

Evaluación de la vulnerabilidad a la intrusión marina en el sector Güira–Quivicán del acuífero costero Cuenca Sur de Artemisa y Mayabeque

Valcerce-Ortega, Rosa María; Forcada-Labrador, Carlos Enrique

Evaluación de la vulnerabilidad a la intrusión marina en el sector Güira–Quivicán del acuífero costero Cuenca Sur de Artemisa y Mayabeque

Minería y Geología, vol. 37, núm. 1, 2021

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa 'Dr Antonio Nuñez Jiménez', Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223566343002>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Evaluación de la vulnerabilidad a la intrusión marina en el sector Güira–Quivicán del acuífero costero Cuenca Sur de Artemisa y Mayabeque

Evaluating vulnerability to marine intrusion in Cuenca Sur coastal aquifer at Güira–Quivicán sector in Artemisa and Mayabeque provinces

Rosa María Valcerce-Ortega

Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba

rosy@tesla.cujae.edu.cu

 <https://orcid.org/0000-0002-7397-6296>

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223566343002>

Carlos Enrique Forcada-Labrador

Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba

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

Recepción: 17 Junio 2020

Aprobación: 21 Septiembre 2020

RESUMEN:

El sector Güira–Quivicán del acuífero cárstico costero Cuenca Sur aporta el 58 % del agua que abastece a la capital cubana. El agua subterránea en este acuífero drena libremente al mar, por lo que es imprescindible el control sistemático de la intrusión marina. Para evaluar la vulnerabilidad del acuífero a la intrusión salina fue aplicado el método GALDIT, que es un método paramétrico de superposición de rangos ponderados de la información hidrogeológica referida a: tipo de acuífero, conductividad hidráulica, nivel piezométrico, distancia a la costa, áreas con evidencias de intrusión salina y espesor del acuífero. El método fue adaptado a las características del área y a la información disponible y se obtuvo alta vulnerabilidad a la intrusión marina en el 31,5 % de este sector, mientras el 49,5 % tiene vulnerabilidad moderada. La alta correlación estadística entre el mapa de vulnerabilidad a la intrusión marina y el mapa de profundidad de la intrusión salina elaborado a partir de la interpretación de los sondeos eléctricos verticales medidos en el área, demuestra la validez de los resultados que se presentan.

PALABRAS CLAVE: intrusión salina, vulnerabilidad a la intrusión marina, método GALDIT, acuífero costero.

ABSTRACT:

Güira–Quivicán sector of Cuenca Sur coastal karstic aquifer contributes 58% of the water the Cuban capital supplies. Groundwater in this aquifer drains freely into the sea, making systematic control of marine intrusion essential. To assess the vulnerability of the aquifer to saline intrusion, the GALDIT method was applied which is a parametric method of superposition of weighted ranges of hydrogeological information referring to: type of aquifer, hydraulic conductivity, piezometric level, distance to the coast, areas where saline intrusion and aquifer thickness is evident. The method was adapted to the available information and the characteristics of the area obtaining high vulnerability to marine intrusion in 31.5% of this sector, while 49.5% has moderate vulnerability. The high statistical correlation between the map of vulnerability to marine intrusion and the depth map of saline intrusion made from the interpretation of vertical electrical soundings measured in the area shows the validity of the results presented.

KEYWORDS: saline intrusion, vulnerability to marine intrusion, GALDIT method, coastal aquifer.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a su carácter insular, Cuba presenta el 80 % de sus acuíferos en cuencas subterráneas abiertas que drenan libremente al mar. Por tal razón cartografiar la presencia y avance de la intrusión marina reviste importancia de primer orden en las investigaciones hidrogeológicas del país.

Se conoce que el nivel del mar en Cuba se ha elevado 6,77 cm como promedio desde 1966 hasta la actualidad y se pronostica que alcance 27 cm para el año 2100. Ello provocará una lenta disminución de la superficie emergida y el incremento de la salinización de los acuíferos costeros; ante esta situación se plantea

y desarrolla la Tarea Vida, Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático, conformado por cinco acciones estratégicas dirigidas a reducir las vulnerabilidades del país por la elevación del nivel medio del mar (Sánchez 2017).

