

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA A LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CUENCAS CUYAGUATEJE Y COSTERA SUR DE PINAR DEL RÍO, CUBA

ASSESSMENT OF INTRINSIC VULNERABILITY TO GROUNDWATER CONTAMINATION IN THE CUYAGUATEJE AND COSTERA SUR BASINS OF PINAR DEL RÍO, CUBA

Rosa María VALCARCE ORTEGA, Ernesto SOLÍS MORALES

Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE). 3H3M+XJ6, La Habana, Cuba.
E-mail: rvalcarce1959@gmail.com; solismoralesernesto@gmail.com

Introducción
Características del área de estudio
Materiales y métodos
Método RISK para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos kársticos
Resultados y discusión
Conclusiones
Referencias

RESUMO - As bacias hidrogeológicas Cuyaguaje e Costera Sur de Pinar del Río são importantes fontes de abastecimento de água subterrânea para a província de Pinar del Río em Cuba, por isso é necessário desenvolver pesquisas que permitam o alerta precoce de uma possível contaminação. O objetivo deste artigo foi avaliar a suscetibilidade à contaminação de ambas as bacias subterrâneas devido ao impacto de potenciais poluentes lançados em sua superfície. Pela primeira vez, o método de superposição de índice ponderado RISK foi usado nesta região. O mapa de vulnerabilidade intrínseca obtido na escala de 1: 100.000 revelou que as áreas de vulnerabilidade moderada atingem 55,1% da região estudada, e as áreas de vulnerabilidade alta e muito alta representam 44,6%, resultados que correspondem à natureza geológica das bacias, com o diagnóstico ambiental da província e com relatórios de outros estudos realizados na região. O método RISK demonstrou seu alto poder de resolução e a viabilidade de sua aplicação em outras bacias do território nacional.

Palavras-chave: Vulnerabilidade intrínseca. Método RISK. Água subterrânea

RESUMEN - Las cuencas hidrogeológicas Cuyaguaje y Costera Sur de Pinar del Río constituyen importantes fuentes de abasto de agua subterrânea a la provincia de Pinar del Río en Cuba, por lo que es necesario el desarrollo de investigaciones que permitan la alerta temprana de su posible contaminación. El objetivo de este artículo fue evaluar la susceptibilidad a la contaminación de ambas cuencas subterrâneas debido al impacto de contaminantes potenciales vertidos en su superficie. Por primera vez fue empleado en esta región el método de superposición de índices ponderados RISK. El mapa de vulnerabilidad intrínseca obtenido a escala 1:100 000 reveló que las zonas de moderada vulnerabilidad alcanzan el 55,1% de la región estudiada, y las zonas de alta y muy alta vulnerabilidad representan el 44,6%, resultados que se corresponden con la naturaleza geológica de las cuencas, con el diagnóstico ambiental de la provincia y con reportes de otros estudios realizados en la región. El método RISK demostró su elevado poder resolutivo y la factibilidad de su aplicación en otras cuencas del territorio nacional.

Palabras claves: Vulnerabilidad intrínseca. Método RISK. Agua subterrânea.

ABSTRACT - Cuyaguaje and Costera Sur of Pinar del Río hydrogeological basins are important sources of groundwater supply to Pinar del Río province in Cuba. For this reason, it is necessary to develop investigations that allow early warning of possible contamination. The objective of this article was to evaluate the susceptibility to contamination of both underground basins due to the impact of potential pollutants discharged on their surface. The RISK weighted index overlay method was used for the first time in this region. The intrinsic vulnerability map obtained at a scale 1: 100 000 revealed that the areas of moderate vulnerability reach 55.1%, and the areas of high and very high vulnerability represent 44.6%, results that correspond with the geological nature of the basins, with the environmental diagnosis of the province and with reports of other studies carried out in the region. The RISK method demonstrated its high resolution power and the feasibility of its application in other basins of the national territory.

Keywords: Intrinsic vulnerability. RISK method. Underground water.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la actividad social y económica a nivel mundial depende en gran medida de las aguas subterráneas, las que constituyen el 97% del volumen total de agua dulce potencialmente disponible en la Tierra (USGS, 2015). El informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos de las Naciones Unidas correspondiente al año 2018 reporta que, al menos el 50% de la población mundial se

abastece de la explotación de los recursos hídricos subterráneos (WWDR, 2018). Es incuestionable que representan un recurso indispensable para la vida y su protección debe ser tarea principal

Las fuentes de contaminación fundamentales del agua subterránea son provocadas por la actividad humana. Las más importantes se relacionan con prácticas agrícolas inadecuadas

como pueden ser el uso indiscriminado de fertilizantes químicos y pesticidas sobre suelos muy permeables y acuíferos libres, el manejo incorrecto de residuos de la producción industrial, fallas en el almacenamiento o transporte de sustancias tóxicas y la infiltración al acuífero de aguas residuales domésticas.

El riesgo de contaminación se hace mayor en los acuíferos kársticos, caracterizados por elevado desarrollo de formas de absorción por donde pueden infiltrarse rápidamente los contaminantes depositados en la superficie del terreno y alcanzar el manto freático para migrar a través de conductos y cavernas o quedar almacenados. Generalmente, en estos sistemas kársticos el suelo presenta características que no favorecen procesos eficientes de atenuación de los contaminantes, lo que provoca que la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación sea muy elevada. Por esta razón, desde la década del 60 del pasado siglo se han desarrollado diferentes metodologías para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos kársticos (Iván & Mádl-Szonyi, 2017).

Para Cuba, en su carácter de país insular con escaso desarrollo de la red fluvial, el agua constituye el principal desafío ambiental para garantizar su desarrollo económico sostenible, su seguridad alimentaria y ambiental (Díaz, 2018).

Especial importancia presentan las aguas subterráneas para el abasto a la población y a las actividades socio económicas, al representar el 33% de los recursos hidráulicos disponibles. Estos recursos están distribuidos en 165 cuencas hidrogeológicas de las cuales 151 son cuencas kársticas y fisuradas (García y Gutiérrez, 2015).

