

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

Rosa María Valcarce Ortega

Ingeniera Geofísica, Profesora Titular de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, Calle 114 # 11901 E/ Rotonda y Ciclovía, Marianao, La Habana, Cuba.e-mail: rosy@tesla.cujae.edu.cu

Marina Vega Carreño

Ingeniera Geofísica, Profesora Titular de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, Calle 114 # 11901 E/ Rotonda y Ciclovía, Marianao, La Habana, Cuba.e-mail: mvega@civil.cujae.edu.cu

Willy Rodríguez Miranda

Ingeniero Geofísico, Profesor Titular de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, Calle 114 # 11901 E/ Rotonda y Ciclovía, Marianao, La Habana, Cuba.e-mail: willy@civil.cujae.edu.cu

Oscar Suárez González

Estudiante de Ingeniería Geofísica de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, Calle 114 # 11901 E/ Rotonda y Ciclovía, Marianao, La Habana, Cuba. e-mail: osgonzalez@civilmail.cujae.edu.cu

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 or 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. 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. Es por ello que, 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. (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, abarca un área de 470,16 km² y suministra el mayor volumen de agua para todos los usos que consume y utiliza la ciudad capital (Cabrera 2014).

Muchas investigaciones se han desarrollado sobre la cuenca hidrográfica del río Almendares para evaluar su situación ambiental. En este sentido se destacan las investigaciones de Cuevas (2011), quien demuestra la contaminación de sus aguas superficiales y subterráneas por el vertimiento de residuales líquidos y sólidos (urbanos e industriales) deficientemente tratados o sin tratamiento alguno, los problemas que ocasionan la deforestación y la erosión de los suelos, unido a la insuficiencia de alcantarillado y de lagunas de oxidación, redes de drenaje en mal estado técnico y poca existencia de plantas de tratamientos. Identificó las fuentes contaminantes que tributan sus residuales directamente hacia el acuífero subterráneo Vento y los patrones de flujos de la contaminación superficial, sin embargo no evaluó la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas. Recientemente, Vázquez et al. (2019) evaluaron la vulnerabilidad natural del acuífero Vento aplicando el método PC, en el que los parámetros empleados se agrupan en Protección natural del acuífero (P) y Concentración del flujo (C). Este método es una simplificación del enfoque europeo para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos cársticos (Daly et al. 2002).

Atendiendo a la importancia y estado crítico de las condiciones ambientales de esta cuenca, y con el objetivo de continuar profundizando en el estudio de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de sus aguas subterráneas, se desarrolló esta investigación en la que se aplica, por primera vez en Cuba, el método RISK.

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. 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.

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS CÁRSTICOS

Los principales métodos 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. A continuación se explica el método RISK desarrollado para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos cársticos.

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 cuatro criterios. Cada uno 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).

