

Vulnerabilidad a la contaminación en horizontes acuíferos del sur de Cuba occidental

José Antonio García Gutiérrez

e-mail: jagarcia@eniapr.co.cu

Ingeniero Geofísico. Máster en Gestión Ambiental. Especialista de la Unidad de Investigaciones de Pinar del Río, Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas.

Carlos Sacasas León

e-mail: cs1@civil.cujae.edu.cu

Ingeniero Geofísico. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae).

Ángel René Díaz Deulofeu

e-mail: angelito@eniapr.co.cu

Licenciado en Geografía. Máster en Gestión Ambiental. Especialista de la Unidad de Investigaciones de Pinar del Río, Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas.

RESUMEN

El trabajo tiene como objetivo mostrar el procedimiento empleado para elaborar el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de dos importantes horizontes acuíferos, constituidos por aguas de estrato cársicas, en la parte sur del occidente de Cuba. El método de cuantificación de la vulnerabilidad está basado en la conductividad eléctrica de las capas superficiales, a partir de indicadores deducidos por Kalinski, Röttger y otros autores. El mapa obtenido muestra que la vulnerabilidad a la contaminación es elevada en el extremo occidental de la región, mientras que para el acuífero principal, asociado con las calizas miocénicas de la formación Paso Real, la vulnerabilidad es mayormente media.

Palabras clave: conductividad hidráulica, conductividad eléctrica, contaminación de acuíferos, índices de vulnerabilidad, vulnerabilidad a la contaminación.

Vulnerability to contamination in aquifer horizons in the south of western Cuba

ABSTRACT

The objective of this work is to show the procedure used to develop the vulnerability map to the contamination of two important aquifer horizons, constituted by karstic stratum waters, in the southern western Cuba. The method of quantification of vulnerability is based on the electrical conductivity of the surface layers, through the use of indicators deduced by Kalinski, Röttger and others. The map shows that the vulnerability to pollution is high at the western end of the region, while for the main aquifer, associated with the Miocene limestones of the Paso Real formation, the vulnerability is mostly medium.

Keywords: hydraulic conductivity, electrical conductivity, aquifer contamination, vulnerability indices, vulnerability to pollution.

INTRODUCCIÓN

La protección de los acuíferos es esencial para un uso sustentable del recurso agua subterránea, la protección de los ecosistemas dependientes de ella y una parte central del planeamiento territorial y de los planes de acción (Kirsch and Hinsby 2007).

Para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos se aplican en Cuba diferentes enfoques metodológicos, entre los cuales destaca el conocido como método DRASTIC, basado en la valoración de propiedades hídricas y geométricas de los depósitos que cubren el horizonte acuífero.

También para caracterizar la vulnerabilidad natural y el riesgo de contaminación se ha empleado la metodología PATHS, la cual valora la vulnerabilidad de los acuíferos a partir del análisis de la profundidad del agua subterránea, precipitaciones, tectónica, topografía del terreno y conductividad hidráulica del suelo (Valcarce y Jiménez 2016).

Un indicador utilizado para cuantificar la vulnerabilidad es el índice de vulnerabilidad del acuífero (IVA) (Van Stempvoort et al. 1992). El mismo cuantifica la vulnerabilidad por la resistencia hidráulica c al flujo vertical de agua a través de las capas protectoras y se define por la ecuación (1).

$$c = \sum_i \frac{d_i}{K_i} \quad (1)$$

donde:

d_i = espesor de la capa;

K_i = conductividad hidráulica de cada capa protectora.

Los valores de d se expresan en metros (m) y los de K en metros por segundo (m/s), por lo que la dimensión de c es tiempo. Entonces, el valor de c puede ser empleado como una aproximación del tiempo que tarda el agua en atravesar verticalmente las capas no saturadas, aunque sin tener en cuenta otros parámetros que intervienen en el mismo, como el gradiente hidráulico y la difusión. Un acuífero se considera bien protegido si el tiempo de percolación a través de las capas que lo cubren excede de 10 años.

Por otra parte, el tiempo que tarda el agua en atravesar verticalmente un grupo de capas geológicas puede ser relacionado con las resistividades eléctricas de estas capas (Kalinski et al. 1993).