En 1994 se crea en Cuba el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) y desde entonces se impulsa la política y los marcos estratégicos y regulatorios en materia de medio ambiente.

En el año 2017 se aprueba la Ley No. 124 de las Aguas Terrestres que regula la gestión integrada y sostenible de este recurso y promueve la aplicación de la ciencia y la tecnología para desarrollar sistemas de alerta temprana que contribuyan a la protección y reducción de la contaminación del agua (ANPP, 2017).

Los mapas de vulnerabilidad natural a la contaminación de los acuíferos constituyen parte del sistema de alerta temprana para prevenir el deterioro de la calidad de las aguas subterráneas, el desarrollo de estos mapas a escalas cada vez más detalladas son tareas de gran importancia en los últimos años en Cuba, lo demuestran importantes investigaciones en esta dirección (Vidal et al., 2015; Valcarce & Jiménez, 2016; García et al., 2018; Vázquez et al., 2019; Valcarce et al., 2020).

La provincia de Pinar del Río está ubicada en el extremo occidental de Cuba, y en ella se localizan las cuencas hidrogeológicas Cuyaguaje y Costera Sur de Pinar del Río. Estas cuencas constituyen las principales fuentes de abasto de agua subterránea a la provincia. Los horizontes acuíferos de mayor interés están presentes en las calizas muy karstificadas de la formación Vedado y, en menor grado, de la formación Jaimanitas, así como en los depósitos terrígeno-carbonatados de la formación Paso Real.

Además de estos complejos acuíferos, en la región se definen otros de importancia secundaria desarrollados en las fisuras y grietas de los depósitos del Cretácico y del Paleógeno. En esta zona se ubican asentamientos poblacionales siendo el más importante la ciudad capital de la provincia. También existe una intensa actividad agrícola que requiere de estos recursos hidráulicos para su desarrollo.

La Estrategia Ambiental 2016/2020 de la provincia Pinar del Río identifica como uno de los principales problemas ambientales las dificultades con el manejo, disponibilidad y calidad del agua. Declara que persisten problemas de contaminación que provocan el deterioro de la calidad ambiental del aire, los suelos y el agua, y los peligros de contaminación que representan el insuficiente tratamiento de residuales líquidos y desechos sólidos producidos por la actividad industrial, agropecuaria y doméstica (CITMA, 2016).

El objetivo general de este artículo es evaluar la susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en las cuencas Cuyaguaje y Costera Sur de Pinar del Río, por el impacto de contaminantes potenciales vertidos en su superficie.

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La región de estudio se encuentra situada al sur de la zona occidental de Cuba, se extiende desde la península de Guanahacabibes hasta la parte

occidental de la provincia de Artemisa (Figura 1). Su borde septentrional está representado por el litoral norte de la referida península y la cordillera

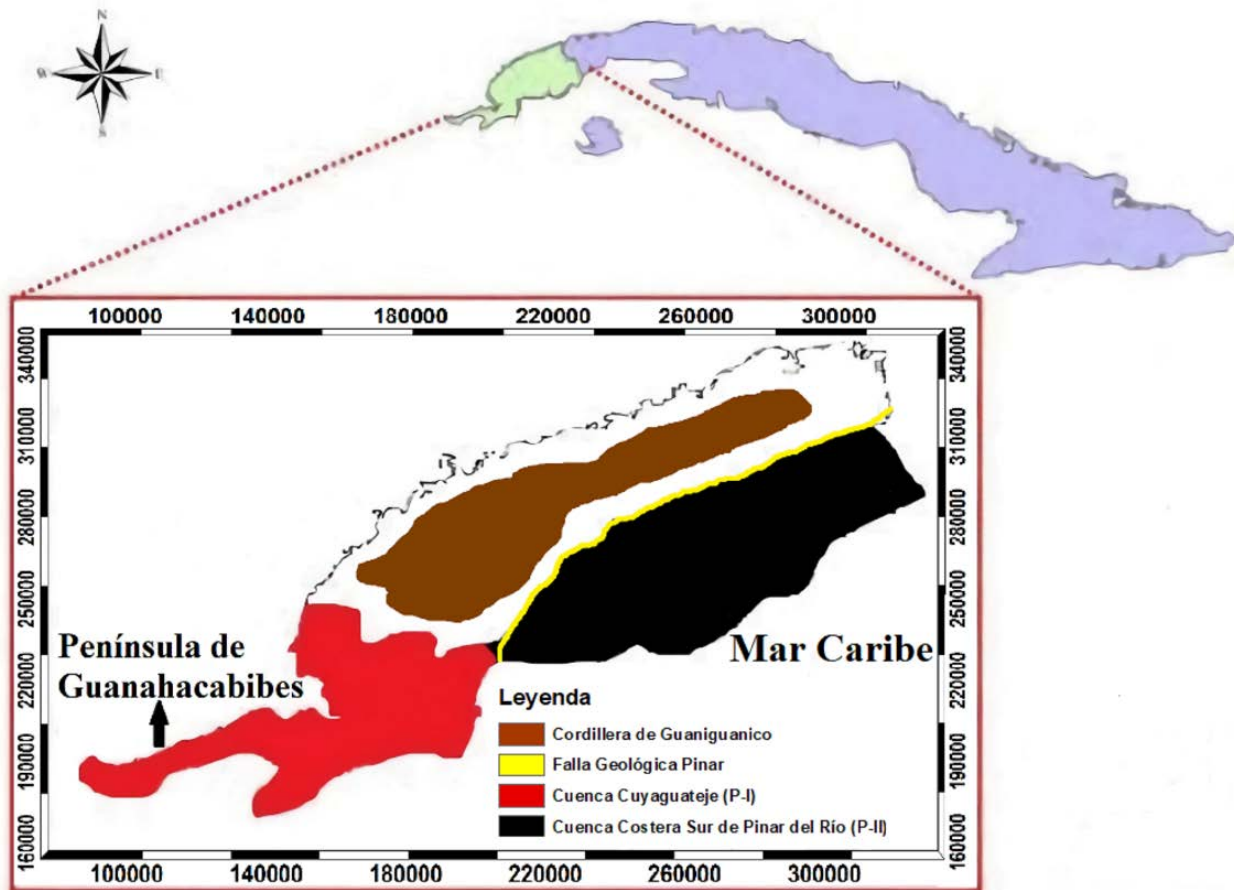


Figura 1 - Ubicación geográfica del área de estudio.

de Guaniguanico, de la cual está separada por la falla geológica regional Pinar, mientras que hacia el sur limita con las aguas del mar Caribe. En esta región se localizan las cuencas Cuyaguajeje (PI) y Costera Sur de Pinar del Río (P II).

