



Evaluación de la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección a manantiales en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica

Evaluation of potential contamination of groundwater and spring protection areas of the Maravilla-Chiz and Quebrada Honda sub-basins, Cartago, Costa Rica

Avaliação da ameaça de contaminação das águas subterrâneas e áreas de proteção de nascentes nas sub-bacias Maravilla-Chiz e Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica

Alicia Fonseca-Sánchez

alicia.fonseca.sanchez@una.cr

Universidad Nacional
Heredia, Costa Rica

Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-1275-2301>

Helga Madrigal-Solís

helga.madrigal.solis@una.cr

Universidad Nacional
Heredia, Costa Rica

Orcid: <http://orcid.org/0000-0003-4423-5592>

Christian Núñez-Solís

christian.nunez.solis@una.cr

Instituto Geográfico Nacional
Universidad Nacional
Heredia, Costa Rica

Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-1221-8758>

Hazel Calderón-Sánchez

hazelcalderon@gmail.com

Universidad Nacional
Heredia, Costa Rica

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9915-627X>

Geannina Moraga-López

geannina.moraga.lopez@una.cr

Universidad Nacional
Heredia, Costa Rica

Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-8221-8489>

Alicia Gómez-Cruz

agomezacruz@gmail.com

Universidad Nacional
Heredia, Costa Rica

Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-8175-8344>

Recibido-Received: *2/feb/2018* / Corregido-Corrected: *11/oct/2018*.
Aceptado-Accepted: *7/feb/2019* / Publicado-Published: *31/jul/2019*.

Resumen

Las subcuencas del río Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, localizadas en la región oriental del área metropolitana de Costa Rica, tienen una superficie aproximada de 46,8 km², donde la principal actividad económica es la producción tanto agrícola como pecuaria y su población se abastece de fuentes de agua subterránea. El objetivo de la investigación fue determinar la amenaza de contaminación del agua subterránea, mediante la evaluación del estado de las áreas de protección en manantiales de abastecimiento público. Para eso, se tomaron en cuenta las fuentes potenciales de contaminación puntuales, lineales y difusas, así como se clasificaron, según la metodología POSH, por sus siglas en inglés (Pollutant Origin Surcharge Hydraulically). El área protegida correspondió a un radio de 200 m alrededor de las nacientes (Ley 276, Costa Rica). Los resultados identificaron que un 7 % del área presentó fuentes difusas con un



potencial generador de carga contaminante elevado, debido a las grandes cantidades de plaguicidas aplicados en hortalizas y verduras, mientras que un 55 % presentó un potencial moderado, en parcelas de caña, café y ocupación urbana carente de alcantarillado sanitario. De las fuentes puntuales encontradas, la mitad se clasificó con potencial elevado y 46 % con moderado. De los 252 km lineales, correspondientes a ríos, red vial y poliducto, 89 % fue de potencial moderado, 10 % elevado y 1 % reducido. Finalmente, se constató la invasión de fuentes lineales y difusas en las áreas de protección de los manantiales; por ello, al gobierno local se le recomienda establecer un procedimiento legal para atender el problema.

Palabras claves: Amenaza; calidad del agua subterránea; fuentes de contaminación; uso de la tierra; agricultura; áreas de protección; Cartago.

Abstract

The sub-basins of the Maravilla-Chiz and Quebrada Honda Rivers have an approximate area of 46.8 km² and are located in the eastern part of the Costa Rican metropolitan area, where agricultural and livestock productions are the main economic activity. The sub-basins supply the populations nearby with groundwater sources. The objective of the paper was to determine the possible groundwater contamination by assessing the state of the protection areas of springs used for public water supply. For such purposes, potential point, line, and diffuse sources of contamination were considered and classified according to the POSH (Pollutant Origin and its Surcharge Hydraulically) method. The protected area corresponded to a 200 m radius around the headwaters (Costa Rican Law 276). Results identified that 7% of the area showed diffuse sources of high potential generating pollutant load, due to the large quantities of pesticides used in greens and vegetables, while 55% presented a moderate potential in plots of sugarcane, coffee, and urban areas with no sanitary sewer. Half of the point sources found were classified as a high potential and 46% as moderate. Of the 252 line-kilometers corresponding to rivers, road network, and pipeline, 89% was classified as moderate potential, 10% as high, and 1% as reduced. Finally, the invasion of line and diffuse sources in the spring protection areas was confirmed; therefore, the local government is recommended to start a legal procedure to address the problem.

Keywords: threat; groundwater quality; sources of pollution; land use; agriculture; protected areas; Cartago.

Resumo

As sub-bacias do rio Maravilha-Chiz e Quebrada Honda Rio, localizadas na região oriental da área metropolitana da Costa Rica, possui uma superfície de aproximadamente 46,8 km², onde a principal atividade econômica é a produção tanto agricultura quanto pecuária, e sua população é abastecida pelas fontes de água subterránea. O objetivo da pesquisa foi determinar a ameaça de contaminação da água subterránea, através da avaliação do estado das áreas de proteção em nascentes de abastecimento público. Para tanto, foram consideradas as fontes potenciais de contaminação pontuais, lineares e difusas, como também classificadas de acordo com a metodologia POSH (Pollutant Origin Surcharge Hydraulically). A área protegida correspondeu a um raio de 200 m ao redor das nascentes (Lei 276, Costa Rica). Os resultados identificaram que 7% da área apresentou fontes difusas com um potencial gerador de alta carga de poluição devido às grandes quantidades de pesticidas aplicados em legumes e verduras, enquanto 55% apresentou um potencial moderado, em parcelas de cana, café e ocupação urbana carente de esgoto sanitário. Das



fontes pontuais encontradas, metade foi classificada com alto potencial e 46% com moderada. Dos 252 km lineares, correspondentes a rios, rede viária e oleoduto, 89% foram de potencial moderado, 10% alto e 1% reduzido. Por fim, confirmou-se a invasão de fontes lineares e difusas nas áreas de proteção das nascentes; portanto, recomenda-se que o governo local que estabeleça um procedimento legal para resolver o problema.

Palavras-chave: ameaça; qualidade da água subterrânea; fontes de contaminação; uso da terra; agricultura; áreas de proteção; Cartago

En el área metropolitana de Costa Rica el recurso hídrico subterráneo es la principal fuente de abastecimiento para el desarrollo socioeconómico de la región. A pesar de ser aprovechado por el sector agropecuario, industrial y, principalmente, para el abastecimiento humano, está siendo amenazado por las mismas actividades antropogénicas. En las subcuencas del río Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, localizadas al este del área Metropolitana, el impacto de la actividad agrícola ha traído consigo repercusiones ambientales, como la contaminación por vertido de aguas residuales a ríos, quebradas y lagunas, falta de protección de zonas de recarga hídrica y manantiales, usos de la tierra no conformes en las áreas de protección de los cuerpos de agua, inadecuado manejo de residuos químicos agrícolas (PREVDA, 2010), el sobreuso de herbicidas y exceso en el uso de fertilizantes nitrogenados (Jiménez, 2010).

Así mismo, en la cuenca Pacayas, al oeste de las subcuencas del río Maravilla-Chiz, se encontraron restos de clorpirifos, clorotalonil y hexaclorobenceno en el agua muestreada en los canales de drenaje adyacente a una naciente utilizada como fuente de agua para abastecimiento humano y hexaclorobenceno en una muestra de agua subterránea (IRET, 2010a, IRET, 2010b). En el mismo estudio, algunos sitios de muestreo de las aguas subterráneas

mostraron concentraciones de nitratos cerca o por encima de 10 mg/L (como nitrógeno), sobrepasando los niveles máximos permitidos según la Organización Mundial de la Salud (OMS), debido a la amplia utilización de fertilizantes y al uso extendido de tanques sépticos en la zona (IRET, 2010b). Según Ramírez *et al.* (2014), en esta misma cuenca se aplican de 320 a 375 kg/ha de nitrógeno en el cultivo de la papa, lo cual sobrepasa los valores recomendados por el MAG (1991). Sumado a lo anterior, el uso de tanques sépticos como sistema de eliminación de excretas, en esta zona, podría alterar la calidad del agua subterránea, si los efluentes alcanzan rápidamente el flujo de agua subterránea, tal como ha sucedido en la zona noroeste del Valle Central (Reynolds-Vargas *et al.*, 2006).

Uno de los primeros pasos en la gestión y protección de los recursos hídricos, propuestos por el Banco Mundial, es la metodología para la identificación de las fuentes potenciales que amenazan la calidad del agua subterránea (Foster *et al.*, 2002). La identificación de zonas críticas, en donde existe mayor riesgo de contaminación, se evalúa con cartografía de amenaza y de vulnerabilidad hidrogeológica. Además, a las fuentes potenciales de contaminación se superponen las áreas de protección de los pozos y manantiales para abastecimiento público, ya que, en ocasiones, estas se



delimitan posteriormente al desarrollo de actividades antrópicas, por lo que se vulnera la calidad de agua para consumo. Para elaborar la cartografía de amenaza, Foster *et al.* (2002) desarrollan el método POSH (por sus siglas en inglés, Pollutant Origin Surcharge Hydraulically), el cual evalúa y clasifica las actividades con mayor probabilidad de generación de cargas contaminantes hacia el subsuelo.

