

Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas en la cuenca Almendares –Vento

Rosa María Valcarce Ortega e-mail: rosy@tesla.cujae.edu.cu
Ing. Geofísica, Prof. Titular, Univ. Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”
(Cujae), Marianao, La Habana, Cuba.

Marina Vega Carreño e-mail: mvega@civil.cujae.edu.cu
Ing. Geofísica, Prof. Titular, Univ. Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”
(Cujae), Marianao, La Habana, Cuba.

Willy Rodríguez Miranda e-mail: willy@civil.cujae.edu.cu
Ing. Geofísico, Prof. Titular, Univ. Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”
(Cujae), Marianao, La Habana, Cuba.

Oscar Suárez González e-mail:
osgonzalez@civilmail.cujae.edu.cu
Estudiante de Ing. Geofísica, Univ. Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”
(Cujae), Marianao, La Habana, Cuba.

RESUMEN

La vulnerabilidad natural de la cuenca Almendares – Vento es evaluada aplicando el método RISK, método multicriterio para cartografiar la vulnerabilidad de acuíferos cársticos que considera cuatro variables: roca del acuífero (R), condiciones de infiltración (I), cubierta o suelo protector (S) y carstificación (K). Este método es modificado introduciendo la capacidad del suelo para proteger al acuífero según su grado de erosión potencial determinado por el método EVERC. Se obtiene el mapa de vulnerabilidad natural de la cuenca a escala 1:100000 el que contribuye de manera significativa al desarrollo de planes de protección del acuífero.

Palabras clave: acuíferos cársticos, EVERC, RISK, vulnerabilidad intrínseca.

Intrinsic vulnerability of groundwater in the Almendares–Vento basin

ABSTRACT

The natural vulnerability of Almendares - Vento basin was assessed by applying the RISK method. This method evaluates four variables: aquifer rock (R), infiltration conditions (I), cover or protective soil (S) and karstification (K). This method is modified through the evaluation of the protective cover of soil by applying the EVERC method. The natural vulnerability map of the basin was obtained at 1:100 000 scale. This research contributes significantly to the development of aquifer protection plans.

Keywords: karstic aquifers, EVERC, RISK, intrinsic vulnerability.

INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas son un recurso natural especialmente vulnerable a los contaminantes y aunque presentan una elevada inercia ante los cambios de calidad, una vez producidos estos sus efectos resultan difícilmente reversibles. En las últimas décadas se ha observado un incremento en el interés por evitar la contaminación del agua subterránea y con ello, el desarrollo de diversos métodos para elaborar mapas de vulnerabilidad de acuíferos a diferentes escalas, los cuales constituyen herramientas indispensables para establecer estrategias de protección del agua subterránea y la mejor planificación del uso de la tierra (Jiménez y Martínez 2013); (Carey and Thusten 2014); (Xanake and Liesch 2017). Cuba no es una excepción y también en los últimos años se ha convertido en una prioridad la protección de los recursos hídricos subterráneos (Valcarce y Jiménez 2016); (García et al. 2018).

Las aguas subterráneas de acuíferos cársticos abastecen alrededor del 25% de la población mundial pero tienen características muy particulares que ocasionan su mayor exposición a contaminantes. La urbanización, la industria y las actividades agropecuarias que se realizan en la superficie del carst son grandes amenazas de contaminación debido a los residuos que son vertidos hacia estos acuíferos. La restauración de un acuífero contaminado es una tarea técnicamente complicada y de elevado costo, a veces irreversible, por lo que es preferible tomar medidas de prevención en lugar de la remediación. Desde los años 60's del pasado siglo y desde diversas disciplinas surgen conceptos, metodologías y enfoques para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en ambientes cársticos. Todas estas metodologías y enfoques tienen en cuenta la complejidad de los acuíferos cársticos y los diversos procesos naturales relacionados con la migración de los contaminantes (adsorción, absorción, descomposición, emisión, transformación), con velocidades de reacción variables debido a la dualidad de la descarga, la infiltración (difusa/concentrada) y la porosidad (conductos/matriz fisurada). En estos acuíferos se originan topografías externas e internas a diferentes escalas y tamaños, como depresiones cerradas y abiertas, lomeríos, valles, cavernas y complejos sistemas de drenaje subterráneo (Aguilar et al., 2013).

La cuenca hidrográfica del río Almendares, que incluye en su territorio a la cuenca cárstica subterránea Vento; es una de las principales cuencas hidrográficas de interés nacional definida por el Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas. Se considera una de las más importantes del país, abarcando un área de 470,16 km² y suministra el mayor volumen de agua para todos los usos que consume y utiliza la ciudad capital (Cuevas 2011). Debido al estado crítico de las condiciones ambientales de esta cuenca se hace necesario un estudio de su vulnerabilidad natural a la contaminación de las aguas subterráneas.

Por todo lo anterior se planteó como objetivo general de esta investigación evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca Almendares – Vento.

CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada en la cuenca Almendares – Vento, en las coordenadas planas X: 347850 - 391550 m e Y: 342649 - 367 686 m, en la hoja topográfica La Habana (3785-III) a escala 1: 50 000; presente en 10 municipios de la provincia: Playa, Plaza de la Revolución, Centro Habana, Habana Vieja, Cerro, Diez de Octubre, Marianao, Boyeros,

Arroyo Naranjo y Cotorro (figura 1). Limita por su extremo norte con las Lomas de San Francisco de Paula y el Lomerío de Santa María del Rosario, por su lado sur con las Alturas de Bejucal-Managua-Limonar, por su extremo este con las Escaleras de Jaruco y por el oeste con las cercanías de la desembocadura del río Almendares y las terrazas marinas emergidas del límite costero norte de los municipios Playa y Plaza de la Revolución. La cuenca subterránea Vento es una de las tres que abastecen a La Habana y suministra el mayor volumen de agua (8,8 m³/s). En ella se encuentran ubicados el 83% de los acueductos que abastecen a la población de La Habana, lo que representa el 47% del volumen total de agua que se entrega a la capital (Cabrera 2014). Está desarrollada fundamentalmente sobre las rocas de las formaciones Güines y Cojimar, caracterizadas por su alta permeabilidad debido a su composición carbonatada y al alto desarrollo del proceso de carstificación con presencia de oquedades y grietas. Particularmente las calizas de la formación Güines constituyen el acuífero de la región. Está caracterizada como una cuenca cerrada y alargada en dirección longitudinal que drena superficialmente por el río Almendares. El extenso desarrollo cárstico presente en esta región influye de manera notable en el régimen de escurrimiento del río. Una gran parte del escurrimiento superficial se convierte en subterráneo, al ser abandonadas las zonas marginales impermeables y alcanzar la llanura cárstica que forma la cuenca hidrográfica, dando lugar a la cuenca subterránea Vento donde la infiltración de las aguas pluviales es un elemento importante a considerar para la alimentación de aguas subterráneas. A este fenómeno contribuyen en gran medida factores como las numerosas fracturas y la abundancia de formas de absorción (dolinas, sumideros, etcétera). Además, los arroyos que abren sus cauces en esta llanura cárstica central para formar el río Almendares, permanecen secos durante casi todo el año, manteniendo su caudal sólo en la época de precipitaciones. La dirección de la corriente de las aguas subterráneas es generalmente de este a oeste. Los recursos explotables están calculados en 287 millones de m³/año.

En la cuenca existe un gran desarrollo de las actividades productivas, como industrias, fábricas, empresas, centros de investigaciones científicas, industria médico - farmacéutica, educación, salud y servicios; que aportan el valor de sus producciones a los municipios, a la provincia y al país, puesto que muchas de ellas son de carácter provincial y nacional. También se cuenta con establecimientos vinculados a los servicios de población, como son los centros hospitalarios, cadenas hoteleras e instituciones culturales. La situación ambiental de la cuenca es crítica, debido a la contaminación de sus aguas por el vertimiento de residuales líquidos y sólidos (urbanos e industriales) deficientemente tratados o sin tratamiento alguno; manejo inadecuado de los residuos sólidos, deforestación, además de problemas con la erosión de los suelos. Existe insuficiencia de alcantarillado, de lagunas de oxidación, redes de drenaje en mal estado técnico y pocas plantas de tratamientos, lo que trae consigo serios problemas a los suelos y a la calidad de las aguas del acuífero subterráneo Almendares - Vento (Cuevas2011).

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS CÁRSTICOS

Los principales métodos que han sido diseñados para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos cársticos se basan en la evaluación de los factores básicos que controlan la infiltración y la entrada de contaminantes hacia el agua subterránea. Estos factores se refieren a: “las capas protectoras”, representadas por el suelo, subsuelo, rocas no cársticas, rocas cársticas no saturadas y el epikarst; “la precipitación”, considerada como la cantidad total de agua, su distribución, intensidad y frecuencia; “la concentración de flujo”, referida a las condiciones de infiltración que pueden ocurrir debido a la presencia, predominio o ausencia de formas exocársticas,

principalmente de depresiones que representan entradas directas o de concentración de flujo de agua y contaminantes, también a aquellas variables que controlan la escorrentía, como la pendiente y la vegetación. A continuación se explica el método RISK desarrollado para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos cársticos.

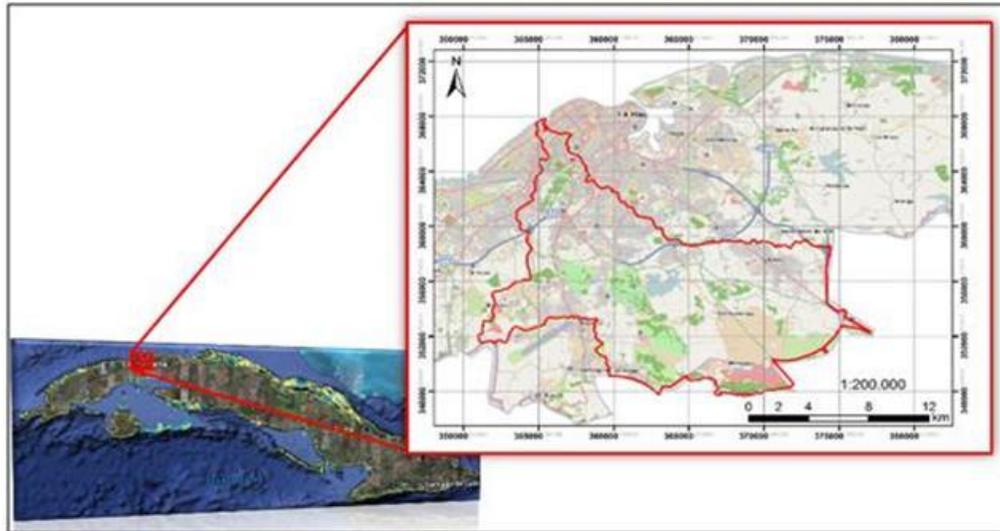


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca Almendares–Vento

Método RISK

El método RISK es un método paramétrico de rangos ponderados, que proporciona una asignación jerárquica en 5 clases de vulnerabilidad. Este método tiene en cuenta cuatro criterios. Cada criterio se divide en diferentes clases, de 0 a 4, de menos vulnerables a más vulnerables. Se asigna un factor de ponderación a cada criterio que reflejará la importancia relativa de los criterios entre sí. Es un método desarrollado para acuíferos cársticos y constituye una modificación del método EPIK. Su acrónimo representa los criterios que evalúa, como se explica a continuación (Dorfliguer et al. 2004).