Entre las zonas priorizadas de la Tarea Vida está el área objeto de estudio de la presente investigación, la cual se planteó como objetivo general evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación por intrusión marina en el tramo hidrogeológico Güira–Quivicán.

De acuerdo con las conclusiones de la conferencia internacional “Vulnerabilidad de los suelos y del agua subterránea a la contaminación”, celebrada en Delft, Holanda en 1987, la vulnerabilidad a la intrusión salina de un acuífero costero abierto o con drenaje al mar, se define como su sensibilidad a la salinización del agua subterránea debido a su explotación, a la elevación del nivel del mar o a ambos efectos, lo que está determinado por características intrínsecas del acuífero (Chachadi y Lobo-Ferreira 2001).

La modelación matemática es una herramienta tecnológica capaz de evaluar y pronosticar el comportamiento de los acuíferos ante diferentes situaciones, como por ejemplo, ante la contaminación por la intrusión marina. No obstante, esa herramienta requiere elevado volumen de información para dar solución numérica a las ecuaciones que controlan el flujo del agua subterránea, información que en muchas ocasiones no está disponible ni en calidad ni en cantidad suficientes, por lo que se dificulta o se hace imposible su aplicación.

Para evaluar la sensibilidad de un acuífero a la contaminación se han desarrollado diferentes métodos, entre ellos los métodos paramétricos de rangos ponderados, que parten de la selección e integración de los factores o parámetros más informativos para caracterizar este fenómeno. Estos métodos, incluso en condiciones de escasa información hidrogeológica, han demostrado su efectividad en estudios de alerta temprana, contribuyendo a la toma de decisiones oportunas que permitan la protección de los acuíferos.

El método GALDIT, desarrollado por Chachadi y Lobo-Ferreira (2001), es un método de superposición de rangos ponderados que integra la información de seis parámetros hidrogeológicos que, en gran medida, gobiernan la susceptibilidad intrínseca de un acuífero costero a la intrusión marina. A nivel internacional muchos investigadores han empleado este método en diferentes países. Uno de los primeros de estos trabajos es el reportado por Lobo–Ferreira y demás colaboradores (2005), quienes aplican el índice GALDIT para evaluar la intrusión marina en acuíferos costeros de Portugal.

Posteriormente, Najib y otros investigadores (2012), en el acuífero costero de Marruecos, ubicado en la región de Chaovia, elaboran el mapa de vulnerabilidad a la intrusión marina utilizando el método GALDIT, y revelan alta vulnerabilidad del acuífero a la intrusión salina en una franja litoral que alcanza 3 km de distancia respecto a la línea de costa.

Kura, Ramli e Ibrahim (2015) confeccionan el mapa de vulnerabilidad a la intrusión marina en la pequeña isla tropical Kapas, perteneciente a Malasia. En su investigación analizan la influencia de cada uno de los parámetros empleados en el cálculo del índice GALDIT y para validar el mapa de vulnerabilidad obtenido lo correlacionan con el mapa de resistividad eléctrica del agua subterránea, atendiendo a los bajos valores de resistividad eléctrica característicos del agua de mar.

El modelo GALDIT fue usado para evaluar la tendencia a la intrusión salina en un acuífero costero de Túnez (Trabelsi et al. 2016), en un acuífero costero en Finlandia (Luoma, Okkonen y Korkka-Niemi 2017), en la costa noreste de Marruecos (Kouz et al. 2018) y en la isla Jeju, al sur de Corea (Chang et al. 2019). Recientemente, otros investigadores han reportado el desarrollo del índice SIVI que representa una modificación del índice GALDIT, la cual incorpora en el análisis el área afectada por la intrusión salina y su variación estacional (Zeinolabedin y Ghiassi 2019).

Para Cuba, los estudios de vulnerabilidad a la intrusión salina son de gran importancia teniendo en cuenta el desarrollo de acuíferos cársticos costeros en gran parte de su geografía. No obstante, es escasa la aplicación de métodos de superposición y rangos ponderados para evaluar la vulnerabilidad a la intrusión salina, no

obstante a ser métodos de alto poder resolutivo; ello explica el hecho de que no abunden publicaciones en esta temática.

Vale mencionar a Blanco de la Paz, Brown-Manrique y Márquez-Gurri (2018) quienes estudian la intrusión salina en el sector hidrogeológico CA-II-1 de la cuenca sur de Ciego de Ávila, aplicando un método de superposición de rangos ponderados que evalúa cinco parámetros: distancia a la línea de costa, altura piezométrica, recarga neta hiperanual, litología del acuífero y caudal extraído.