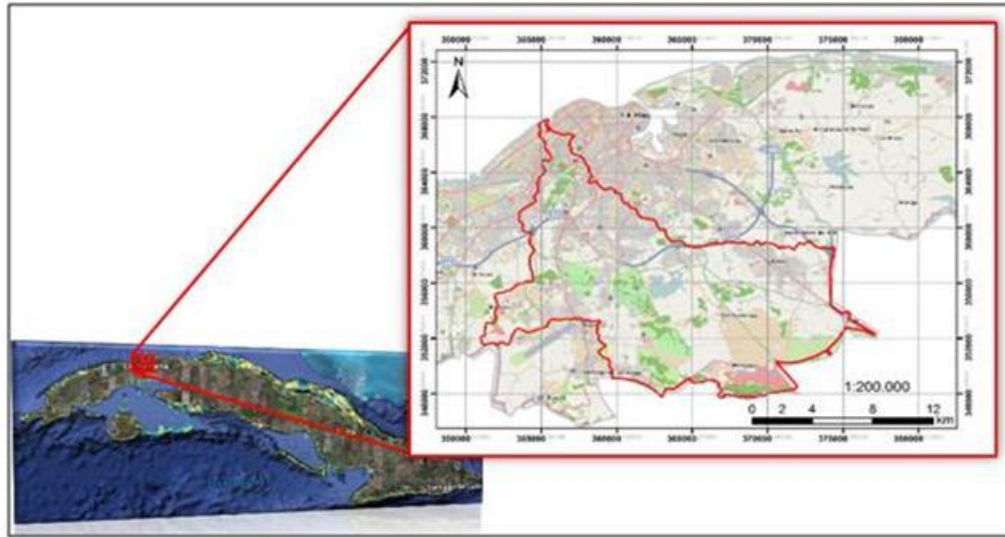


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca Almendares–Vento

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	Puntuación
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.

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 T-1, T-2 o T-3, y luego se define la puntuación al criterio *S* considerando la textura y el espesor del suelo de la forma que se indica en la tabla 3.

Tabla 2. Evaluación del criterio I por el método RISK

Criterio I	Puntuación
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)]	

Tabla 3. Evaluación del criterio S por el método RISK

CLASIFICACIÓN SEGÚN TEXTURA DEL SUELO					
Gujarros	(0 – 15%)	arcillas	limos	arenas	
		T-1	T-1	T-2	
	(15 – 60%)	T-1	T-2	T-3	
	mayor que 60%	T-2	T-3	T-3	
PUNTUACIÓN ASIGNADA CONSIDERANDO TEXTURA Y ESPESOR DEL SUELO					
Espesor	mayor que 100 cm	Textura desconocida	T-1	T-2	T-3
		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 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. No se tiene en cuenta la cobertura y uso del suelo porque el objetivo es calcular la erosión potencial, si el objetivo fuera calcular la erosión actual del suelo en un momento concreto, y no la erosión potencial, deberán incluirse esos parámetros.

Para iguales precipitaciones mensuales y anuales, la erosividad del suelo puede ser diferente

en función del comportamiento de la intensidad de la lluvia. El Índice Modificado de Fournier (IMF) definido por Arnoldus (1978), es una solución alternativa para estimar la erosividad cuando no se disponen de datos de intensidad de las precipitaciones. En la presente investigación fue empleado el IMF, calculado según la ecuación 1, empleando la serie de lluvia del período 1985 – 2006.

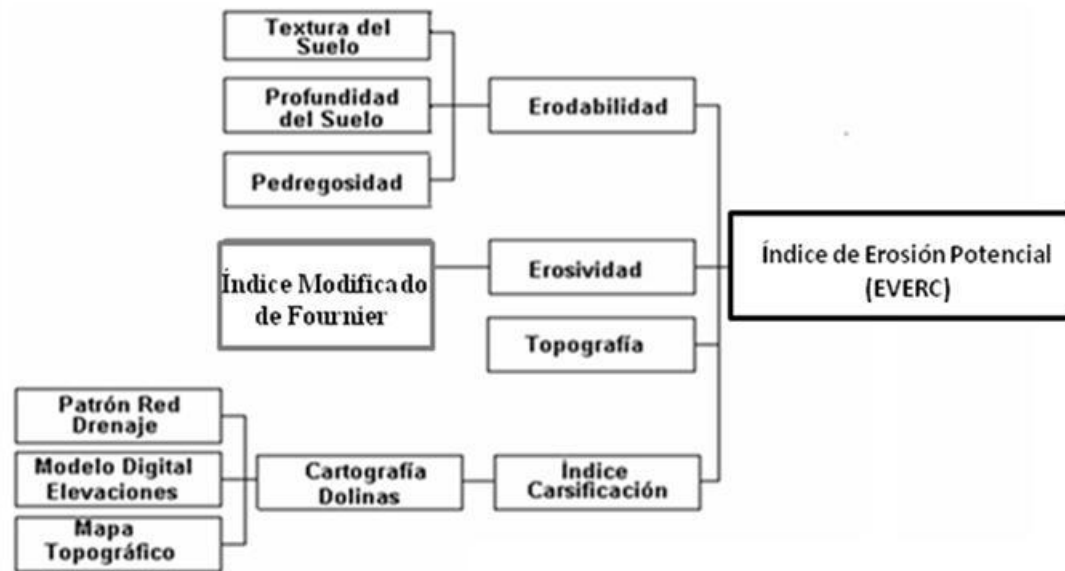


Figura 2. Método EVERC [Modificado de Vega y Febles (2008)]

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

donde: p_i : precipitación media mensual (mm)

P_t : precipitación media anual (mm)

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

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.

