

Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de la Cuenca Dolores-Sagua la Chica, Cuba

Rosa María Valcarce Ortega e-mail: rosy@tesla.cujae.edu.cu
Ingeniera Geofísica. Profesora Titular. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, (Cujae). Habana.

Rafael Jiménez Reyes e-mail: jai@eiphvc.hidro.cu
Ingeniero Geofísico, Especialista de la Empresa de Recursos Hidráulicos de Villa Clara.

RESUMEN

Los mapas de vulnerabilidad de los acuíferos permiten diferenciar las características naturales del medio geológico para proteger al acuífero de la acción de múltiples contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie asociados con fenómenos naturales o con la actividad del hombre. El artículo que se presenta evalúa la vulnerabilidad natural y el riesgo de contaminación de la Cuenca Dolores – Sagua la Chica, ubicada al noreste de la provincia de Villa Clara, Cuba, aplicando la metodología *PATHS*, la cual valora la vulnerabilidad de los acuíferos a partir del análisis de: Profundidad del agua subterránea, Precipitaciones, Medio Acuífero, Tectónica, Topografía del terreno y Conductividad Hidráulica del Suelo. Como resultado final se presenta el Mapa de Vulnerabilidad y el Mapa de Riesgo de Contaminación para esta cuenca a escala 1:100 000.

Palabras clave: aguas subterráneas, calidad del agua, contaminación de las aguas subterráneas, medio ambiente, vulnerabilidad intrínseca de acuíferos.

Vulnerability and contamination risk in Dolores-Sagua la Chica basin, Cuba

ABSTRACT

Aquifers vulnerability maps allow differentiating the natural characteristics of the geological environment to protect the aquifer from the action of multiple pollutants that can infiltrate from the surface, associated to natural phenomena or to man's activity. This paper evaluates the natural vulnerability and risk of contamination of the Cuenca Dolores - Sagua La Chica, located northeast of Villa Clara, Cuba. The *PATHS* methodology is applied, which values aquifers vulnerability analyzing: Precipitations and groundwater level, Aquifer, Tectonic and Topography of the land and Soil Hydraulic Conductivity. As a final result the Map of Vulnerability and the Map of Contamination Risk are obtained for the basin at a scale of 1:100 000.

Keywords: groundwater, water quality, groundwater pollution, environment, intrinsic vulnerability of aquifer.

INTRODUCCIÓN

El término “vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación” fue introducido por el hidrogeólogo francés J. Margat en la década del 60, basado en el hecho de que, en cierta medida, el medio físico protege al acuífero de los contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie. Desde entonces se han sucedido numerosas definiciones, calificaciones y metodologías sobre el mismo y en la actualidad continúan siendo los mapas de vulnerabilidad una útil herramienta para desarrollar estrategias de protección de las aguas subterráneas (Hemmati et al. 2014), (Hind 2014, (Amadi et al. 2014).

En el presente trabajo se considera que la vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de un sistema acuífero que depende de su sensibilidad a los impactos naturales y antropogénicos. Este concepto tiene gran utilidad en los trabajos de planificación de uso del territorio y del agua, particularmente en lo que respecta a la preservación de la calidad de este recurso. Considera que la vulnerabilidad del acuífero es una función de las características hidrogeológicas del acuífero, de los suelos y materiales geológicos que lo cubren. En esencia, el medio físico puede darle cierto grado de protección a los acuíferos al actuar de purificador del agua contaminada cuando percola a través del suelo y de otros estratos de la zona no saturada, y cuando viaja a través del acuífero. El grado de atenuación que el ambiente físico pueda efectuar determina el potencial relativo con que el acuífero se contamina.

Todo esto se evalúa a partir de innumerables parámetros básicos, escogidos adecuadamente. La literatura especializada (Foster et al. 2003), (Heredia y Fernández 2008) reconoce como principales parámetros para evaluar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero los siguientes: *suelo* (espesor, textura, estructura, porosidad, humedad, contenido de materia orgánica, contenido de arcilla mineral, permeabilidad), *zona no saturada* (espesor, porosidad, humedad relacionada con, sobre todo, el nivel del agua subterránea, litología de los materiales existentes y su consolidación y estratificación, tiempo de recorrido del agua), *acuífero o zona saturada* (espesor, profundidad hasta el agua subterránea, litología predominante y su estratificación y consolidación, porosidad efectiva, conductividad hidráulica, capacidad de almacenamiento, transmisividad, dirección del flujo de agua subterránea, edad y tiempo de residencia del agua subterránea, lluvia anual y recarga natural anual).