Es ampliamente conocido el riesgo para la salud humana proveniente del consumo de agua contaminada con plaguicidas y nitratos, pues puede conducir a serias condiciones patológicas, tales como el cáncer (Ahmed *et al.* 2017; Bivolarska y Gatseva, 2015; Ward, 2009; Weyer *et al.*, 2001; WHO, 2011). Dado este contexto y el hecho de que en el área de estudio los poblados de Capellades, Juan Viñas y Murcia utilizan el agua subterránea como fuente de abastecimiento para consumo humano, resulta de suma importancia evaluar la amenaza sobre la calidad del agua subterránea, por la presencia de fuentes con potencial de aportar cargas contaminantes al subsuelo, como los talleres mecánicos, actividades agrícolas y pecuarias, entre otros. A causa de la aparición de nitratos y plaguicidas en el agua subterránea en la cuenca adyacente y a la problemática ambiental identificada en las subcuencas Quebrada Honda y Maravilla-Chiz, la presente investigación tuvo como objetivo principal desarrollar una caracterización de la amenaza a la contaminación que sufre este recurso. Finalmente, se propuso evaluar la amenaza a la contaminación del agua subterránea dentro de las áreas de protección en los principales manantiales utilizados para el abastecimiento público.

Marco teórico

La contaminación de acuíferos no se resuelve a corto plazo; es un problema cuya solución podría tomar décadas. Diseñar e implementar programas de educación o herramientas de monitoreo que eviten o minimicen la contaminación de acuíferos puede constituir un punto de partida en la atención del problema; en este sentido, contar con información de amenaza (fuentes potenciales de contaminación al agua subterránea), permitirá una evaluación ambiental que oriente las acciones preventivas y correctivas, especialmente en donde el acuífero es vulnerable y en sectores donde se extrae agua subterránea para el abastecimiento humano.

Debido a la dificultad de contar con información sobre la cantidad de carga contaminante generada por cada actividad humana, la metodología POSH simplifica la evaluación de la amenaza al priorizar sobre la clasificación de las principales fuentes con potencial contaminante para la generación de un mapa de amenaza, con base en dos características: la posible presencia de contaminantes persistentes y móviles en el subsuelo, y la presencia de una carga hidráulica capaz de transportar los contaminantes hacia los acuíferos (Foster *et al.*, 2002).

Otra herramienta para la protección de la calidad del agua subterránea es la zonificación de las áreas de protección (AP) en manantiales y pozos de abastecimiento público. Debido a las presiones socioeconómicas de una región, es inviable prohibir las actividades potencialmente contaminantes en toda la zona en donde se da la recarga del agua subterránea que será captada por dicha fuente, es decir, en toda el área de captura (Foster *et al.*, 2002). Por esta razón, el Banco Mundial recomienda proteger una sección de esta área, conocida como el área



de protección (AP), la cual debe definirse de acuerdo con el conocimiento o supuestos de las condiciones hidrogeológicas locales y de la fuente (Foster *et al.*, 2002).

En Costa Rica, la legislación determina un radio fijo arbitrario de 200m como AP alrededor de los manantiales captados para abastecimiento, según Art. 31 de la Ley de Aguas (Ley N.º 276), aunque este radio no cuenta con fundamentación técnica ni toma en cuenta las características hidráulicas del acuífero ni la geomorfología del lugar. Sin embargo, es el único radio que se permite zonificar, en especial cuando no existe información sobre los parámetros hidrogeológicos locales debido a la falta de pozos y pruebas de bombeo; tal es el caso del sitio de estudio en la presente investigación.

Sitio de estudio

El área de estudio tiene una extensión de 46,8 km² y está localizada al noreste de la provincia de Cartago, entre las coordenadas geográficas 83°47'30" - 83°40'00" latitud norte y 9°52'30" - 9°50'00" longitud oeste, y entre las coordenadas 522 000m - 534 000m este y 1 090 000m - 1 098 000m norte del sistema de Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica del 2015 (CRTM05) (Figura 1). Ubicada sobre la margen izquierda del río Reventazón-Parismina, vertiente

del Caribe de Costa Rica, el área está conformada por las subcuencas de los ríos Maravilla, Chiz y Quebrada Honda. La época lluviosa se presenta desde mayo a noviembre y la época seca desde diciembre a abril, con una precipitación anual de 2500mm en la parte media y baja y de 3000mm en la parte alta (IMN, 2005). La máxima altitud es de 2000 m.s.n.m. y la mínima es de 650 m aproximadamente. La gradiente general de la cuenca es del 12 % alcanzando hasta el 30 % en el sector sureste en los alrededores de Murcia, en la parte baja de las subcuencas.

Los principales centros poblados son Capellades, Juan Viñas y Murcia, en los cantones de Alvarado, Jiménez y Turrialba respectivamente, con una población de 11 526 habitantes para el 2011 (INEC, 2012). La mayor parte del área pertenece al distrito de Juan Viñas. La población se abastece de manantiales, y las concesiones de agua superficial son para uso agropecuario, según la base de datos de la Dirección de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía del 2017. Además, solo existe un pozo perforado, el cual no está en funcionamiento, ya que no cuenta con una concesión para su uso. Los principales usos agropecuarios corresponden a café, caña de azúcar, frutales, pejíbabe, pastos y hortalizas. Además, se cultiva culantro, frijol y musáceas (INDER, 2014).

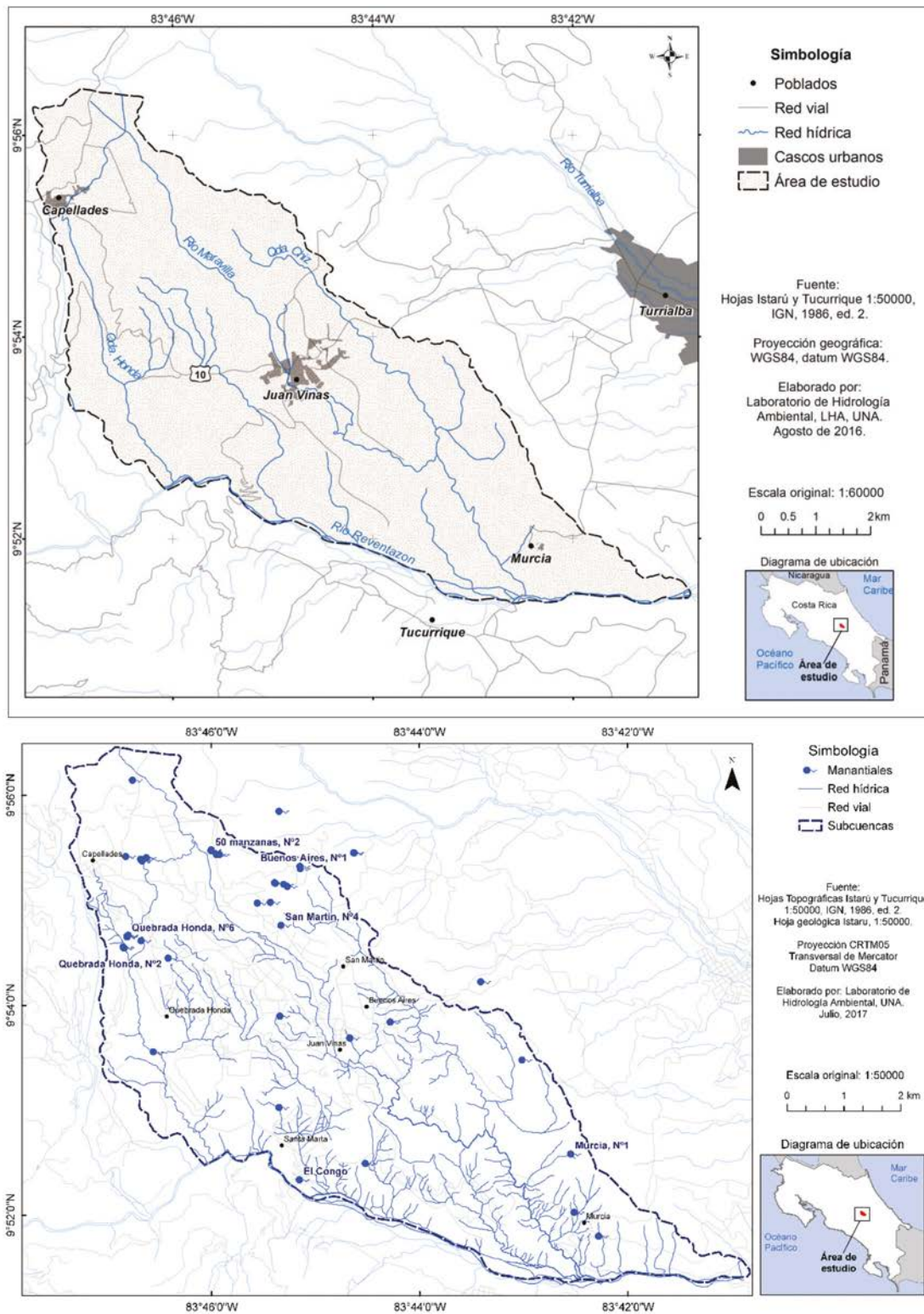


Figura 1. Ubicación subcuencas de los ríos Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. Elaboración propia.