La cuenca Cuyaguajeje forma una llanura marina karstificada, donde se describen terrazas marinas con cotas absolutas comprendidas entre 0 y 20 m. La cuenca Costera Sur de Pinar del Río es una llanura fundamentalmente aluvial, formada sobre rocas sedimentarias más antiguas y cubiertas por sedimentos arcillo-arenosos jóvenes de gran potencia, arrastrados por las corrientes de la vertiente sur de la cordillera de Guaniguanico. Está atravesada por numerosos ríos que poseen anchos valles (García et al., 2018).

La figura 2 presenta el mapa geológico del área de estudio. Las formaciones geológicas se caracterizan por presentar sedimentos que abarcan desde el Jurásico hasta el Cuaternario reciente y están formadas en su mayoría por rocas carbonatadas donde existe un marcado desarrollo kárstico, fundamentalmente en las formaciones geológicas Vedado, Paso Real y Jaimanitas. En las formaciones del Cuaternario

reciente predominan los sedimentos arenos-arcillosos y los depósitos palustres.

En la cuenca Cuyaguajeje prevalecen distintos tipos de suelos, los más representados son protorrendzina roja, histosol, nodular ferruginoso y arenosol. En la Costera Sur de Pinar del Río se describen suelos ferralíticos amarillentos, pardos rojizos, fersialíticos e histosol, presentándose como arenosos y arcillosos. En toda la región estudiada el recurso suelo muestra un alto grado de deterioro al presentar erosión fuerte a moderada, mal drenaje, bajo contenido de materia orgánica, elevada compactación, alta salinidad, sodicidad y acidez (CITMA, 2016).

En la región se describen cinco horizontes acuíferos, cuyos rasgos principales se describen a continuación (García et al., 2018):

1. Horizonte acuífero de los depósitos del Cretácico: Son aguas de grietas asociadas a rocas de composición terrígena calcárea. La fuente de alimentación son las aguas de lluvia y la descarga es hacia la red fluvial y pequeños manantiales;

2. Horizonte acuífero de los depósitos del Paleógeno: este complejo está poco estudiado. Las aguas son de propagación esporádica, apro-

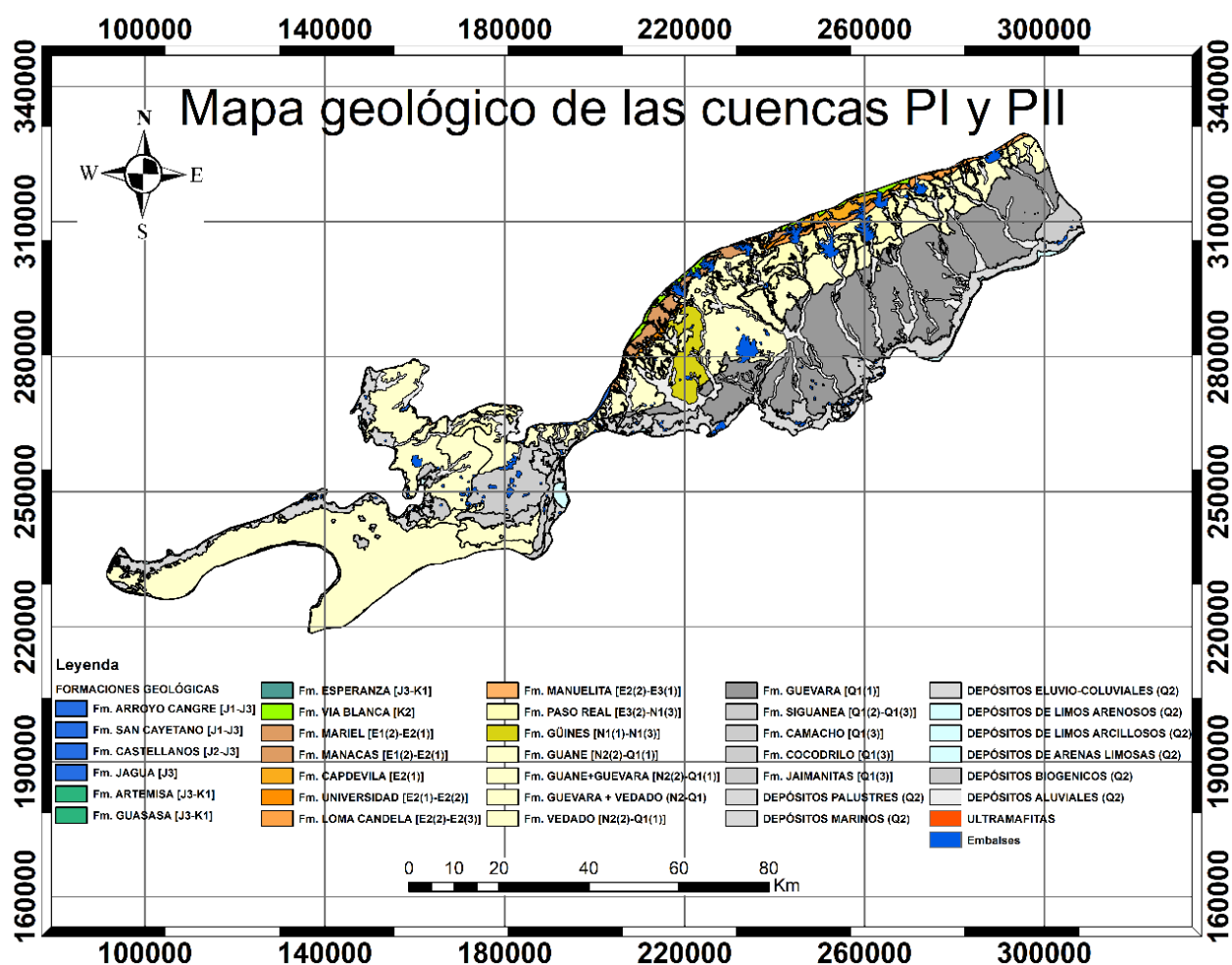


Figura 2 - Mapa geológico de la región de estudio, Escala 1:100 000 (IGP, 2011).