En general, los mapas de vulnerabilidad deben ser vistos como una de las herramientas principales para el manejo del medio ambiente y pueden ser usados con propósitos de toma de decisión concernientes al manejo de los recursos hídricos subterráneos, para identificar áreas susceptibles a la contaminación y decidir sobre las investigaciones y redes de monitoreo, en planes informativos y educativos sobre la necesidad de proteger los acuíferos y evitar la contaminación de las aguas subterráneas, insistiendo en que los acuíferos constituyen parte fundamental en el sistema ecológico que está siendo afectado por la actividad humana.

El objetivo fundamental de los mapas de vulnerabilidad de acuíferos es la subdivisión del área en diferentes unidades homogéneas, a veces llamadas celdas o polígonos, que tienen diferentes niveles de vulnerabilidad. Sin embargo, esta diferenciación entre las celdas, solo muestra la vulnerabilidad relativa de unas áreas con respecto a otras, no representa valores absolutos.

En Cuba existe experiencia en la confección de mapas de vulnerabilidad de acuíferos basados en la importante información geológica, hidrogeológica, edafológica, meteorológica y en el desarrollo y asimilación de módulos computacionales como los Sistemas de Información Geográficos (SIG) y la Cartografía Digital. A partir de la década de los años noventa se han realizado varios estudios sobre el tema, de lo cual son exponentes Hernández y Carrillo (1992), Carrasco (2001), Jiménez (2009), entre muchos otros investigadores.

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es la región acuífera del noreste de Villa Clara, conformada por la Cuenca Dolores – Sagua La Chica, que abarca un área de 1087 km² y se desarrolla en forma de franja con dirección noroeste paralela a la Bahía de San Juan de los Remedios, desde el río Sagua La Chica por el oeste hasta el límite con la provincia de Sancti Spíritus por el este. Por el sur se extiende hasta el límite de la región cársica que coincide con el parteaguas subterráneo regional. La figura 1 muestra la ubicación geográfica del área estudiada.

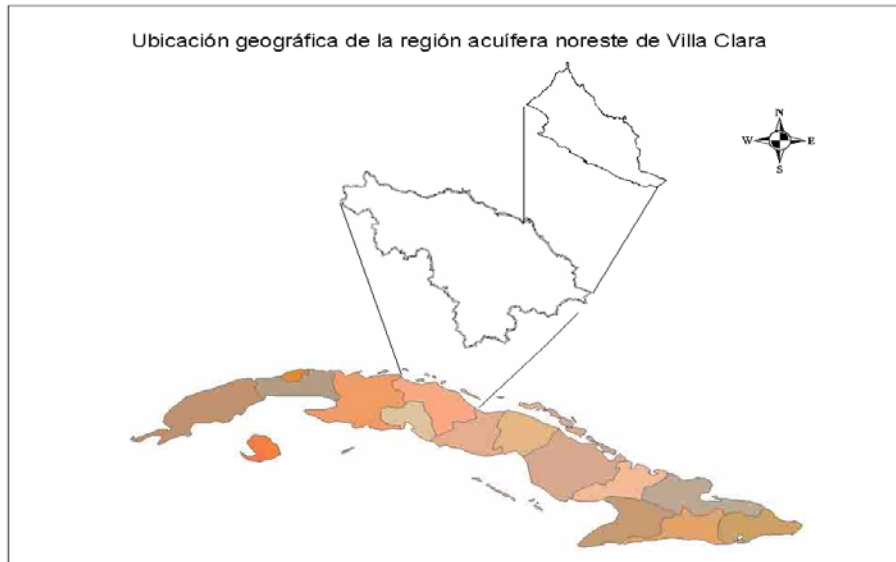


Figura 1. Ubicación geográfica de la región estudiada

Los suelos de la región poseen alta fertilidad y el creciente desarrollo de la agricultura incrementa cada año los volúmenes de fertilizantes a verter por hectárea, destacándose los fertilizantes químicos como una de las fuentes más importantes de contaminación de las aguas subterráneas. El clima, al igual que en el resto del país, es subtropical húmedo, con dos estaciones claramente definidas: la seca (invierno) de noviembre a abril, y la lluviosa (verano) de mayo a octubre. Su temperatura media anual es de 25,5 °C y las precipitaciones medias anuales de 1320 mm. Predomina un relieve del tipo llanuras denudativas amplias, con cotas entre 100 m y 150 m sobre el nivel medio del mar. En el interior de estas llanuras se observa una gran cantidad de alturas tectónico-estructurales representadas por bloques aplanados con cotas entre 200 m y 250 m, con pendientes que oscilan entre 5° y 15°, y disección entre 10 y 100 m/km².