Geología

Geológicamente la zona de estudio está conformada por diversas formaciones geológicas, entre las que predominan rocas volcánicas principalmente y los procesos de formación del país. El basamento geológico de la zona lo constituyen rocas sedimentarias tipo areniscas y calizas. Además, hay presencia de depósitos no consolidados que se originan a partir de los procesos de erosión y arrastre fluvial y de gravedad, con su posterior sedimentación. En la zona de estudio se encuentran las siguientes unidades geológicas (Figura 2):

Formación Tuis

Conformada, según [Obando \(1984\)](#), por: a) arenisca muy meteorizada, con estratificación masiva, muy fracturada, con fragmentos de roca volcánica; b) conglomerado lenticular, con clastos de composición volcánica; c) areniscas, de grano medio, con lentes arenosos de grano más grueso y; d) aglomerados post-Tuis, muy arcillosos con clastos correspondientes a fragmentos volcánicos, de tipo andesíticos y basálticos. La formación corresponde con la edad del Paleoceno-Eoceno medio ([Fernández, 1987](#)). El espesor asociado a la formación es de 850 m.

Grupo Aguacate

Incluye todas las litologías volcánicas anteriores al emplazamiento de los volcanes de la cordillera volcánica actual, desde el Mioceno hasta el Plioceno- Pleistoceno ([Denyer & Arias, 1991](#)).

Formación Ujarrás

Se compone de conglomerados de clastos métricos y de brechas locales poco consolidadas, intercaladas con areniscas

y lutitas friables con cambios de *facies* abruptos en poca extensión, en una matriz areno-arcillosa, del Pleistoceno ([Mora y Ramírez, 2015](#);). Sobreyacida por el Miembro Paraíso de la Formación Reventado ([Krushensky, 1972](#)).

Formación Reventado

Se adopta aquí, para la caracterización litoestratigráfica de esta formación, la realizada por [Krushensky \(1972\)](#), por considerarse la contribución más relevante. Se utiliza, además, su nomenclatura a pesar de ser la más antigua, debido a que ha sido la más utilizada como referencia en el área. Además, en trabajos posteriores, los nombres utilizados son diferentes con cada autor y/o su división responde a características vulcanológicas. Este autor relaciona a esta formación con rocas volcánicas provenientes de las erupciones del volcán Irazú, de finales del Pleistoceno y cuya localidad tipo se encuentra en el cañón del río Reventado. Esta formación aflora al noreste de la hoja topográfica Istarú, así como al noreste de la hoja topográfica Tapantí y, en ella, se agrupan las rocas volcánicas recientes. A su vez, siguiendo con lo propuesto por [Krushensky \(1972\)](#), esta formación se subdividió en tres miembros: Inferior o Paraíso, Intermedio o Cama de cenizas y Miembro Superior.

a) **Miembro Paraíso.** Conformado por flujos de lava andesíticas y por flujos laháricos intercalados en menor proporción, con 170 m de espesor en la catarata Los Novios. Sobreyace discordantemente a la formación Ujarrás y al grupo Aguacate, concordantemente al flujo de ceniza del río Aguacaliente.



- b) **Miembro Cama de Ceniza.** Está constituido por una capa de ceniza fina de tonos café rojizos altamente meteorizada, de 15 m de espesor. Se infiere que se encuentra sobreyaciendo al Miembro Paraíso, mientras el contacto superior está cubierto por lahares.
- c) **Miembro Superior.** Corresponde con capas de ceniza superficiales, flujos de lahares, así como flujos de lava. Los flujos de lava tienen espesores de decenas de metros y presentan fracturas columnares. Comúnmente, aparecen lentes de arcillas verdosas parecidas a la bentonita. Las capas de ceniza varían de espesores métricos de acuerdo con su posición respecto a la fuente, con espesores mayores en los flancos noroeste y norte, y menores hacia el oeste, sur y este. Se estima que el

espesor supera los 600 m. Se encuentra sobreyaciendo discordantemente al Miembro Cama de Ceniza.

Depósitos no consolidados

Dentro de esta unidad se agrupan todos aquellos depósitos no consolidados que se han formado por acción de la gravedad (coluvios) o por arrastre del agua. Por ser una cuenca en la que la pendiente del terreno es muy fuerte, predominan los depósitos coluviales a los depósitos aluviales, excepto en la margen izquierda del río Reventazón, en donde se puede apreciar un pequeño aluvión asociado a la zona de deposición del río. Localmente, las rocas se encuentran cubiertas por lo general de arcillas producto de la meteorización de las rocas, lo cual dificulta su identificación en el campo ([Instituto de Investigaciones en Ingeniería, 2010](#)).

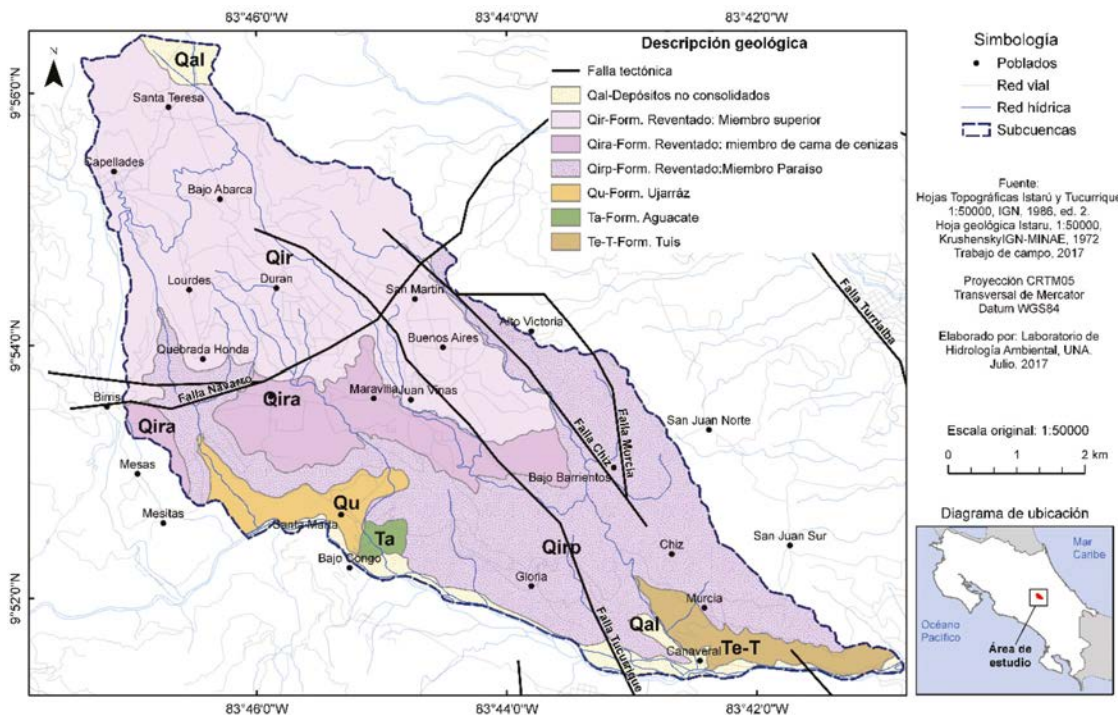


Figura 2. Mapa de geología, subcuencas de los ríos Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. Modificado de [Krushensky \(1972\)](#).



Hidrogeología

Dada la abundancia de manantiales en la zona, la perforación de pozos de producción o de investigación no ha sido desarrollada. Por tanto, la descripción de las características hidrogeológicas es muy limitada y se basa únicamente en la presencia de los manantiales de la zona. La litología predominante y la presencia de manantiales a lo largo de la cuenca evidencian un flujo de agua subterráneo preferencialmente en rocas volcánicas fracturadas. Esto demuestra, explícitamente, la existencia de uno o varios acuíferos volcánicos locales y discontinuos en la cuenca de los ríos Chiz-Maravilla. La dirección de flujo de agua es preferentemente hacia el río Reventazón, que representa el colector principal de la cuenca. Sin embargo, es muy probable que algún flujo de agua sea desviado hacia estos ríos que recorren dicha cuenca.

Metodología

Clasificación de actividades según su amenaza

En esta investigación, se tomaron fuentes con potencial de contaminación puntual, lineal y difusa para la elaboración de un mapa de fuentes potenciales de contaminación. En cuanto a las fuentes puntuales, el método POSH (Foster *et al.*, 2002) propone evaluar las que presentan mayor potencial de contaminación al subsuelo: sitios de disposición de residuos sólidos, sitios industriales, lagunas de oxidación para efluentes, estaciones gasolineras y cementerios. A su vez, según el método POSH, estas se catalogaron en fuentes puntuales con potencial contaminante reducido, moderado y elevado.

