane 80 WP	Mancozeb	Carbamato (F)	1-2 kg/ha	Melón
Pounce	Permetrina	Piretroide (I)	250 cc/ha	Melón
Dibron	Triclorfon	Organofosforado (I)	200-300 cc/ha	Melón
Round-Up	Glifosato	Aminofosfato (H)	2-3 L/ha	Melón y caña
Terbutrina	Terbutrina	Triazina (H)	3 L/ha	Melón y caña
2,4-D	2,4-D (ácido fenoxiacético)	Hormonal (H)	1-2 L/ha	Melón y caña
Ametrina	Ametrina	Triazina (H)	2 kg/ha	Caña
Prowl 45,5 CS	Pendimetalina	Dinitroanilina (H)	3 L/ha	Caña
Diuron	Diuron	Fenilurea (H)	2-2,5 kg/ha	Caña
Hexazinona	Hexazinona	Triazina (H)	0,6-0,8 kg/ha 3 L/ha	Caña

Fuente: Exporpack, 2010 (entrevista) e Ingenio el Viejo (entrevista)

Nota: F= fungicida I= insecticida H= herbicida

Considerando el riesgo de infiltración, las cantidades aplicadas, así como su disponibilidad en el mercado, se midió experimentalmente el Kd (coeficiente de distribución en suelos), con base en el Método ASTM D 4646-03, utilizando una muestra de suelos de la cuenca del río San Blas tomada en la zona de captación de un pozo para consumo humano,

a distintas concentraciones iniciales (0,1 mg/L, 0,5 mg/L y 2 mg/L) en agua destilada de los siguientes ingredientes activos (Tabla 2): Carbendazim (benzimidazol, Diuron (fenilurea), Terbutilazina (triazina), Mancozeb (carbamato), Ametrina (triazina), 2,4-D (fenoxiacético).

Tabla 2. Coeficiente de distribución (Kd), según concentración inicial ingrediente activo. (Método ASTM D 4646 – 03)

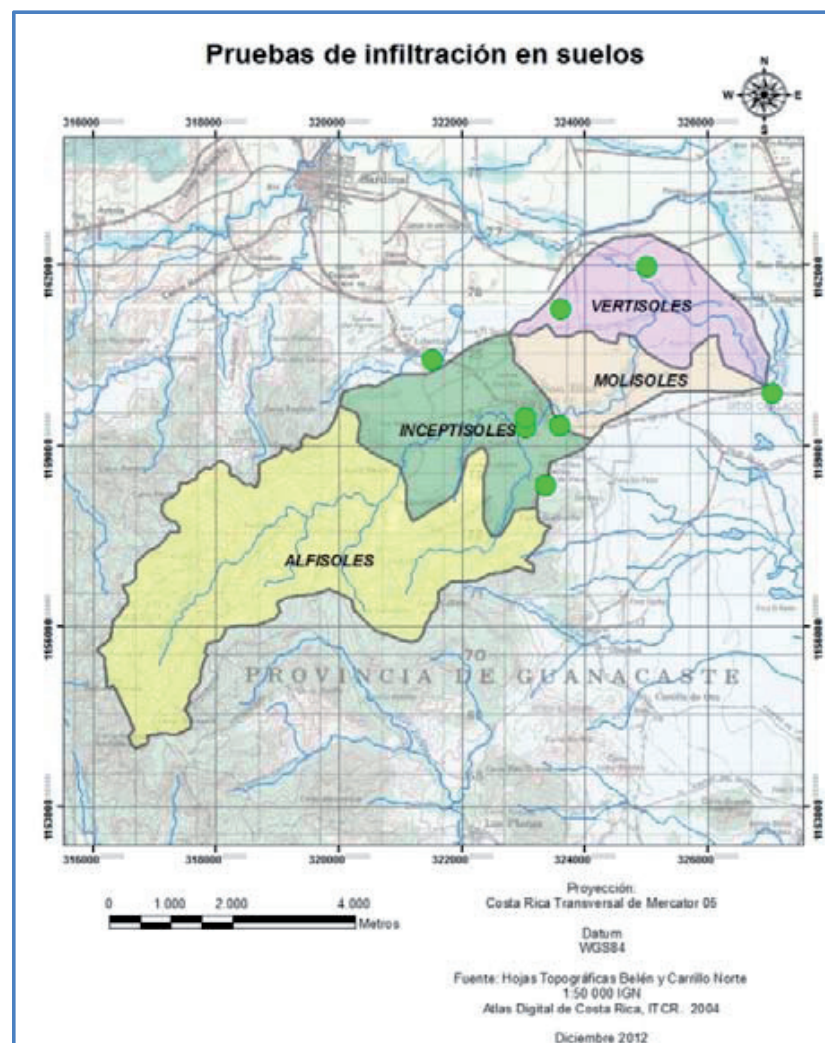
Plaguicida	Tipo de plaguicida	Kd, según concentración inicial (mg/L)		
		0,1 mg/L	0,5 mg/L	2 mg/L
Terbutilazina	Triazina (H)	1,63	0,57	0,12
Mancozeb	Carbamato (F)	2,12	1,33	0,34
Diuron	Fenilurea (H)	4,05	0,85	0,26
Carbendazim	Benzimidazol (F)	4,67	0,41	0,10
Ametrina	Triazina (H)	7,31	2,67	0,18
2,4-D	Fenoxiacético (H)	11,15	2,34	1,38

