REVISTA ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Vulnerabilidad natural a la contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica Guantánamo-guaso

Vulnerabilidade natural à poluição das águas subterrâneas na bacia hidrográfica de Guantánamo-guaso

Sandra Cruz González[1], Willy Roberto Rodríguez Miranda[2], Rosa María Valcarce Ortega[3], Marina Beatriz Vega Carreno[4]

[1]Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Habana - Cuba, sandracrugon@civil.cujae.edu.cu
[2]Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Habana - Cuba, wrodriguezm1955@gmail.com
[3]Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Habana - Cuba, rvalcarce1959@gmail.com
[4]Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Habana - Cuba, mvega@cujae.edu.cu

Recibido:
2 de abril de 2025
Recibido en formato de revisión:
17 de junio de 2025
Aceptado:
31 de julio de 2025
Disponible en línea:
22 de agosto de 2025
Sección:
Artículos

Palabras-clave:
Cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso.
Vulnerabilidad intrínseca.
Aguas subterráneas.
K-medias.
Imágenes satelitales.

Palavras-chave:
Bacia do rio Guantánamo-Guaso.
Vulnerabilidade intrínseca.
Águas subterrâneas.
K-means.
Imagens de satélite.

https://doi.org/10.14295/ras.v39i2.30319

RESUMEN

La cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso, situada en la región suroriental de Cuba, constituye una de las cuencas de interés nacional estando calificada por el Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas entre las de máxima prioridad en el país, por lo que el desarrollo de investigaciones dirigidas a proteger sus recursos naturales es de especial importancia. El objetivo de este artículo es evaluar la vulnerabilidad natural a la contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca mediante el empleo de técnicas de minería de datos, en particular el algoritmo k-medias. El mapa de vulnerabilidad intrínseca obtenido a escala 1:100.000 reveló que las zonas de baja vulnerabilidad están asociadas al complejo acuífero clástico-carbonatado del Paleógeno-Cretácico, y las zonas de vulnerabilidad entre moderada y extrema se relacionan con el complejo acuífero carbonatado-clástico del Paleógeno-Cretácico. Al realizar el análisis de la variación espacio temporal del índice de vegetación y la salinidad de los suelos en la cuenca, empleando las imágenes satelitales de Landsat 5 y 8 correspondientes a los años 2000 y 2023 fue posible identificar una disminución de la cobertura vegetal y un incremento de la salinidad de los suelos en este período, lo que representa un impacto ambiental negativo, sobre todo en aquellas áreas consideradas como de alta y muy alta vulnerabilidad.

RESUMO

A bacia hidrográfica Guantánamo-Guaso, localizada no sudeste de Cuba, é uma das bacias de interesse nacional, classificada pelo Conselho Nacional de Bacias Hidrográficas como uma das bacias de maior prioridade do país. Por isso, a investigação voltada à proteção dos seus recursos naturais é de particular importância. O objetivo deste artigo é avaliar a vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas na bacia utilizando técnicas de data mining, particularmente o algoritmo k-means. O mapa de vulnerabilidade intrínseca obtido à escala 1:100.000 revelou que as zonas de baixa vulnerabilidade estão associadas ao complexo aquífero clástico-carbonático do Paleogeno-Cretáceo, e as zonas de vulnerabilidade moderada a extrema estão relacionadas ao complexo aquífero carbonatado-clástico do Paleogeno-Cretáceo. Analisando a variação espaço-temporal do índice de vegetação e da salinidade do solo na bacia, utilizando imagens de satélite Landsat 5 e 8 correspondentes aos anos de 2000 e 2023, foi possível identificar uma diminuição da cobertura vegetal e um aumento da salinidade do solo neste período, o que representa um impacto ambiental negativo, principalmente naquelas áreas consideradas de alta e muito alta vulnerabilidade.

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas son unidades territoriales con múltiples interacciones, que vinculan espacial y funcionalmente ecosistemas terrestres y acuáticos con actividades sociales, económicas y culturales muy específicas que se desarrollan sobre ellas. Suministran el hábitat de la mayor parte de las especies. Desde el punto de vista económico, las cuencas suministran agua, alimento, energía eléctrica, recreación y transporte a la sociedad, entre otros servicios básicos. Son unidades territoriales que desempeñan un rol importante en la estabilidad de los ecosistemas y requieren adecuada planificación para lograr la explotación responsable de los valiosos recursos naturales que poseen (García; Gutiérrez, 2015). Sin embargo, en el empeño de lograr una gestión integral sostenible de las cuencas hidrográficas, la protección a la contaminación de sus aguas subterráneas es un elemento esencial al que no siempre se brinda toda la atención necesaria (Blanco, 2000; Echemendia, 2017; García; Sacasas-León; Díaz-Deulofeu, 2018).