La mayor parte de la costa norte está ocupada por llanuras marinas abrasivas y abrasivo-acumulativas planas débilmente diseccionadas, con cotas variables entre 30 m y 50 m y las pendientes oscilan entre 0° y 30°. Las llanuras marinas están representadas por zonas lacustres, palustres y cenagosas. Se pueden observar además alturas tectónico-erosivas, representadas por horst y bloques medianamente diseccionados, con pendientes entre 3° y 30°, con cotas entre 150 m y 300 m, con escarpas erosivas y otras formas cársicas del relieve, tales como dientes de perro, furnias, sumideros. También se observan pendientes de valles de erosión vertical asociadas con varios ríos.

En la región se encuentran rocas carbonatadas con edades que oscilan desde el Jurásico Superior Tithoniano hasta los sedimentos del Cuaternario. Se describen fundamentalmente elementos del sustrato plegado y predominan los de naturaleza continental, representados por los terrenos de la Plataforma de las Bahamas y sedimentos del Protocaribe. Además, se observan rocas del Sistema Paleógeno y rocas del Sistema Cuaternario. Destacan rocas de la Zona Remedios y de la secuencia Camajuaní predominando las calizas microcristalinas, organógenas, en menor grado detríticas, con intercalaciones de dolomitas.

El espesor de la capa de cobertura varía dentro de dos intervalos fundamentales: de 0 a 5 m y de 10 a 20 m. El intervalo de 0 a 5 m corresponde con la zona de alimentación del manto acuífero y ocupa la mayor parte de su superficie; el intervalo de 10 a 20 m se corresponde con la zona de almacenamiento del manto acuífero. Existen lugares con espesores superiores de la capa de cobertura alcanzando de 20 a 30 m.

La trasmisividad predominante del acuífero, desarrollado en las rocas colectoras carsificadas difundidas en la región, está en el rango entre 1000 y 5000 m²/día y diseminados en distintos sectores se observan valores menores y mayores lo cual se explica por la elevada heterogeneidad y anisotropía de los macizos cársicos tanto en sentido horizontal como vertical. La conductividad hidráulica predominante de las rocas colectoras carsificadas varía entre 100 y 250 m/día y diseminados en distintos sectores se observan valores mayores y menores. El coeficiente de almacenamiento del acuífero varía desde 0,031 hasta 0,060. Los caudales predominantes por sectores del acuífero se presentan en dos intervalos fundamentales, el intervalo de acuosidad más ampliamente difundido es el situado en el rango de 50 a 100 L/s; el otro intervalo es el comprendido en el rango de 10 a 25 L/s y ocupa una estrecha franja al sur de la región.

La alimentación de las aguas subterráneas ocurre fundamentalmente en su parte sur, donde el espesor de la capa de cobertura es menor que 5 m y por tanto se facilita la infiltración de las aguas pluviales, principal fuente de alimentación, y de las aguas de escorrentía provenientes de las laderas o corrientes superficiales de los ríos Viñas, Bartolomé y otros que se sumergen. Ello explica los elevados recursos de agua subterránea existentes en esta región.

Las hidroisohipsas trazadas permiten determinar la dirección y sentido del flujo de agua subterráneo, que en esta región se orienta perpendicularmente a las estructuras geológicas con rumbo SO-NE. En la zona de alimentación predominan las cotas más elevadas, en la zona de descarga las cotas bajas entre 5 m y 10 m. El valor del gradiente hidráulico medio varía desde 0,0021 hasta 0,0026 (Ramos y Burgos 2006).

Como reflejo directo de las características hidrogeológicas descritas, la región presenta considerables recursos hídricos distribuidos de manera no uniforme en los distintos bloques que la componen (Jiménez 2009).

CALIDAD DE LAS AGUAS Y PROBLEMAS DE CONTAMINACIÓN

Se considera un agua contaminada aquella que ha sido afectada por la acción del hombre en tal magnitud, que sobrepasa los valores máximos permisibles de las concentraciones establecidas por los patrones nacionales o internacionales para los diferentes usos del agua.

Las actividades humanas producen gran cantidad de desechos y provocan perturbaciones en el ciclo hidrogeológico y en la circulación de las aguas. El resultado es, con frecuencia, una contaminación de las mismas, unas veces de forma reparable y otras veces prácticamente irreversible. En el caso de las aguas subterráneas, al no ser visibles y estar su explotación muy

difundida, las acciones protectoras llegan con frecuencia demasiado tarde, y por lo general la contaminación se hace perceptible cuando ha alcanzado un importante desarrollo en extensión.

Los posibles orígenes de la contaminación en la región estudiada son muy variados y pueden resumirse de la manera siguiente: contaminación por actividades agrícolas, por actividades industriales, por actividades domésticas y por la actividad ganadera.