Criterio R: Roca del acuífero, refleja la naturaleza de las formaciones geológicas y la fracturación de las mismas. Estos parámetros tienen una gran influencia en el tipo de circulación subterránea y, por lo tanto, en la velocidad de transferencia de un contaminante en el acuífero. La tabla 1 presenta la puntuación asignada al criterio *R*.

Tabla 1. Evaluación del criterio *R* por el método RISK

Características del criterio	Índice
Margas (35-65% de minerales arcillosos)	0
Margas calcáreas (25-35% minerales de arcilla)	1
Caliza con intercalación de niveles de marga, % de minerales de arcilla <10-25 %	2
Calizas delgadas con fracturamiento y/o dolomías masivas sin fracturas, flujos subterráneos rápidos.	3
Calizas y/o dolomías masivas con alta intensidad de fracturación y carstificación, flujo subterráneo rápido.	4
[fuente Dorfliguer et al. (2004)]	

Criterio I: Condiciones de infiltración. Las condiciones de infiltración del agua en los acuíferos cársticos son muy importantes para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de sus aguas subterráneas. Toman en cuenta la pendiente (aceleración de la escorrentía) y la presencia de pérdidas (comunicación muy rápida entre una pérdida y la salida de la red cárstica). La puntuación asignada al criterio *I* se resume en la tabla 2.

Tabla 2. Evaluación del criterio I por el método RISK

Criterio I	Índice
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
Pérdidas activas, accidentes tectónicos (fallas y alineación de sumideros)	4
[fuente Dorflieger et al. (2004)]	

Criterio 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, textura y composición del suelo.

Se definen tres clases de suelo, dependiendo de su textura y de la proporción de guijarros. Las clases tienen una calificación de 1 a 3 y luego se definen cuatro clases de vulnerabilidad cruzando la naturaleza del suelo con el espesor: En la tabla 3 se resume la forma de asignar la puntuación al criterio *S*.

El criterio *S* también fue evaluado calculando el índice de erosión potencial aplicando el método EVERC (Evaluación de la Erosión en Regiones Cársticas) desarrollado por Vega y Febles (2008), quienes incorporan un Índice de Carstificación al método CORINE (1992) que permite caracterizar, objetivamente, la dinámica de los procesos cárstico-erosivos en territorios donde existen formas cársticas de absorción. En esta investigación la cartografía del criterio *S* (suelo y cubierta protectora) a partir del método EVERC, se realizó con el objetivo de asociar las zonas de mayor vulnerabilidad del acuífero a las zonas de mayor índice de erosión potencial.

El método EVERC calcula la erosión potencial del suelo evaluando 4 índices de diagnóstico: el Índice de Erodabilidad (definido sobre la base de la textura, profundidad y pedregosidad del suelo), el Índice de Erosividad (calculado a partir del Índice Modificado de Fournier), el Índice Topográfico y el Índice de Carstificación. La figura 2 resume los elementos esenciales para el cálculo de la erosión potencial del suelo por este método.

Para calcular el Índice de Erodabilidad (*IE*) se procede como aparece en la tabla 4, atendiendo a la textura, profundidad y pedregosidad del suelo.

El Índice de Erosividad fue calculado a través del Índice Modificado de Fournier (*IMF*) empleando la ecuación siguiente:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P_t} \quad (1)$$

donde: p_i : precipitación media mensual (mm)
 P_t : precipitación media anual (mm)

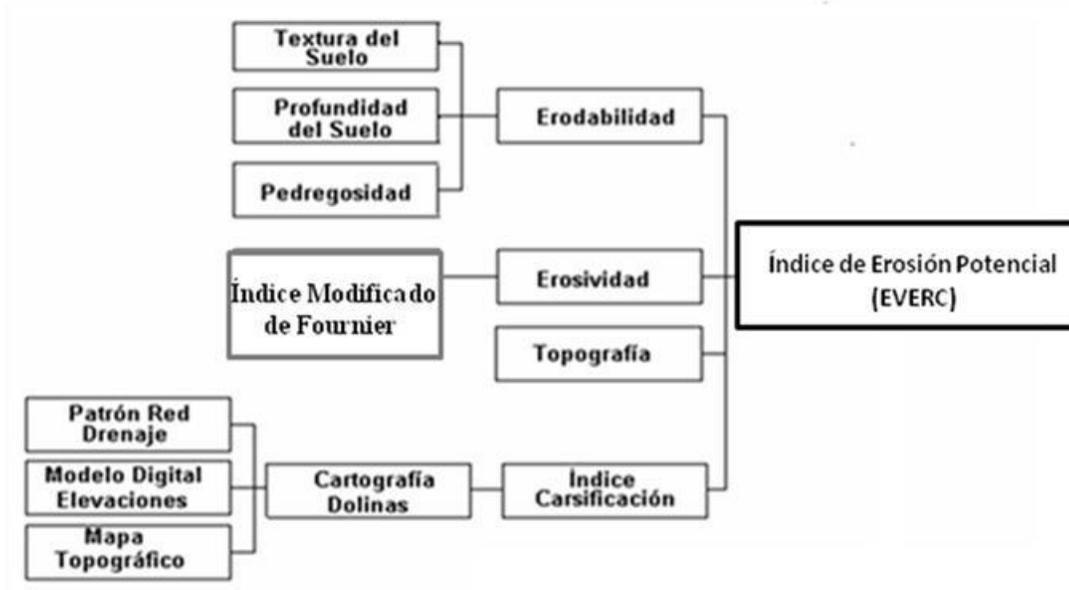


Figura 2. Método EVERC [Modificado de Vega y Febles (2008)]