vechando zonas agrietadas y tectonizadas en las rocas, sin presión. Aunque los gastos predominantes son bajos (0,4 a 2,5 l/s), localmente se han medido valores entre 10,2 y 35 l/s. Su alimentación es mediante precipitaciones, mientras que la descarga es hacia horizontes suprayacentes y hacia la red fluvial.

3. Horizonte acuífero de los depósitos del Neógeno: Constituye el principal acuífero regional, estando asociado a depósitos terrígeno carbonatados de la Formación Paso Real. La profundidad de yacencia de las aguas varía entre 4,5 y 29 m, aumentando hasta 37 a 42 m en la parte oriental de la región. 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.

4. Horizonte acuífero de los depósitos del Neógeno-Cuaternario: Está ampliamente propagado en la región de estudio. Se manifiesta, generalmente, en forma de lentes colgados que pueden tener dimensiones y reservas considerables. La alimentación es a partir de 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.

5. Horizonte acuífero de los depósitos del Cuaternario: Representado por sedimentos arcillo-arenosos aluviales, eluviales, palustres y marinos, y por calizas arrecifales. La alimentación es mediante infiltración de precipitaciones en su área de extensión y localmente por aguas de depósitos superficiales. La zona de descarga es hacia la red fluvial y hacia el mar, este horizonte está representado por la formación Jaimanita.

También a este horizonte pertenecen las calizas fosilíferas muy karstificadas de la formación Vedado en la Península de Guanahacabibes. Hacia el interior de la península se reportan las aguas más dulces, reservando aguas cloruradas con elevados niveles de salinización para las profundidades de más de 10 m y para las zonas próximas al litoral. La dirección predominante del agua subterránea es hacia la costa, con velocidades de flujo entre 0,1 y 3.0 m/d

MATERIALES Y MÉTODOS

El término vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación fue introducido en la década del 60 del pasado siglo (Margat, 1968) y posteriormente se han sucedido numerosas definiciones. En la presente investigación se asume la definición planteada por Zwahlen (2003), quien establece que la vulnerabilidad de un acuífero está dada por las características naturales 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.

Existen cuatro modelos para evaluar la vulnerabilidad natural de los acuíferos (Vargas, 2010): 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. Concluyen 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.

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 (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.

En general, la denominación de estos 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 Epkarst, 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).

Método Risk para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos kársticos

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.

El sistema de información geográfico QGIS fue empleado para realizar el procesamiento de la información y la representación de todos los mapas temáticos.

Después de clasificados los criterios se obtuvo un índice global de vulnerabilidad mediante la expresión (2).

$$RISK = 0.15R + 0.4I + 0.25S + 0.2K \quad (2)$$

El índice RISK obtenido se reclasificó en 5 clases, como se muestra en la Tabla. 2.

Aplicación del Método RISK en la Región de Estudio.

Para evaluar el criterio **R** (roca del acuífero) fue analizada la composición litológica de las formaciones geológicas descritas en el Mapa Geológico de la República de Cuba a escala 1:100 000 (IGP, 2016) para el área de estudio. La Tabla 3 resume cómo quedó clasificado este criterio.

Para evaluar las zonas de mayor y menor probabilidad de ocurrencia de infiltración de potenciales contaminantes depositados en la superficie de las cuencas fue evaluado el criterio I. Fueron analizados tres factores fundamentales: comportamiento de la red de drenaje superficial, desarrollo de fallas tectónicas, variación de la pendiente topográfica. La información necesaria fue extraída del Modelo Digital de Elevación (MDE) 10x10 de la República de Cuba (GEOCUBA, 2010).

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

Criterios	Definición
R	Roca del acuífero, refleja la naturaleza de las formaciones geológicas y su fracturación. Este parámetro tiene 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.
I	Condiciones de Infiltración . 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.
S	Suelo 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.
K	Karstificación . Evalúa el desarrollo de la red kárstica subterránea. En las zonas de pérdida el índice K elegido es 4 porque se considera que los flujos superficiales infiltran fácilmente en una red kárstica muy desarrollada. Se clasifica en 5 cinco clases y se le asigna una puntuación entre 0 y 4 puntos, de menos a más vulnerable.

Fuente: (Dörfliger *et al.*, 2004).

Tabla 2 - Reclassificación del índice de vulnerabilidad por el método RISK.

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

Fuente: (Dörfliger *et al.*, 2004).

En lugares donde la red de drenaje superficial pierde su continuidad y también donde se desarrollan fallas tectónicas, existe la mayor probabilidad de infiltración directa de potenciales contaminantes al acuífero, por lo que en esa situación se asignó la mayor puntuación al criterio I. También se consideró que en zonas de mayor pendiente topográfica predomina la escorrentía superficial y disminuye la probabilidad de infiltración de contaminantes al acuífero.

El análisis de la red de drenaje superficial se realizó utilizando la extensión *Hydrology de* la herramienta *Terrain Analyst* del sistema informático QGIS, para obtener el modelo digital de elevaciones (MDE) sin depresiones y generar 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 tales como 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. En las zonas de fallas tectónicas identificadas en el mapa geológico se asignó puntuación 4 para evaluar el criterio I. La Tabla 4 muestra la evaluación del criterio I. El criterio **S** (suelos) fue clasificado a partir de la información de los atributos pedregosidad o gujarros, textura y espesor del suelo, extraída del Mapa de Suelos a escala 1:25 000 (Instituto de Suelos, 1990). La

Tabla 5 muestra la clasificación de este criterio.