La resistencia hidráulica de las capas superficiales depende de la porosidad efectiva para los suelos arenosos y del contenido de arcilla para los suelos cohesivos, parámetros que también controlan la resistividad eléctrica de dichos suelos.

De aquí resulta, que si en la ecuación (1) se toma la resistividad eléctrica como equivalente a la conductividad hidráulica, la razón d/K puede ser sustituida por la expresión equivalente d/ρ , o reemplazando la resistividad por su inverso, la conductividad eléctrica σ , por $d \cdot \sigma$, resultando:

$$CI = \sum_i d_i \cdot \sigma_i \quad (2)$$

La expresión en la ecuación (2) se denomina conductividad integral (*CI*) por Röttger et al. (2005), y se expresa en milisiemens (mS), ya que d viene dado en metros (m) y σ en milisiemens por metro (mS/m). La misma puede ser empleada para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero, en una relación inversa donde a mayor conductividad integral corresponde menor vulnerabilidad del acuífero.

CARACTERIZACIÓN DE LA REGIÓN DE ESTUDIO

La región de estudio ocupa un área de forma irregular, que se extiende desde la península de Guanahacabibes hasta la parte occidental de la provincia de Artemisa. Su borde septentrional está representado por el litoral norte de la referida península y la cordillera de Guaniguanico, mientras que hacia el sur limita por la costa y una línea imaginaria trazada aproximadamente por la zona de transición entre la denominada premontaña y la llanura baja, con un ancho de 5 a 27 km en este sector, cubriendo una superficie total de 3 854,53 km² (figura 1).

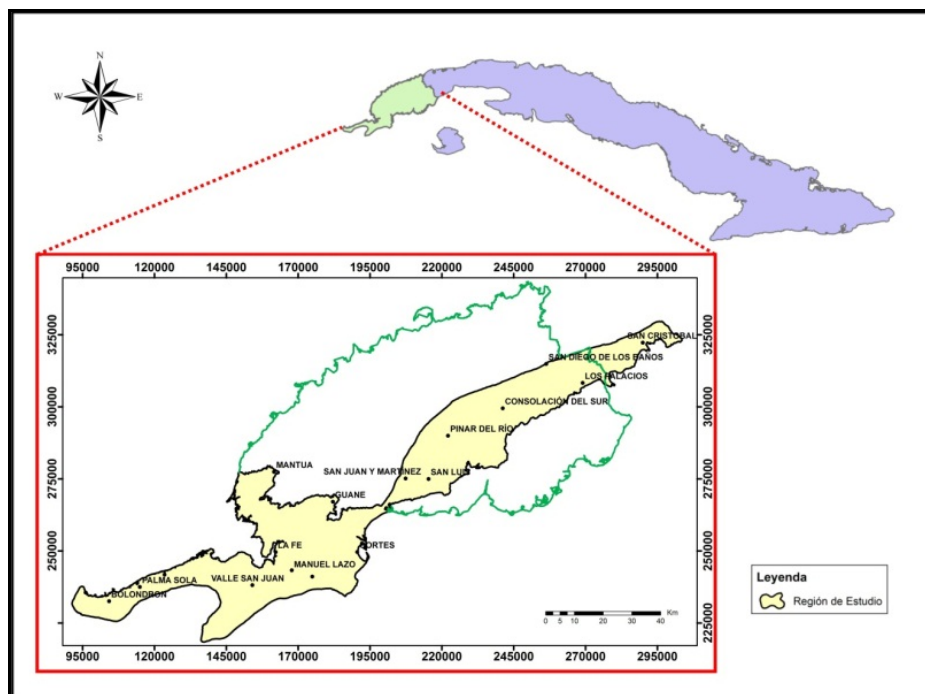


Figura 1. Ubicación de la región de estudio

La región abarca, de oeste a este, las subregiones geomorfológicas Llanura de Guanahacabibes y Llanura Sur de Pinar del Río. La primera se extiende por el extremo más occidental de Cuba, conformando una llanura marina aterrizada, carsificada, plana a suavemente inclinada hacia el norte, sustentada sobre rocas carbonatadas del Plioceno-Pleistoceno, afectadas por movimientos tectónicos recientes. Constituye mayormente una llanura abrasiva, con cotas

absolutas comprendidas entre 0-10 m, la que transiciona en su porción suroriental al tipo abrasivo-acumulativa, aumentando las cotas hasta 10-20 m.