Fuente: elaboración propia, con base en análisis químicos del Laboratorio Lambda, Método ASTM D-4646-03.

Nota: F= fungicida I= insecticida H= herbicida

Se observó a partir de los análisis de iones mayores en aguas subterráneas, que las concentraciones de nitratos en las zonas de cultivos son aproximadamente de dos a tres veces las concentraciones detectadas en los pozos para consumo humano. Las aguas subterráneas y superficiales se clasificaron con base en el esquema de Piper, utilizando el software GW-CHART del United States Geological Survey. Las aguas subterráneas corresponden a aguas alcalino-térreas de carácter normal con prevalencia de bicarbonatos. En cuanto a cationes divalentes, éstas tienen la misma proporción de calcio que de magnesio por peso; y entre los cationes monovalentes, predomina el sodio. Las aguas superficiales son muy similares a las subterráneas, indicativo de la estrecha relación entre el río San Blas y el acuífero, pero al mostrar una mayor dispersión en cuanto a cationes, corresponden a aguas alcalino-térreas con álcalis aumentados. Estos valores son típicos de acuíferos someros en contacto parcial con rocas carbonatadas. No se detectaron plaguicidas en aguas subterráneas. El glifosato se detectó en dos muestras de agua en canales en fincas de una empresa agrícola, en concentraciones entre 2-3 mg/L. Este herbicida es usado en un amplio rango de actividades, para controlar zacates y hierbas de hoja ancha. Para éste se estimó un Kd de 35, con base en un % de carbono

orgánico de 2,5%, promedio de la cuenca. A pesar del alto valor de Kd, indicativo de una buena capacidad de adsorción en suelo, el hecho que permanezca disuelto en agua, y detectable a niveles altos, es un dato controversial, y apunta a su alta solubilidad, la posible adsorción/desorción o a un uso no adecuado del producto.

Figura 3. Ubicación de pruebas en suelos y aguas subterráneas

Fuente: elaboración propia.

Caracterización físico-química de los suelos y su relación con la contaminación

La textura de estos suelos es arcillosa o franco arcillosa en general. A partir de las características de dichos suelos y con base en la literatura y análisis de mapas de cobertura y uso del suelo, se seleccionaron 8 puntos (Figura 3) para realizar pruebas de doble anillo para determinar coeficientes de infiltración, datos para humedad, capacidad de campo, punto de marchitez y densidad de suelos. Dichos parámetros fueron determinados experimentalmente y se realizó un Balance Hídrico de Suelos. Los mismos sitios fueron utilizados para los análisis químicos de suelos y determinar parámetros relacionados con la capacidad de retención de contaminantes, que se describen en la siguiente sección y se resumen en la tabla 3.