El criterio **K** expresa el desarrollo de la red kárstica en profundidad, y fue evaluado analizando el desarrollo cárstico de las rocas que componen las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio, según muestra la Tabla 6.

El índice de vulnerabilidad RISK se obtuvo a partir de la superposición de todos los criterios aplicando la ecuación (2), empleando las herramientas del software informático QGIS. Este índice de vulnerabilidad fue clasificado como se explica en la Tabla 2.

Tabla 3 - Clasificación del criterio R según el método RISK para las cuencas Cuyaguaje y Costera Sur de Pinar del Río.

Formación(Fm) y Depósitos	Puntuación / Vulnerabilidad
Depósitos limo arcillosos, Ultramafitas,	0 / Muy baja
Fm. San Cayetano, Fm. Castellanos, Fm. Guevara, Fm. Arroyo Cangre, Fm. Camacho, Fm. Manacas, Fm. Mariel, Fm. Capdevila, Fm. Loma Candela, Fm. Jagua, Fm. Manacas, Fm. Jagua, Fm. Los Cedros, Fm. Pelao, Fm. Manacal, Fm. Iberia, Depósitos Palustres, Depósitos Biogénicos.	1 / Baja
Fm. Artemisa, Fm. Esperanza, Depósitos Aluviales, Fm. Vía Blanca, Fm. Guasasa, Fm. Universidad, Fm. Manuelita, Fm. Tinajita, Depósitos Eluvio-Coluviales, Depósitos de arenas limosas.	2 / Moderada
Fm. Guane, Fm. Güines, Fm. Paso Real, Fm. Cocodrilo, Depósitos marinos, Depósitos de arenas.	3 / Alta
Fm. Vedado, Fm. Jaimanitas, Fm. Siguatepeque.	4 / Muy alta

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4 - Clasificación del criterio I según el método RISK para las cuencas Cuyaguaje y Costera Sur de Pinar del Río.

Criterio I	Puntuación / Vulnerabilidad
Pendiente muy pronunciada > 50%	0/ Muy baja
Pendiente fuerte 15 - 50%	1/ Baja
Pendiente moderada 5 - 15% y valles secos	2/ Moderada
Pendiente baja 0 - 5% zonas cultivadas y dolinas	3/ Alta
Pérdidas activas, accidentes tectónicos (fallas y sumideros)	4/ Muy Alta

Fuente: (Dörfliger et al., 2004).

Tabla 5 - Clasificación del criterio S según el método RISK para las cuencas Cuyaguaje y Costera Sur de Pinar del Río.

		TEXTURA DEL SUELO			
		Desconocido	Arcillas	Limos	Arenas
GUIJARROS	(0 - 15%)	-	S1	S1	S2
	(15 - 60%)	-	S1	S2	S3
	mayor que 60%	-	S2	S3	S3
		Desconocido	S1	S2	S3
ESPESOR	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

Fuente: (Dörfliger et al., 2004).

Tabla 6 - Clasificación del criterio K según el método RISK para las cuencas Cuyaguaje y Costera Sur de Pinar del Río.

Formación geológica	Puntuación / Vulnerabilidad
Castellanos, Artemisa, Arroyo Cangre, Camacho, Los Cedros, Pelao Basaltos y Diabasas, Ultramafitas, Asociación gabro-Plagiogranítica	0/Muy Baja
Depósitos limo arcillosos, Depósitos limo arenosos Depósitos palustres, Iberia, El Cobre, San Cayetano, Siguatepeque, Guevara, Guane, Depósitos aluviales, Depósitos biogénicos, Manacas, Cocodrilo, Mariel, Loma Candela, Guasasa, Jagua, Tinajita, Manacal, Iberia, Guane.	1/Baja
Esperanza, Güines, Capdevila, Vía Blanca, Universidad, Manuelita, Depósitos marinos, Depósitos de arena, Depósitos Eluvio-Coluviales.	2/Moderada
Jaimanitas, Paso Real	3/Alta
Vedado, zonas con infiltración directa y permanente	4/Muy Alta

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los mapas temáticos de los criterios R, I, S y K se presentan en la figura 3. En estos mapas se evidencia en el área el predominio de moderada

y alta vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas, a excepción del mapa del criterio K donde predomina la baja vulnerabilidad.