Tabla 3. Evaluación del criterio S por el método RISK

TEXTURA DEL SUELO						
Guijarros		arcillas	limos	arenas		
		(0 – 15%)	1	1	2	
		(15 – 60%)	1	2	3	
		mayor que 60%	2	3	3	
TEXTURA Y ESPESOR DEL SUELO						
Espesor		Desconocido	1	2	3	
		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 Dorflieger et al. (2004)]						

El Índice Topográfico (IT) fue obtenido del mapa de pendientes calculado del modelo digital de elevaciones, como se muestra en la tabla 6.

El Índice de Carstificación (IC) fue calculado aplicando la función Densidad (disponible en ArcGIS) sobre el mapa de zonas de infiltración directa que se obtuvo superponiendo la red hidrográfica y las formas negativas del relieve. En la tabla 7 se presenta la clasificación de este índice.

Tabla 4. Determinación del Índice de Erodabilidad (IE)

FACTOR	CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	CLASE
Textura	Arcillosa	Levemente erosionable	1
	Franco arcillosa	Moderadamente erosionable	2
Profundidad (mm)	mayor que 500	Levemente erosionable	1
	250 – 500	Moderadamente erosionable	2
	menor que 250	Altamente	3
Pedregosidad (%)	16 – 90	Totalmente protegido	1
	menor que 15	No totalmente protegido	2
<i>IE</i> = clase de Textura X clase de Profundidad X clase de Pedregosidad			
RANGO DE <i>IE</i>	DESCRIPCIÓN		CLASE
0 – 3	Bajo		1
3 – 6	Moderado		2
mayor que 6	Alto		3
[Modificado de Vega y Febles (2008)]			

La tabla 5 presenta la clasificación del Índice de Erosividad, o sea, del *IMF*

Tabla 5. Clasificación del Índice de Erosividad (IMF)

VALORES DEL <i>IMF</i>	DESCRIPCIÓN	CLASE
120 – 160	Alto	3
160 – 220	Muy alto	4
[Modificado de Vega y Febles (2008)]		

Tabla 6. Evaluación del Índice Topográfico (IT)

RANGO DE PENDIENTE	DESCRIPCIÓN	CLASE
mayor que 50%	Pendiente muy pronunciada	0
15 – 50%	Pendiente fuerte	1
5 – 15%	Pendiente moderada	2
0 – 5%	Pendiente baja o plana	3
[Modificado de Vega y Febles (2008)]		

Tabla 7. Clasificación del Índice de Carstificación (IC)

RANGO DE IC	DESCRIPCIÓN	CLASE
0 – 20	Bajo	1
20 – 40	Moderado	2
40 – 60	Alto	3
mayor que 60	Muy Alto	4
[Modificado de Vega y Febles (2008)]		

Una vez que han sido evaluados los cuatro índices de diagnóstico, el Índice *EVERC* de erosión potencial se obtiene como:

$$EVERC = IE \times IMF \times IT \times IC \quad (2)$$

En la tabla 8 aparece la clasificación del Índice *EVERC*.

Tabla 8. Clasificación del Índice EVERC

RANGO DE EVERC	DESCRIPCIÓN	CLASE
0 – 5	Bajo	1
5 – 8,5	Moderado	2
mayor que 8,5	Alto	3
[Modificado de Vega y Febles (2008)]		

Criterio K: Carstificación. Este criterio evalúa el desarrollo de la red cárstica. En las zonas de pérdida, al índice *K* se le asigna valor 4 porque en estas zonas los flujos superficiales infiltran fácilmente a la red cárstica subterránea muy desarrollada. La tabla 9 presenta la puntuación asignada al parámetro *K*.

Tabla 9. Evaluación del criterio K por el método RISK

Características del criterio	Índice
Acuífero más o menos agrietado.	0
Acuífero agrietado pero sin carstificación.	1
Red cárstica poco desarrollada o poco conectada a la superficie.	2
Red cárstica bien desarrollada y más o menos conectada con la superficie	3
Red cárstica muy desarrollada y conectada con la superficie	4
[fuente Dorfliguer et al. (2004)]	

El índice de vulnerabilidad general se calcula empleando la ecuación siguiente:

$$RISK = 0,15 R + 0,41 I + 0,25 S + 0.2 K \quad (3)$$

Siendo:

RISK = Índice de vulnerabilidad general

R = Valor asignado al criterio roca del acuífero

I = Valor asignado al criterio condiciones de infiltración

S = Valor asignado al criterio suelo

K = Valor asignado al criterio carstificación

Finalmente, el índice de vulnerabilidad *RISK* se clasifica en 5 categorías (tabla 10).