La intrusión salina en el tramo Güira–Quivicán de la cuenca sur de Artemisa y Mayabeque ha sido modelada matemáticamente por varios investigadores en diferentes años (Llanusa 1997; Barros y Llanusa 2001; Hernández, Cabrera y Gómez 2012); aunque no se reportan trabajos en los que se hayan aplicado los métodos de superposición de rangos ponderados con este objetivo.

1.1. Características del área de estudio

El tramo hidrogeológico Güira–Quivicán constituye uno de los acuíferos más importantes para el desarrollo económico y social de Cuba. Se localiza al sur de las provincias Artemisa y Mayabeque en una cuenca cárstica de llanura, donde el agua subterránea drena libremente al mar y el espesor acuífero alcanza hasta 200 m (Figura 1). La cobertura de esta llanura está formada por suelos ferralíticos muy permeables, con gran desarrollo de diferentes formas cársticas que constituyen los sistemas de infiltración de las aguas superficiales al acuífero que garantizan su recarga natural. Todo esto condiciona que no exista una red definida de drenaje superficial y que prácticamente toda la lluvia que cae en la cuenca se infiltre o se evapore (Llanusa 1997).

En esta área se encuentra ubicado el acueducto Cuenca Sur que abastece al 58 % de la población de La Habana, a partir del caudal que se extrae de 19 pozos que alcanzan como promedio 220 L/s cada uno durante 24 horas diariamente.

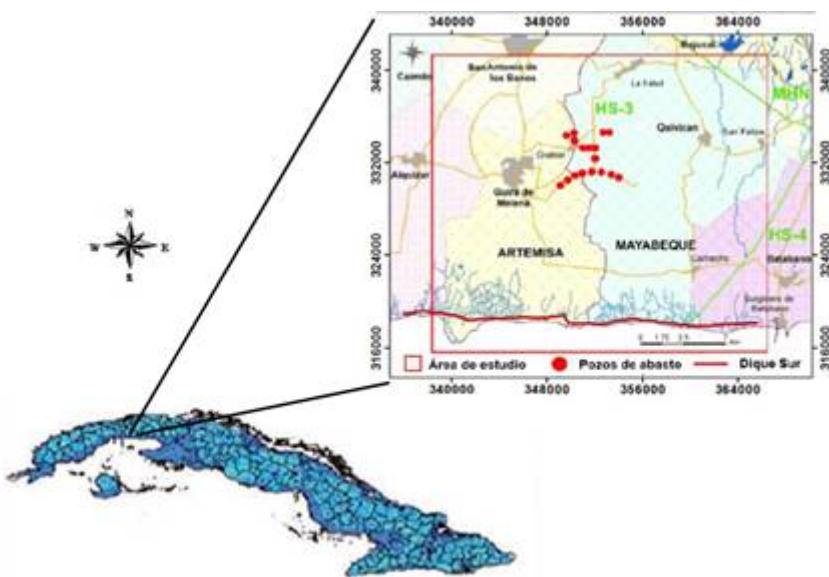


FIGURA 1.
Ubicación del área de estudio.

La intensa explotación y la interacción del acuífero con el mar han provocado la existencia de una cuña de intrusión de agua salada que ha penetrado bajo esta gran llanura, llegando a alcanzar una distancia de 14 km tierra adentro en dirección perpendicular a la costa, situación que puede empeorar en los próximos años como consecuencia del cambio climático y el ascenso del nivel medio del mar (Hernández, Cabrera y Gómez 2012), incluso bajo el efecto positivo del Dique Sur de La Habana, construido entre los años 1985 y 1991

para retener el agua dulce que drenaba superficialmente por canales que desembocan en la costa sur. Esta obra favorece la infiltración del agua dulce para hacer retroceder la cuña de intrusión salina en el acuífero.

En el área se presentan rocas del Neógeno que se dividen en formaciones Cojímar, Colón y Güines, compuestas principalmente por calizas arrecifales, cavernosas, cristalinas y dolomíticas. La formación Güines es la más representada en el área y la que almacena el mayor volumen de agua subterránea debido a su intenso desarrollo cárstico (Figura 2).