En los sitios utilizados para las pruebas físico-químicas en suelos también se tomaron muestras de aguas

subterráneas en pozos profundos. Con base en dichas pruebas, cuyos resultados se presentan en la presente sección, se analizó la correlación de los distintos parámetros con la concentración de nitratos en aguas subterráneas, como indicativo del riesgo general de infiltración de agroquímicos.

Para la caracterización química de suelos se consideraron parámetros que se relacionan con las moléculas con carga eléctrica positiva, así como las cargadas negativamente. Estos deben incluir el riesgo de infiltración de plaguicidas y abonos, principalmente los nitrogenados. La capacidad de intercambio catiónico se relaciona con el riesgo de infiltración de las moléculas cargadas positivamente, como la mayor parte de los plaguicidas orgánicos; y los relacionados con la infiltración de nitratos, como la relación Al/Si y el pH en diversos medios, se relacionarían con aquellas moléculas cargadas negativamente, los que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Descripción hidrogeológica y edafológica de la cuenca del río San Blas

Parámetro	Valor o rango
ACUIFERO	
Transmisividad del acuífero (m ² /día)	4,1-1 800
Porosidad del acuífero (%)	3-20
Conductividad hidráulica (m/d)	14,5-16,5
Gradiente hidráulico (m/m)	4 x 10 ⁻³
Distancia al nivel de agua (m)	3-5
SUELOS	
Capacidad de infiltración (mm)	423-1165
Densidad de suelos (g/cm ³)	1,00-1,37
Densidad de partículas (g/cm ³)	2,33-2,53
Factor de pendiente (Kp)	0,1-0,2
Factor por vegetación (Kv)	0,15
Profundidad de raíces (mm)	1 500-2 000
Capacidad de campo (%)	24-36
Punto de marchitez (%)	19-24
Precipitación (mm)	1 807
Infiltración (mm)	1 582
Evapotranspiración real (mm)	855-974
Recarga potencial (mm)	607-726
Necesidad de riego (mm)	1 072-1 655
% de arena	18-30
% de limo	21-39
% de arcilla	30-55
% de carbono	0,9-4,0
% de nitrógeno	0,1-0,4
Relación carbono/nitrógeno	8,6-13,2
% de saturación de bases	49-77
Capacidad de intercambio catiónico (cmol/kg)	42-88
pH de suelos en agua destilada	6,90-7,59
pH de suelos en CaCl ₂	5,56-6,83
pH de suelos en NaF	9,38-9,67
pH de suelo en KCl	4,78-6,92
Relación Aluminio: Sílice	1,33-26,74
% de retención de nitratos	32-68

Fuente: Muestreo propio, Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) y Laboratorio Lambda

DISCUSIÓN

Foster et al indican que se considera válido agregar, a métodos de evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, similares al GOD, un "factor de suelo" (14), que debe considerar el espesor del suelo, junto con las propiedades que influyen directamente en la desnitrificación *in-situ* y en la atenuación de plaguicidas (textura y contenido de materia orgánica del suelo). Este enfoque se aplicó en el Valle del Cauca (Colombia), con base en una metodología propuesta por el Departamento de

Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad de Chile.

La literatura científica sobre la cuenca del Río Tempisque, así como los datos de pozos en bases de datos institucionales permitió una adecuada caracterización desde el punto de vista hidrogeológico de la Cuenca del Río San Blas. Se logró caracterizar las aguas subterráneas y obtener un balance hídrico según el método de Schosinsky (12). Con base en datos reportados de perforaciones para el acuífero aluvial y las muestras de suelos se alcanzó una satisfactoria descripción litológica.

