



Avances  
ISSN: 1562-3297  
cvg@ciget.vega.inf.cu  
Instituto de Información Científica y Tecnológica  
Cuba

# Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas en la Cuenca M-IV, Cuba

Scull Rodríguez, Oslaydi; Valcarce Ortega, Rosa María

Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas en la Cuenca M-IV, Cuba

Avances, vol. 23, núm. 1, 2021

Instituto de Información Científica y Tecnológica, Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=637869233006>

## Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas en la Cuenca M-IV, Cuba

*Assessment of the intrinsic vulnerability to groundwater contamination in the MIV-Matanzas Basin, Cuba*

Oslaydi Scull Rodríguez  
Facultad Ingeniería Civil, Departamento de Geociencias,  
Cuba  
oslysr97@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-9178-6226>

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=637869233006>

Rosa María Valcarce Ortega  
Facultad Ingeniería Civil, Departamento de Geociencias,  
Cuba  
rvalcarce1959@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-9981-6832>

Recepción: 04 Septiembre 2020  
Aprobación: 14 Diciembre 2020

### RESUMEN:

La Cuenca M-IV, ubicada al norte de la provincia de Matanzas, es una cuenca kárstica de gran importancia para el desarrollo socioeconómico de Cuba. Sus aguas subterráneas abastecen a la ciudad de Cárdenas, al polo turístico de Varadero y a parte de la provincia Matanzas. El objetivo de este artículo fue desarrollar el mapa de vulnerabilidad intrínseca para determinar la susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas de esta cuenca. Fue aplicado el método RISK, el que ha sido implementado para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos de origen kárstico. El mapa obtenido por este método, a escala 1:100 000, reveló que el 75 % de la cuenca presenta alta y muy alta vulnerabilidad. Estos resultados se corresponden con la naturaleza geológica de la cuenca, con resultados reportados por otros autores en el área estudiada y con el diagnóstico de los principales problemas identificados en la Estrategia Ambiental 2016/2020 de la provincia. El método RISK demostró su efectividad y poder resolutivo.

**PALABRAS CLAVE:** vulnerabilidad intrínseca, método RISK, acuíferos kársticos.

### ABSTRACT:

The M-IV Basin, located in the north of the Matanzas province, is a karst basin of great importance for the Cuba socioeconomic development. The groundwater of this basin supplies the Cárdenas city, the tourist pole of Varadero and part of the Matanzas province. The objective of this article was to develop the intrinsic vulnerability map to determine the susceptibility to contamination of the groundwater in this basin. The RISK method was applied, which has been implemented to assess karst aquifer vulnerability. The vulnerability map obtained by this method, at a scale of 1: 100 000, revealed that 75 % of the basin presents high and very high vulnerability. These results correspond with the geological nature of the basin, with results reported by other authors in the studied area and the diagnosis of the principal problems identified in the 2016/2020 Environmental Strategy of the province. The RISK method proved its effectiveness and resolving power.

**KEYWORDS:** intrinsic vulnerability, RISK method, karstic aquifers.

## INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas son una de las principales fuentes de abasto a las actividades domésticas, agrícolas e industriales, representan el 97 % del volumen total de agua dulce potencialmente disponible en la Tierra (USGS, 2015).

Al menos el 50 % de la población mundial se abastece de agua potable mediante la explotación de recursos hídricos subterráneos, los que también aportan el 43 % del agua que se emplea en el riego agrícola

(WWDR, 2018). Constituyen un recurso indispensable en el desarrollo de las actividades socioeconómicas y su protección es tarea de primer orden a nivel mundial y en Cuba.

La contaminación del agua subterránea generalmente es un proceso irreversible debido a la dificultad de regeneración del acuífero, aun cuando los trabajos de remediación sean económicamente viables. La utilización inadecuada de fertilizantes en zonas de riego sobre suelos permeables y acuíferos libres, la elevada tasa de reciclado de aguas subterráneas en áreas de regadío intensivo, el vertido de residuos de animales sobre el terreno en zonas vulnerables, la utilización incorrecta de pesticidas, son factores que pueden provocar los mayores niveles de contaminación del agua subterránea asociada a las actividades agrícolas (De Miguel, 2012). Las principales fuentes de contaminación industrial están constituidas por los residuos de producción que se eliminan a través de la atmósfera, el terreno y las aguas superficiales o subterráneas, también por las pérdidas de sustancias contaminantes durante su almacenamiento o transporte y por los accidentes en tanques y líneas de conducción.