El agua es un recurso vital para la vida en la Tierra, y aunque es un recurso natural renovable, su escasez se agrava debido al aumento de la demanda por el crecimiento poblacional y las actividades humanas. La falta de agua afecta especialmente a regiones con climas de precipitaciones irregulares. Su contaminación y mal uso representan amenazas para la salud humana y el equilibrio ecológico. A pesar de su importancia, el agua es frecuentemente mal utilizada y devuelta a los cuerpos de agua en condiciones perjudiciales (De Miguel, 2012; Marzo-Manuel; Gómez-Luna, 2024). El uso inapropiado de fertilizantes en áreas de riego con suelos permeables y acuíferos abiertos, el alto reciclaje de aguas subterráneas en zonas de riego intensivo, el vertido de desechos de animales en áreas vulnerables y el empleo indebido de pesticidas, son factores que pueden causar grandes niveles de contaminación del agua subterránea relacionados con las actividades agropecuarias (De Miguel, 2012). La contaminación industrial puede provenir de la quema de combustibles fósiles, el vertido de sustancias al suelo o al agua, o la emisión a la atmósfera.

En Cuba representa una prioridad la protección de los recursos hídricos, de ahí que la gestión de los mismos ha experimentado una evolución significativa a lo largo del tiempo. En la primera mitad del Siglo XX, en Cuba, no existía una gestión responsable de estos recursos y solo a partir de 1960 se promovieron políticas destinadas a la protección y explotación sostenible de las aguas, dando origen al programa "Voluntad Hidráulica" en 1963 (Pérez, 1969). Hoy, Cuba cuenta con una legislación para normar el empleo racional y productivo del recurso hídrico, la Ley No. 124 de las Aguas Terrestres, que regula la gestión integrada y sostenible de este recurso con el fin de lograr su uso y preservación en armonía con el desarrollo socioeconómico sostenible, y promueve la adecuada aplicación de la ciencia y la tecnología con este propósito en total correspondencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ANPP, 2017).

La evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación es crucial para comprender y prevenir posibles impactos negativos en la calidad del agua subterránea. En este contexto, numerosos estudios han abordado la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, utilizando una variedad de enfoques y metodologías.

El enfoque metodológico presentado por Zwahlen (2003) detalla el trabajo del Grupo de Acción COST 620 en la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en acuíferos cársticos. Dicha metodología ha sido exitosamente implementada por diversos investigadores en distintas localidades a nivel global, como el estudio de Jiménez; Carrasco; Martínez, (2009) en los acuíferos carbonatados de la Sierra de Cañete, ubicada en España.

Rupert *et al.* (2003) en la zona atlántica de Costa Rica, realizaron la evaluación preliminar de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas, y desarrollaron un procedimiento que emplea un Sistema de Información Geográfica (SIG) para mejorar la protección de los acuíferos. Los resultados indicaron un alto riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por bromacil después de años de producción de piña en la zona de estudio, así como la vulnerabilidad de muchos pozos no profundos y no protegidos a la contaminación por coliformes. Los autores recomendaron aplicar la metodología en otras zonas vulnerables del país y ampliar el estudio en la zona atlántica.

Existen diversas investigaciones que evalúan la calidad del agua subterránea en Cuba y su vulnerabilidad a la contaminación. Se destacan los trabajos de García; Sacasas-León; Díaz-Deulofeu (2018) quienes elaboraron un mapa de vulnerabilidad a la contaminación de dos horizontes acuíferos en la parte sur del occidente de Cuba, identificando una elevada vulnerabilidad en el extremo occidental. Además, otros estudios han evaluado la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas en diferentes cuencas de Cuba (Valcarce; Scull, 2020; Valcarce *et al.,* 2021; Valcarce; Solís, 2022). Estos trabajos han demostrado la importancia de evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación y han proporcionado resultados significativos que pueden contribuir a la gestión sostenible del agua tanto en Cuba como en el resto del mundo.

La cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso constituye una de las cuencas de interés nacional, estando calificada por el Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas entre las de máxima prioridad en el país, ya que abastece de agua a la región oriental para su consumo humano y desarrollo agroindustrial. En esta cuenca se presentan serios problemas ambientales que requieren atención. Tales problemas están relacionados con las sequías prolongadas que han afectado significativamente el escurrimiento de los ríos y los volúmenes de agua embalsados, lo que ha llevado a una escasez de este recurso para los cultivos y el abastecimiento de las comunidades (Marzo-Manuel; Gómez-Luna, 2024).

El estudio que aquí se presenta, tiene como objetivo general evaluar la susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso mediante el empleo de técnicas de mineria de datos, en particular el algoritmo k-medias, por el impacto de potenciales contaminantes vertidos en su superficie. Además y considerando el impacto de la vegetación y la salinidad en la vulnerabilidad de las aguas subterráneas se realiza un análisis de su variación espacio-temporal en toda el área de la cuenca.

2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso constituye una de las cuencas de interés nacional, estando calificada por el Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas entre las de máxima prioridad en el país. Se encuentra ubicada en la región suroriental de las provincias Santiago de Cuba y Guantánamo. Tiene una superficie total de 2048,3 km^2, abarcando áreas de cinco municipios de la provincia Guantánamo (El Salvador, Niceto Pérez, Guantánamo, Caimaneras y Manuel Tames) y el municipio Songo–La Maya de la provincia Santiago de Cuba (Figura 1).

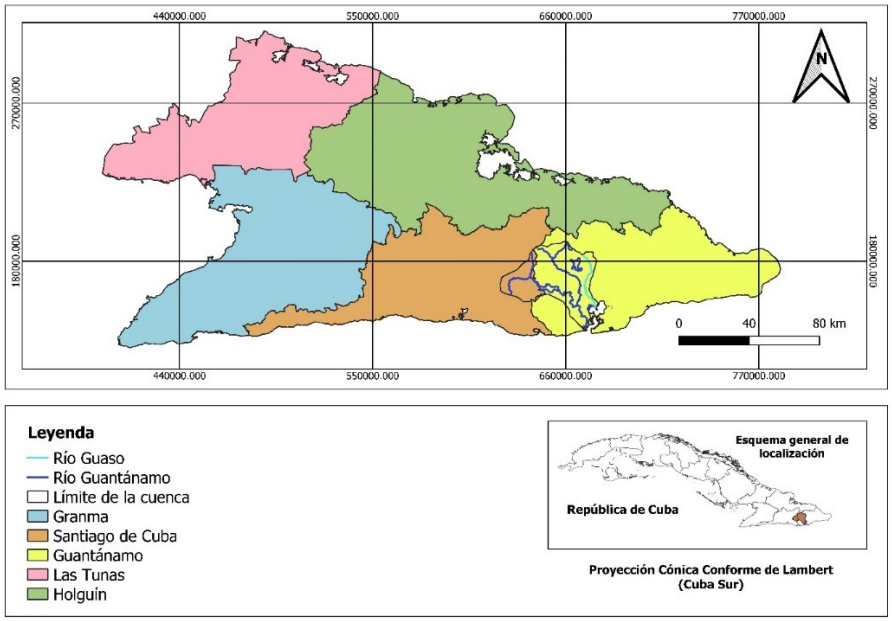

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

El río principal de la cuenca es el río Guantánamo que tiene una superficie de 1221 km^2, con una longitud de 105 km y una densidad de drenaje de 1.0 km/km^2. Su nacimiento se encuentra en el macizo montañoso de Alto de Camarones en su vertiente norte, a una altura de 380 m estando su fuente en el nacimiento de un manantial de escaso caudal en la provincia de Santiago de Cuba (Castellanos, 2023).

El otro río importante del área de estudio es el Guaso que tiene una superficie de 289 km^2, con una longitud de 56,9 km. Su nacimiento se encuentra en la vertiente sur de la Sierra de Nipe – Sagua – Baracoa, con una altura cercana a los 860 m.

La Figura 2 presenta el mapa geológico del área de estudio. La cuenca está ubicada sobre las rocas de la formación (Fm) San Luis (Eoceno medio (parte alta) - Eoceno superior). Además, están extendidas las formaciones (Fms) Puerto Boniato y Charco Redondo de edad Eoceno medio, caracterizadas por su composición carbonatada y por el desarrollo de procesos de carstificación, lo que le confiere una alta permeabilidad (Marzo-Manuel; Gómez-Luna, 2024).