La caracterización más aproximada del riesgo a la contaminación del agua subterránea consiste en la interacción de la carga contaminante aplicada sobre el acuífero desde la superficie con la vulnerabilidad del acuífero (Foster et al. 2003).

La figura 2 expresa la relación entre la vulnerabilidad natural del acuífero y la carga contaminante, lo cual permite establecer cualitativamente el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y cartografiar las áreas críticas que serán las que resulten presentando riesgos de contaminación altos o extremos.

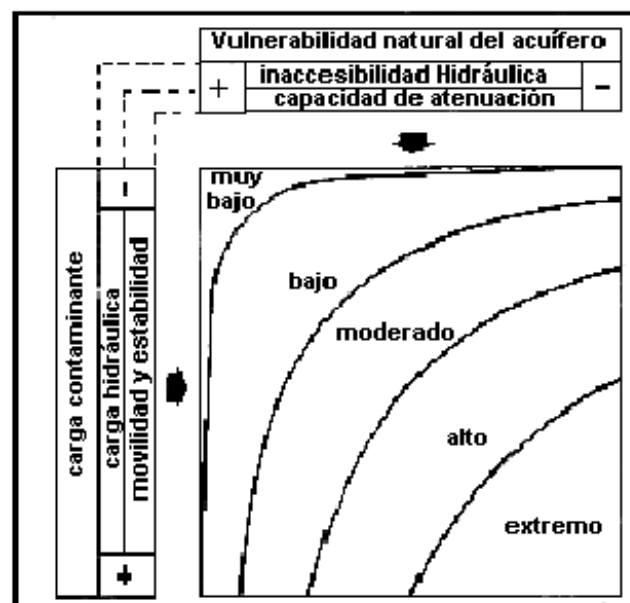


Figura 2. Esquema conceptual del riesgo de contaminación del agua subterránea (Foster et al. 2003)

METODOLOGÍA APLICADA Y RESULTADOS OBTENIDOS

La metodología aplicada en este trabajo para evaluar la vulnerabilidad del acuífero es la metodología *PATHS*, desarrollada por Valcarce y Rodríguez (Rodríguez et al. 2010).

Esta metodología evalúa la vulnerabilidad natural de los acuíferos a partir del análisis de: Profundidad del agua subterránea, Precipitaciones, Medio Acuífero (profundidad del nivel freático, litología del acuífero), Tectónica (presencia de fallas), Topografía (pendiente del terreno) y Conductividad Hidráulica del Suelo. Se aplica un sistema de rangos ponderados a cada uno de los parámetros analizados para calcular un índice denominado *PATHS* que resulta proporcional a la vulnerabilidad natural o intrínseca del acuífero. La tabla 1 resume este planteamiento.

Tabla 1. Variables empleadas en el cálculo del índice *PATHS*

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	PARÁMETROS EMPLEADOS
P	Profundidad del agua y Precipitaciones
A	Acuífero (litología)
T	Tectónica y Pendiente Topográfica
H S	Conductividad Hidráulica del Suelo

A continuación se justifica el empleo de cada uno de estos parámetros, su división por rangos y la importancia que se le atribuye a cada uno de ellos.

En sentido general, en zonas donde la precipitación es baja, la acción solvente del agua provoca que grandes cantidades de sales sean transportadas hasta la zona saturada, contaminando de esta manera las aguas del subsuelo hasta limitar su utilización. Sin embargo, elevados niveles de precipitaciones pueden mitigar el impacto del agente contaminante, ya sea disminuyendo su concentración y/o transportándolo hacia zonas alejadas en forma de flujo superficial.

Para diferentes sectores de la cuenca se estudió la variación de la media de precipitación anual en el período comprendido entre los años 1995 y 2005, la que oscila entre 1150 mm y 1650 mm (Ramos y Burgos 2006). La metodología asigna peso cuatro (4) a esta variable que queda dividida en los rangos que se establecen en la tabla 2.

Tabla 2. División por rango de la variación de la media de precipitación anual entre 1995 y 2006 (Pp)

Precipitaciones (mm)	Rango
≤ 1200	10
1201-1350	9
1351-1450	8
1451-1550	7
1551-1650	5

El nivel freático presenta variaciones en las diferentes estaciones del año, por lo que es recomendable considerar la profundidad del nivel superior de las aguas subterráneas en épocas del nivel más alto de las mismas. Mientras más profundo sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será el espesor de la zona no saturada y por tanto será mayor la capacidad de atenuación de los contaminantes. La metodología establece peso cinco (5) a esta variable y para el acuífero estudiado se asignaron los rangos que aparecen en la tabla 3.