Particular importancia presentan los acuíferos kársticos porque se estima que abastecen al 25 % de la población mundial. Estos acuíferos exhiben elevada heterogeneidad y anisotropía de sus propiedades hidrogeológicas, presentan formas de absorción (dolinas, sumideros, hoyos) que conectan directamente la superficie del terreno con las redes de conductos internos del acuífero por donde el agua puede transportarse a largas distancias o ser almacenada temporalmente. En un sistema kárstico los procesos de atenuación de los contaminantes (retención, mineralización, adsorción, etc.) son nulos o poco eficientes, y la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas es muy elevada. Esto ha originado que a partir de los años 60 del pasado siglo y desde diversas disciplinas, surgen conceptos, metodologías y enfoques para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en ambientes kársticos (Iván y Mádl-Szonyi, 2017).

En Cuba las aguas subterráneas ocupan el 33% del volumen total de los recursos hidráulicos disponibles. Estas aguas subterráneas se distribuyen en 165 cuencas hidrogeológicas, de las cuales 151 son kársticas y fisuradas – kársticas, lo que indica la importancia de su correcta explotación, observación y protección (García & Gutiérrez, 2015). Díaz (2018) fundamenta por qué el agua constituye el principal desafío ambiental para Cuba, para garantizar su desarrollo económico sostenible, su seguridad alimentaria y ambiental. Concluye que la protección de los recursos hídricos y la educación ambiental son esenciales para lograr el uso sostenible del agua.

La Ley No. 124 de las Aguas Terrestres regula la gestión integrada y sostenible de este recurso con el fin de garantizar su uso y preservación en armonía con el desarrollo socioeconómico sostenible, y promueve la adecuada aplicación de la ciencia y la tecnología con este propósito (ANPP, 2017). Esta ley destaca la importancia de desarrollar sistemas de alerta temprana que contribuyan a la protección y reducción de la contaminación del agua. Importancia especial concede al ordenamiento territorial de las cuencas hidrográficas como base para definir acciones encaminadas a prevenir el deterioro de la calidad de las aguas, establecer zonas de protección alrededor de los cuerpos de agua y de las fuentes subterráneas que por su importancia lo requieran. Por ello, en los últimos años existe un interés creciente en el desarrollo de mapas de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a escalas cada vez más detalladas.

En Cuba se han reportado algunas investigaciones relacionadas con la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos, lo que se evidencia en las publicaciones de Vidal et al. (2015) y Valcarce et al. (2020). La utilidad de estos mapas en apoyo al cumplimiento de la legislación ambiental vigente justifica la necesidad de continuar desarrollando investigaciones en este sentido.

La Cuenca M-IV es una de las más importantes para el desarrollo económico de Cuba, abastece a la ciudad de Cárdenas, al polo turístico de Varadero y a parte de la ciudad de Matanzas. La Estrategia Ambiental 2016/2020 de la provincia Matanzas destaca que estas aguas subterráneas se caracterizan por muy buena calidad aunque identifica problemas ambientales que representan peligro de contaminación de este recurso, entre ellos: deficiente gestión de los residuos sólidos de asentamientos humanos, prácticas inadecuadas en el traslado y operaciones de residuales industriales y de otras instituciones, mala operación de los vertederos

existentes, insuficiente servicio de alcantarillado que provoca deficiente tratamiento de los residuales líquidos primarios y secundarios, degradación de los suelos, intensas sequías, salinización por avance de la cuña de agua de mar en la porción este del municipio Martí (CITMA, 2016). También Llobel-Pardo (2014) identificó el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por la actividad minera, específicamente por la explotación de la cantera Cantel II ubicada al oeste del campo de pozos de abasto de agua a Varadero, Santa Marta y parte de Cárdenas.

Evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos en la cuenca M-IV por el impacto de la migración de contaminantes potenciales vertidos en su superficie, permitirá disponer de una alerta temprana para prevenir el posible deterioro de la calidad de las aguas, delimitar las zonas de protección que se requieran y brindar la información necesaria para lograr un ordenamiento territorial que favorezca la protección de este recurso.

El objetivo general de este artículo es desarrollar el mapa de vulnerabilidad intrínseca para determinar la susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas de la Cuenca M-IV.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El término vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación fue introducido en la década del 60 del pasado siglo (Margat, 1968). Desde entonces se han sucedido numerosas definiciones y en esta investigación se asume la que plantea Zwahlen (2003), quien establece que la vulnerabilidad de un acuífero está dada por las características naturales (hidrogeología, suelo, relieve, clima, vegetación) inherentes al sistema en conjunto, las cuales determinan la susceptibilidad a la contaminación por actividades antrópicas y la potencial pérdida de calidad del agua subterránea.

Vargas (2010) clasifica los métodos de evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos según cuatro modelos: modelos de simulación, modelos estadísticos, modelos hidrogeológicos y modelos paramétricos o de superposición de índices ponderados. Katyal et al. (2017) hacen un análisis crítico de las tendencias en el empleo de estos modelos. Concluye que los métodos de superposición de índices ponderados son los más empleados, tanto a escala regional como local, por su elevado poder resolutivo en diferentes situaciones hidrogeológicas unido a su relativamente fácil implementación.