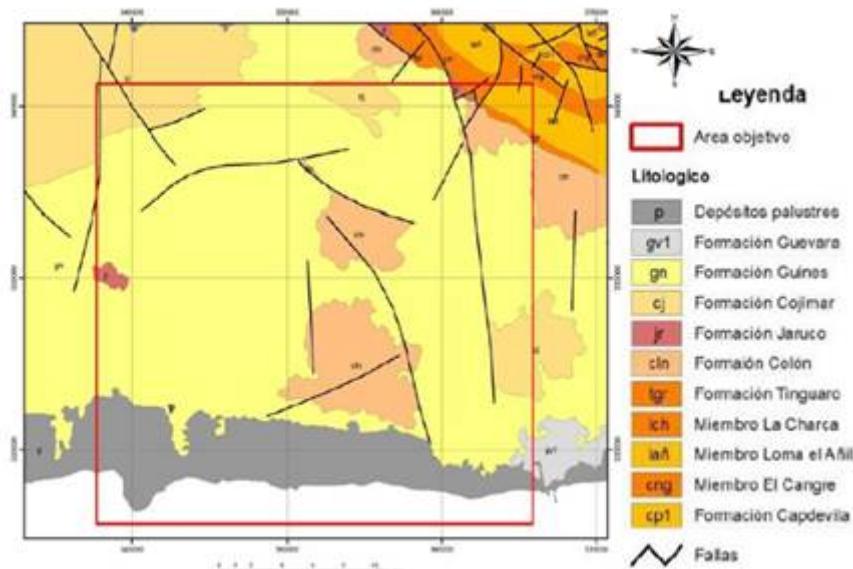


FIGURA 2.
Mapa geológico del área de estudio (modificado de IGP 2016).

El complejo acuífero del Neógeno puede ser dividido en dos horizontes: el primero, superior, con un espesor de hasta 200 m, representado principalmente por calizas carstificadas de la formación Güines, con transmisividades de 1 000 m²/d a 10 000 m²/d. El segundo horizonte, inferior, hasta 500 m, representado por calizas organógenas menos carstificadas de la formación Güines y por calizas arcillosas de transición de Güines a Cojímar, con transmisividades menores de 100 m²/d (INRH y JICA 2017).

Se reconoce que el espesor de la zona activa del acuífero es de 40 m a 50 m coincidiendo con el espesor de las aguas dulces. La dirección del flujo subterráneo, en general, es en dirección al mar, pero en la zona del acueducto Cuenca Sur, por la influencia de la explotación del agua, la dirección del flujo es noroeste-sureste.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales disponibles para dar respuesta a los objetivos planteados en esta investigación fueron los siguientes:

- Mapa Geológico Digital de la República de Cuba a escala 1:100 000 (IGP 2016);
- Mapa del Nivel Piezométrico del acuífero en abril 2015, a escala 1:10 000 (INRH y JICA 2017);
- Mapa del Coeficiente de Transmisividad Hidráulica a escala 1:10 000 (INRH y JICA 2017);
- Mapa de isohipsa de sales solubles totales (SST) de 1 g/L, a escala 1:100 000;
- Mediciones de 28 sondeos eléctricos verticales (SEV) en el área de estudio, disponibles en los archivos de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana (EIPH).

2.1. Método GALDIT

El método GALDIT es un sistema de superposición de factores o parámetros que contiene tres partes fundamentales: pesos, rangos y puntuación (Chachadi y Lobo-Ferreira 2001; Lobo-Ferreira et al. 2005). Los parámetros que incluye este método son:

- G: tipo de acuífero (*Groundwater occurrence*). Un acuífero no confinado será más vulnerable a la intrusión salina comparado con un acuífero confinado, porque este último se encuentra a mayor presión que la presión atmosférica, dificultando el avance de la cuña salina.
- A: conductividad hidráulica del acuífero (*Aquifer hydraulic conductivity*). La mayor conductividad hidráulica permite mayor penetración de la cuña salina.
- L: nivel piezométrico (*height of groundwater Level*). A mayor nivel piezométrico mayor presión hidráulica ejerce el acuífero sobre el agua de mar y menos avanza la cuña marina.
- D: distancia a la costa (*Distance from the shore*). La intrusión salina generalmente disminuye con el incremento de la distancia en dirección perpendicular a la línea de costa.
- I: presencia de intrusion salina (*impact of existing status of seawater Intrusion*). Este factor puede ser evaluado teniendo en cuenta las encuestas a la población local, a partir del análisis hidroquímico o considerando cualquier otra propiedad que refleje la salinidad del agua subterránea.
- T: espesor del acuífero (*saturated aquifer Thickness*). A mayor espesor del acuífero, mayor será la extensión de la intrusión salina y viceversa.