La litología es una variable muy importante porque los principales fenómenos de difusión y dispersión de los agentes contaminantes dependen de la granulometría, textura, fraccionamiento, porosidad y permeabilidad de las rocas donde se encuentra el acuífero. Estas características definen la capacidad del medio geológico para atenuar o restringir el transporte de los contaminantes por el acuífero. Las rocas que poseen mayor permeabilidad hacen más vulnerable al acuífero. En el área de estudio la litología del acuífero está caracterizada fundamentalmente por rocas carbonatadas, carbonatadas terrígenas y humedales. La metodología asigna peso tres (3) a esta variable y establece la división por rango que aparece en la tabla 4.

Tabla 3. División por rango para la profundidad del agua subterránea (P)

Profundidad del agua (m)	Rango
0,5-10	10
10 -20	6
20-30	1

Tabla 4. División por rangos para la litología del acuífero (Lit)

Litologías	Rango
carbonatadas cársicas carbonatadas clásticas, clásticas, humedales	10
carbonatadas terrígenas	8
terrígenas carbonatadas	6
ultrabásicas	3
evaporitas, metamórficas, vulcanógenas	1

La presencia de fallas en el medio geológico favorece el desarrollo de fracturas y puede provocar el incremento de la porosidad secundaria y la permeabilidad de las rocas disminuyendo la capacidad de atenuación de los contaminantes en la zona no saturada. La metodología establece peso uno (1) a esta variable y la división por rangos que resume la tabla 5.

Tabla 5. División por rangos para la tectónica (T)

Presencia de Fallas	Rango
zona con presencia de fallas	5
zona sin presencia de fallas	0

La topografía indica la posibilidad de que un agente contaminante tienda a moverse como escorrentía superficial o que, por el contrario, tienda a permanecer sobre el sitio; aumentando el tiempo disponible para que infiltre y pase a formar parte del agua subterránea.

Se considera en esta metodología que a menor pendiente del terreno mayor vulnerabilidad del acuífero, y que las pendientes elevadas favorecen la escorrentía superficial y hacen que

disminuya la infiltración de los contaminantes. La tabla 6 resume la división por rangos para esta variable a la cual se asigna peso uno (1).

Tabla 6. División por rangos para la pendiente topográfica (PendTop)

Pendiente topográfica (%)	Rango
≤ 1	10
1.1-3	8
3.1-7	5
7.1-10	3
10.1-18	1

El suelo tiene una importante función en la atenuación de los contaminantes que se depositan en la superficie de los acuíferos. Las propiedades de los suelos más importantes en este sentido incluyen la textura, estructura, contenido de materia orgánica, tipos de minerales arcillosos, permeabilidad y otros (Heredia y Fernández 2008). Lo importante es identificar un parámetro capaz de cuantificar la resistencia que hace el suelo a la infiltración de contaminantes y por ello la metodología propuesta considera la conductividad hidráulica del suelo, la cual indica el tiempo aproximado que demora el flujo por unidad de gradiente de carga, en atravesar verticalmente varias capas de sedimentos. A mayor conductividad hidráulica del suelo, mayor vulnerabilidad del acuífero que lo subyace.

A partir del mapa de suelos en el área de estudio (Paneque et al. 1991) y de las investigaciones de Custodio (1995) que permiten estimar la conductividad hidráulica (expresada en m/día) para diferentes tipos de suelos, fue posible reclasificar el mapa de suelos según los rangos mostrados en la tabla 7. A esta variable se asignó peso cinco (5).

Tabla 7. División por rangos para la conductividad hidráulica de los suelos (HS)

Tipo de Suelo	HS (m/días)	Rango
arena y carso desnudo	10^0-10^{-2}	10
suelos ferralíticos rojos	$10^{-2}-10^{-4}$	8
loams, limos, turbas	$10^{-4}-10^{-5}$	6
arcillas compactas	$10^{-5}-10^{-7}$	3
gleys	$< 10^{-7}$	1

Fue necesario utilizar un modelo geoespacial para integrar las variables ya descritas y calcular el índice *PATHS*, que es proporcional al grado de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. Toda la información fue representada en el sistema ArcGIS y el procesamiento fue realizado haciendo uso de las ventajas que ofrece este sistema. Fueron creados en formato ráster los mapas temáticos de: profundidad del nivel freático, precipitación media anual, litología del acuífero, zonas con presencia de fallas, pendiente topográfica y conductividad hidráulica de los suelos.