El Índice *EVERC*, que expresa la erosión potencial del suelo, se obtiene multiplicando los valores de clase asignados a cada uno de los índices de diagnóstico, aplicando la ecuación (2).

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

En la tabla 8 aparece la puntuación asignada al Índice *EVERC* atendiendo a su rango de variación.

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 4. Determinación del Índice de Erodabilidad (IE)

FACTOR	CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	CLASE
Textura	Arcillosa	Levemente erodable	1
	Franco arcillosa	Moderadamente erodable	2
Profundidad (mm)	mayor que 500	Levemente erodable	1
	250 – 500	Moderadamente erodable	2
	menor que 250	Altamente	3
Pedregosidad (%)	16 – 90	Totalmente protegido	1
	menor que 15	No totalmente protegido	2
$IE = \text{clase de Textura} \times \text{clase de Profundidad} \times \text{clase de Pedregosidad}$			
RANGO DE IE	DESCRIPCIÓN		CLASE
0 – 3	Bajo		1
3 – 6	Moderado		2
mayor que 6	Alto		3
[Modificado de Vega y Febles (2008)]			

Tabla 5. Clasificación del Índice de Erosividad (IMF)

VALORES DEL IMF	DESCRIPCIÓN	CLASE
Menor que 60	Muy Bajo	1
60 - 90	Bajo	2
90 - 120	Moderado	3
120 - 160	Alto	4
Mayor que 160	Muy Alto	5
[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)]		

Tabla 8. Clasificación del Índice EVERC

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

Tabla 9. Evaluación del criterio K por el método RISK

Características del criterio	Puntuación
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 RISK se calcula empleando la ecuación (3). Los coeficientes empleados para ponderar cada criterio son los propuestos por los autores del método RISK (Dorfliguer et al. 2004) quienes plantean que éstos pueden variar según criterios de los expertos. En la presente investigación se decidió mantener estos coeficientes, los que pudieran ser modificados en investigaciones futuras sobre la base de resultados de trabajos dirigidos a la validación de los mapas propuestos.

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

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 la información del Mapa Geológico de la República de Cuba, el criterio *R* (roca acuífera), quedó evaluado como se muestra en la tabla 11.

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 *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.

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 todos los suelos presentes en el área de estudio muestran un alto contenido de material arcilloso y la pedregosidad varía entre 15 y 60 %. De ahí que el elemento decisivo para la evaluación del criterio estuvo basado en el espesor, resultando este entre 0 y 20 cm (puntuación 3 y vulnerabilidad alta) y entre 20 y 100 cm (puntuación 2 y vulnerabilidad moderada).

Cartografiando el criterio *S* por su erosión potencial calculada por el índice *EVERC*, se obtiene que los suelos del área de estudio se clasifican como levemente erodables al presentar textura arcillosa, arcillo arenosa y arcillo limosa.

Según el espesor del suelo toda el área presenta suelos levemente erodables y según el porcentaje de pedregosidad (mayor al 15%) se considera que son suelos totalmente protegidos. Es por ello que el índice de erodabilidad (IE) para toda la región de estudio es bajo.

El índice de erosividad fue obtenido calculando el Índice Modificado de Fournier (*IMF*) con datos de los pluviómetros presentes en la cuenca, siendo procesada la información de la serie de lluvia del período 1985 – 2006. El *IMF* resultó muy superior a 160 para toda el área, lo que clasifica como alta erosividad.