La cuenca en su porción sur – sudeste es una de las áreas más secas del país (Blanco, 2000), esta situación adversa unida a la alta evaporación y las condiciones hidrogeológicas naturales, han provocado que una gran parte de los suelos de la cuenca se encuentren salinizados. Los tipos predominantes de salinidad son: salinidad clorhídrica–sulfática, salinidad sulfática–clorhídrica y salinidad clorhídrica– sódica. De las 26000 ha afectadas por salinidad en la cuenca, 6174 ha pertenecen al municipio Guantánamo, representando el 9% del área total de la cuenca (Marzo-Manuel; Gómez-Luna, 2024).

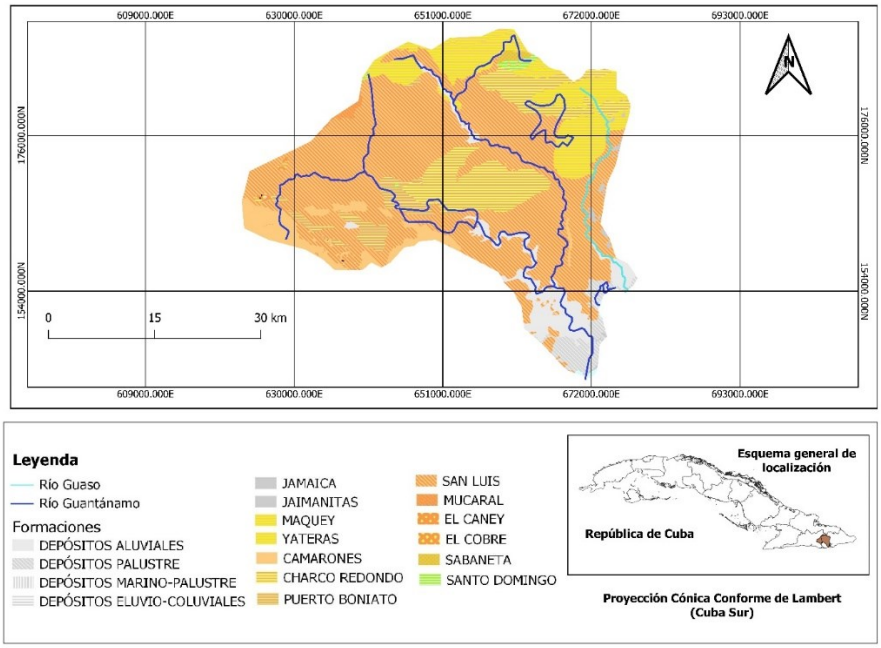

Figura 2. Mapa geológico de la región, Escala 1:100 000 (IGP-SGC, 2011).

Los suelos predominantes por su distribución en el área corresponden con el agrupamiento pardo, con preponderancia de los subtipos mullido, ócrico, cálcico y vértico. Por otra parte, se encuentran los suelos del agrupamiento fersialítico, con predominio de los subtipos pardo rojizo mullido y rojo ócrico, donde los materiales parentales sobre los que se desarrollan son rocas calcáreas, peridotitas y esquistos, adquiriendo el perfil del suelo colores rojo o rojo parduzco, debido a su alto contenido en hierro libre, superior a 3% (Olivera, 2012).

En la región se han identificado diversos complejos acuíferos (Figura 3), cuyas características principales se describen a continuación, siguiendo el trabajo de Echemendía (2017):

- A1-3: Complejo acuífero palustre costero o de humedales del Cuaternario. Este complejo se forma por depósitos palustres y restos vegetales, en su mayoría de mangles, así como por limos, arcillas y arenas carbonáticas. En las cercanías de las áreas emergidas, estos depósitos pueden incluir componentes terrígenos.
- A2-3: Complejo acuífero clástico-terrígeno del Cuaternario, el cual se caracteriza por depósitos aluviales recientes. Está compuesto principalmente por arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, incluyendo depósitos aluviales y la Formación Jamaica.