Cada uno de estos mapas fue reclasificado según los rangos ya definidos y fueron ponderados con sus pesos correspondientes. Finalmente se procedió a sumar estos mapas temáticos para calcular el índice *PATHS* como:

$$PATHS = 5P + 4Pp + 3Lit + T + PendTop + 5HS \quad (1)$$

Analizando la variabilidad del índice *PATHS*, la vulnerabilidad en cada celda del mapa fue clasificada como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Clasificación de la vulnerabilidad del acuífero según el índice *PATHS*

<i>PATHS</i>	Vulnerabilidad
< 100	baja
101-120	moderada
121-140	alta
>140	extrema

Como resultado de aplicar la metodología *PATHS* en el estudio de la vulnerabilidad natural de acuíferos en la región noreste de la provincia de Villa Clara, se construyó el mapa que se muestra en la figura 3. Este mapa muestra la distribución de áreas por categoría de vulnerabilidad. Un 1,7 % del territorio posee una vulnerabilidad baja, el 12,6 % presenta vulnerabilidad moderada, el 80,2 % posee una vulnerabilidad alta y el 5,5 % una vulnerabilidad muy alta o extrema.

En general las zonas más vulnerables corresponden a las llanuras costeras y a zonas donde el nivel freático se encuentra a poca profundidad con respecto a la superficie del terreno, las litologías del acuífero están representadas fundamentalmente por rocas carbonatadas con manifestaciones cársicas y las pendientes topográficas no favorecen el desarrollo de la escorrentía superficial. Las zonas moderadamente vulnerables y no vulnerables se localizan en las zonas de mayores pendientes topográficas que favorecen la escorrentía superficial y en las que las litologías presentes son rocas menos agrietadas y menos permeables.

Una de las características hidrogeológicas más distintivas de este acuífero es la poca profundidad de yacencia de sus aguas las cuales varían entre 0 y 20 metros, observándose los valores mínimos en la franja costera donde se produce, además, un incremento notable del contenido de sales solubles totales, sobrepasando en ocasiones la línea del gramo por litro el cual es otro fenómeno de gran incidencia en la calidad de las aguas subterráneas. La evaluación de la vulnerabilidad de este acuífero a la contaminación por intrusión salina no forma parte de los objetivos de este trabajo.

Superponiendo el mapa de vulnerabilidad natural del acuífero con la ubicación y caracterización de fuentes puntuales de contaminación ubicadas en la superficie de la región estudiada, fue posible definir cualitativamente las zonas de mayor riesgo a la contaminación (figura 4). Este mapa de riesgo de contaminación es el resultado de analizar la relación entre la carga contaminante de estas fuentes y la vulnerabilidad natural de la cuenca, expresada conceptualmente en la figura 2. Las zonas de mayor riesgo de contaminación se corresponden con niveles de vulnerabilidad alto sobre las cuales se ubican áreas densamente pobladas y de mayor desarrollo industrial, con presencia de centrales azucareros, refinerías, granjas porcinas y tenerías.