Además, se incluyeron y clasificaron con potencial de generación de carga contaminante reducido, los talleres de ebanistería

y torres de telecomunicaciones; con potencial moderado las granjas avícolas, bodegas de abono orgánico, ferreterías, lagunas de efluentes, lecherías, porquerizas, centro de acopio para materiales reciclables, centros de belleza, entre otros. También, se clasificaron con potencial de generación de carga contaminante elevado los beneficios de café, talleres mecánicos, bodegas de agroquímicos, sitios donde desfogon aguas residuales, botaderos clandestinos de desechos sólidos, sitios donde existe estancamiento de aguas residuales, sitios donde ubican ilegalmente los estañones vacíos de agroquímicos, áreas donde se efectúa el lavado de maquinaria agrícola, plantel donde se guarda la maquinaria agrícola y zonas donde venden agroquímicos y autos usados.

La información sobre las fuentes potenciales de contaminación puntual se obtuvo de los registros georreferenciados de instituciones públicas, hasta octubre del 2017: las patentes de actividades se obtuvieron de las Municipalidades de Alvarado y Jiménez; los registros de porquerizas, lecherías u otra actividad pecuaria, del Servicio Nacional de Salud Animal (SENASA), y registros de establecimientos con permiso sanitarios, del Ministerio de Salud. Los datos suministrados por estas instancias se estandarizaron en el sistema de coordenadas oficial para Costa Rica, CRTM05, con el software ArcGis 10.5. Además, se realizaron tres campañas, durante abril del 2017, para el reconocimiento en el campo de actividades potencialmente contaminantes. Durante estas campañas se localizaron actividades que no estaban inscritas en los registros de patentes o permisos de funcionamiento.

El mapa de fuentes difusas con potencial de generación de carga contaminante se generó a partir de la técnica de fotointerpretación, según metodología descrita por



Fernández (2000), con base en imágenes ortorectificadas World View II del año 2016, a una resolución espacial de 0.6 m, recuperadas de la plataforma Google Earth Plus. Sobre la imagen se realizó una digitalización de usos de la tierra a escala 1:5,000 en el software ArcGis10.5®. Se corroboró en el campo y actualización de usos, georreferenciando actividades a lo largo de la cuenca, con el navegador GPSmap 60CSx con +/- 3m de error. La reclasificación final fue de cinco clases: bosque, pastos, cultivos permanentes (caña de azúcar, café y árboles frutales), cultivos estacionales (hortalizas, maíz, frijol, legumbres, etc) y urbano, según la metodología descrita por Foster *et al.* (2002).

Los cultivos estacionales de hortalizas y verduras, como papa y tomate, fueron clasificados como fuentes con potencial generador elevado de carga contaminante, debido a que, en su agricultura se aplican cantidades altas de plaguicidas (Ramírez *et al.*, 2014), de 30 a 60 de ingrediente activo (ai)/ha/año (Bravo *et al.*, 2013), y de fertilizantes que, muchas veces, superan las recomendaciones técnicas (IRET, 2010a y Ramírez *et al.*, 2014). Los cultivos de café y caña se utilizan menos agroquímicos, menos de 30 ai/ha/año (Bravo *et al.*, 2013) comparado con los estacionales, por lo que fueron considerados como fuentes difusas con potencial moderado. Por su parte, los cultivos de árboles frutales y plantaciones forestales de coníferas son actividades consideradas con potencial moderado, debido a que estos cultivos requieren plaguicidas, aunque también en menor medida que los estacionales. El uso urbano fue considerado con potencial moderado al no existir servicio de alcantarillado y poseer una densidad poblacional menor a 100 personas/ha (INEC, 2011), criterio utilizado por Foster *et al.* (2002) para clasificar el uso urbano

como fuente difusa con potencial moderado. El uso del suelo cubierto por pastos para ganadería fue considerado como fuente difusa con potencial reducido por la baja cantidad de plaguicidas, menor de 10 ai/ha/año (Bravo *et al.*, 2013) y la baja densidad de cabezas de ganado observada en la zona.

Entre las fuentes lineales con potencial de contaminación se incluyeron los ríos permanentes, la red vial y la línea del poliducto. Los ríos y la red vial se obtuvieron de las hojas cartográficas Istarú y Tucurrique 1:50000 (IGN, 1986). La línea del poliducto, perteneciente a RECOPE, se obtuvo de la cartografía digital, escala 1:25000, del Centro Nacional de Información Geoambiental (CENIGA, s. f.) a través del geoservicio Web Coverage Service (WCS). El poliducto y la red vial se clasificaron, según la metodología POSH (Foster *et al.*, 2002), como fuentes con potencial generador de carga contaminante elevado y moderado, respectivamente. Por su parte, los ríos se clasificaron en reducido, moderado y elevado con base en dos parámetros: a) uso de suelo y; b) índices biológicos. Se tomó en consideración el uso de la tierra en una zona de influencia de 15m en horizontal, a cada lado del cauce del río, debido a que es el área que tiene mayor influencia sobre la calidad del agua ribereña. De esta manera, los tramos de los ríos se clasificaron de la siguiente forma: con potencial reducido, los tramos de los ríos que cursaron terrenos con bosque; reducido, los tramos bajo cobertura de pastos; moderado, si hubo presencia de fuentes potenciales clasificadas como moderadas, y elevado, cuando hubo presencia de fuentes elevadas. Para esto, se utilizó la misma cartografía de uso de suelo elaborada para generar el mapa de fuentes de contaminación difusa.

Adicional al uso de la tierra, se tomó en cuenta la calidad del agua de los ríos con



base en un estudio realizado en el 2018 por Alfaro *et al.* (en preparación), en las partes alta, media y baja de los ríos Quebrada Honda, Maravilla y Chiz. En ese estudio, se analizaron coliformes y se aplicó la metodología del índice BMWP-CR (Biological Monitoring Working Party adaptado para Costa Rica). Este índice se basa en la presencia de familias de macroinvertebrados bentónicos mencionadas en el apéndice III del Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales N33903-MINAE-S (La Gaceta, 2007). Finalmente, se utilizó el software ArcGis10.5®, con el fin de generar tres capas vectoriales, una para cada grupo de fuente contaminante: puntual, difusa y lineal.

Áreas de protección a manantiales

Se delineó un perímetro de 200m de radio, según la legislación nacional, a seis manantiales de abastecimiento público, con el fin de evaluar la amenaza por presencia de actividades con potencial de generación de carga contaminante al subsuelo dentro de ese perímetro. Dichos manantiales abastecen a un poco más de 5000 personas y son administrados por acueductos municipales y Asociaciones Administradoras de Sistemas

de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios (ASADAS). En la Figura 1 se ubican los manantiales incluidos en este análisis: 50 Manzanas, Buenos Aires, Quebrada Honda, San Martín, El Congo y Murcia.

Resultados

En la cuenca alta se han desarrollado cultivos estacionales de hortalizas y vegetales y, además, fincas de pastos para la ganadería. En la parte media, la mayor cobertura correspondió a los cultivos permanentes de la caña de azúcar y café, aunque, este último, en menor medida; también, se localizó la mancha urbana de mayor extensión, correspondiente al poblado de Juan Viñas. En la parte baja, parcelas de café, caña de azúcar, pastos y parches boscosos (Figura 3). En general, el cultivo de caña de azúcar constituyó una tercera parte del área de estudio, seguido por los cafetales, los pastos y otros cultivos estacionales, por lo que el uso de la tierra, en el periodo de la investigación, fue agropecuario en un 70 % del área; en contraste, los parches boscosos y forestales de coníferas representaron cerca del 25 %, mientras que el uso urbano fue significativamente menor, cerca del 4 % (Figura 3).

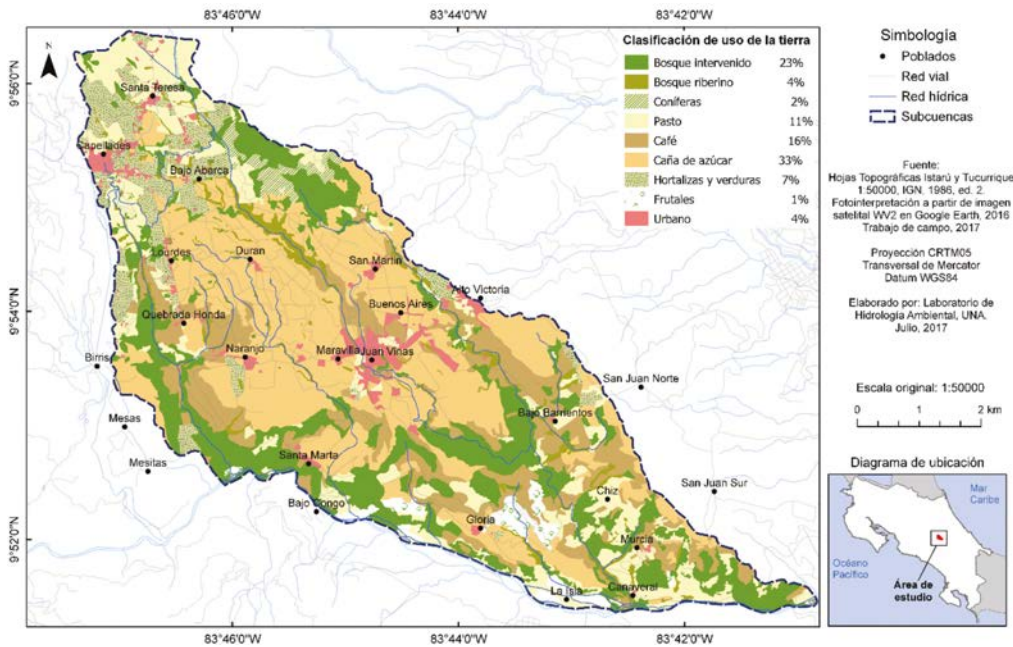


Figura 3. Uso de suelo en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica.
 Elaboración propia.