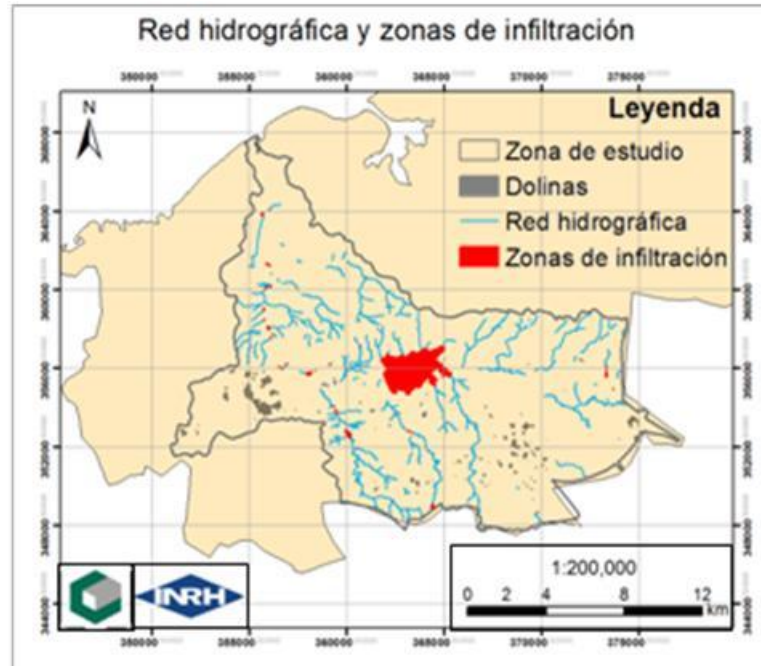


Figura 3. Superposición de la red hidrográfica y formas negativas del relieve para determinar las zonas de infiltración directa

El índice topográfico (*IT*) se obtuvo calculando las pendientes, quedando clasificado desde baja hasta muy pronunciada (tabla 6). Por último, el índice de carstificación (*IC*) en la zona fue clasificado en tres clases: bajo, moderado y alto (tabla 7).

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, Cojimar, 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

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.