Tabla 10. Clasificación para el índice de vulnerabilidad RISK

Rango de <i>RISK</i>	Clasificación	Vulnerabilidad
3,2 - 4	4	Muy alta
2,4 - 3,19	3	Alta
1,6 – 2,39	2	Moderada
0,8 – 1,59	1	Baja
0 – 0,79	0	Muy baja
[fuente Dorfliguer, et al. (2004)]		

Aplicación del método RISK en la cuenca Almendares - Vento

En la cuenca Almendares – Vento fue evaluada la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicando el método RISK y el método RISK modificado, siguiendo los pasos siguientes:

Paso 1: Cartografía de cada criterio. Se utilizó la información existente en: Mapa Geológico de la República de Cuba a escala 1:100 000 (Instituto de Geología y Paleontología), Mapa de Suelos del área de estudio a escala 1:100 000 (Dirección Nacional de Suelos y Fertilizantes) y Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a escala 1:25 000.

Considerando los parámetros evaluados por el método RISK y la información del Mapa Geológico de la República de Cuba, el criterio *R* (roca acuífera), quedó evaluado como se muestra en la tabla 11.

Para cartografiar el criterio *I* (condiciones de infiltración) se obtuvo el mapa de pendientes del MDE para su posterior clasificación como muestra la tabla 2. Las zonas de pérdidas activas se determinaron empleando la malla Fill creada con el ArcGIS 10.2.2 a partir del MDE. Al ser sustraída esta malla al MDE se obtuvo las áreas donde existen formas negativas del relieve. Teniendo en cuenta la geomorfología del área de estudio, estas formas negativas del relieve pueden tratarse de manifestaciones de paisaje cárstico como dolinas, uvalas, poljes (Pardo-Iguzquiza et al., 2014).

Luego se superpuso la red de drenaje superficial y se detectaron aquellas áreas que constituyen zonas de infiltración por corresponderse con depresiones del relieve en las que el flujo de agua superficial pierde su continuidad. La determinación de estas zonas fue de gran relevancia para el resultado final de la investigación porque constituyen áreas de muy alta vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas, por cuanto su presencia indica la conexión directa de la superficie con la red cárstica subterránea y por tanto la comunicación inmediata de cualquier contaminante superficial con el acuífero.

En esta situación se encuentra la Presa “Ejército Rebelde” puesto que en investigaciones anteriores se reporta que influye significativamente en la recarga del acuífero (Cabrera 2014). También se tuvo en cuenta para la cartografía del criterio *I* la presencia de fallas u otros accidentes tectónicos que propicien la infiltración de contaminantes. La figura 3 presenta los resultados obtenidos en el área de estudio.

Tabla 11. Evaluación del criterio R para el área de estudio

Formaciones	Descripción	Puntuación
Güines, Jaimanitas	Calizas biodetríticas masivas, muy carstificadas y fosilíferas.	4
Colón, Cojímar, Vedado	Calizas, margas calcáreas y arenáceas	3
Universidad, Tinguaro, Mercedes, El Cangre, Peñalver, Jaruco, Chirino, Mariel, Guanajay, Vía Blanca	Margas y calizas arcillosas	2
Capdevila, Sta. María del Rosario, La Charca, Loma el Añil, Consuelo, Depósitos aluviales	Calizas con alto contenido de arcilla	1

Para cartografiar el criterio *S* (suelo y cubierta protectora) como establece el método RISK, se consultó la información del Mapa de Suelos y se comprobó que según la textura y pedregosidad

El criterio *K* (red cárstica o carstificación) se evaluó como se muestra en la tabla 12, teniendo en cuenta las manifestaciones del desarrollo cárstico en superficie y las zonas de infiltración directa. También fueron consideradas las características de la roca acuífera.

Tabla 12. Evaluación del criterio *K* para el área de estudio

Composición	Descripción	Puntuación
Zonas con infiltración permanente	Red cárstica muy desarrollada y conectada con la superficie	4
Formaciones Güines, Jaimanitas, Colón, Cojímar, Vedado	Red cárstica bien desarrollada y más o menos conectada con la superficie	3
Formaciones Universidad, Tinguaro, Mercedes, El Cangre, Peñalver, Jaruco, Chirino, Mariel, Guanajay, Vía Blanca, Capdevila, Sta. María del Rosario, La Charca, Loma el Añil, Consuelo, Depósitos aluviales	Red cárstica poco desarrollada y poco conectada con la superficie	2

Paso 2: Discretización de los mapas. La discretización de los mapas se efectuó asignando a cada celda los valores de clasificación ya descritos y convirtiéndolos a formato *ráster*.

Paso 3: Cálculo de la vulnerabilidad global en cada malla. El índice de vulnerabilidad global *RISK* se calculó para cada celda del mapa empleando la ecuación (3).

Paso 4: Clasificación del índice *RISK* en cinco categorías como aparece en la tabla 10.

RESULTADOS

Las figuras 4, 5, 6, 7 y 8 muestran los mapas de cada uno de los criterios empleados en la aplicación del método *RISK* y del método *RISK* modificado.

La figura 9 presenta el mapa de vulnerabilidad intrínseca de la Cuenca Almendares - Vento considerando la cartografía del criterio *S* por el método *RISK*, y la figura 10 presenta los resultados obtenidos por el método *RISK* modificado, o sea, considerando la erosión potencial del suelo calculada por el índice *EVERC*. Destaca que no existe ninguna zona dentro del área de estudio con muy baja o baja vulnerabilidad.