El horizonte acuífero de interés está presente en las calizas fosilíferas, muy carsificadas, de la formación Vedado y, en menor grado, de Jaimanitas. Hacia el interior de la península se reportan las aguas más dulces, reservando para las profundidades de más de 10 m en estos sectores, así como para las zonas próximas al litoral, aguas cloruradas con elevados niveles de salinización.

Además, esta zonación vertical muestra, en perfiles, lentes de agua dulce flotando sobre masas de agua salada, que en algunos casos son aprovechados para el abasto local. La dirección predominante del agua subterránea está dirigida preferentemente hacia la costa, con velocidades de flujo entre 0,1 y 3 metros por día, lo que indica elevados valores de permeabilidad (Proambiente 2005).

Las capas de recubrimiento están representadas por pequeños espesores de suelos eluviales de la formación Vedado, arenas de origen marino, arenas cuarzosas de la formación Siguaná y depósitos eluvio-coluviales.

A continuación, se encuentra la Llanura Sur de Pinar del Río, a la que pertenecen las partes central y oriental de la región de estudio. Es una llanura fundamentalmente aluvial, formada sobre rocas sedimentarias más antiguas, y cubierta por sedimentos arcillo-arenosos jóvenes de gran potencia, arrastrados por las corrientes de la vertiente sur de la cordillera.

Está atravesada por numerosos ríos que poseen valles llanos y anchos, la mayoría represados en la faja premontañosa. En el sector estudiado, el relieve transiciona, de norte a sur, de colinas amplias con laderas de pendientes suaves, a ligeramente ondulado, variando las cotas absolutas entre 10 y 100 m.

Esta parte de la región de estudio coincide con la franja de mayor desarrollo económico y social de la parte occidental del país, y donde se ubican los asentamientos poblacionales más importantes, entre los cuales sobresale la ciudad de Pinar del Río, capital de la provincia del mismo nombre.

En la misma se localiza un horizonte acuífero asociado con los depósitos terrígeno-carbonatados de la formación Paso Real, de edad Mioceno, el cual representa el principal acuífero regional. Está constituido por aguas de estrato cársicas, cuya profundidad de yacencia varía entre 5 y 40 m.

Es artesiano en la parte sur, perdiendo presión hacia la zona premontañosa. Los gastos observados en pozos varían de 0,47-17 L/s en la premontaña, hasta alcanzar valores de 80-220 L/s, con menos de un metro de abatimiento, en la parte sur del territorio.

Según el criterio más aceptado, la zona de alimentación se localiza en la premontaña y en sectores donde aflora el horizonte, mientras que la descarga es hacia el mar.

Las principales capas de recubrimiento en la región están constituidas por suelos arcillosos carbonatados, producto de la meteorización de las rocas primarias, sedimentos arcillo-arenosos de la formación Guane, sedimentos indiferenciados de las formaciones Guane y Guevara y depósitos aluviales en las zonas próximas al cauce de los ríos.

Además de los complejos acuíferos descritos, en la región se definen otros de importancia secundaria, como los relacionados con los depósitos del Cretácico y del Paleógeno, representados por aguas de fisuras y grietas, cuya fuente de alimentación son las precipitaciones y la descarga es hacia la red fluvial y pequeños manantiales.

Otro horizonte de significación local se manifiesta en forma de lentes “colgados” en los sedimentos arcillo-arenosos de diferente génesis, cuya alimentación es también a partir de la infiltración de agua de lluvia en su área de extensión, mientras que la descarga tiene lugar hacia horizontes subyacentes o por evaporación cuando yace próximo a la superficie terrestre (Martínez et al. 1988).