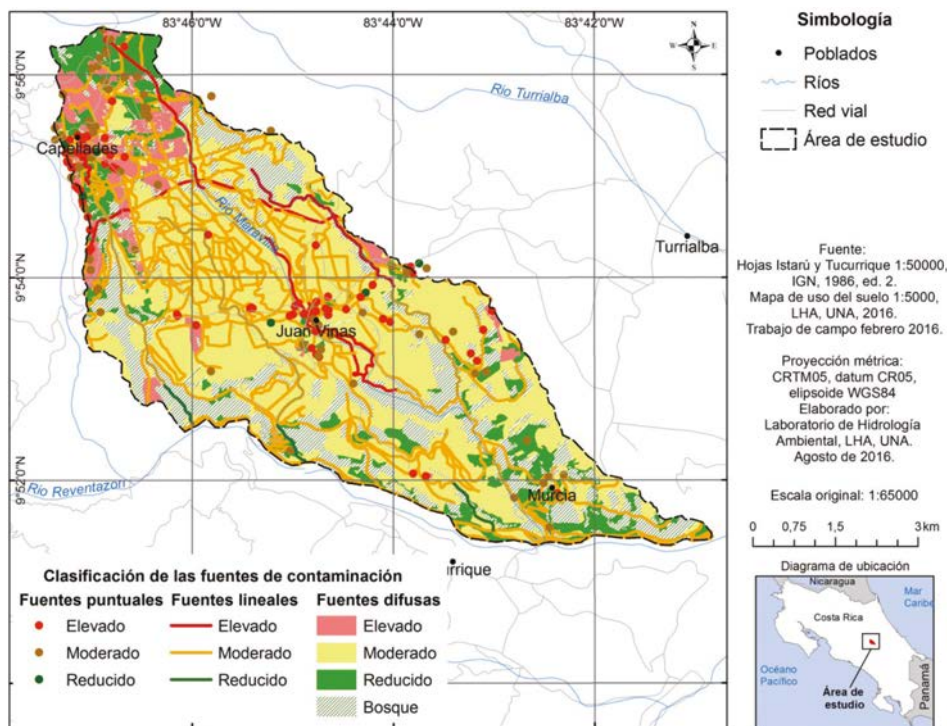


Figura 4. Mapa de amenaza a la calidad del agua subterránea en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica.
 Elaboración propia.



Tomando en cuenta que, en este estudio, estas actividades son consideradas fuentes potenciales de contaminación de tipo difusa y su potencial de generación de carga contaminante, se encontró que un 7 % del área presentó una cobertura con un potencial elevado, principalmente en la zona alta de las subcuencas (Figura 4), asociado a los cultivos estacionales de hortalizas y verduras, como papa y tomate (Figura 5). Por su parte, un 55 % del área de estudio estuvo cubierta con uso urbano, cultivos de caña, café, árboles frutales y cultivos forestales, los cuales representan fuentes de contaminación difusa con potencial moderado (Figura 5). Cerca de un 14 % del área estuvo cubierta por pastos para ganadería, uso considerado con potencial reducido. Los bosques, con potencial nulo, cubrieron el 24 % del área estudiada (Figura 5).

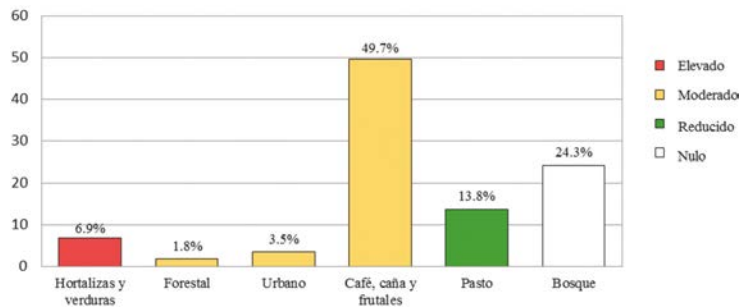


Figura 5. Cobertura de fuentes difusas con potencial generador de carga contaminante al subsuelo sobre las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. Elaboración propia.

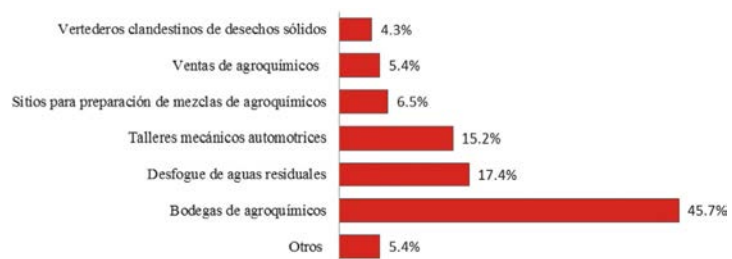


Figura 6. Fuentes puntuales con elevado potencial generador de carga contaminante al subsuelo en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. Elaboración propia.

Las fuentes puntuales con potencial de generación de carga contaminante al subsuelo en las subcuencas estudiadas fueron 186 en total. De estas, la mitad fueron clasificadas con potencial elevado, un 46 % con potencial moderado y un 4 % reducido. De las 92 fuentes puntuales con potencial de generación de carga contaminante elevado, casi la mitad fueron bodegas de almacenamiento de agroquímicos, seguidas por los sitios en donde se localizaron desfogues de aguas residuales domésticas y los talleres mecánicos automotrices; la mayor parte de estas actividades se localizaron cerca de los poblados de Capellades y Juan Viñas (Figura 6).

En menor cantidad, se encontraron cuatro vertederos de basura y chatarra clandestinos, cinco ventas de agroquímicos, donde se podrían presentar derrames accidentales de estos productos y, además, se localizaron seis sitios en donde los grupos agricultores disponen los estañones utilizados para preparar las soluciones de plaguicidas, a partir de los concentrados en polvo que se venden en los comercios de la zona (Figura 6).

De las 86 fuentes puntuales con potencial moderado, la mayoría correspondió a lecherías, mientras que las porquerizas y granjas avícolas fueron menos frecuentes



(Figura 7); la mayoría se localizó en la parte noroeste del área de estudio (Figura 4). Además, en la zona de estudio se localizaron seis centros de belleza, en los cuales se generan aguas residuales

con lavados de tintes y otros tratamientos químicos que, generalmente, se depositan sin tratamiento en los sistemas sépticos o en el drenaje pluvial urbano, lo cual representa una amenaza por lixiviación de estas sustancias tóxicas al subsuelo.

También, existe una planta de tratamiento para los residuos agroindustriales de una hacienda dedicada al cultivo y procesamiento de la caña de azúcar. Además, esta hacienda opera un beneficio de café, en el que se procesa todo el café cultivado en esta zona. Las aguas residuales de este proceso se vierten en una laguna de oxidación para efluentes, la cual representaría una fuente con potencial moderado de generación de carga contaminante, debido a la elevada cantidad de materia orgánica en ella. Los efluentes de la planta de tratamiento y de la laguna de oxidación se dirigen al río Maravilla, por tanto, aumentan la carga orgánica.

Así mismo, se localizaron siete fuentes puntuales consideradas como actividades con potencial reducido; entre ellas, talleres de ebanistería y cementerios. Al igual que las otras actividades, existe la posibilidad de lixiviación hacia las aguas subterráneas de sustancias provenientes de la descomposición de los cuerpos enterrados en cementerios o de las sustancias utilizadas en el teñido y tratamiento de maderas en las ebanisterías, a lo que se le suma la falta de controles sobre la disposición de estas sustancias.

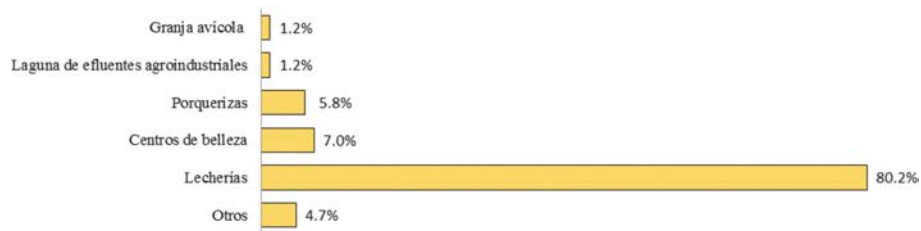


Figura 7. Fuentes puntuales con moderado potencial generador de carga contaminante al subsuelo en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. Elaboración propia.