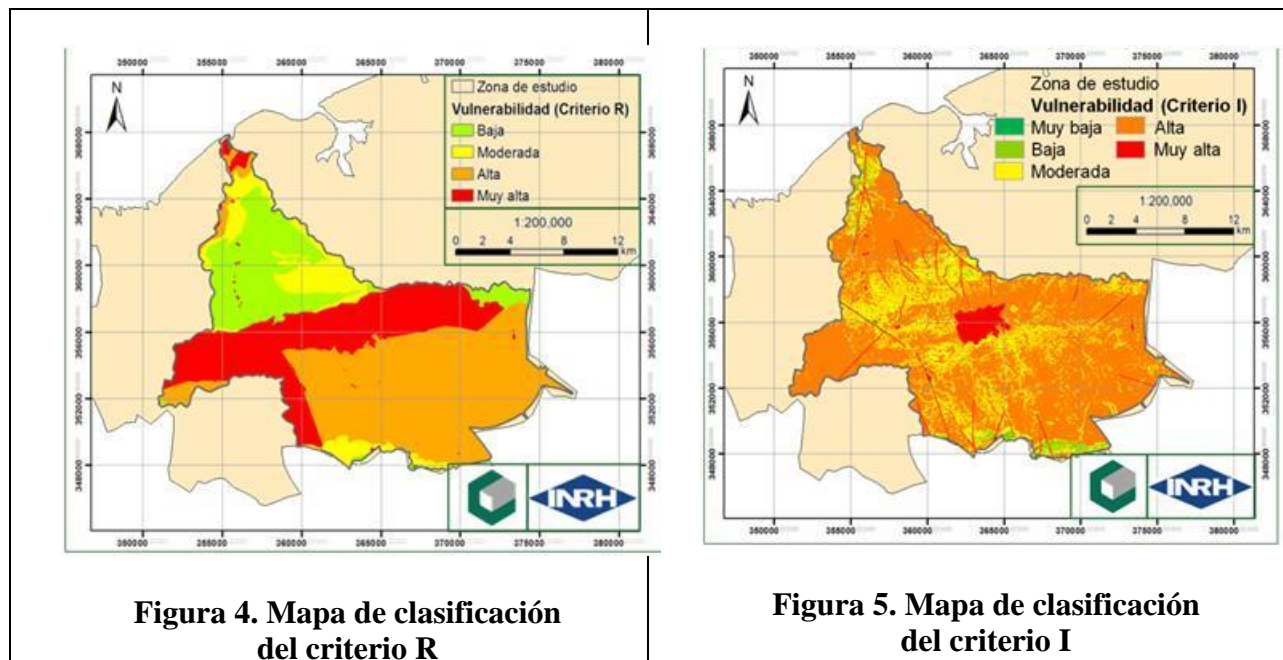
DISCUSIÓN

En los mapas obtenidos 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, presenta 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.



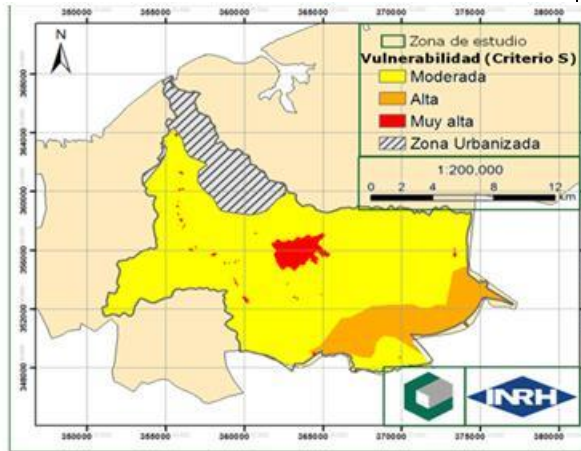


Figura 6. Mapa de clasificación del criterio S (según RISK)

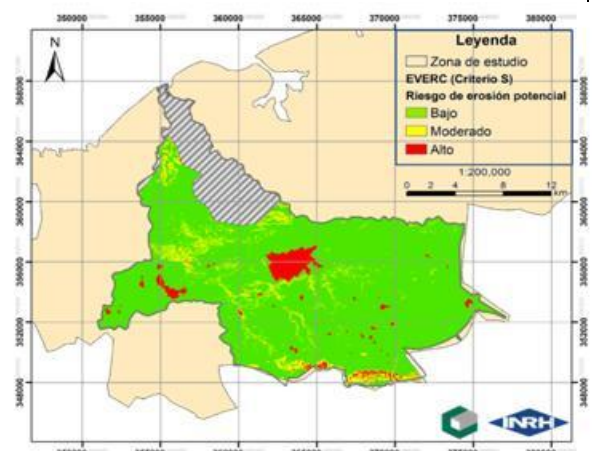


Figura 7. Mapa de clasificación del criterio S (según EVERC)