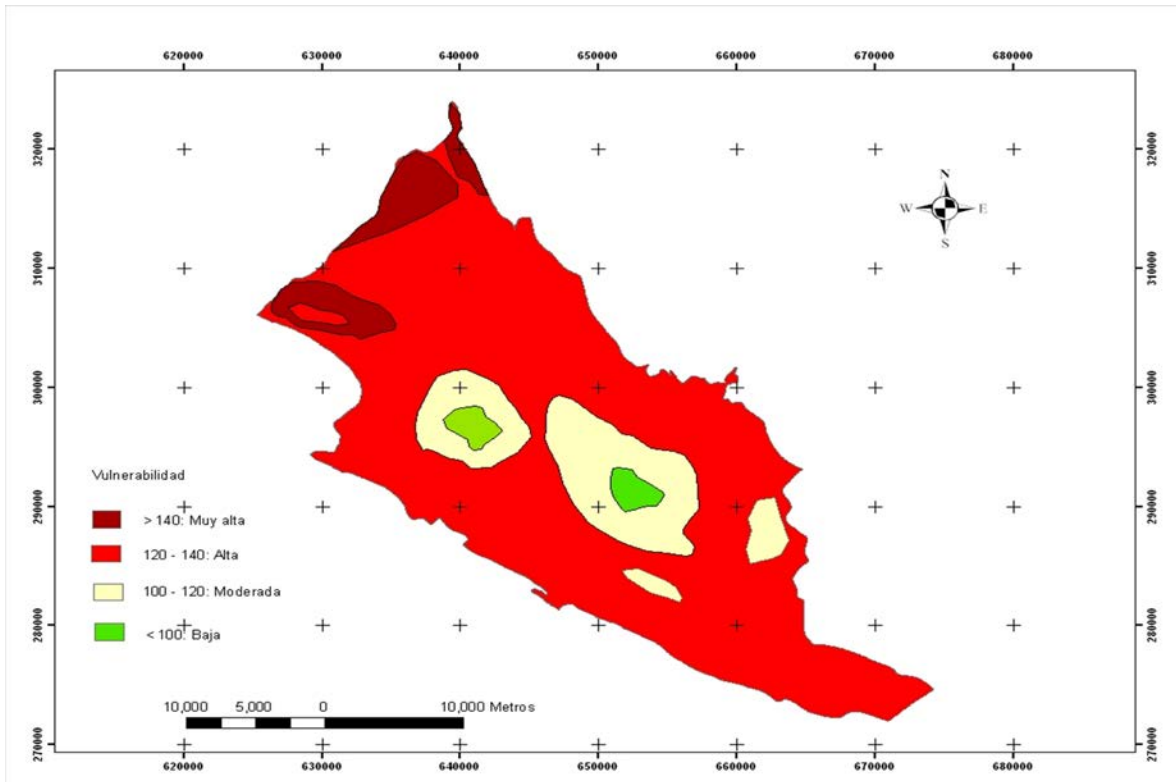


Figura 3. Mapa de vulnerabilidad natural de la Cuenca Dolores – Sagua la Chica empleando la metodología *PATHS*