Esta es una zona que se caracteriza por tener suelos con una alta proporción de arcilla (30-55%), y un contenido de carbono orgánico entre 1-4%, que facilitan, en términos generales, la retención de contaminantes *orgánicos* y mitigar su impacto hacia aguas subterráneas, aunque el nivel estático de los pozos ronda los 3-5 metros, aproximadamente. Los suelos tienen una capacidad mediana de intercambio catiónico (CIC), entre 42-88 cmol/kg.

La relación carbono nitrógeno es mayor a 1,0 en el rango bajo, (C:N =8,6-13,2), lo que es indicativo de procesos de utilización microbiana y fijación del nitrógeno en los suelos, con poca infiltración de sustancias nitrogenadas. El pH en NaF es muy cercano a 9,4 y se concluye, al igual que hace Graham, que hay una ligera presencia de alofanos; la diferencia (δ pH), entre el pH en KCl y el pH en agua, indica que los suelos tienen una carga ligeramente negativa o sea que la capacidad de intercambio catiónico es mayor que la capacidad de intercambio de aniones, y existe riesgo de contaminación por nitratos, sulfatos y cloruros.

La relación Al/Si, es muy baja (Al:Si 1,1-1,3) en las zonas de agricultura intensiva (cerca del río Las Palmas, y cercanas al Canal 11-2 usado para riego agrícola y la zona de La Libertad), intermedia (Al:Si 20-26) en zonas de uso urbano, y más alta (Al: Si 138) en zonas de agricultura no-intensiva. Se ha demostrado que una relación Al:Si cercana a 1 es indicativa de materiales más ricos en halloysita y alofana rica en sílice, según cita Graham en su tesis. Estos no tienen una alta capacidad de intercambio aniónico, como es característico en los suelos con alofano rico en aluminio. Por ende, estas zonas con bajos valores de Al:Si no tendrían una alta capacidad de adsorción de nitratos, y según estudios previos se relacionan con suelos

originados en la meteorización de cenizas volcánicas. En este sentido, las zonas donde se ubican los pozos de abastecimiento público de la ASADA San Blas, con valores de Al:Si en suelos entre 20-26, brindan un grado de protección intermedio; y bajo esta zona, en las aguas subterráneas, no se detectaron valores de nitratos de importancia, a diferencia de pozos ubicados en zonas agrícolas.

Los análisis de suelos para extracción de nitratos en agua y KCl indican un % de retención de nitratos muy variable, entre 32% y 68%, y no se consideran concluyentes, si bien en otros estudios se han correlacionado de mejor manera con las condiciones de desnitrificación (http://books.google.co.cr/books/about/Nitrate_Attenuation_Beneath_Two_Coffee_P.html?id=j0T5cQAACAAJ&redir_esc=y).

A fin de seleccionar las variables más prometedoras relacionadas con la vulnerabilidad de los suelos y que facilitan la infiltración de sustancias agrícolas, se estableció la correlación estadística entre concentración de nitratos en aguas subterráneas y cada uno de los parámetros químicos, físicos y biológicos de los suelos estudiados. Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson, ($n=7$) utilizando fórmulas estadísticas del Excel de Microsoft Office. Se seleccionaron para futura verificación aquellas variables que mostraran una correlación positiva entre 0,5 y 1,0, o una correlación negativa entre -0,5 y -1,0. Debe recordarse que diversas fuentes (13, 14) han indicado que los nitratos pueden utilizarse como indicador de la contaminación por sustancias agroquímicas, en general.

Entre los parámetros *físicos* de los suelos, se observó una correlación de 0,7 entre los nitratos en aguas y la suma (% arcillas + % limos) en suelos, lo que se explica por la carga eléctrica negativa que éstos tienen en su superficie, ya que al repeler a los nitratos, igualmente cargados negativamente, facilitan su infiltración.