Desde inicios de la década del 80 del pasado siglo han sido desarrollados varios métodos paramétricos para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos. En general, la denominación de los métodos corresponde al acrónimo formado con los nombres de los parámetros que emplean. El primer método desarrollado especialmente para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos kársticos fue EPIK (Dörfliger et al., 1999), que emplea como parámetros: presencia de Epikarst, capacidad Protectora del suelo y otros materiales de cobertura, condiciones de Infiltración y desarrollo de la red Kárstica subterránea. Este método ha sido el origen de otros desarrollados posteriormente también para evaluar la vulnerabilidad en acuíferos kársticos (Vías et al. 2002; Dörfliger et al., 2004).

Los métodos de superposición de índices ponderados se basan en la combinación de diferentes parámetros. Cada parámetro se divide en clases o rangos a los que se asigna determinada puntuación, y también a cada parámetro se asigna un factor de ponderación para cuantificar su influencia en la vulnerabilidad del acuífero. Para un método que emplea  $n$  parámetros  $P$  y  $n$  factores de ponderación  $fP$ , el índice de vulnerabilidad  $iV$  se calcula como muestra la Figura (Vargas, 2010):

$$iV = \sum_{j=1}^n fP_j * P_j \quad [1]$$

Este índice ( $iV$ ) se divide en rangos y se clasifica en baja, media, alta, muy alta y extrema vulnerabilidad.

El método RISK es un método paramétrico de índices ponderados para la cartografía de la vulnerabilidad de acuíferos kársticos, desarrollado por el Buro de Investigaciones Geólogo-Mineras de Francia (Dörfliger et al., 2004). Debe su nombre al acrónimo formado con los parámetros que emplea: Roca del acuífero, condiciones de Infiltración, Suelo y cubierta protectora, Karstificación. Proporciona una asignación jerárquica en 5 clases de vulnerabilidad. A cada parámetro se asigna un factor de ponderación que refleja su importancia relativa en la evaluación de la vulnerabilidad y se divide en diferentes clases. Constituye una modificación del método EPIK. La Tabla 1 resume la definición de cada uno de los criterios o parámetros empleados en el método RISK.

Tabla 1. Definición de cada criterio según el método RISK.

Criterios	Definición
<b>R</b>	<b>Roca</b> del acuífero, refleja la naturaleza de las formaciones geológicas y su fracturación. Este parámetro tiene una gran influencia en el tipo de circulación subterránea y, por lo tanto, en la velocidad de transferencia de un contaminante en el acuífero. Se clasifica en cinco clases y se le asigna una puntuación entre 0 y 4 puntos, de menos a más vulnerable.
<b>I</b>	Condiciones de <b>infiltración</b> . Toma en cuenta la pendiente topográfica (a mayor pendiente topográfica predomina la escorrentía sobre la infiltración) y la presencia de formas kársticas superficiales que favorecen la infiltración directa. Considera también la presencia de fallas tectónicas como elementos que incrementan la permeabilidad de las rocas y la infiltración potencial de los fluidos. Se clasifica en cinco clases y se le asigna una puntuación entre 0 y 4 puntos, de menos a más vulnerable.
<b>S</b>	<b>Suelo</b> y cubierta protectora. Las formaciones que cubren las rocas del acuífero tienen un papel esencial en relación con su vulnerabilidad. El criterio S depende del espesor del suelo, su textura (guijarros, matriz, etc.), su composición (arcillas, limos, arenas). Se clasifica en cuatro clases y se le asigna una puntuación entre 1 y 4 puntos, de menos a más vulnerable.

Dörfliger et al. (2004)

El índice de vulnerabilidad RISK se calcula como:

Este índice de vulnerabilidad se clasifica en cinco categorías como se presenta en la Tabla 2.

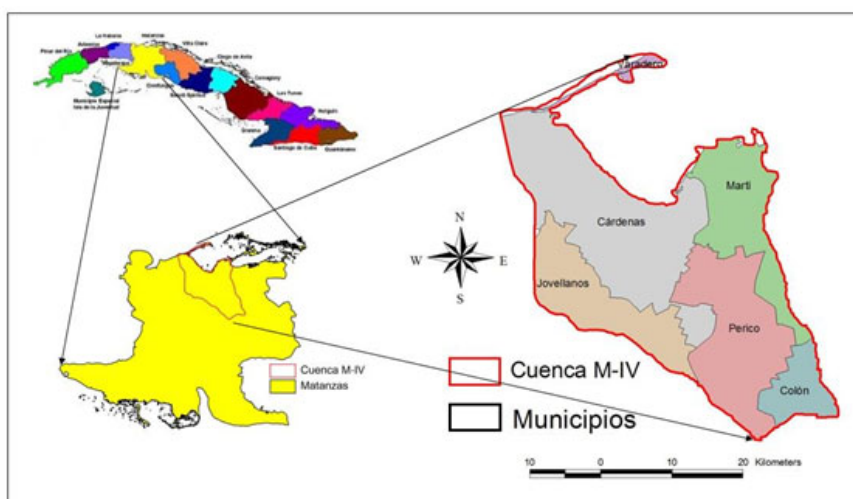
Tabla 2. Clasificación del índice de vulnerabilidad por el método RISK.