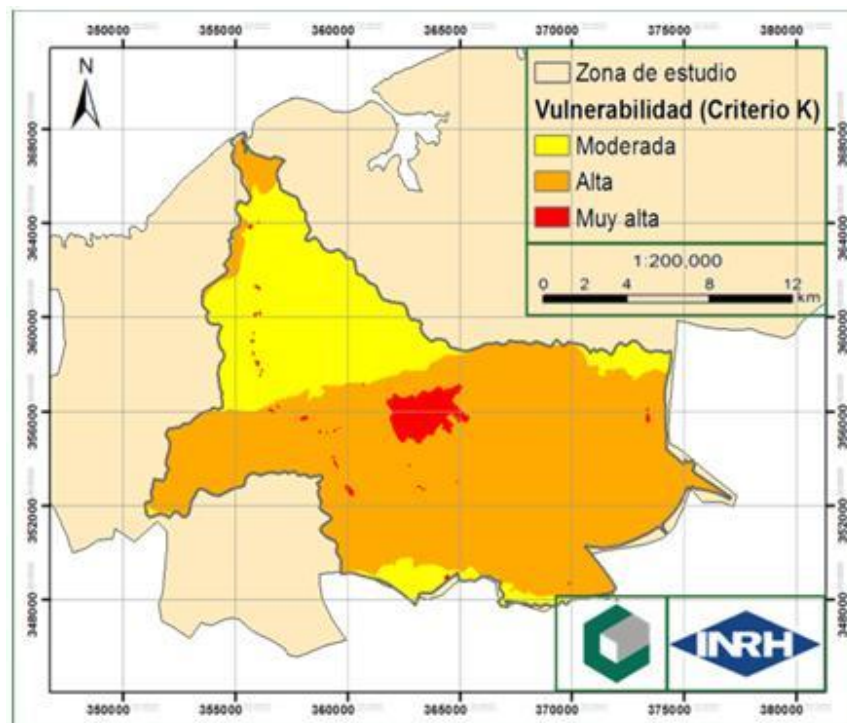


Figura 8. Mapa de clasificación del criterio K

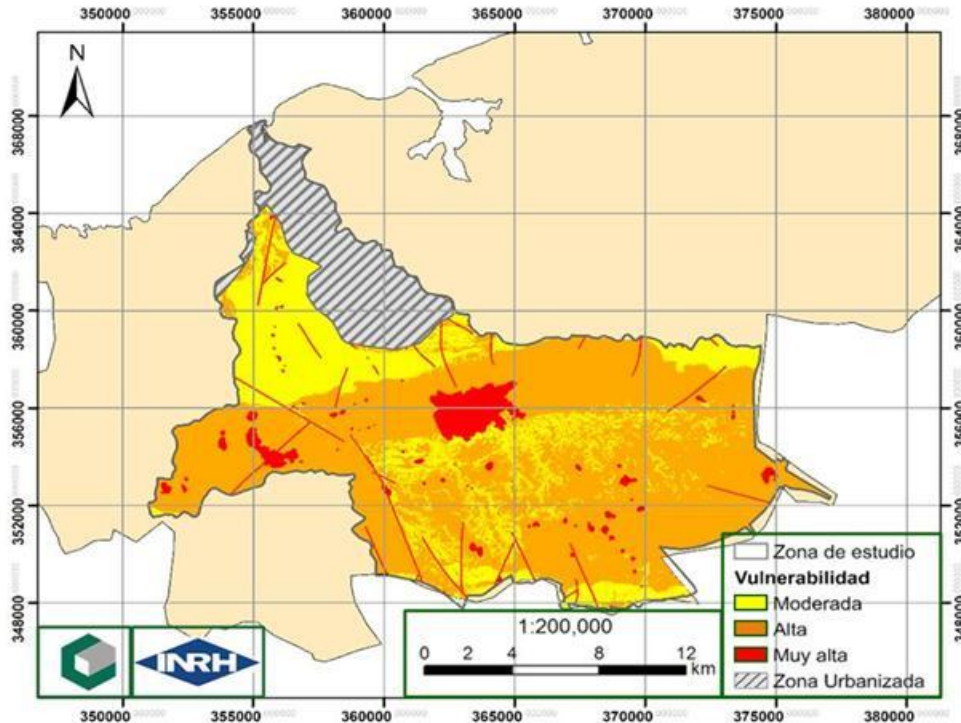


Figura 9. Mapa de vulnerabilidad natural de la cuenca Almendares – Vento obtenido por el método RISK