DISCUSIÓN

En los mapas obtenidos solo se describen tres categorías de vulnerabilidad: muy alta, alta y moderada, por lo que se evidencia la necesidad de una correcta gestión integrada de esta cuenca para garantizar la protección de sus aguas subterráneas a la contaminación.

Los resultados obtenidos con el método *RISK* y con el método *RISK* modificado son muy similares, pero con este último se logra una mayor diferenciación entre zonas con moderada y alta vulnerabilidad. O sea, cartografiar el criterio Suelo considerando su erosión potencial permitió una evaluación más detallada de la vulnerabilidad de esta cuenca cárstica.

Los resultados de la aplicación del método RISK modificado reflejan que la mayor parte del área de estudio (61%), correspondiente al centro sur de la cuenca Almendares - Vento, se evalúa con una alta vulnerabilidad de las aguas subterráneas.

Existe una pequeña representación de áreas evaluadas con muy alta vulnerabilidad (3,5%), que coinciden con zonas de infiltración directa de las aguas superficiales, y el 35,4 % restante se corresponde con zonas de vulnerabilidad moderada, ubicadas al noroeste del área de estudio.

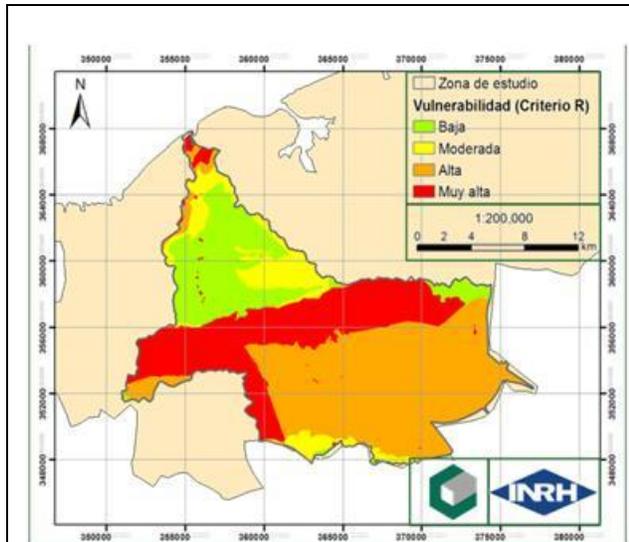


Figura 4. Mapa de clasificación del criterio R

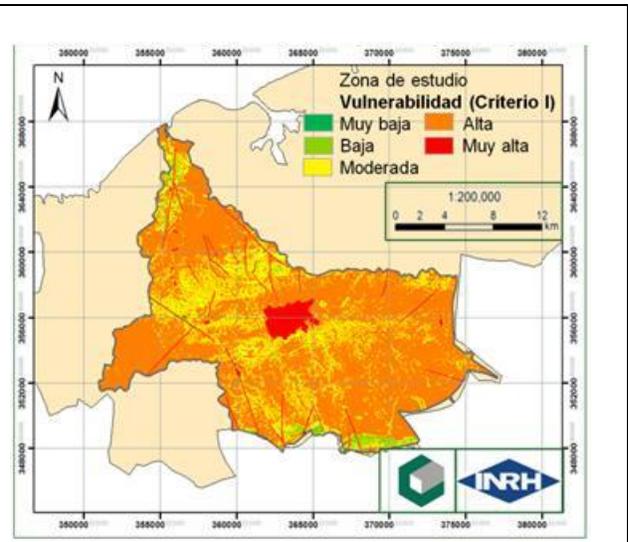


Figura 5. Mapa de clasificación del criterio I

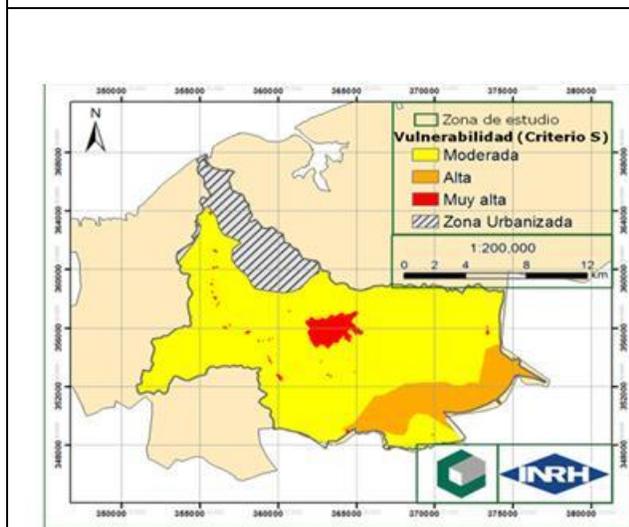


Figura 6. Mapa de clasificación del criterio S (según RISK)

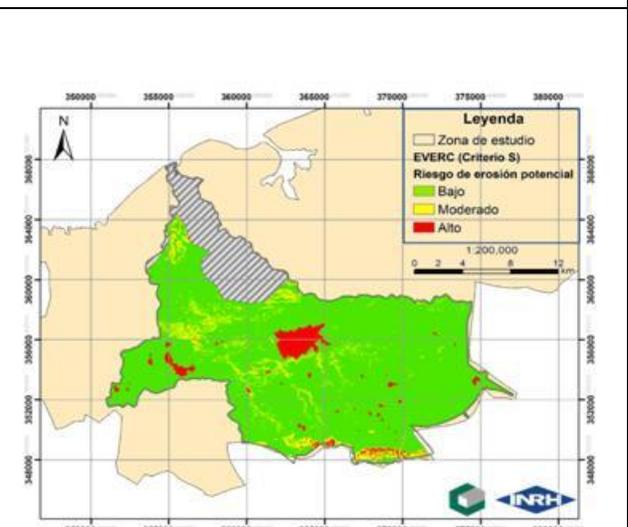


Figura 7. Mapa de clasificación del criterio S (según EVERC)