Rangos	Puntuación	Vulnerabilidad
<b>0 – 0,79</b>	0	<b>Muy baja.</b> Presencia de capas protectoras en las que el flujo vertical es insignificante.
<b>0,8 – 1,59</b>	1	<b>Baja.</b> Solo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados en forma amplia y continua durante largos períodos de tiempo.
<b>1,6 – 2,39</b>	2	<b>Moderada.</b> Vulnerable a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
<b>2,4 – 3,19</b>	3	<b>Alta.</b> Vulnerable a muchos contaminantes excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados en muchos escenarios de contaminación
<b>3,2 – 4,0</b>	4	<b>Muy alta.</b> Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.

Dörfliger et al. (2004)

*Características del área de estudio y aplicación del método RISK*

La cuenca kárstica M-IV, se localiza en la vertiente norte de la provincia Matanzas, entre el río Camarioca por el oeste y el canal San Mateo por el este. Está presente en cinco municipios de la provincia: Cárdenas, Jovellanos, Martí, Perico y Colón (Figura 1).



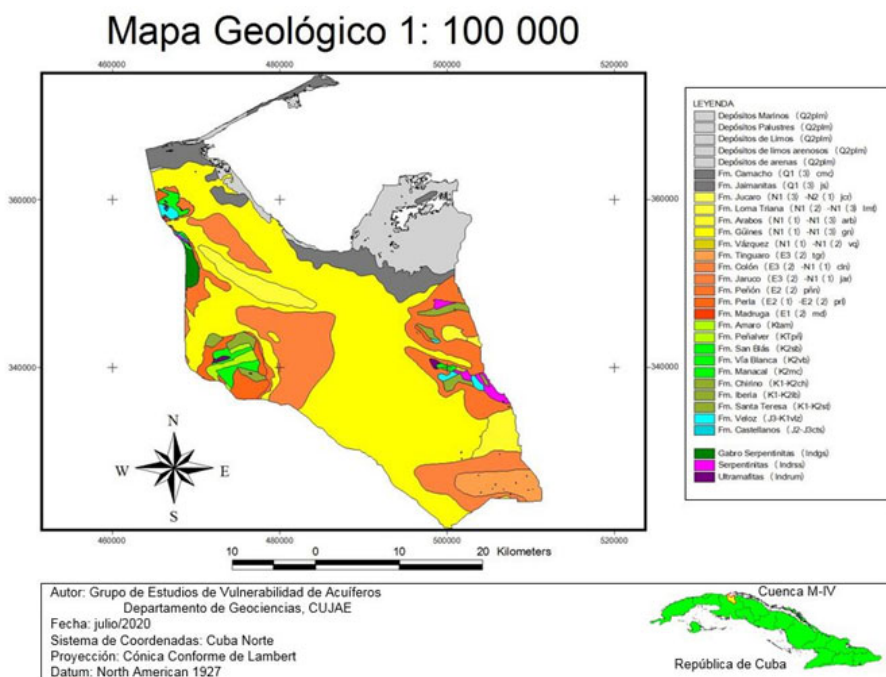
**Figura 1.** Ubicación del área de estudio (modificado de INRH, 1996).

Elaboración propia.

La Cuenca M-IV está desarrollada fundamentalmente en rocas de edad Neógeno de la Formación Güines, la que predomina en el área y en la que se describe una gran variedad de calizas con elevado grado de karstificación y en ocasiones lentes finos de arcillas (Figura 2). El elevado desarrollo kárstico de estas rocas las convierte en un excelente acuífero que almacena los mayores recursos de agua subterránea en la provincia.

Generalmente el acuífero es freático excepto en algunas áreas debido a la presencia de una fina capa de arcilla que lo sobreyace. El nivel freático se encuentra a una profundidad entre 2 y 8 m. El coeficiente de transmisividad varía entre 5 000 y 100 000 m<sup>2</sup>/d siendo el valor promedio de 11 000 m<sup>2</sup>/d. El gasto promedio es de 100 a 200 l/s/m. La dirección predominante del flujo de agua subterránea es de sur a norte con descarga al mar. El gradiente hidráulico es bajo, entre 10<sup>-2</sup> y 10<sup>-4</sup>. La intrusión salina se presenta en forma natural y también producto de las extracciones, las que han causado la inutilización de algunos pozos al penetrar tierra adentro a través de vías preferenciales como agrietamientos y conductos kársticos (Fagundo et al., 2011).