En cuanto a las fuentes lineales de contaminación, de los 252 km lineales correspondientes a ríos, red vial y poliducto, un 89 % fue clasificado con un potencial moderado de generación de carga contaminante al subsuelo, un 10 % elevado y un 1 % reducido. Del total de kilómetros lineales clasificados como fuente lineal con potencial moderado, se encontró que un 71 % correspondió a la red vial y el resto a ríos y canales con una calidad del agua de “regular a mala”, según el indicador biológico del BMWP aplicado por Alfaro *et al.* (s. f.) o cuyas zonas de protección contenían fuentes de contaminación potencial difusas. Entre las fuentes lineales con potencial elevado, un 60 % correspondió a varios tramos de los ríos Maravilla y Quebrada Chiz, principalmente en las partes altas de las subcuencas. Estos tramos recorren terrenos cuyas zonas de protección de 15m están invadidas por actividades agrícolas y zonas urbanas, en las cuales existen desfuegos de aguas residuales hacia estos ríos; además, resultaron positivos para coliformes y su agua clasificada de “calidad muy mala” según los indicadores biológicos del BMWP. También se encontraron tramos que, a pesar de recorrer zonas boscosas, han sido clasificados con potencial elevado, pues sus aguas fueron clasificadas como “muy mala” según el BMWP, debido a la carga contaminante proveniente de cultivos estacionales aguas arriba (Figura 4).



El resto de las fuentes lineales con potencial elevado está conformado por el poliducto que se encuentra debajo o sobre del terreno, el cual transporta combustible fósil hacia la zona y que podría sufrir de alguna fuga subterránea, accidental o provocada, lo que podría contaminar el agua subterránea. Los tramos lineales que fueron clasificados con potencial reducido estuvieron asociados a tramos de ríos que recorren zonas boscosas y a niveles de calidad buena, según el BMWP aplicado por Alfaro *et al.* (s. f.) (Figura 4).

Amenaza dentro de las AP según radio fijo de 200m.

En los seis manantiales estudiados (Figura 1), las áreas de protección estuvieron

invadidas por fuentes lineales y difusas (Tabla 1). En 50 Manzanas, Buenos Aires, San Martín y Murcia (Figura 8 a-b-d y 9b), las áreas de protección incluyeron fuentes lineales con potencial moderado y elevado y más de un 50 % de estas áreas han sido invadidas por fuentes difusas con potencial moderado. En los manantiales N.º 2 y N.º 6, pertenecientes al grupo de manantiales conocidos como Quebrada Honda, el área de protección final incluyó las áreas de protección combinadas de ambos manantiales, debido a que, por su cercanía, dichas áreas se traslapan en la mayor parte de su extensión (Figura 8c). En estos dos manantiales, aproximadamente un 25 % del área por radio fijo está bajo una fuente difusa con potencial elevado a la contaminación (Figura 8c).

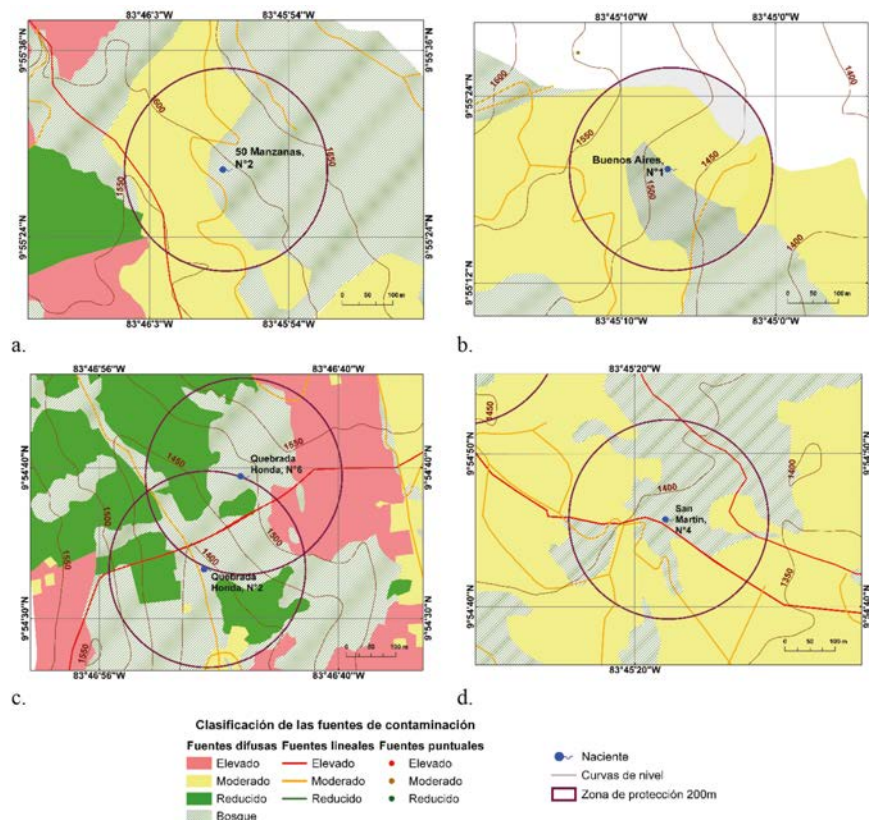


Figura 8. Áreas de protección según radio fijo de 200m para cuatro manantiales de abastecimiento público: a. 50 Manzanas, b. Buenos Aires, c. Quebrada Honda, d. San Martín; subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. Elaboración propia.



Los manantiales 50 Manzanas y Buenos Aires son los únicos que poseen la mayor parte de su AP bajo cobertura boscosa; una parte, con bosque secundario intervenido por la extracción de individuos maderables, representa una amenaza nula a la contaminación del agua subterránea (Figura 8 a-b). Sin embargo, más de la mitad de estas AP se encuentran bajo plantaciones de coníferas, a las que se les aplican fertilizantes, lo que podría generar una amenaza moderada a la calidad del recurso hídrico subterráneo. En Quebrada Honda, cerca del 15 % estuvo cubierta por fuentes difusas con potencial elevado por la presencia de cultivos de hortalizas y verduras. Adicional, en este manantial y en el de San Martín, el poliducto atraviesa el AP, el cual representa una fuente lineal con potencial elevado. De manera similar, en el manantial San Martín, cerca del 15 % del área de protección está cubierta de caña de azúcar, con potencial contaminante moderado (Figura 8d).

Por su parte, el manantial Congo posee su área de protección bajo cobertura de pasto, uso que se consideró como una fuente difusa con potencial reducido y, además, se encontró una carretera, considerada como fuente lineal moderada (Figura 9a). Finalmente, un 69,8% del área de protección del manantial Murcia se dedica a producción del cultivo de café y caña de azúcar, considerados en este estudio como fuentes difusas de contaminación con potencial moderado.

Tabla 1
Clasificación de uso de la tierra (has) en los 200 metros de zonas de protección de los manantiales de abastecimiento público en las subcuencas Chiz y Quebrada Honda

Manantial	Clasificación de uso de la tierra	Ha	%
50 manzanas	Bosque intervenido	5.89	46.9
	Coníferas	6.65	52.9
	Pastos	0.02	0.2
Buenos Aires	Bosque intervenido	4.36	34.7
	Caña de azúcar	0.84	6.7
	Coníferas	6.38	50.7
Congo	Pastos	0.98	7.8
	Bosque intervenido	2.77	22.1
	Pastos	9.47	75.6
Murcia	Urbano	0.28	2.3
	Bosque intervenido	1.52	12.1
	Bosque ribertino	0.65	5.1
Quebrada Honda	Caña de azúcar	1.83	14.6
	Café	6.93	55.2
	Pastos	1.63	13.0
	Bosque intervenido	10.14	49.9
	Bosque ribertino	0.73	3.6
San Martin	Café	0.13	0.6
	Hortalizas y verduras	2.96	14.6
	Pastos	6.08	29.9
	Urbano	0.30	1.5
San Martin	Bosque intervenido	6.25	49.7
	Caña de azúcar	6.32	50.3

Nota: Elaboración propia.