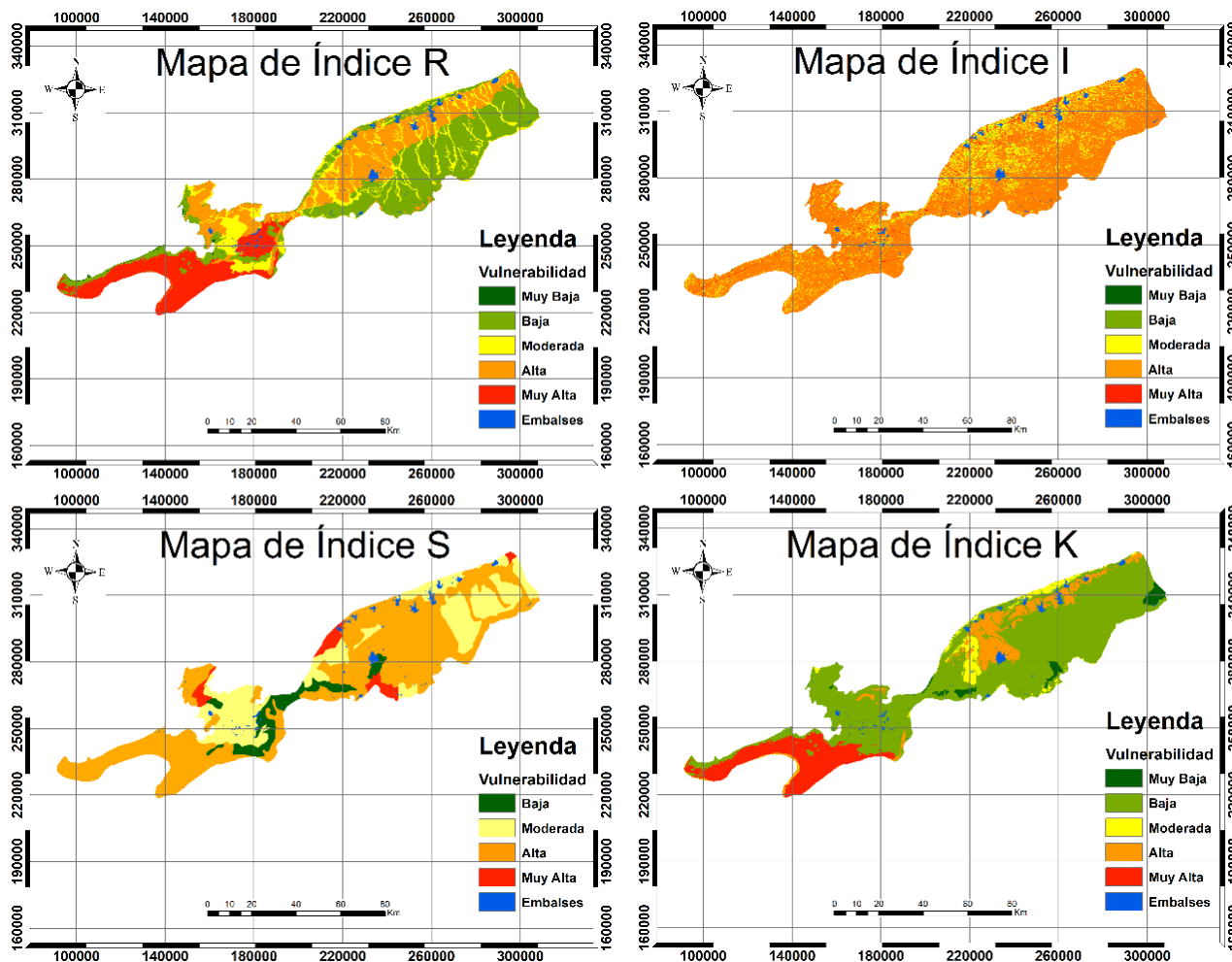


Figura 3 - Mapas de los criterios R, I, S, K, pertenecientes a las cuencas Cuyaguatzeje y Costera Sur de Pinar del Río (elaborado en la escala 1:100.000).

El criterio R refleja alta vulnerabilidad en la parte norte de ambas cuencas y muy alta vulnerabilidad hacia la parte más occidental de la cuenca Costera Sur de Pinar del Río, ello se debe a la presencia de rocas kársticas y fracturadas de las formaciones geológicas Guane, Güines, Paso Real, Cocodrilo, Vedado, Jaimanitas. Hacia el norte de la cuenca Cuyaguatzeje la vulnerabilidad del acuífero es baja debido a la presencia de rocas muy arcillosas pertenecientes a los depósitos palustres.

El criterio I presenta una alta vulnerabilidad en toda la zona de estudio, y en las zonas donde existen fallas tectónicas y donde los flujos de aguas superficiales pierden su continuidad presenta la mayor vulnerabilidad. En casi toda la zona de estudio el criterio S presenta moderada y alta vulnerabilidad, expresión de la textura, pedregosidad y espesor de los suelos presentes.

Hacia la región occidental de la cuenca Cuyaguatzeje el criterio K exhibe muy alta susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas debido al intenso desarrollo kárstico de las rocas que componen la formación geológica Vedado. También es elevada la vulnerabilidad de la cuenca Costera Sur de Pinar del Río en su porción más septentrional, asociado a las rocas de las formaciones geológicas Paso Real, Güines y Guane.

Una vez obtenido el índice RISK quedó conformado el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en ambas cuencas que se muestra en la Figura 4.

Las zonas de moderada vulnerabilidad alcanzan el 55,1% de la región estudiada, y las zonas de alta y muy alta vulnerabilidad representan el 44,6%. Este resultado demuestra que el 99,7% del área ocupada por las cuencas Cuyaguatzeje y

Costera Sur de Pinar del Río presentan vulnerabilidad entre moderada y muy alta, lo que se corresponde con la naturaleza geológica y con

las características edafológicas de ambas cuencas, y refleja la necesidad de protección de los recursos hidráulicos subterráneos.