Para aplicar el método RISK en la Cuenca M-IV se contó con la información de: Mapa Geológico de la República de Cuba a escala 1:100 000 (IGP, 2016), Mapa de Suelos a escala 1:25 000 (Instituto de Suelos, 1990), Modelo digital de elevación (MDE) 10x10 (GEOCUBA, 2010). Con esta información fueron evaluados los criterios R, I, S y K. Todo el procesamiento se realizó empleando las herramientas del sistema de información geográfico QGIS.



**Figura 2.** Mapa geológico de la Cuenca M-IV (modificado de IGP, 2016)  
Elaboración propia.

Atendiendo a la composición litológica de las formaciones geológicas descritas en el mapa geológico del área se asignó la puntuación al criterio R de la forma que se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Evaluación del criterio R, Cuenca M-IV

Formaciones Geológicas	Puntuación
Fm. Arabos, Fm. Camacho, Fm. Iberia, Fm. Veloz, Fm. Castellanos, Gabbros, Serpentinitas, Ultramafitas	1
Fm. Chirino, Fm. Jaruco, Fm. Júcaro, Fm. Manacal, Fm. Vázquez, Fm. Peñón, Fm. Peñalver, Fm. Perla, Fm. Tinguaro, Fm. Madruga, Fm. Amaro, Fm. Vía Blanca, Fm. San Blás, Fm. Santa Teresa.	2
Depósitos no consolidados, Fm. Colón, Fm Loma Triana.	3
Fm. Güines, Fm. Jaimanitas	4

Elaboración propia.

En el método que se aplica, el criterio I evalúa zonas de mayor y menor probabilidad de ocurrencia de infiltración de potenciales contaminantes depositados en la superficie del acuífero. La mayor puntuación a este criterio se asignó en las zonas donde la red de drenaje superficial pierde su continuidad así como donde se desarrollan fallas tectónicas.

Se utilizó la extensión Hydrology de la herramienta Terrain Analyst del sistema informático QGIS para obtener el modelo digital de elevaciones (MDE) sin depresiones, generando la malla Fill sinks. Al sustraer la malla Fill sinks del MDE original se obtuvo las áreas donde existen formas negativas del relieve, que pueden representar manifestaciones del paisaje kárstico (dolinas, uvalas, poljes). Se superpuso a este mapa la red de drenaje superficial para identificar las depresiones del relieve en las que el flujo de agua superficial pierde su continuidad, delimitándose las zonas de infiltración directa (Pardo-Iguzquiza et al., 2014). Estas constituyen áreas de muy alta vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, porque permiten la conexión

directa de la superficie del terreno con la red kárstica subterránea y la comunicación inmediata de cualquier contaminante con el acuífero. En estas zonas se asignó puntuación 4 al criterio I.

Las fallas tectónicas, independientemente de su clasificación (fallas normales, inversas, de cabalgamiento), producen un esfuerzo de cizalla que tritura a las rocas de los bloques que están en contacto y provocan un aumento de la porosidad secundaria y de la permeabilidad, incrementando la probabilidad de infiltración de contaminantes que lleguen a alcanzar el nivel freático de las aguas subterráneas. En las zonas de fallas tectónicas identificadas en el mapa geológico se asignó puntuación 4 para evaluar el criterio I.

También para evaluar el grado de infiltración al acuífero se consideró el comportamiento de la pendiente topográfica, para diferenciar las zonas donde predomina la escorrentía superficial o la infiltración de los fluidos.

La Tabla 4 muestra la evaluación del criterio I, según la pendiente topográfica en la cuenca y la posible infiltración a través de zonas de fallas tectónicas y sumideros.

**Tabla 4.** Evaluación del criterio I, Cuenca M-IV.

<b>Criterio I</b>	<b>Puntuación</b>
Pendiente muy pronunciada > 50%	0
Pendiente fuerte 15 - 50%	1
Pendiente moderada 5 - 15% y valles secos.	2
Pendiente baja 0 - 5% zonas cultivadas y dolinas	3
Fallas tectónicas y sumideros	4

Dörfliger et al. (2004).

A partir del mapa de suelos del área de estudio se evaluó el criterio S, atendiendo a su textura, proporción de guijarros y espesor (Tabla 5).

**Tabla 5.** Evaluación del criterio S, Cuenca M-IV

		<b>TEXTURA DEL SUELO</b>			
		Desconocido	Arcillas	Limos	Arenas
<b>GUIJARROS</b>	(0 - 15%)	-	S1	S1	S2
	(15 - 60%)	-	S1	S2	S3
	mayor que 60%	-	S2	S3	S3
		<b>TEXTURA DEL SUELO</b>			
		Desconocido	S1	S2	S3
<b>ESPESOR</b>	mayor que 100 cm	1	1	2	3
	(20 - 100 cm)	2	2	3	4
	(0 - 20 cm)	3	3	4	4
	Nulo	4	4	4	4

Dörfliger et al. (2004).