El índice de vulnerabilidad GALDIT se calcula multiplicando los puntos asignados a cada parámetro por su peso relativo y sumando estos seis productos. Altos valores del índice GALDIT corresponden a zonas con alta vulnerabilidad a la intrusión marina.

Atendiendo a que no fue posible contar con la información del parámetro A (conductividad hidráulica del acuífero) y a que se disponía del mapa de transmisividad hidráulica (INRH y JICA 2017) se decidió emplear este parámetro conociendo que la transmisividad es igual al producto de la conductividad hidráulica por el espesor del acuífero y, por tanto, representa la capacidad del acuífero para transmitir el agua.

El valor de 1 g/L de SST marca la frontera entre agua dulce y agua salada, por lo que para evaluar el parámetro I (evidencias de la existencia de intrusión salina) se tomó como referencia el mapa de la isohipsa SST de 1 g/L a escala 1:100 000, elaborado en el año 2017 por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).

En esta investigación fue empleado el sistema de información geográfico de software libre QGIS, con el cual fue posible organizar e integrar toda la información georeferenciada necesaria, generar los mapas temáticos, asignar pesos y puntuación por rangos a cada uno de ellos, y finalmente, calcular el índice de vulnerabilidad. La Tabla 1 presenta los pesos y puntuación asignados a cada uno de los parámetros empleados en el cálculo del índice GALDIT para el área de estudio. El índice de vulnerabilidad GALDIT (Chachadi y Lobo-Ferreira 2001) fue calculado según la expresión (1):

$$\text{GALDIT} = \mathbf{G} + 3\mathbf{A} + 4\mathbf{L} + 2\mathbf{D} + \mathbf{I} + 2\mathbf{T} \quad (1)$$

La Figura 3 ilustra los mapas reclasificados de los parámetros L, D, A e I. No se muestran los mapas de los parámetros G y T porque a estos se asignaron valores 9 y 10, respectivamente para toda el área, al ser un acuífero no confinado de espesor mayor a 10 m. La Tabla 2 muestra las clases de vulnerabilidad definidas a partir de la división en rangos del índice GALDIT.

TABLA 1.
Puntuación y pesos asignados a los parámetros empleados en el cálculo del índice GALDIT

Parámetro	Peso	Rangos	Puntuación
G tipo de acuífero	1	no confinado	9
		> 40 000	10
A transmividad hidráulica del acuífero (m ² /d)	3	20 000 a 40 000	8
		10 000 a 20 000	6
		100 a 1 000	3
		< 100	2
L nivel piezométrico (m)	4	< 2	10
		5 a 2	8
		10 a 5	6
		> 10	3
D distancia a la costa (km)	2	< 1	10
		1 a 2	9
		2 a 3	8
		3 a 6	7
		6 a 10	4
		> 10	2
I presencia de la intrusión salina (SST, g/l)	1	> 1	10
		< 1	1
T espesor del acuífero (m)	2	> 10	10