Por último, debe indicarse que en la estructura tectónica regional, la zona de estudio pertenece a la cuenca o depresión Los Palacios, situada al sur de la cordillera de Guaniguanico, de la cual está separada por la falla regional Pinar. Dicha cuenca es un monoclinas que buza suavemente (7-8 grados) hacia el sur, con potencia de miles de metros de sedimentos que abarcan desde el Cretácico Inferior hasta el Cuaternario Reciente, asignados a diferentes formaciones geológicas (figura 2).

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO VS CONDUCTIVIDAD INTEGRAL

Con el fin de obtener los rangos de vulnerabilidad para la conductividad integral, se efectuó una comparación entre ambos indicadores de vulnerabilidad obtenidos para las tipologías de suelo más representativas, con valores de referencia de conductividad hidráulica y eléctrica tomados de fuentes bibliográficas reconocidas (Mijailov 1985), (Liajovitski et al. 1989), mostrándose los resultados en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación del IVA y de la conductividad integral para distintos tipos de suelo con espesor de 10 m

Tipo de suelo	Conductividad hidráulica (K), m/s	Índice de vulnerabilidad (IVA), años	Conductividad eléctrica (σ), mS/m	Conductividad integral (CI), mS	Vulnerabilidad del acuífero
Grava	$10^{-2} - 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$	0,2 - 1	2 - 10	Muy alta
Arena	$10^{-4} - 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$	1 - 2	10 - 20	Alta
Arena arcillosa	$10^{-6} - 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-1}$	2 - 10	20 - 100	Media
Arcilla arenosa	$10^{-7} - 10^{-6}$	0,3 - 2,7	10 - 50	100 - 500	Baja
Arcilla	$10^{-8} - 10^{-7}$	2,7 - 27,4	50 - 100	500 - 10000	Muy baja