El criterio K (karstificación) fue evaluado a partir del nivel de desarrollo kárstico que pueden presentar las rocas según la composición litológica de las formaciones descritas en el mapa geológico. La puntuación asignada a este criterio se muestra en la Tabla 6.

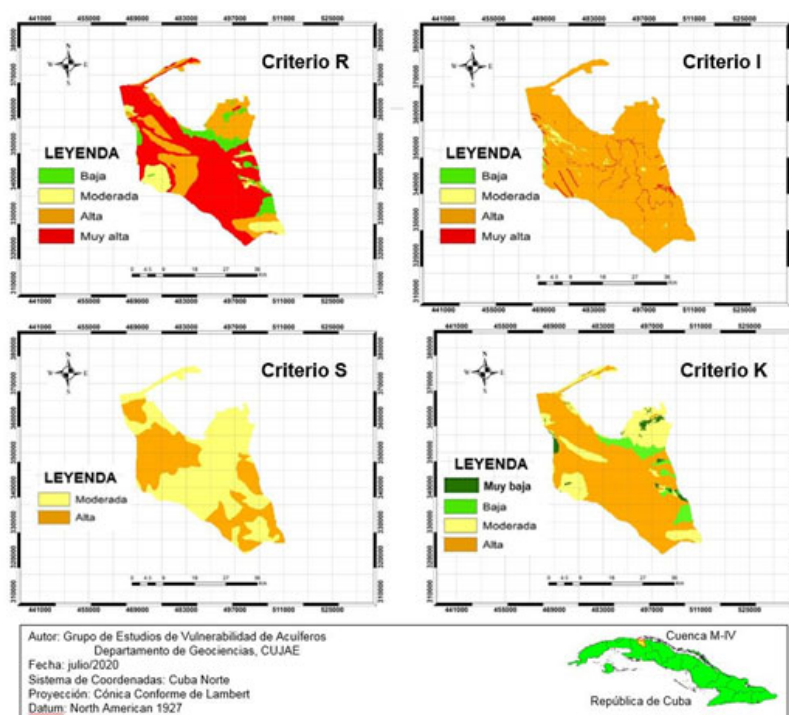
**Tabla 6.** Evaluación del criterio K, Cuenca M-IV

Formaciones Geológicas	Puntuación
Depósitos no consolidados	0
Fm. Arabos, Fm. Camacho, Fm. Iberia, Fm. Veloz, Fm. Castellanos, Gabros, Serpentinatas, Ultramafitas	1
Fm. Chirino, Fm. Jaruco, Fm. Júcaro, Fm. Manacal, Fm. Vázquez, Fm. Peñón, Fm. Peñalver, Fm. Perla, Fm. Tinguaro, Fm. Madruga, Fm. Amaro, Fm. Vía Blanca, Fm. San Blás, Fm. Santa Teresa.	2
Fm. Colón, Fm. Loma Triana, Fm. Güines, Fm. Jaimanitas	3

Elaboración propia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cartografía de los criterios R, I, S y K (Figura 3) en general refleja la alta susceptibilidad natural de la cuenca a la contaminación de sus aguas subterráneas.



**Figura 3.** Mapa de los criterios R, I, S y K en la Cuenca M-IV. Escala 1:100 000.

El criterio R clasificó de muy alta y alta vulnerabilidad en gran parte del área estudiada, reflejo de la presencia de rocas intensamente fracturadas y karstificadas, lo que puede provocar alta velocidad del flujo de agua subterránea y favorecer la propagación de contaminantes potenciales que logren alcanzar el nivel freático. Similar comportamiento presentó el criterio Infiltración (I), que clasificó de alta vulnerabilidad en casi toda el área, destacándose zonas de muy alta vulnerabilidad por elevada capacidad de infiltración en las fallas tectónicas y depresiones del relieve donde el flujo de agua superficial pierde su continuidad.

El criterio Suelo (S) clasificó de moderada y alta vulnerabilidad en toda el área, expresándose de esta manera, que atendiendo a su textura, pedregosidad y espesor, los suelos presentes en la cuenca no ofrecen elevada protección al paso de potenciales contaminantes.

Para el criterio K se clasificaron áreas de alta vulnerabilidad excepto hacia el norte y noreste de la región donde fueron identificadas zonas de moderada y muy baja vulnerabilidad.

Para cartografiar la vulnerabilidad de la cuenca se realizó la superposición de los índices ponderados para lo cual se usó la herramienta álgebra de mapas disponible en QGIS y se aplicó la ecuación [2]. Se aprecia el predominio de zonas de alta y muy alta vulnerabilidad, lo cual es característico de cuencas kársticas (Figura 4).