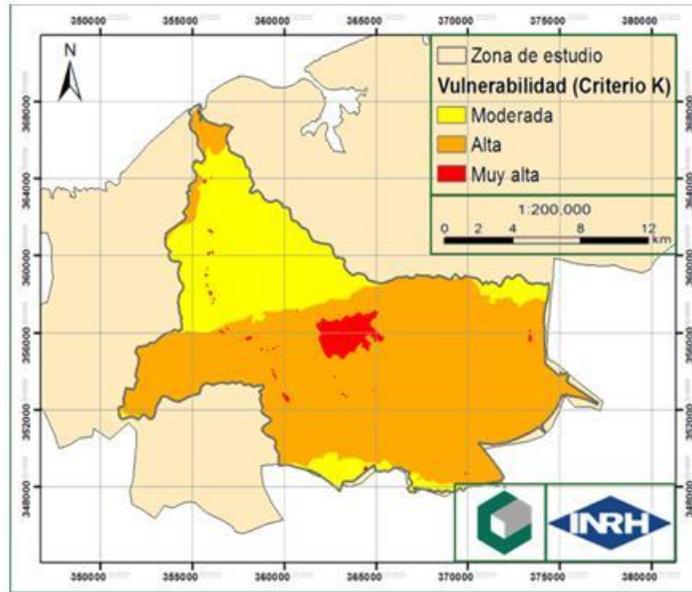


Figura 8. Mapa de clasificación del criterio K

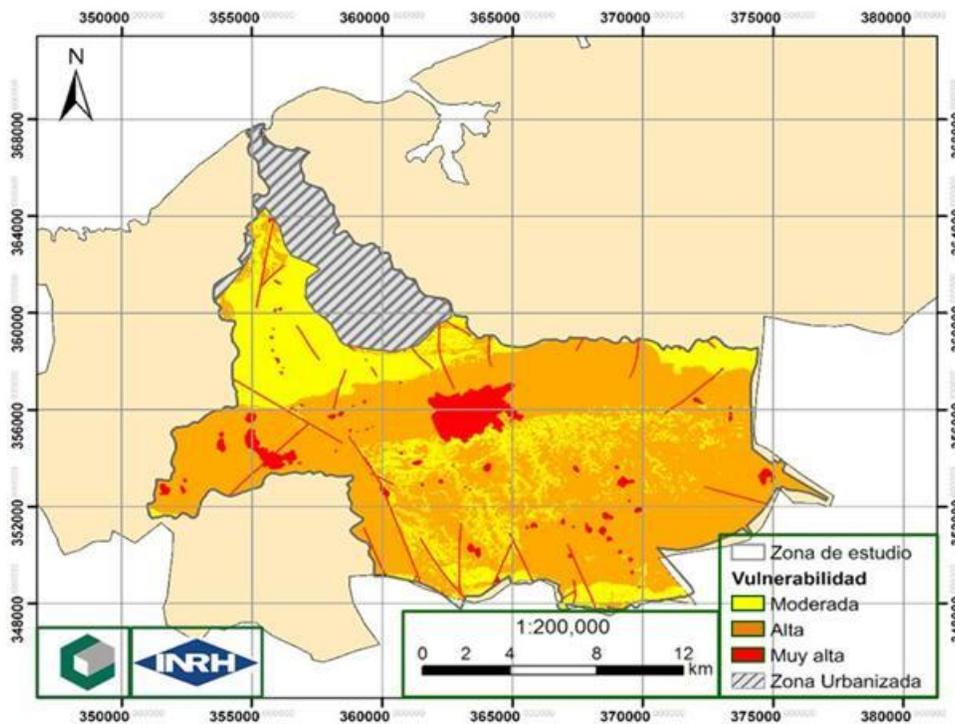


Figura 9. Mapa de vulnerabilidad natural de la cuenca Almendares – Vento obtenido por el método RISK