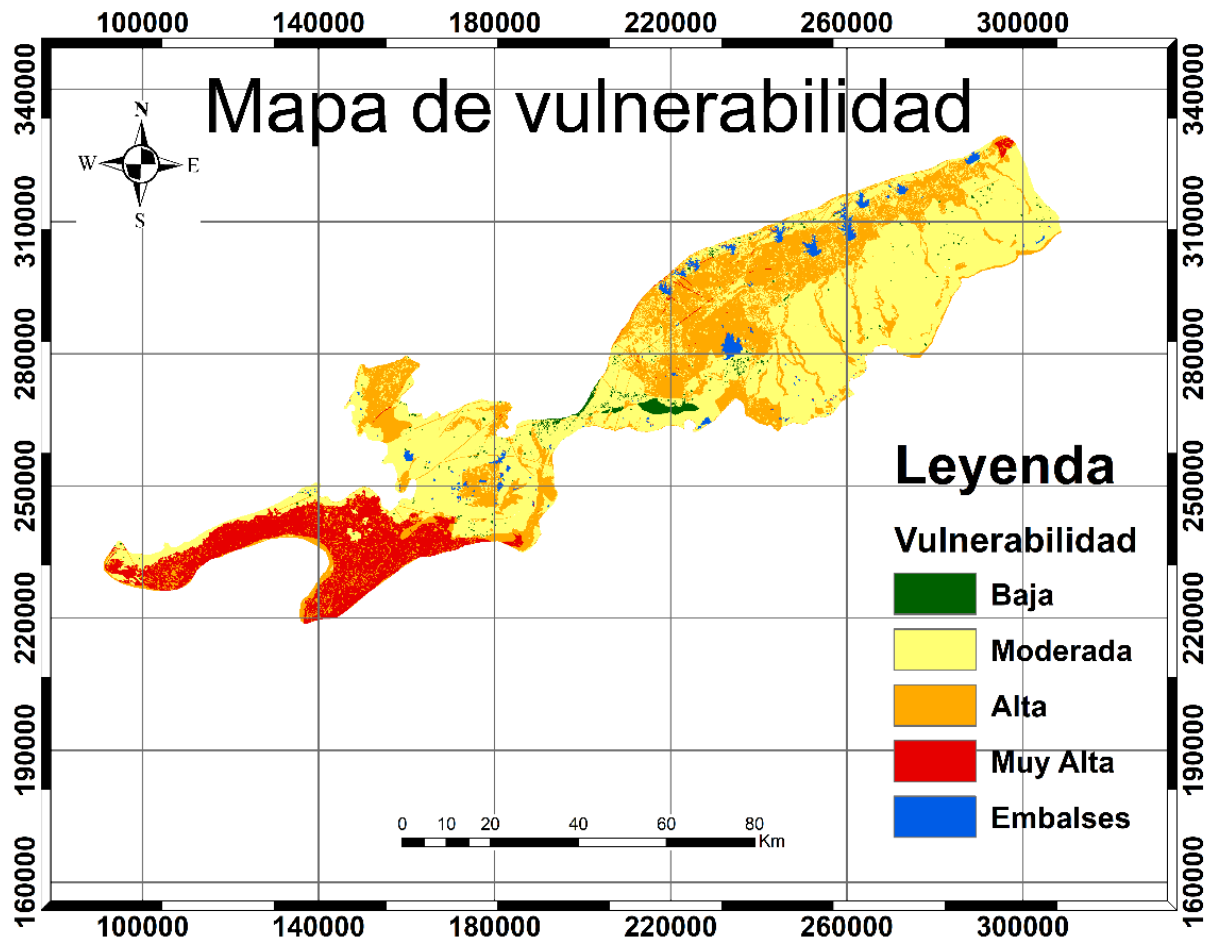


Figura 4 - Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas obtenido por el método RISK en las cuencas Cuyaguatzeje y Costera Sur de Pinar del Río (elaborado en la escala 1:100.000).

Las zonas clasificadas de baja vulnerabilidad solo representan el 1.3 % de la región y corresponden a zonas de mayores espesores de suelos y capas de arcillas de baja permeabilidad, pertenecientes principalmente a un sector de la Fm. Guevara, asociadas a rocas que no presentan ningún desarrollo kárstico.

Las zonas clasificadas de vulnerabilidad moderada corresponden a áreas con presencia de formaciones arcillosas, poco desarrollo del carso, poco espesor de suelo, donde existe predominio de zonas llanas. En esta área se describen la mayoría de los depósitos biogénicos, palustres, formaciones geológicas como Camacho, Loma Candela, Capdevila, Sigüanea y Güane.

Las zonas clasificadas de alta vulnerabilidad representan un 29,9 % del área total y en ella se manifiestan rocas calizas karstificadas, bajos espesores de suelos, pendientes topográficas de bajas a medias, en algunos sectores formas negativas del relieve y presencia de fallas tectónicas. En esta área se encuentran ubicadas

las principales formaciones acuíferas de la cuenca Costera Sur de Pinar del Río, desarrolladas en las formaciones geológicas Paso Real y Güines. Por último, se evidencia que las zonas con muy alta vulnerabilidad constituyen el 13,7% de la región de estudio, ubicada mayormente en la Península de Guanahacabibes, región donde existe un gran desarrollo del carso, gran presencia de dolinas y lapies que facilitan la infiltración directa de potenciales contaminantes, zonas de pendientes bajas y desprovistas de cobertura. En esta región se desarrollan formaciones acuíferas de gran importancia asociadas a la formación Vedado.

El mapa de vulnerabilidad obtenido para ambas cuencas se corresponde con el diagnóstico ambiental presentado en la Estrategia Ambiental de la Provincia Pinar del Río (CITMA, 2016) donde se señala que uno de los principales problemas es el alto deterioro que presentan los suelos por lo que no constituyen una adecuada barrera de protección a la contaminación de las

aguas subterráneas. También señala el deterioro de la calidad de las aguas subterráneas en la provincia donde existen fuentes de abasto con elevadas concentraciones del ión nitrato por el riego de fertilizantes durante varios años en zonas tabacaleras, así como el manejo inadecuado de productos químicos y desechos peligrosos que son vertidos directamente en lagunas de oxidación y finalmente llegan a alcanzar los sistemas de aguas subterráneas.

Los resultados obtenidos en esta investigación se corresponden con anteriores estudios de vulnerabilidad a la contaminación de estas

cuenas reportados por García *et al.* (2018). En sus investigaciones los autores cuantificaron la vulnerabilidad a partir de la conductividad eléctrica de las capas superficiales del corte geológico y concluyeron que la susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas es muy alta en el extremo occidental de la cuenca Cuyaguaje, donde se describen las calizas karstificadas de la Formación Vedado, y que predomina la vulnerabilidad moderada para el acuífero desarrollado en las calizas miocénicas de la Formación Paso Real presentes en la cuenca Costera Sur de Pinar del Río.

CONCLUSIONES

Ha sido desarrollado el mapa de vulnerabilidad intrínseca de las cuencas hidrogeológicas Cuyaguaje y Costera Sur de la Provincia de Pinar del Río, lo que permite evaluar la susceptibilidad a la contaminación de sus aguas subterráneas por la migración de potenciales contaminantes depositados en su superficie.

Los resultados obtenidos con la aplicación del método RISK ponen de relieve que las zonas de moderada vulnerabilidad alcanzan el 55,1% de la región estudiada, y las zonas de alta y muy alta vulnerabilidad representan el 44,6%. Estos resultados evidencian la necesidad de protección de estas cuencas y se corresponden con su naturaleza geológica, donde predominan rocas

carbonatadas kársticas y escaso desarrollo de la capa de suelo. Los resultados obtenidos se corresponden también con el diagnóstico de los principales problemas identificados en la Estrategia Ambiental 2016/2020 de la provincia Pinar del Río y con resultados de investigaciones desarrolladas por otros autores en el área.