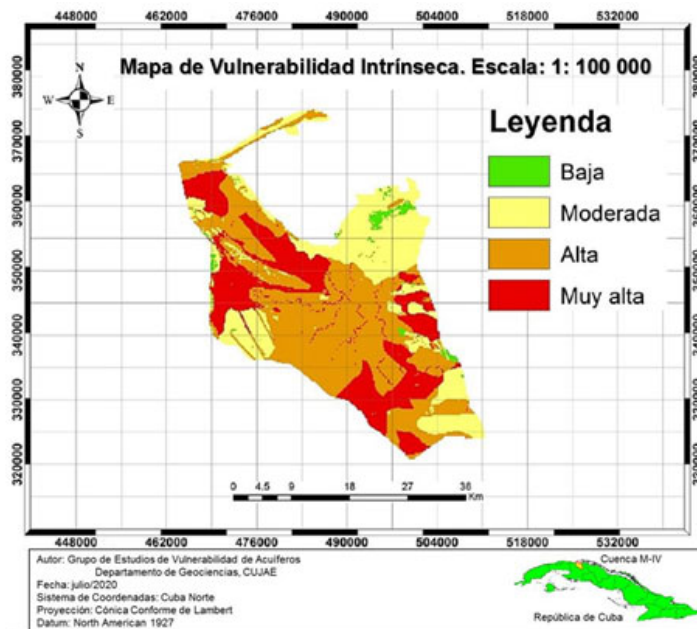


Figura 4. Mapa de vulnerabilidad intrínseca de la Cuenca M-IV.

Elaboración propia.

Las zonas de muy alta vulnerabilidad abarcan el 35 % del área total de la cuenca, y las zonas clasificadas de alta vulnerabilidad alcanzan el 40 %. Estas zonas se asocian fundamentalmente a rocas de la formación Güines, compuesta por calizas biogénicas, detríticas, dolomitizadas y con elevado desarrollo de los procesos kársticos. También en esas zonas el suelo presenta poco espesor efectivo y predominan bajas pendientes topográficas. El 15 % del área estudiada presenta vulnerabilidad moderada y solo el 5 % exhibe baja vulnerabilidad.

Los resultados obtenidos se corresponden con lo reportado en la Estrategia Ambiental 2016/2020 de la provincia Matanzas, que enfatiza la degradación del recurso suelo como una de los principales problemas ambientales y señala la elevada erosión, compactación, acidez, salinidad y poca profundidad efectiva que lo caracterizan (CITMA, 2016). Con esas particulares de la cobertura edáfica en la región no se garantiza elevada protección al recurso agua subterránea. Molerio et al. (2002) reporta los resultados obtenidos en un proyecto patrocinado por el Organismo Internacional de Energía Atómica para definir los factores que influyen en la composición química de las aguas subterráneas en la Cuenca M-IV y contribuir a mejorar la gestión del acuífero. Esas investigaciones reportaron la presencia de sulfato y nitrato en las aguas subterráneas por el impacto de actividades antrópicas. También concluyeron que la relación observada entre los isótopos estables  $2\text{H}$  y  $18\text{O}$  es producto de la acelerada infiltración del agua de lluvia que condiciona la rápida recarga del acuífero a través de formas kársticas, y de manera difusa a través de la superficie del terreno. Estos resultados confirman la alta vulnerabilidad natural de la cuenca a la infiltración de potenciales contaminantes que sean vertidos en su superficie.

## CONCLUSIONES

Ha sido desarrollado el mapa de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos en la Cuenca M-IV, lo que permite conocer la susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas. Los resultados obtenidos con la aplicación del método RISK ponen de relieve que el 75% del área presenta alta y muy alta vulnerabilidad a la contaminación por la migración de potenciales contaminantes depositados en su superficie. Este resultado se corresponde con la naturaleza geológica de la cuenca, con el diagnóstico de los principales problemas identificados en la Estrategia Ambiental 2016/2020 de la provincia de Matanzas y con resultados de investigaciones de otros autores en el área estudiada.