Entre los parámetros *químicos* de los suelos aquellos más prometedores son la capacidad de intercambio catiónico (CIC) con una correlación positiva con los nitratos en aguas subterráneas de 0,52. Se observó una correlación inversa de -0,75 para los nitratos en agua subterránea con el pH del suelo en agua destilada, de -0,5 para nitratos en aguas y el pH del suelo en CaCl_2 ; y también de -0,5 para nitratos en aguas y el pH del suelo en solución NaF. Asimismo, se observó ($n=6$, pues se eliminó un valor anómalo) una correlación inversa de -0,6 entre nitratos en aguas subterráneas y la capacidad de retención de nitratos del suelo. Otro parámetro de interés, con una correlación de 0,6 con los nitratos en aguas subterráneas, es la relación Al/Si,

que al igual que la variable de pH en solución de NaF apunta a la mineralogía de las arcillas, pero la primera presenta mayor variación a lo largo de la cuenca, por lo que se prefiere su uso como indicador. No se determinó ninguna correlación entre los nitratos en aguas y los parámetros *biológicos* relacionados con la degradación microbiana (% carbono, % nitrógeno relación carbono/nitrógeno).

La capacidad de intercambio catiónico y la relación C:N se relacionan con la capacidad de retener sustancias orgánicas en general. El pH en suelos, así como la extracción de nitratos en suelos y la determinación de Al:Si extraíbles en oxalato, se relacionan con el riesgo principal detectado (infiltración de sustancias con carga eléctrica negativa), y con el riesgo de infiltración de agroquímicos nitrogenados, que son los de mayor riesgo según la determinación del coeficiente de reparto (K_d) en suelo. Los análisis presentan además un costo razonable. Con base en el K_d de las sustancias se concluye que la terbutilazina, ametrina, carbendazim, diuron y nitratos representan amenaza importante al acuífero.

Con base en la viabilidad de las pruebas descritas, se plantea un modelo de análisis del riesgo de infiltración de agroquímicos que incluye: a) *los parámetros físico-químicos del suelo* (pH de suelos, relación aluminio: sílice, capacidad de retención de nitratos, capacidad de intercambio catiónico y % de arcillas+% limos); b) *parámetros del acuífero* (profundidad al nivel de agua, espesor de la capa de cobertura y conductividad hidráulica horizontal), c) *parámetros físico-químicos de las sustancias* (toxicidad y factor de retardo medido) y d) *época de aplicación*. El modelo debe enfocarse a la prevención de la infiltración de fertilizantes nitrogenados, como indicativo del riesgo de infiltración de otros agroquímicos.

El presente estudio se considera exploratorio e indicativo de futuras acciones, y se basó en un número pequeño de muestras, tanto para agua como para suelos. Se consideraron los métodos empleados como factibles para futuras investigaciones, pero se desaconseja el muestreo y análisis directo de plaguicidas en aguas subterráneas y suelos, por la falta de métodos para muchos de los metabolitos, costos analíticos y los niveles de detección. Se recomienda un mapeo a mayor detalle de los parámetros estudiados, con un número mayor de muestras, que permitan directamente desarrollar un modelo de correlación múltiple entre éstos y la concentración de nitratos en aguas subterráneas, y su variación geográfica.

CONCLUSIONES

Los suelos de la zona de estudio presentan un mayor riesgo de contaminación hacia aguas subterráneas cuando los contaminantes tienen carga eléctrica negativa (ej, plaguicidas, nitrogenados, nitratos). Esta predisposición, según Graham, se relaciona con el origen de los suelos, y se acentúa en zonas de origen en cenizas volcánicas meteorizadas.

Se detectó en las zonas de alto uso del suelo para agricultura que los valores de nitratos en aguas subterráneas son casi 3 veces las encontradas en pozos de abastecimiento público ubicados en áreas pobladas. Entre los plaguicidas, únicamente se detectó glifosato (fosfometilglicina) en canales, lo que apunta a la contribución de la escorrentía y posible adsorción/desorción de la sustancia, pues su presencia no es congruente con el valor calculado del coeficiente de reparto ($K_d = 35$) y se sugiere su monitoreo en el Acuífero Tempisque.