Se demuestra que el método RISK presenta alto poder resolutivo para evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las cuencas kársticas y fisuradas - kársticas, y atendiendo a la disponibilidad de los parámetros necesarios para su implementación se recomienda su aplicación en el territorio nacional así como en otras regiones con condiciones hidrogeológicas similares.

REFERENCIAS

- AGUILAR-DUARTE, Y.; BAUTISTA, F.; MENDOZA, M.E.; DELGADO, C. Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 16, p. 243 – 263, 2013.
- AGUILAR-DUARTE, Y.; BAUTISTA, F.; MENDOZA, M.E.; FRAUSTO, O.; DELGADO, C. IVAKY: Índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico Yucateco a la contaminación. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, v. 15, n. 3, p. 1-21, 2016.
- ASAMBLEA NACIONAL DEL PODER POPULAR, ANPP. Ley No. 124 de las aguas terrestres. **Gaceta Oficial No. 51 Extraordinaria**. Cuba. 63p., 2017.
- DELEGACION TERRITORIAL DEL MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE EN PINAR DEL RÍO, CITMA. **Estrategia Ambiental de la Provincia de Pinar del Río 2016 -2020**. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Cuba, 31 p., 2016.
- DÍAZ, J. A. El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad. **Ingeniería Hidráulica y Ambiental**, v.34, n. 2, p. 46-59, 2018.
- DÖRFLIGER, N., JAUFFRET, D. ; LOUBIER, S. **Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche-Comté**. BRGM/RP-53576-FR., 140 p., 2004.
- DÖRFLIGER, N.; JEANNIN, P.; ZWAHLEN, F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). **Environmental Geology**, v. 39, n. 2, p. 165-176, 1999.
- GARCÍA, J. & GUTIÉRREZ J. **La gestión de cuencas hidrográficas en Cuba**. La Habana: Editorial Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, 95 p, 2015.
- GARCÍA, J.A.; SACASAS-LEÓN, C.; DÍAZ-DEULOFEU, A. Vulnerabilidad a la contaminación en horizontes acuíferos del sur de Cuba occidental. **Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental**, v. 34, n. 1, p. 73-83, 2018.
- GRUPO EMPRESARIAL GEOCUBA. **Modelo Digital de Elevaciones de la República de Cuba**, GEOCUBA, La Habana, 2010.
- INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y PALEONTOLOGÍA, IGP. **Mapa Geológico de la República de Cuba a escala 1:100 000**. La Habana, Servicio Geológico de Cuba, 2016.
- INSTITUTO DE SUELOS. **Mapa de los Suelos de Cuba a escala 1:25 000**, Ministerio de la Agricultura, La Habana, 1990.
- IVÁN, V. & MADL-SZONYI, J. State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook. **Environmental Earth Science**, v. 76, n. 112, p. 1-25, 2017.
- KALINSKI, R.J.; KELLY, W.E.; BOGARDI, I; PESTI G. Electrical resistivity measurements to estimate travel times through unsaturated ground water protective layers. **Journal of Applied Geophysics**, v.30, n.2., p. 161–173, 1993.
- KATYAL, D.; TOMER, T; JOSHI, V. Recent trends in groundwater vulnerability assessment techniques: A review. **International Journal of Applied Research**, v. 3, n. 5, p. 646-655, 2017.
- MARGAT, J. **Vulnerabilité des nappes d eau souterraine a la pollution**. Francia: Editorial BRGM, 68 p., 1968.

- PARDO-IGUZQUIZA, E.; DURÁN, J.; LUQUE-ESPINAR, J.; MARTOS-ROSILLO, S. Análisis del relieve kárstico mediante el modelo digital de elevaciones. Aplicación a la Sierra de las Nieves (Provincia de Málaga). **Boletín Geológico y Minero**, v. 125, n. 3, p. 381-389, 2014.
- USGS. **El ciclo del agua**. United States Geological Survey, USA, 2015. Disp. en: <http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html#global> Consultado el 15 de junio de 2020.
- VALCARCE, R.M.; VEGA, M.; RODRÍGUEZ, W.; SUÁREZ, O. Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas en la cuenca Almendares - Vento. **Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental**, v. 41, n. 2, p. 33-47, 2020
- VALCARCE, R.M. & JIMENEZ, R. Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de la Cuenca Dolores-Sagua la Chica, Cuba. **Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental**, v. 37, n. 1., p. 3-14, 2016.
- VARGAS QUINTERO, M.S. Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Ministerio de Ambiente, Bogotá, 45 p., 2010.
- VÁZQUEZ, B., FARFÁN, H. Y GUANCHE, C. Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero cársico Vento, La Habana, Cuba. **Infomin**, v. 11. n. 1, p. 1-16, 2019.
- VÍAS, J.M.; ANDREO, B.; PERLES, M.J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers. En: CARRASCO, F.; DURÁN, J.J.; ANDREO, B (Coords) *Karst and Environment*. Málaga. España, pág. 371-390, 2002. Dis. en: https://www.researchgate.net/publication/285021857_Preliminary_proposal_of_a_method_for_vulnerability_mapping_in_carbonate_aquifers Consultado el 15 de junio de 2020.
- VIDAL, V.; GONZÁLEZ-ABREU, R.; JIMÉNEZ, Y.; VALDÉS, L.; CASTRO, M.Y.; RODRÍGUEZ, D. Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero norte de la provincia Ciego de Ávila. **Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental**, v. 36, n. 2, p. 45-56, 2015.
- WWDR. **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. 2018. Disp. en: <https://www.unesco.org/water.waap> Consultado el 15 de junio de 2020.
- ZWAHLEN, F. **Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, scope, goal, results**. European Commission. COST Action 620. Belgium, 297 p, 2003. Disp. en: http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/F+E/Cost620/cost60_fb_02_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1 Consultado el 22 de marzo de 2015.

*Submetido em 9 de março de 2021
Aceito para publicação 30 de junho de 2021*