Se propone el método RISK para evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las cuencas kársticas y fisuradas - kársticas en Cuba, atendiendo a su poder resolutivo y disponibilidad de los parámetros necesarios para su implementación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asamblea Nacional del Poder Popular, ANPP. (2017). Ley No. 124 de las aguas terrestres. *Gaceta Oficial de la República de Cuba* (E51), de 16 noviembre. <http://www.gacetaoficial.cu/>
- Delegación Territorial del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente en Matanzas. (2016). *La Estrategia Ambiental de la Provincia de Matanzas 2016-2020*. Matanzas, Cuba: CITMA. 47 p. [https://www.atenas.inf.cu/?wpfb\\_dl=298](https://www.atenas.inf.cu/?wpfb_dl=298)
- De Miguel, C. (2012). *Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales*. Holguín, Cuba: Editorial Digital Universitaria Moa, 384 p.
- Díaz, J. A. (2018). El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2), 46-59.
- Dörfliger, N., Jauffret, D., & et Loubier, S. (2004). *Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche – Comté*. Francia: Editorial BRGM, 129 p. <https://www.google.com.cu/search?q=Cartographie+de+la+vulnerabilit%C3%A9+des+aquiferes+karstiques+en+Franche+%E2%80%93+Comt%C3%A9&spell=1&sa=X&ved=2ahUKEwj-176iprLqAhVHU8KHUsLBpQQkeECKA-B6BAGLECo&biw=1999&bih=979>
- Fagundo, J., González, P., Mesa, O., Benamor, O., de las Cuevas, R. & Álvarez, G. (2011). Patrones hidrogeoquímicos en el agua de la cuenca Norte Matanzas aplicando conductividad eléctrica y relaciones matemáticas. *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 32(2), 14-26.
- García, J. & Gutiérrez J. (2015). *La gestión de cuencas hidrográficas en Cuba*. La Habana: Editorial Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. 95 p.
- Grupo Empresarial GEOCUBA. (2010). Modelo Digital de Elevaciones de la República de Cuba. La Habana: GEOCUBA.
- Instituto de Geología y Paleontología, IGP. (2016). Mapa Geológico de la República de Cuba a escala 1:100 000. La Habana: Servicio Geológico de Cuba.
- Instituto de Suelos (1990). *Mapa de los Suelos de Cuba a escala 1:25 000*. La Habana: Ministerio de la Agricultura.
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, INRH. (1996). Esquema Regional Precisado de Aprovechamiento Integral de los Recursos Hídricos y Agrarios de las Provincias La Habana, Matanzas y Ciego de Ávila. Segunda Versión. [Informe Técnico]. Centro de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Matanzas: INRH. 230 p.
- Iván, V., & Madl – Szonyi, J. (2017). State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook. *Environmental Earth Science*, 76(112). 1-25. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6422-2>
- Katyal, D., Tomer, T., & Joshi, V. (2017). Recent trends in groundwater vulnerability assessment techniques: A review. *International Journal of Applied Research*, 3(5), 646-655. <http://www.allresearchjournal.com/archives/2017/vol3issue5/PartJ/3-5-116-604.pdf>

- Llobel-Pardo, C. (2014). Impactos medioambientales negativos a cuencas subterráneas de aguas terrestres en la cantera Cantel II. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 8(2), 1-15. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193932724003>
- Margat, J. (1968). *Vulnerabilité des nappes deau souterraine a la pollution*. Francia: Editorial BRGM, 68 p.
- Molerio, L., Rodríguez, K., Torres, J. C., Rocamora, E., Guerra, O. (2002). Factores de control de la composición química e isotópica de las aguas subterráneas en la región de Varadero-Cárdenas, Matanzas, Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 23(2), 36-46.
- Pardo-Iguzquiza, E., Durán, J., Luque-Espinar, J. & Martos-Rosillo, S. (2014). Análisis del relieve kárstico mediante el modelo digital de elevaciones. Aplicación a la Sierra de las Nieves (Provincia de Málaga). *Boletín Geológico y Minero*, 125(3), 381-389.
- United States Geological Survey, USGS. (2015). *El ciclo del agua*. United States Geological Survey, USA. <http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html#global>
- Valcarce, R. M., Vega, M., Rodríguez, W., & Suárez, O. (2020). Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas en la cuenca Almendares - Vento. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41(2), 33-47.
- Vargas, M. (2010). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial. Viceministerio de Ambiente. Bogotá. 45 p. <https://www.scribd.com/document/116139375/PROPUESTA-METODOLOGICA-PARA-LA-EVALUACION-DE-LA-VULNERABILIDAD-INTRINSECA-DE-LOS-ACUIFEROS-A-LA-CONTAMINACION>
- Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I., & Jiménez, P. (2002). Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers. *En: Carrasco, F., Durán, J.J., Andreo, B (eds.) Karst and Environment*. Málaga. España. 371-390. [https://www.researchgate.net/publication/285021857\\_Preliminary\\_proposal\\_of\\_a\\_method\\_for\\_vulnerability\\_mapping\\_in\\_carbonate\\_aquifers](https://www.researchgate.net/publication/285021857_Preliminary_proposal_of_a_method_for_vulnerability_mapping_in_carbonate_aquifers)
- Vidal, V., González-Abreu, R., Jiménez, Y., Valdés, L., Castro, M. y Rodríguez, D. (2015). Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero norte de la provincia Ciego de Ávila. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2), 45-56.
- WWDR. (2018). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. Cifras y datos. UNESCO. 12 p. <https://www.unesco.org/water.waap>
- Zwahlen, F. (2003). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, scope, goal, results. European Commission. COST Action 620. Belgium. 297 p. [http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/F+E/Cost620/cost60\\_fb\\_02\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&cv=1](http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/F+E/Cost620/cost60_fb_02_pdf.pdf?__blob=publicationFile&cv=1)