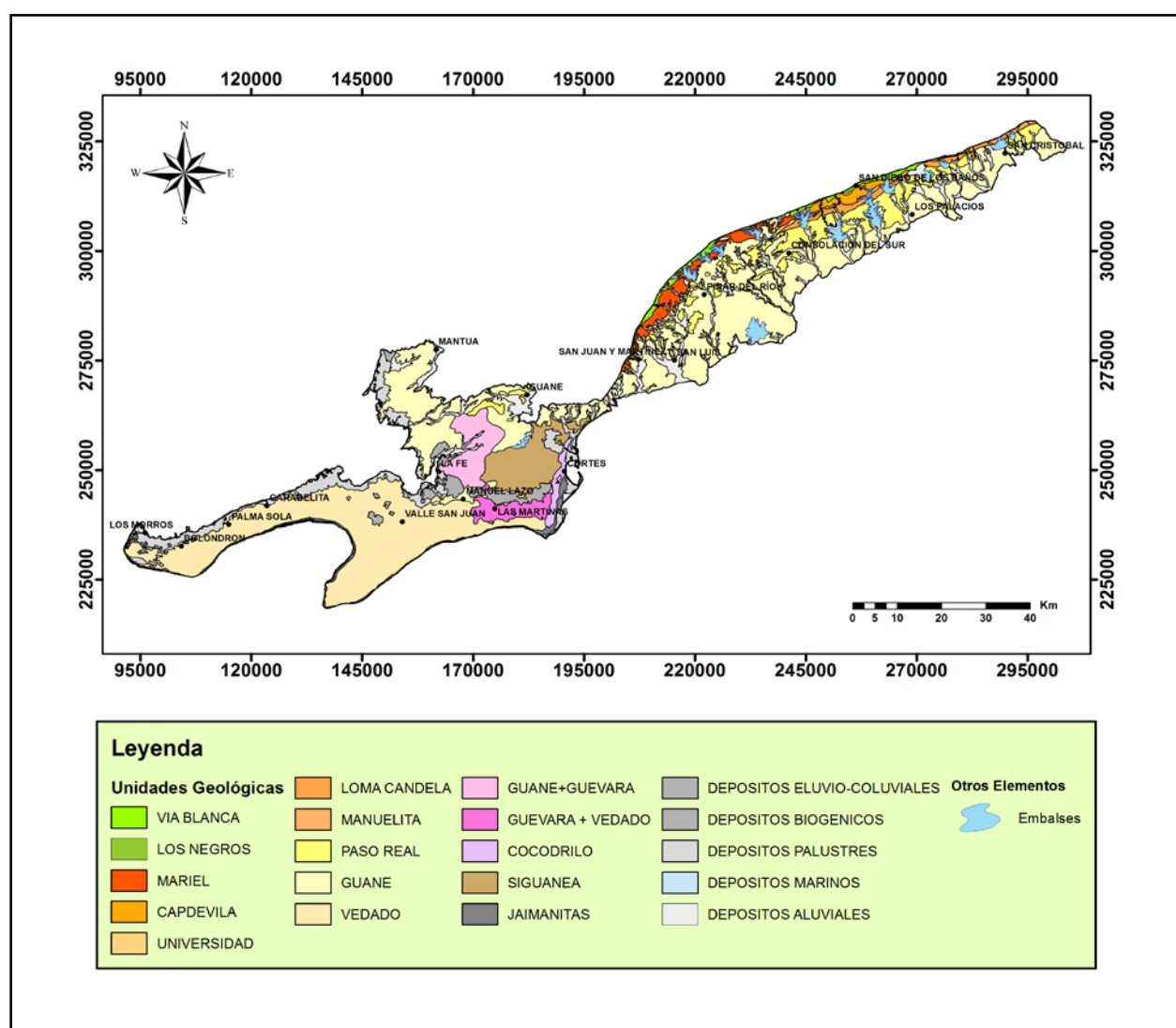


Figura 2. Mapa geológico regional a escala 1:100 000. (IGP-SGN 2005)

CONDUCTIVIDAD INTEGRAL DE LOS SUELOS DE CUBIERTA

El cálculo de la conductividad integral de los suelos que recubren los dos principales acuíferos de la región de estudio, asociados a formaciones geológicas representadas en la figura 2, constituye la etapa principal del procedimiento para evaluar su vulnerabilidad a la contaminación. Para ello, según la expresión que la define, se requieren los valores de conductividad eléctrica (o de resistividad eléctrica) y los espesores de los mismos.

El cumplimiento de esta tarea se basó en una investigación anterior de los dos primeros autores, donde se definieron 10 modelos de resistividad eléctrica para las principales formaciones geológicas de la región de estudio a partir de materiales de archivo, con el empleo de 48 obras con 895 sondeos eléctricos verticales, de los cuales un 35,4 % estaban situados junto a perforaciones (García y Sacasas 2016). De ellos, se utilizaron para este trabajo los modelos indicados en la tabla 2.

Tabla 2. Modelos de resistividad empleados para determinar la conductividad eléctrica y espesor de los suelos de cubierta (García y Sacasas 2016)

Modelo	Descripción
II	Formación Vedado cubierta por eluvios arcillosos
III	Formación Vedado cubierta por arenas cuarzosas de la formación Siguanea
IV	Formación Jaimanitas cubierta por arenas de playa
VI	Formación Paso Real cubierta por suelos de las formaciones Guane y Guevara
VII	Formación Paso Real cubierta por suelos de la formación Guane
VIII	Formación Paso Real cubierta por suelos aluviales

En la figura 3, se presenta el modelo VII, correspondiente a los sedimentos de la formación Paso Real cubiertos por suelos de la formación Guane, con los valores promedio y el intervalo de confianza para un 95 % de probabilidad de la resistividad eléctrica y el espesor de cada capa.