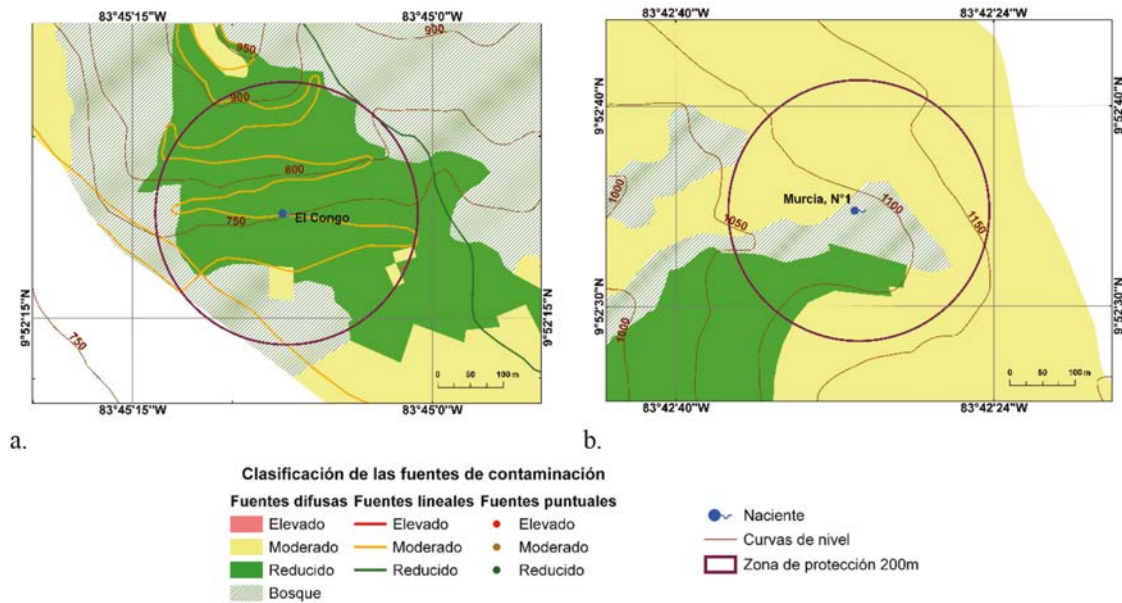


Figura 9. Áreas de protección según radio fijo de 200m para cuatro manantiales de abastecimiento público: a. El Congo, b. Murcia; subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. Elaboración propia.

Discusión

La presencia de fuentes difusas, lineales y puntuales con potencial generador de carga contaminante hacia el subsuelo en el área de estudio, debido a la posible lixiviación de sustancias químicas como nitratos, desde tanques sépticos y fertilizantes, plaguicidas, lubricantes, metales, entre otros, puede significar un riesgo para la salud de la población residente que se abastece de aguas subterráneas en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda.

Las actividades lecheras, porcinas y avícolas representan fuentes potenciales de contaminación no solo por la carga de desechos fecales generados en estos sitios productivos, sino también por el proceso de lavado de pisos e infraestructura de los recintos de los animales, el cual se realiza con mangueras, donde los desechos orgánicos escurren hacia el terreno adyacente. Ya sea

por deposición directa en el terreno o por el lavado de los pisos en los recintos, los desechos fecales se podrían lixiviar y, con ellos, algunas sustancias como nitratos, hormonas y antibióticos, entre otras.

Debido a que, entre los cultivos que demandan mayor aplicación de plaguicidas están los estacionales, la zona con mayor amenaza a la contaminación del agua subterránea es la parte alta. Fuhrmann et al (2018), con base en un estudio en Zarcero, Costa Rica, identificaron que a menudo no se evalúa la degradación de ingredientes activos ni de los metabolitos de los plaguicidas registrados. Mencionan que, aunque el sector agrícola se esfuerza por usar pesticidas de manera segura, existe una percepción de bajo riesgo en la agricultura, puesto que en las diferentes etapas de la cadena de manejo de pesticidas (almacenamiento, mezcla, preparación y aplicación) ocurre deriva de estas sustancias en el entorno.



Otra fuente potencial de contaminación es el lavado de estañones donde se preparan los plaguicidas, el cual se realiza frecuentemente en terrenos sin protección. En el 2010, otra investigación en las cuencas Pacayas-Plantón, adyacentes al área de estudio, identificó que el 86 % de los sujetos agricultores reconocieron lavar el equipo de aplicación en terrenos cerca de los cultivos o las bodegas y el 19 % dentro de la bodega, mientras que el 24 % entierra y bota los envases usados de plaguicidas (IRET, 2010b). Por procesos de lixiviación, estas sustancias altamente tóxicas (lubricantes, aceites, metales, plaguicidas y restos de otros agroquímicos) pueden moverse por las capas del suelo, contaminando algunos sectores del acuífero.

Por su parte, la descarga de aguas de tipo agrícola, doméstica o industrial a los ríos podría tener un alto impacto, no solo en las aguas superficiales sino en las subterráneas. Esto sigue representando una amenaza a la calidad del agua subterránea, aun cuando el acuífero es el que descarga en el río, es decir, cuando el río tenga un comportamiento efluente con respecto al acuífero, debido a que se puede dar lixiviación de sustancias contaminantes desde el lecho permeable del río (Foster *et al.*, 2002).

El radio fijo de 200 m para la protección de la calidad del agua de los manantiales utilizados para abastecimiento humano podría conllevar a la protección insuficiente de terrenos aguas arriba y a la protección innecesaria de un territorio aguas abajo. Las fuentes potenciales ubicadas aguas abajo de los manantiales no generan, necesariamente, amenaza a la calidad del agua subterránea. Esto debido que el agua subterránea no puede fluir aguas arriba, a menos que el flujo sea revertido por la fuerza de bombeo en pozos de extracción. A pesar de que lo más recomendable es proteger las áreas

estimadas con metodologías específicas cuando se cuente con información hidrogeológica necesaria, proteger los 200 metros de radio fijo arbitrario de ley procura, al menos, mantener pequeños parches de zonas de protección que, si bien no son relevantes como zona de influencia aguas abajo de las nacientes, permiten reducir procesos de deforestación y degradación de las cuencas.

A pesar de la importancia del ordenamiento territorial en la protección de los recursos hídricos, existe un débil ordenamiento en el cantón de Jiménez, el cual cuenta con su Plan Regulador Municipal en proceso de elaboración. En el cantón de Alvarado, dicho plan regulador fue aprobado hasta el año 2015. En ambos casos, el desarrollo agropecuario se generó previo a la planificación territorial, lo que se refleja en el desarrollo de actividades humanas potencialmente contaminantes dentro de las zonas de captura y áreas de protección de las fuentes a abastecimiento público. Inclusive, las plantaciones de coníferas no deberían ser consideradas como una cobertura boscosa compatible con los requerimientos de protección, ya que en ellos se podrían utilizar agroquímicos.

En el caso del manantial Quebrada Honda, parte del AP se encuentra sembrada con cultivos estacionales, los que representan una amenaza elevada por lixiviación de agroquímicos. Sin embargo, la eliminación de actividades humanas que generen cargas contaminantes al subsuelo en zonas de protección a manantiales requiere de un proceso jurídico complejo, debido a que la legislación costarricense únicamente establece la protección de un radio fijo de 200m alrededor de la fuente captada, aun cuando este radio pueda no ser suficiente en términos hidrogeológicos.



Conclusiones

Dada la presión agrícola en las subcuencas de los ríos Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, se identificaron niveles de amenaza a la calidad del agua subterránea, desde un nivel reducido a elevado. Así mismo, más de un 62 % del área posee un uso de suelo con potencial generador de cargas contaminantes de moderado a elevado, debido a la lixiviación de plaguicidas y nitratos provenientes de cultivos permanentes y estacionales, así como de tanques sépticos, sustancias que podrían causar enfermedades en la población que se abastece del agua subterránea.

La mayor parte de las fuentes difusas y puntuales con potencial elevado se encuentran en la cuenca alta, correspondiente a cultivos estacionales y bodegas de almacenamiento de agroquímicos. Además, la mayoría de las fuentes con potencial elevado, como sitios de desfogues de aguas residuales domésticas y los talleres mecánicos automotrices, se encuentran cerca de los centros poblados. Los cultivos de caña de azúcar y café abarcan la mayor parte del área de estudio, con un potencial moderado.

Finalmente, en este estudio se encontró incumplimiento de la ley 276 en los manantiales estudiados. En todos los casos, las AP incluyeron fuentes potenciales de contaminación lineales y difusas. En ninguna de las AP se encontró cobertura boscosa propia de la zona de manera significativa; solamente el manantial Quebrada Honda presentó un 53,5 % de bosque en su AP, el manantial San Martín, un 49,7 % de uso conforme con el reglamento y el manantial 50 Manzanas, con un 46,9 %; los demás no superaron el 35 %.

Recomendaciones

Las municipalidades involucradas deben priorizar en su inversión la realización de estudios hidrogeológicos para caracterizar, a profundidad, el tipo de roca del acuífero, fuente del acueducto y del abastecimiento de las familias abonadas. De manera complementaria, los parámetros obtenidos en estos estudios constituyen la base para la aplicación de metodologías, modelos de evaluación o predictivos por contaminación difusa del sistema hídrico, lo cual pueden ser los criterios para el establecimiento de las zonas de protección, o bien tramitar la compra de terrenos para la eliminación de las actividades potencialmente contaminantes.

Por otro lado, establecer e implementar programas de buenas prácticas agrícolas dirigidos a los grupos agricultores y enfocadas a la protección de los recursos hídricos, puede constituir el inicio de los cambios visibles en el mediano y largo plazo. Para lograrlo, se requiere de la intervención del Ministerio de Agricultura y Ganadería y de otras instituciones encargadas de la protección de la salud y el ambiente, con rectoría en vigilancia, capacitación y motivación al sector agrícola empresarial, sobre el manejo de biocidas y fertilizantes orgánicos, producción de cultivo mixto en lugar de monocultivos, dosis recomendadas de agroquímicos, la disposición adecuada de estañones usados para preparar las mezclas de plaguicidas y en el tratamiento adecuado de aguas residuales.