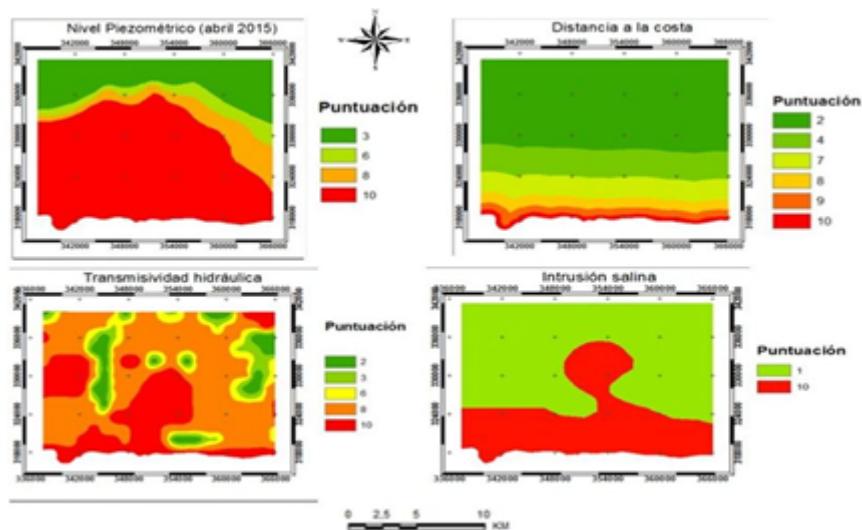


FIGURA 3.
Mapas reclasificados de los parámetros A, L, D e I.

TABLA 2.

Clasificación del índice GALDIT en categorías de vulnerabilidad a la intrusión marina

GALDIT	VULNERABILIDAD
menor que 70	Baja
entre 70 y 110	Media
mayor 110	Alta

Para conocer la influencia de cada factor en la vulnerabilidad del acuífero se realizó el análisis de correlación lineal entre cada uno de los parámetros y el índice GALDIT, calculando el coeficiente de correlación de Pearson y verificando la prueba de hipótesis estadística que permite definir la existencia de correlación para una probabilidad del 95 %.

2.2. Validación del mapa de vulnerabilidad a la intrusión salina

Con la información geológica disponible se interpretaron las curvas de SEV existentes en los archivos de la Empresa de Investigaciones y Proyectos de La Habana. El objetivo fue cartografiar la profundidad de la intrusión salina, la cual se manifiesta en el área de estudio como un sustrato conductor, con resistividad eléctrica entre 0 y 20 ohm-m.

La validación del mapa de vulnerabilidad obtenido se realizó estudiando la correlación lineal entre el índice GALDIT y la profundidad de la intrusión salina determinada por la interpretación de los SEV. Se evaluó el coeficiente de Pearson entre ambos mapas y se verificó la prueba de hipótesis de existencia de correlación para un nivel de significación del 5 %.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El 31,5 % del área presenta alta vulnerabilidad, el 49,5 % media y el 19 % baja (Figura 4). La zona de alta vulnerabilidad se localiza en una franja costera de 8 km como promedio, pero en las inmediaciones del campo de pozos del acueducto Cuenca Sur alcanza una distancia a la costa de 16 km.

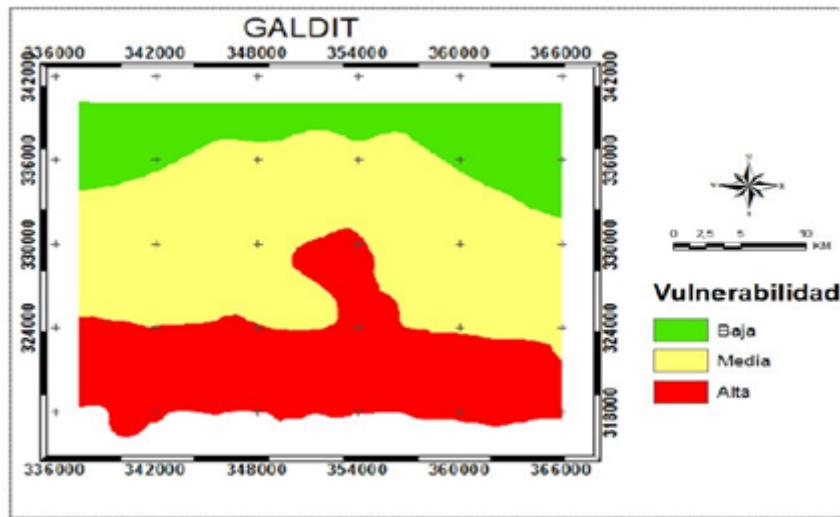


FIGURA 4.
Mapa de vulnerabilidad a la intrusión salina obtenido empleando el índice GALDIT.