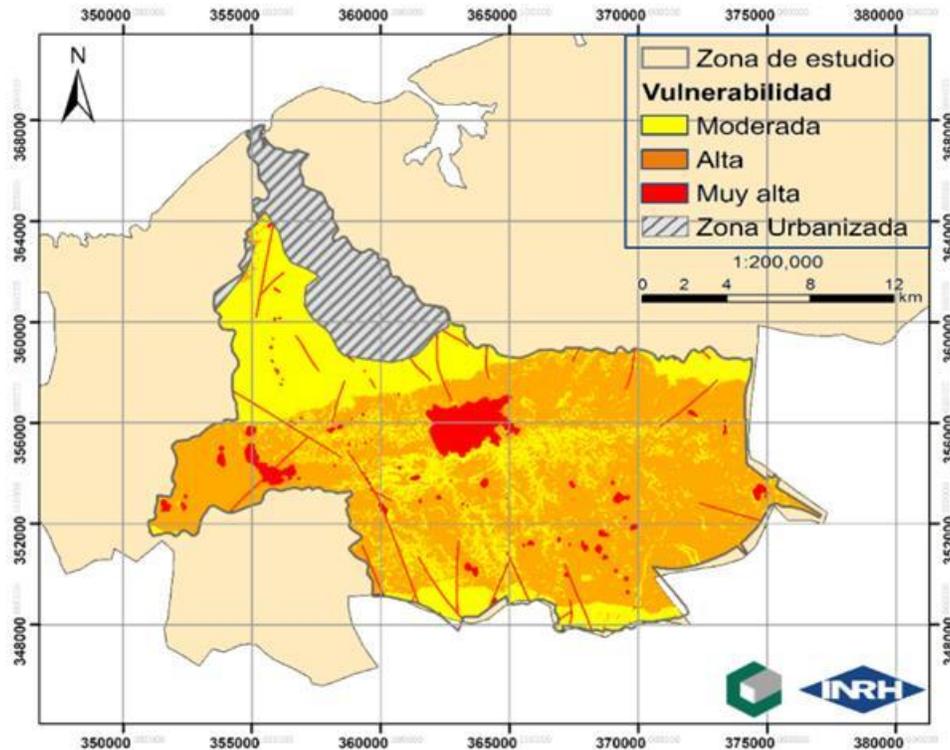


Figura 10. Mapa de vulnerabilidad natural de la cuenca Almendares – Vento obtenido por el método RISK modificado

CONCLUSIONES

- Los resultados presentados revelan el grado de protección natural a la contaminación de las aguas subterráneas de la cuenca Almendares –Vento y evidencia la necesidad de concretar planes de mitigación de la contaminación y un ordenamiento territorial responsable en el área estudiada.
- La modificación introducida al método RISK, consistente en evaluar el criterio *S* a partir de la erosión potencial del suelo determinada por el índice *EVERC*, permitiouna mayor diferenciación entre zonas con moderada y alta vulnerabilidad.
- Se recomienda evaluar el riesgo de contaminación de la cuenca y definir las zonas de protección de las fuentes de abasto, integrando la información de los focos contaminantes presentes y el mapa de vulnerabilidad obtenido.

REFERENCIAS

- Aguilar Y., Bautista M., Mendoza y Delgado, C.** (2013). “Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos”. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, Vol. 16, No. 2, pp. 243-263. ISSN 1870-0462, México.
- Cabrera E. H.** (2014). “Modelación matemática del acuífero de Vento, Cuba”. Tesis de diploma, Facultad de Ingeniería Civil, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba.
- Carey M. and Thursten N.** (2014). “New groundwater vulnerability mapping methodology”. Environmental Agency, ISBN: 978-1-849111-318-2, Bristol, UK.

- CORINE** (1992). “Soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community”. Commission of the European Communities, Brussels, Belgium. Extraído de http://reports.eea.eu.int/COR0-soil/en/soil_erosion.pdf. en febrero 2018.
- Cuevas J. L.** (2011). “Una aproximación al estado actual del medio ambiente en la cuenca hidrográfica Almendares-Vento. SIG y Multimedia”. Memorias de IX Congreso Cubano de Geología, ISBN 959-7117-11-8. Sociedad Cubana de Geología, La Habana, Cuba.
- Dorflieger N., Jauffret D. and Loubier S.** (2004). “Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche – Comté”. Rapport: BRGM RP-53576-FR, Paris, Francia.
- García J. A., Sacasas C. y Díaz A. R.** (2018). “Vulnerabilidad a la contaminación en horizontes acuíferos del sur de Cuba occidental”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 39(1): 73-83, ISSN 1815-591X, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Univ. Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría”, Cujae, Cuba.
- Jiménez A. y Martínez C.** (2013). “Estrategias de protección del agua subterránea destinada al consumo humano en la cuenca del Guadalquivir”. Boletín Geológico y Minero, Vol. 124, No. 1, pp: 3 – 19. ISSN: 0366-0176, España.
- Pardo-Iguzquiza E., Durán J., Luque-Espinar J. A. y 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, Vol. 125, No. 3, pp. 381-389. ISSN 0366-0176, España.
- 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.
- Vega M. y Febles J. M.** (2008). “Aplicación del nuevo método de Evaluación de la Erosión de los Suelos (EVERC) y el modelo MMF en suelos de la subcuenca ganadera de Mampostón en la provincia La Habana, Cuba”. Revista Cubana de Ciencia Agrícola, Vol. 42, No. 3, pp. 305 – 311, ISSN 0034-7485, Cuba.
- Xanake J. and Liesch T.** (2017). “Contamination risk and drinking water protection for a large-scale managed aquifer recharge site in a semi-arid karst region, Jordan”. Hydrogeology Journal. Vol.10, No. 25. pp. 1 – 16. DOI 10.1007/s10040-017-1586-0. Springer – Verlag Berlín Heidelberg. Alemania.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

Rosa María Valcarce Ortega <https://orcid.org/0000-0001-9981-6832>

Dirigió la investigación y su diseño. Trabajó en procesamiento de los datos y conclusiones de la investigación., redacción y revisión del informe final.

Marina Vega Carreño <https://orcid.org/0000-0001-6745-5282>

Participó en el diseño de la investigación. Trabajó en procesamiento de datos y conclusiones de la investigación., redacción y revisión del informe final.

Willy Roberto Rodríguez Miranda <https://orcid.org/0000-0003-2938-6472>

Participó en el diseño. Asesoró en procesamiento de datos y sistemas de información geográfica.

Oscar Antonio Suárez González <https://orcid.org/0000-0003-1617-5262>

Participó en el diseño. Trabajó en el procesamiento de datos, realizó trabajos de campo, haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Participó en la redacción del informe final.