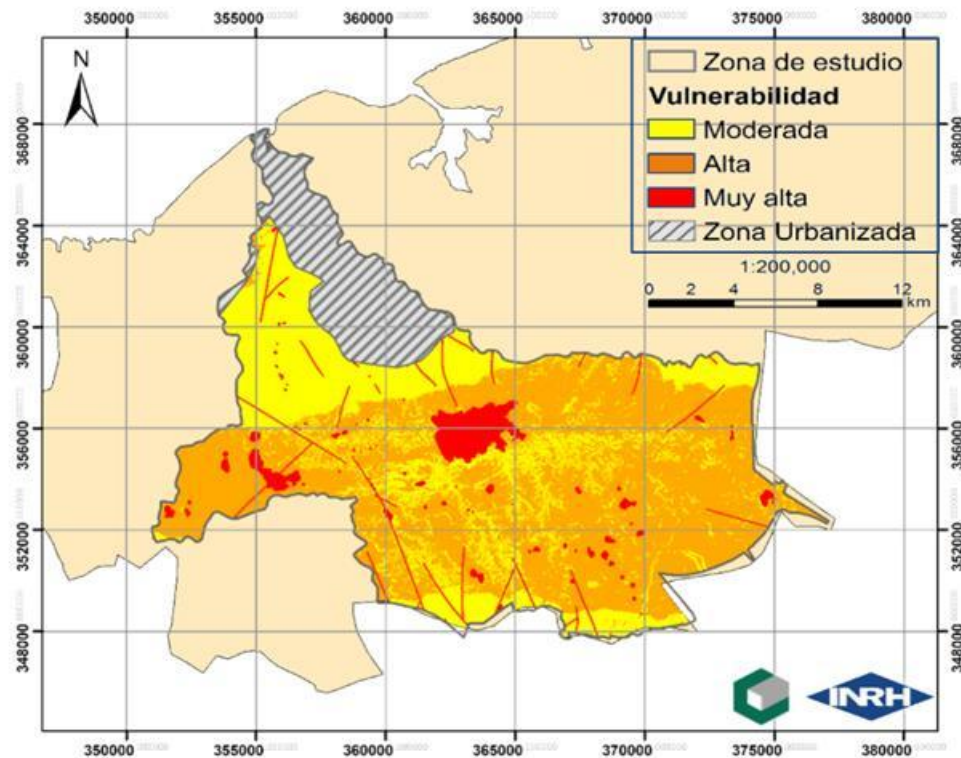


Figura 10. Mapa de vulnerabilidad natural de la cuenca Almendares – Vento obtenido por el método RISK modificado

Al comparar estos resultados con los obtenidos por Vázquez et al. (2019), se aprecia que el valor medio de vulnerabilidad obtenido en el área de estudio por esos investigadores clasifica como de moderada vulnerabilidad, mientras que el valor medio de vulnerabilidad obtenido en la presente investigación clasifica como de alta vulnerabilidad. Ello se explica por el uso de métodos diferentes para evaluar la vulnerabilidad. Vázquez et al. (2019) aplicaron el método PC que considera el tipo de vegetación como uno de los parámetros para evaluar el criterio concentración de flujo (C), lo que le confiere a ese método un enfoque de evaluación de vulnerabilidad actual y no de vulnerabilidad intrínseca. Se considera que el método RISK responde de forma más efectiva a la vulnerabilidad intrínseca de la cuenca, a partir de los parámetros y criterios que emplea.

CONCLUSIONES

Los resultados presentados revelan el grado de protección natural intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas de la cuenca Almendares –Vento, y evidencian 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 suelo (S) a partir de su erosión potencial determinada por el índice *EVERC*, permitió una 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.
- Arnoldus, H. M.** (1978). “An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation”. In *Assessments of erosion* (ed. M. De Boodst and D. Gabriels), pp. 127-132. John Wiley and Sons, Inc. New Cork.
- 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.
- 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.
- Daly, D., Dessargues, A., Drew, D., Dunne, S., Godscheider, N., Neale, S., Popescu, I.C. and Zwahlen, F.** (2002). Main concepts of the European Approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping”. *Hydrogeology Journal*. Vol. 10, No. 2. pp. 340 - 345. DOI 10.1007/s10040-017-1586-0. Springer – Verlag Berlín Heidelberg. Alemania.

- 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.
- 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.
- Vázquez B., Farfán H. y Guanche C.** (2019). “Evaluación de la Vulnerabilidad y el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero cársico Vento, La Habana, Cuba. Infomin. Vol. 11. Extraído de <http://www.infomin.co.cu> en junio 2019.
- 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.

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 el procesamiento de datos y uso de 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.