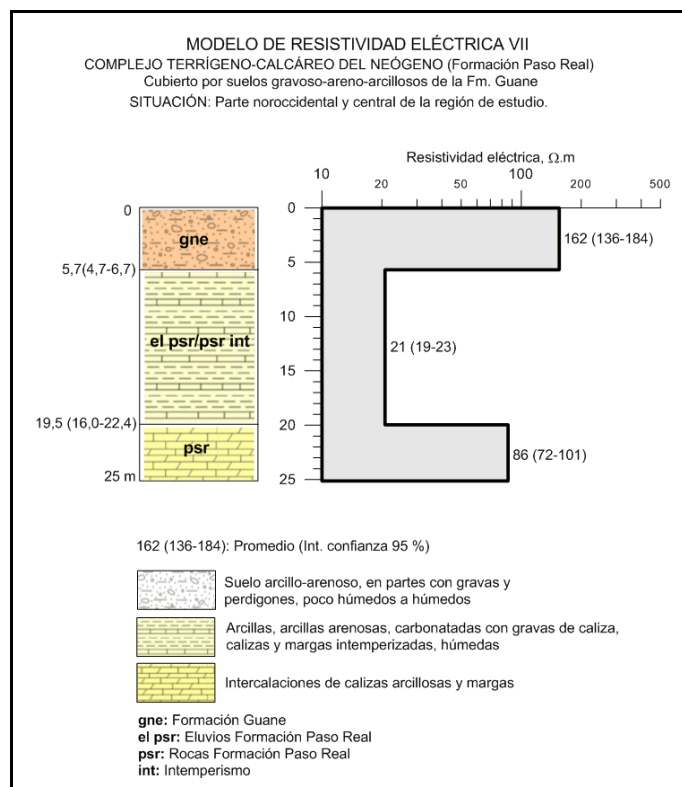


Figura 3. Modelo de resistividad eléctrica para la formación Paso Real cubierta por suelos de la formación Guane

Los resultados del cálculo de la conductividad integral para los suelos de recubrimiento de los dos principales acuíferos de la región considerada están mostrados en las tablas 3 y 4, respectivamente.

En dichas tablas se muestra el rango de variación para un nivel de confianza de 95 % de la resistividad eléctrica y del espesor de capa asignados a cada formación geológica de cubierta, conjuntamente con la conductividad integral y la valoración de la vulnerabilidad.

En el caso de las formaciones Guane+Guevara y Sigüanea, constituidas por tres y dos capas geoelectricas, respectivamente, su conductividad integral se determinó por la sumatoria de los valores de cada capa del corte, según la ecuación (2).

Tabla 3. Rangos de conductividad integral para las formaciones geológicas de cubierta sobre el horizonte acuífero del Neógeno

Formación geológica protectora	Resistividad eléctrica, $\Omega \cdot m$	Conductividad eléctrica, mS/m	Espesor, m	Conductividad integral, mS
Depósitos aluviales	48-71	14,1-20,8	6,5-10,5	91,5-218,8
Guane	136-184	5,4-7,7	4,7-6,7	25,5-49,3
Guane + Guevara	780-1702	0,6-1,3	1,2-2,1	0,7-2,7
	173-290	3,4-5,8	6,4-9,9	22,1-57,2
	55-94	10,6-18,2	3,4-3,9	36,2-70,9
	Total:			58,9-130,8

Tabla 4. Rangos de conductividad integral para las formaciones geológicas de cubierta sobre el horizonte acuífero del Plioceno-Cuaternario

Formación geológica protectora	Resistividad eléctrica, $\Omega \cdot m$	Conductividad eléctrica, mS/m	Espesor, m	Conductividad integral, mS
Depósitos marinos	320-395	2,5-3,1	1,5-1,9	3,8-5,9
Sigüanea	8000-11000	0,09-0,1	0,1-2,4	0,01-0,3
	600-1000	1,0-1,7	0,3-2,0	0,3-3,3
	Total:			0,3-3,6
Guevara + Vedado	500-800	1,3-2,0	0,1-5,0	0,1-10,0
Suelos eluvio-coluviales	50-100	10-20	2,0-5,0	20,0-100,0

MAPA DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN

Una vez calculados los valores de conductividad integral de las formaciones geológicas que sobreyacen a los horizontes acuíferos, la representación cartográfica final de la vulnerabilidad se realizó a partir de la representación de las unidades geológicas en el mapa a escala 1:100 000 del Instituto de Geología y Paleontología - Servicio Geológico Nacional, con apoyo de tecnología SIG (Sistema de Información Geográfica) para la obtención del resultado final (figura 4).

En los casos de afloramiento del horizonte acuífero, su vulnerabilidad se estimó como alta.

Basados en los valores de la conductividad integral de las capas protectoras y el proceso de calibración mostrado en la tabla 1, se definieron tres rangos de vulnerabilidad del acuífero para ser utilizados en la zonificación (tabla 5).