La Figura 5 expone el mapa de profundidad del sustrato conductor obtenido a partir de la interpretación de los SEV. Este sustrato conductor se asocia a la saturación de las rocas con agua de mar o con agua de alta salinidad. Aproximadamente a 4 km de la costa se localiza el sustrato conductor a menor profundidad y con mínimos valores de resistividad eléctrica. Hacia el centro del área de estudio, hasta una distancia que alcanza 13 km desde la línea de costa, la resistividad eléctrica del sustrato conductor varía entre 0,2 y 20 ohm-m y se localiza a menos de 30 m de profundidad. Este comportamiento refleja el avance de la cuña marina por el efecto del acueducto Cuenca Sur.

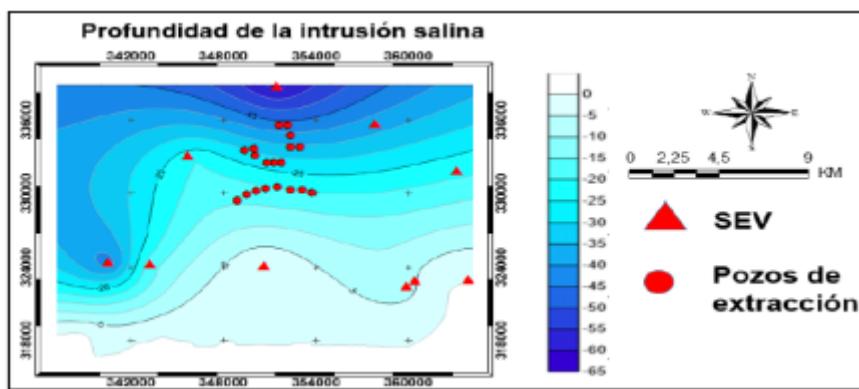


FIGURA 5.
Mapa de profundidad de la intrusión salina obtenido de la interpretación de los SEV.

Se comprobó que existe correlación lineal en todos los casos para un nivel de significación del 5 %, indicando la influencia de todos los parámetros en el cálculo del índice GALDIT. La alta correlación negativa entre la profundidad de la intrusión marina (PIM) y el índice GALDIT reveló que en las zonas de mayor

vulnerabilidad el agua salinizada se localiza a menor profundidad (Tabla 3). Este resultado permitió validar el mapa de vulnerabilidad obtenido y demostró el poder resolutivo del método aplicado.

TABLA 3.
Matriz de correlación lineal entre los parámetros A, L, D, I, PIM y GALDIT

Parámetros	A	L	D	I	PIM
GALDIT	0,47	0,70	0,72	0,83	-0,70

4. CONCLUSIONES

El 31,5 % del sector hidrogeológico Güira–Quivicán presenta alta vulnerabilidad a la intrusión salina, alcanzando el 80 % entre alta y media. La zona de mayor vulnerabilidad se localiza en una franja costera de 8 km como promedio, y en la zona central comprende una distancia a la costa de 16 km, debido al impacto del acueducto Cuenca Sur.

El mapa de vulnerabilidad obtenido debe ser actualizado sistemáticamente a partir de la mejora continua de la información hidrogeológica. En ese sentido se recomienda disponer de la información hidroquímica, así como de los valores de nivel piezométrico promedio en temporada de lluvia y de seca de los últimos años.

El método GALDIT ha demostrado su efectividad y elevado poder resolutivo. Se recomienda su aplicación para evaluar la vulnerabilidad a la intrusión salina en todos los acuíferos costeros cubanos, considerando el nivel del mar actual y el pronosticado para los años 2050 y 2100; de esta manera contribuye a las investigaciones de la Tarea Vida que desarrolla el país para el enfrentamiento al cambio climático.