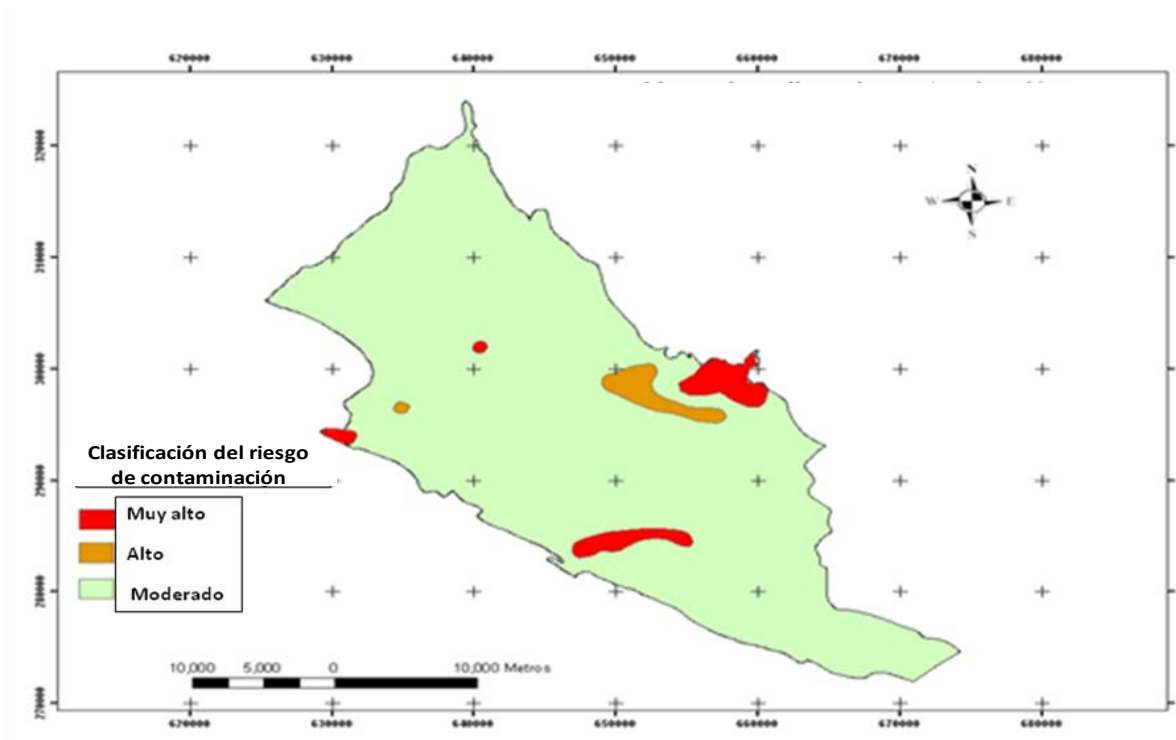


Figura 4. Mapa de riesgo de contaminación de la Cuenca Dolores – Sagua la Chica

CONCLUSIONES

- Los mapas de vulnerabilidad de acuíferos permiten evaluar la protección que brinda el medio geológico a la contaminación del agua subterránea y cualquier metodología que se emplee para ello será de mayor o menor confiabilidad en dependencia de la cantidad y calidad de la información disponible.
- La metodología *PATHS*, desarrollada en Cuba, es una alternativa para cartografiar la vulnerabilidad natural de los acuíferos en condiciones de escasa información hidrogeológica, a diferencia de otras metodologías reportadas en la literatura como la ampliamente aplicada metodología *DRASTIC* que exige información de difícil acceso.
- Los acuíferos estudiados presentan alta vulnerabilidad natural y las zonas de alto riesgo a la contaminación coinciden con lugares de mayor desarrollo urbano y agroindustrial como es el caso de los municipios de Caibarién, Remedios y Camajuaní.
- Estos estudios constituyen punto de partida para desarrollar programas de educación ambiental que permitan lograr un uso responsable del suelo, así como para decidir sobre investigaciones y redes de monitoreo a escalas más detalladas que aporten la información necesaria para dictar políticas de control a las actividades agrícolas, industriales y urbanas.
- Se recomienda desarrollar estudios en la zona para calibrar el método *PATHS*, haciendo mediciones de la calidad del agua subterránea y analizando su correlación con la vulnerabilidad del acuífero. De esta manera será posible analizar la sensibilidad de los parámetros, de los rangos y pesos asignados. Se recomienda también continuar estas investigaciones desarrollando metodologías que permitan evaluar integralmente la contaminación del acuífero por la infiltración de los contaminantes superficiales provenientes de fuentes puntuales y difusas y por la intrusión del agua de mar.

REFERENCIAS

- Amadi A. N., Olasehinde P. I., Nwanwoala H. O., Dan-Hassan M. A. and Okoye N. O.** (2014). “Aquifer vulnerability studies using *DRASTICA* Model”. *International Journal of Engineering Science Invention*, vol. 3, no. 3, ISSN (Online): 2310-6734, ISSN (Print): 2319 - 6726, extraído de <http://www.ijesi.org> en septiembre 2014.
- Carrasco H.** (2001). “Confeción del mapa de vulnerabilidad intrínseca en la Costera Sur de la Habana, Sector Guira Quivicán utilizando el Método *GOD*”. Tesis de Maestría en Geofísica Aplicada, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.
- Custodio E.** (1995). “Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la polución”. *II Seminario Hispano–Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea*, Serie *Correlación Geológica*, no. 11, pp. 99-122, ISSN 1514-4186, ISSN 1666- 9479 (online), CONICET, Santa Fé, Argentina.

- Foster S., Hirata R., Gómes D., D'Elia M. y Paris M.** (2003). “Protección de la calidad del agua subterránea, guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales”. World Bank, pp. 17-58. Washington.
- Hemmati F., Sajadi Z. and Jamshidi A. R.** (2014). “Assessment of groundwater vulnerability in the Borazjan aquifer of Bushehr, south of Iran, using GIS technique”, Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences, vol. 4, pp. 415-425, ISSN 2231-6345 (online), Centre for Info Bio Technology (CIBTech), India, extraído de <http://www.cibtech.org/sp.ed/jls/2014/03/jls.htm> en septiembre 2014.
- Heredia O. y Fernández A.** (2008). “Importancia de las propiedades de los suelos en la determinación del riesgo de contaminación de acuíferos”. Revista Suelo, vol. 26, no. 2, pp. 131-140, ISSN 1850-2067 (on-line), Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Santa Fé, Argentina.
- Hernández R. y Carrillo E.** (1992). “Evaluación de las condiciones de la cuenca Almendares (Vento) que propician la protección de sus aguas contra la contaminación”. Informe Técnico, Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos, INRH, La Habana.
- Hind M. A.** (2014). “New groundwater vulnerability index for the main aquifers in central catchment area in Jordan and validation of the results using NO₃ concentrations maps”. World Environment, vol. 4, no. 1, pp. 22-32, ISSN 2163-1573, ISSN 2163-1581 (on line), Scientific & Academic Publishing, California, USA, extraído de <http://www.journal.sapub.org/env> en septiembre 2014.
- Jiménez R. R.** (2009). “Estudio de la vulnerabilidad natural de la región acuífera noreste de Villa Clara”. Tesis de Maestría en Geofísica Aplicada, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.
- Paneque J., Fuentes, E., Mesa A. y Echemendía A.** (1991). “El Mapa Nacional de Suelos Escala 1:25000”. Instituto de Suelos, Ministerio de la Agricultura, Cuba.
- Ramos H. y Burgos M.** (2006). “Actualización del Mapa Hidrogeológico Provincial de Villa Clara”. Informe técnico, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos, Villa Clara, Cuba.
- Rodríguez W., Sacasas C., Valcarce R. M., Vega M., Hernández O., Febles D. y Rodríguez J.** (2010). “Por una coexistencia responsable con los peligros naturales”. Premio de Estudios Iberoamericanos en el Área Científico-Técnica, Ed. Universidad Internacional de Andalucía, ISBN: 978-84-7993-204-6, España..