Tabla 5. Rangos de vulnerabilidad del acuífero utilizados en el mapa de vulnerabilidad a la contaminación

Rango de CI, mS	Vulnerabilidad del acuífero
Menor de 20	Alta
20-100	Media
100 - 500	Baja

En dicho mapa aparecen señaladas también las áreas de distribución de los acuíferos del Paleógeno y del Cretácico, caracterizados por la propagación esporádica de aguas de fisuras y grietas, que no cumplen los requisitos establecidos en la metodología empleada.

Además, se indican sectores reducidos en el mapa, relacionados con formaciones que no presentan importancia como acuíferos (depósitos palustres, biogénicos y miembro Cocodrilo).

Se destaca en la parte occidental de la región la elevada vulnerabilidad a la contaminación de las aguas de estrato cársicas en las calizas de la formación Vedado, debido al carácter arenoso de los suelos de cubierta y el reducido espesor de los eluvios.

En cuanto al acuífero principal, asociado con las calizas miocénicas de la formación Paso Real, la vulnerabilidad es mayormente media, con áreas de valores altos en los afloramientos cercanos a la premontaña.

Cuando están cubiertas por depósitos aluviales, su vulnerabilidad se reduce debido a la presencia de finos (limo, arcilla) en la composición de la cubierta protectora.