Se recomienda que las actividades agrícolas utilicen abonos nitrogenados a base de urea, o abonos orgánicos ricos en ésta, ya que por su carga eléctrica, son retenidos más fácilmente. Sin embargo, en el caso de una zona que utiliza estos abonos, las aguas son altas en nitratos, por lo que la caracterización de la razón C:N y el estudio de las necesidades de fertilización son de importancia. Se debe minimizar la aplicación en épocas de alta infiltración.

A fin de minimizar el riesgo de infiltración de herbicidas nitrogenados (fenilureas y triazinas) se recomienda alternar su uso con otros tipos de herbicidas, o buscar alternativas no químicas.

Con base en el coeficiente de reparto (K_d) medido se considera que la terbutilazina, ametrina, carbendazim, diuron y nitratos representan amenaza importante al acuífero.

AGRADECIMIENTOS:

A la Dra. María de los Ángeles Morales, Directora de Regulación de la Salud, por la inspiración y apoyo para iniciar el presente trabajo, a la MSc. Ingrid Vargas, al MSc. Federico Arellano y al MSc. Eduardo Madrigal, por su apoyo como Directora y lectores de tesis, respectivamente; a la MSc. Viviana Ramos del AyA por su apoyo y el de su personal en las pruebas de infiltración y aforos, y al Lic. Rafael Amón del Laboratorio Lambda por su colaboración en química analítica. A todos ellos mi sincero agradecimiento por dar forma a esta iniciativa y por brindar la motivación en el momento oportuno.

REFERENCIAS

1. Organización de Estudios Tropicales. Perspectivas para el Manejo Integrado de la Cuenca del Río Tempisque. San José, Costa Rica. 2001.
2. García J. Análisis preliminar del uso de plaguicidas en la Cuenca del Río Tempisque., Revista Acta Académica, Universidad Autónoma de Centroamérica, 1999; (25): 51-62, San José, Costa Rica.
3. Arias-Estevez M, López-Periago E, Martínez-Carballo E, Simal-Gándara J, Mejuto J, García-Río L. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008; (123): 247-260.
4. Candela L. El transporte de los plaguicidas a las aguas subterráneas, Boletín Geológico y Minero, 2003 No. 114(4): 409-417. España.
5. Albert L (ed). Introducción a la Toxicología Ambiental, México: OPS/CEPIS; 1997.
6. Ruepert C, De La Cruz E, Argüello, S. DDT y sus metabolitos en muestras ambientales y de sangre de niños en viviendas de Estrada y Olivia-Paraíso, Costa Rica. Resumen de Actividades Ejecutadas, 2004-2008. Programa Regional de Acción y Demostración de Alternativas Sostenibles para el control de vectores de la malaria sin uso del DDT en México y América Central: El caso de Costa Rica. Serie Informes Técnicos No. 5, IRET (UNA), Costa Rica; 2008.
7. Appelo C A J, Postma D. Geochemistry, groundwater and pollution. Rotterdam, Holanda; 1994.
8. Humbert S, Margni M, Charles, R, Torres-Salazar O, Quirós A, Jolliet O. Toxicity assessment of the main pesticides used in Costa Rica. Agriculture, Ecosystems and Environment 2007 (118): 183-190. Disponible en www.sciencedirect.com (consultado 13setiembre2009).
9. Bergoeing J P. Geomorfología de Costa Rica. San José, Costa Rica: Librería Francesa; 2007.
10. Denyer P, Kussmaul S. Geología de Costa Rica, Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica; 2006.
11. Tomlin C (editor). Pesticide Manual, British Crop Protection Council; 1997.
12. Schosinsky G. Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Revista Geológica de América Central. 2006; (34-35): 13-30.
13. Foster S, Hirata R, Gomes D, D'Elia M, Paris M. Protección de la calidad del agua subterránea – Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Washington EEUU. Banco Mundial; 2003.
14. Barbash J, Resek E. Pesticides in Ground Water – Distribution, Trends and Governing Factors. Michigan, EEUU: Ann Arbor Press, In