5. REFERENCIAS

- Barros, O. y Llanusa, H. 2001: Impacto del cambio global en la dinámica de la intrusión marina. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 22(4): 21-28.
- Blanco de la Paz, E.; Brown-Manrique, O. y Márquez-Gurri, R. 2018: Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas en la cuenca sur de Ciego de Ávila. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1): 73-83.
- Chachadi, A. y Lobo-Ferreira, J. P. 2001: Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. En: Workshop on Modelling in Hydrogeology. Proceedings. Anna University Chennai, India, 2-7 diciembre, p. 143-156.
- Chang, S.; Chung, I.; Kim, M.; Tolera, M. y Koh, G. 2019: Application of GALDIT in Assessing the Seawater Intrusion Vulnerability of Jeju, South Korea. *Water*, 11(9). Consultado: 2020/04/10. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/w11091824>.
- Hernández, A.; Cabrera, E. y Gómez, M. 2012: Integración de las nuevas tecnologías en el manejo de las aguas subterráneas. *Obras y Proyectos*, 12(2). Consultado: 2019/05/05. Disponible en: http://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_issuetoc&pid=0718-281320120002&Ing=es&nrm=iso.
- INRH y JICA. 2017: Proyecto para el Fortalecimiento de las Capacidades del Manejo del Agua Subterránea y el Control de la Intrusión Salina en la República de Cuba. Consultado: 2019/02/28. Disponible en: https://www.google.com.cu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj4rpW7qfpAhV1SzABHfGDANIQFjAAegQIBBAB&url=https%3A%2F%2Fopenjicareport.jica.go.jp%2Fpdf%2F12286498_01.pdf&usg=AOvVaw27dRPhooLrK7Oixxhy84a8.
- Instituto de Geología y Paleontología (IGP). 2016: Mapa geológico de la República de Cuba. La Habana: Servicio Geológico de Cuba.

- Kouz, T.; Cherkaoui, H.; Mansour, S.; Hassani, M. y Mourabit, T. 2018: Application of GALDIT Index to Assess the Intrinsic Vulnerability of Coastal Aquifer to Seawater Intrusion. Case of the Ghiss-Nekor Aquifer (Norst East of Morocco). 169-177. En: Calvache, M.; Duque, C. y Pulido-Velázquez, D. (editores). Groundwater and Global Change in the Western Mediterranean Area. Environmental Earth Sciences. Tuscaloosa, Estados Unidos: Springer International Publishing AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69356-9>.
- Kura, N.; Ramli, M. e Ibrahim, S. 2015: Assessment of groundwater vulnerability to anthropogenic pollution and seawater intrusion in a small tropical island using index-based methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(2015): 1512-1533.
- Llanusa, H. 1997: *Ampliación de la tecnología AQÜIMPE. Acciones sobre el sistema acuífero*. José Bienvenido Martínez Rodríguez (Tutor). Tesis doctoral. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. 130 p.
- Lobo-Ferreira, J. P.; Chachadi, A. G.; Diamantino, C. y Henriques, M. J. 2005: Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 1 – Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo. En: The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources. Portugal, 11-14 julio, 1-13.
- Luoma, S.; Okkonen, J. y Korkka-Niemi, K. 2017: Comparison of the AVI, modified SINTACS and GALDIT vulnerability methods under future climate-change scenarios for a shallow low-lying coastal aquifer in southern Finland. *Hydrogeology Journal*, 25(1): 203-222. Consultado: 2019/06/10. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-016-1471-2>.
- Najib, S.; Grozavu, A.; Mehdi, K.; Breaban, I.; Guessir, H. y Boutayeb, K. 2012: Application of the method GALDIT for the cartography of groundwaters vulnerability: aquifer of Chaouia coast (Morocco). *Scientific Annals of Alexandru Ioan Cuza University of IASI*, 58(2): 77-88. Consultado: 2019/06/10. Disponible en: <http://www.analegeo.uaic.ro/index.php/SciGeo/article/view/Najib>.
- Sánchez, M. 2017: Una mirada a la problemática del financiamiento climático en Cuba: entre retos y oportunidades. *Revista Cubana de Economía Internacional*, (2): 135-161. Consultado: 2019/05/05. Disponible en: <http://www.rcei.uh.cu>.
- Trabelsi, N.; Triki, I.; Bentati, I. y Zairi, M. 2016: Aquifer vulnerability and seawater intrusion risk using GALDIT, GQISWI and GIS: case of a coastal aquifer in Tunisia. *Environmental Earth Sciences*, 75(8): 669. Consultado: 2019/06/10. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5459-y>.
- Zeinolabedin, A. y Ghiassi, R. 2019: The SIVI index: a comprehensive approach for investigating seawater intrusion vulnerability for island and coastal aquifers. *Environmental Earth Sciences*, 78(24): 1-10. Consultado: 2020/04/10. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8651-z>.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Conflictos de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores: RMVO: Diseño y dirección de la investigación. Procesamiento de los datos, análisis de resultados, redacción del original, revisión y aprobación de la versión final. CEFL: Procesamiento de los datos, análisis e interpretación, revisión y aprobación de la versión final.