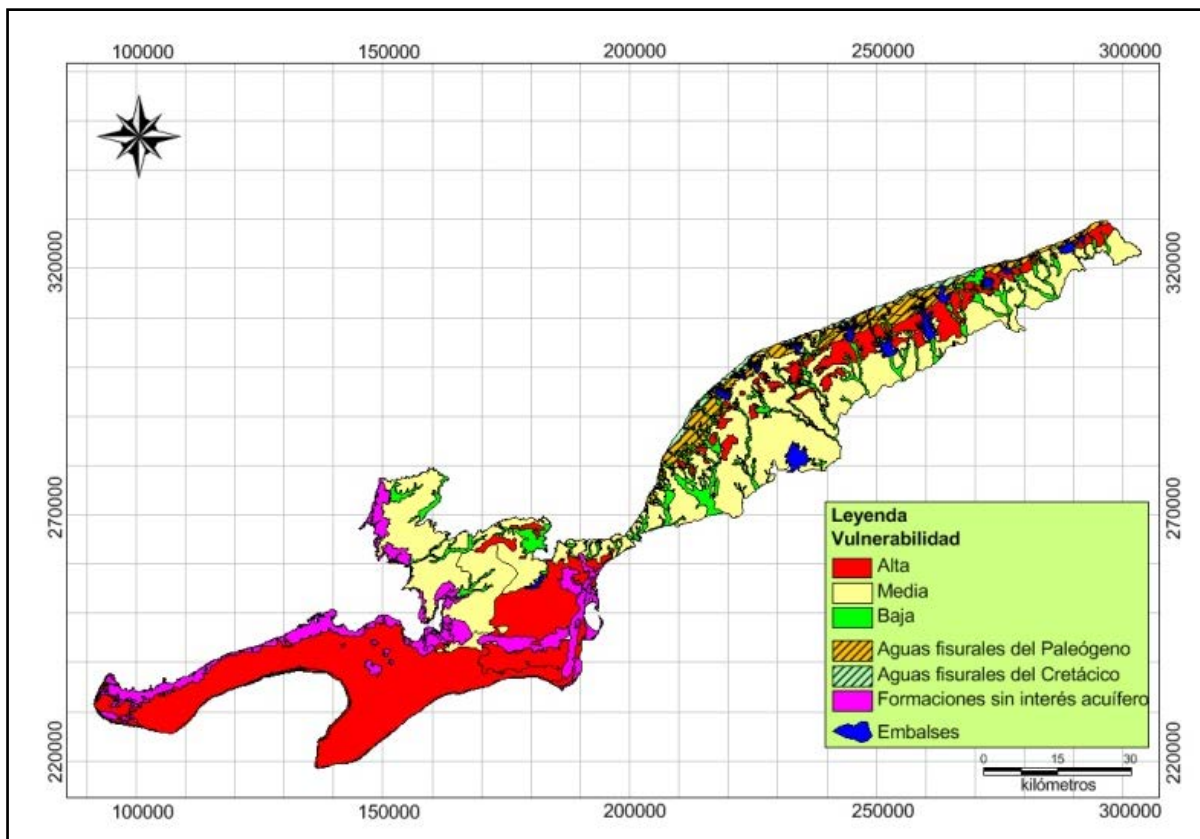


Figura 4. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos del Neógeno y del Plioceno-Cuaternario en la parte sur del occidente de Cuba

CONCLUSIONES

- El mapa de vulnerabilidad elaborado, debido a la escala de trabajo y metodología empleada, brinda una información regional sobre el grado de protección a la contaminación de las aguas de los horizontes acuíferos más importantes, pudiendo ser empleado en tareas de planeamiento territorial para la ubicación preliminar de fuentes contaminantes y analizar el riesgo potencial de las existentes.
- En ulteriores etapas de proyección y localizaciones específicas de fuentes contaminantes, se recomienda complementar su uso con trabajos geofísicos de detalle u otras metodologías de vulnerabilidad, que permitan reducir el nivel de incertidumbre ante una situación particular.

REFERENCIAS

García J. A. y Sacasas C. (2016). “Mapas regionales de resistividad eléctrica en un sector al sur de Cuba occidental”. Rev. Ciencias de la Tierra y del Espacio, vol. 17, no. 1, ISSN 1729-3790, Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana, Cuba.

IGP-SGN (2005). “Mapa geológico de Cuba a escala 1:100000.” Inst. de Geología y Paleontología-Servicio Geológico Nacional, Minist. Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, La Habana, Cuba.

Kalinski R. J.; Kelly W. E.; Bogardi I. and Pesti G. (1993). “Electrical resistivity measurements to estimate travel times through unsaturated ground water protective layers.” *Journal of Applied Geophysics*, 30: 161–173, ISSN 0926-9851, Elsevier.

Kirsch R. and Hinsby K. (2007). “Aquifer vulnerability”. Project BurVal. Near Surface 2007-13th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Lund University Publications, Sweden.

Liajovitski F. M.; Jmelevskoi V. K. y Yashchenko Z. G. (1989). “Geofísica ingenieril.” Ed. Niedra, ISBN 5-247-00460-4, Moscú, Rusia, 252 p.

Martínez D.; Fernández de Lara R.; Peláez R. y Núñez R. (1988). “Informe sobre los trabajos del levantamiento geológico y búsqueda a escala 1:50000 en la parte central de la provincia de Pinar del Río”. Empresa de Geología de Pinar del Río, Minist. Industria Básica, Cuba, 959 p.

Mijailov L. (1985). “Hidrogeología.” Edit. Mir, ISBN 5-03-000661-3, Moscú, Rusia, 286 p.

Proambiente (2005). “Estudio de riesgos península de Guanahacabibes (parte sur).” Unidad de Investigaciones para la Construcción P. Río, Emp. Nac. Investigaciones Aplicadas, Minist. Construcción, Cuba, 139 p.

Röttger B.; Kirsch R.; Scheer W.; Thomsen S.; Friberg R. and Voss W. (2005). “Multifrequency Airborne EM Surveys – a Tool for Aquifer Vulnerability Mapping.” In: D.K. Butler (ed.): Near surface geophysics, investigations in Geophysics no. 13, Society of Exploration Geophysicists: 643–651, ISBN 978-1-56080-130-6, Tulsa, Oklahoma, USA.

Valcarce R. M. y Jiménez R. (2016). “Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de la cuenca Dolores-Sagua la Chica, Cuba”, *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 37(1): 3-14, ISSN 1815-591X, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Univ. Tecnológica de La Habana José A. Echeverría (Cujae), Cuba.

Van Stempvoort D.; Ewert L. and Wassenaar L. (1992). “Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping”. *Canadian Water Resources Journal* 18:25–37, ISSN 0701-1784, Canadian Water Resources Association, Pub. Taylor & Francis.