Así mismo, la conciliación o negociación ambiental con el Ingenio Juan Viñas, uno de los últimos latifundios azucareros del país, ocupa entre un 50 % al 60 % de las tierras dentro de las subcuencas. Las intervenciones en materia ambiental son primordiales para minimizar los impactos negativos de dicha actividad; un mecanismo para



lograrlo es el diseño e implementación de programas para recuperar la rivera arbolada en los ríos, el desfogue de aguas con residuos de caña de azúcar y café a los cauces, implementar buenas prácticas agrícolas e incorporar el manejo de cuencas en los planes de ordenamiento del territorio.

Finalmente, otro elemento clave en el manejo integrado de los recursos hídricos son los administradores del agua conformados como ASADAS que, en conjunto con el acueducto municipal, deberán establecer mecanismos para la zonificación de las áreas de protección de los manantiales de abastecimiento humano. Además, se recomienda la implementación, por parte de estos acueductos, de un mecanismo de vigilancia de la calidad del agua de estos manantiales, lo cual permitirá establecer las características físicas, químicas, microbiológicas y evaluar tendencias espacio/temporales de las concentraciones de parámetros indicadores de contaminación.

Reconocimientos

Este trabajo fue elaborado en el marco del proyecto de investigación “Herramientas para la protección del agua subterránea en las subcuencas Quebrada Honda y Maravilla-Chiz, Cartago, Costa Rica”, código 0280-15, desarrollado por el Laboratorio de Hidrología Ambiental de la Universidad Nacional.

Referencias

- Ahmed, M., Rauf, M. y Mukhtar, Z. (2017). Excessive use of nitrogenous fertilizers: an unawareness causing serious threats to environment and human health. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(35), 26983–26987. doi: <https://doi.org/s11356-017-0598-7>
- Alfaro-Arrieta, J., Fonseca-Sánchez, A., Guevara, M., Núñez-Solís, C. y Valiente-Álvarez, C. (2018). *Caracterización de la calidad del agua superficial en las subcuencas Quebrada*

- Honda y Chiz-Maravilla, Cartago Costa Rica*. Inédito.
- Bivolarska A. y Gatseva, P. (2015). Thyroid status in pregnant woman and association with nitrates as an environmental factor stimulating the manifestation of iodine deficiency. *Trace Elements and Electrolytes*, 32, 60-64. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/281731662_Thyroid_status_in_pregnant_women_and_association_with_nitrates_as_an_environmental_factor_stimulating_the_manifestation_of_iodine_deficiency
- Bravo, V., de la Cruz, M., Herrera, G. y Ramírez, F. (2013). Uso de plaguicidas en cultivos agrícolas como herramienta para el monitoreo de peligros en salud. *Uniciencia*, 27(1). 351-376. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/4759/475947762021.pdf>
- CENIGA. (s.f.). *Centro Nacional de Información Geoambiental*. Recuperado de <http://ceniga.sinac.go.cr/geonetwork/srv/eng/main.home>
- Denyer, P. y Arias, O. (1991). Estratigrafía de la región central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 12, 1-59. doi: <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i12.13039>
- Fernández, F. (2000). Introducción a la fotointerpretación. *Papeles de Geografía*, 37, 285-288. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/407/40703720.pdf>
- Fernández, J. (1987). *Geología de la Hoja Topográfica Tucurrique 1:50 000 IGNCR, 3445I* (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- 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*. Banco Mundial. Recuperado de <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf>
- Fuhrmann, S., Winkler, M., Staudacher, P., Weiss, F. Stamm, C., Eggen, R., Lindh, C., Menezes-Filho, J., Baker, J., Ramírez, F., Gutiérrez, R. y Mora, A. (2018). *Exposure to pesticides and health effects in farm owners and workers from conventional and organic agricultural farms in Costa Rica: a study protocol*. doi: 10.2196/preprints.10914
- IGN-Instituto Geográfico Nacional. (1986). *Hojas cartográficas Istarú y Tucurrique. Escala 1:50000*. 2da ed. San José, Costa Rica.



- IMN-Instituto Meteorológico Nacional. (2005). *Atlas Climatológico*. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/atlas-climatologico>
- INDER-Instituto de Desarrollo Rural de Costa Rica. (2014). Informe técnico de caracterización integral básica: Territorio Turrialba-Jiménez. Recuperado de https://www.inder.go.cr/territorios_inder/region_central/caracterizaciones/Caracterizacion-Turrialba-Jimenez.pdf
- INEC-Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2011). *Censo Nacional 2011* (base de datos en línea). Recuperado de <http://www.inec.go.cr/censos/censos-2011>
- INEC-Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2012). *Censo Nacional de Población y VI de Vivienda 2011: Resultados generales* (1^{era} ed.). San José, Costa Rica: Autor. Recuperado de https://www.cipacdh.org/pdf/Resultados_Generales_Censo_2011.pdf
- Instituto de Investigaciones en Ingeniería. (2010). *Informe final sobre caracterización de la geología superficial y subterránea del área de las estaciones acelerográficas RALT, CSLG, CCDN, CPAR, CCCH, sector central de la provincia de Cartago*. N.º 731-A9-123. Recuperado de http://www.lis.ucr.ac.cr/clase_index/tv/finales/pdf/16.pdf
- IRET-Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas. (2010a). *Informe técnico sobre Diagnóstico sobre contaminación de aguas, suelos y productos hortícolas por el uso de agroquímicos en la microcuenca de las quebradas Plantón y Pacayas en Cartago, Costa Rica*. Documento Técnico N.º 16, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- IRET-Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas. (2010b). *Reporte técnico de agroquímicos en ecosistemas hortícolas y pecuarios en la microcuenca de las quebradas Plantón y Pacayas en Cartago, Costa Rica*. doi: 10.13140/RG.2.2.20045.33766
- Jiménez, M. (2010). *Intervenciones basadas en la planificación y gestión territorial de los riesgos del agua y del medio ambiente con enfoque de multiculturalidad y género en el cantón de Jiménez, Cartago, Costa Rica* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos, Guatemala
- Krushensky, R. (1972). *Geología del cuadrángulo Istarú*. *Geological Survey Bulletin* N.º 1358. Washington: United States Government Printing Office.
- Ley N.º 276. *Diario Oficial La Gaceta República de Costa Rica, San José, Costa Rica, 28 de agosto de 1942*.
- MAG-Ministerio de Agricultura y Ganadería. (1991). *Aspectos técnicos sobre cuarenta y cinco cultivos agrícolas de Costa Rica*. Autor.
- Mora, H. y Ramírez, P. (2015). Delimitación y caracterización de unidades geológicas a partir del modelado numérico del terreno en el distrito de Juan Viñas, Cartago. *Rev. Geográfica América Cent*, 54, 89–111. Recuperado de <https://doi.org/10.15359/rgac.1-54.4>
- Obando, L. (1984). Unidad litoestratigráfica Tuis. En P. Sprechmann (Ed.); *Manual de Geología de Costa Rica* (Vol. 2). San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Poder Ejecutivo de Costa Rica. (2007). *Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales*, N.º 33903-MINAE-S. N.º Gaceta 178. Recuperado de http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/de-33903reglamento_evaluacion_clasificacion_cuerpos_de_agua_0.pdf
- PREVDA- Programa Regional de Reducción de la Vulnerabilidad y Gestión Ambiental. (2010). *Caracterización del cantón de Jiménez, Cartago, Costa Rica. Énfasis: Planificación y gestión territorial de los riesgos, del agua y del medio ambiente, con enfoque de multiculturalidad y género*. Publicación ME-136. Recuperado de <http://bvssan.incap.int/local/ME/ME-136.pdf>.
- Ramírez, F., Fournier, M., Ruedert, C. y Hidalgo, C. (2014). Uso de agroquímicos en el cultivo de papa en Pacayas, Cartago, Costa Rica. *Agroonomía Mesoamericana*, 25(2), 337-345. doi: <https://doi.org/10.15517/am.v25i2.15441>
- Reynolds-Vargas, J., Fraile, J., y Hirata, R. (2006). Trends in Nitrate Concentrations and Determination of Its Origin Using Stable Isotopes (¹⁸O and ¹⁵N) in Groundwater of the Western Central Valley, Costa Rica. *Ambio*, 35(5), 229-236. Recuperado de <http://www.jstor.org.una.idm.oclc.org/stable/4315727>
- Ward, M.H. (2009). Too much of a good thing? Nitrate from nitrogen fertilizer and cancer. *Reviews on Environmental Health*, 24(4), 357-363.
- Weyer, P., Cerhan, J., Kross, B., Hallberg, G., Kantamneni, J., Breuer, G., Jones, M., Zheng, W., Lync, C. (2001). Municipal Drinking Water Nitrate Level and Cancer Risk in



Older Women: The Iowa Women's Health Study. *Epidemiology*, 12(3), 327-338. doi: 10.1097/00001648-200105000-00013

WHO- World Health Organization. (2011). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). Recuperado de http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151_eng.pdf;jsessionid=96C733DEF6FD859DEE-825BFB34823A5D?sequence=1



Evaluación de la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección a manantiales en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica (Alicia Fonseca-Sánchez y otros) por [Revista Uniciencia](#) se encuentra bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 3.0 Unported](#).