- A4-2: Complejo carbonatado clástico del Cuaternario. Está representado por calizas fosilíferas y órganos detríticos masivos, que son poco compactos y altamente carstificados o porosos, pertenecientes a la Formación Jaimanitas.
- B3-4: Complejo terrígeno-carbonatado del Neógeno-Oligoceno, caracterizado por una alternancia de areniscas, limolitas y arcillas calcáreas, así como calizas detríticas, biodetríticas y biógenas, de las Formaciones Maquey y Yateras.
- C2-4: Complejo acuífero clástico-carbonatado del Paleógeno-Cretácico, que se compone de margas intercaladas con calizas arcillosas, limolitas, tobas, conglomerados y areniscas polimícticas que corresponden a las Formaciones Camarones, San Luis y Mucaral.
- C4-2: Complejo acuífero carbonatado-clástico del Paleógeno-Cretácico, caracterizado por intercalaciones de calizas finamente estratificadas, compactas y fosilíferas, así como margas, silicitas y brechas, que pertenecen a las Formaciones Charco Redondo y Puerto Boniato.
- C5-2: Complejo acuífero vulcanógeno-sedimentario del Paleógeno-Cretácico, que se presenta en las formaciones de los arcos de islas del Cretácico y Terciario, además del olistostroma Háticos de este mismo período, correspondiente a las Formaciones El Cobre, El Caney, Santo Domingo y Sabaneta.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso, se emplearon los siguientes recursos:

a. Mapa Geológico de la República de Cuba, escala 1:100.000 (IGP-SGC, 2011).
b. Mapa Tectónico de la República de Cuba, escala 1:100.000 (IGP-SGC, 2011).
c. Mapa de Suelos en escalas 1:100.000 y 1:25.000 (Instituto de Suelos, 2000; Instituto de Suelos, 2017).
d. Mapa Digital de Elevaciones (MDE) con resolución de 25x25 m (GEOCUBA, 2020).
e. Imágenes Satelitales Landsat 5 y 8 (USGS, 2024).
f. Base de datos de pozos del nivel freático del Oriente de Cuba (INRH, 2024).

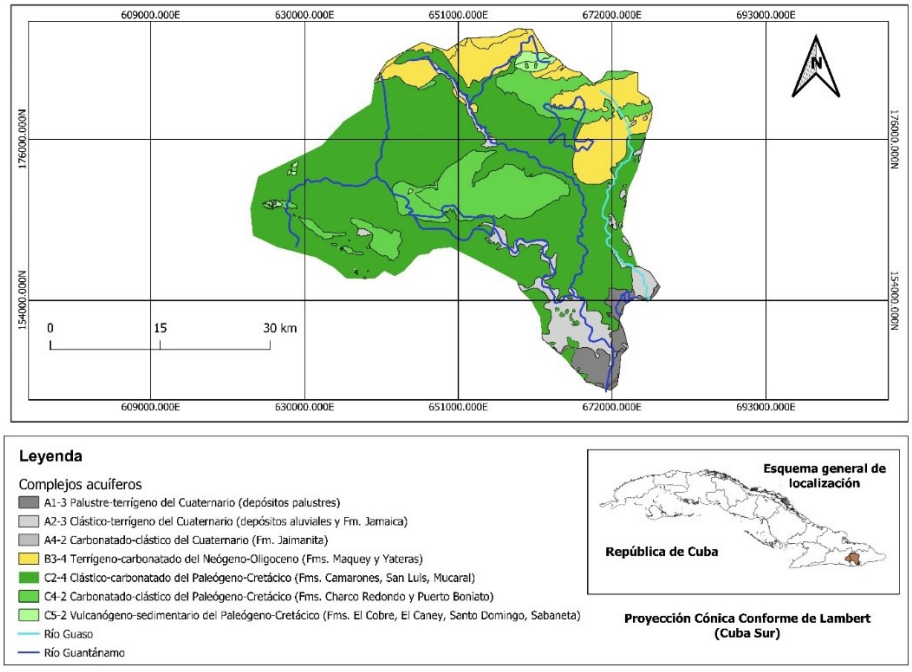

Figura 3. Complejos o sistemas acuíferos identificados en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso.

Para la creación del mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, se aplicó la técnica de minería de datos, utilizando el análisis clúster en su variante k-medias Vías; Perles; Andreo, 2003; Valcarce; Solís, 2022. Además, atendiendo a que la ausencia de vegetación y el aumento de la salinidad de los suelos representan un impacto negativo para la vulnerabilidad de las subterráneas, se llevó a cabo un análisis temporal de la salinidad de los suelos y la vegetación en la cuenca, basado en imágenes satelitales Landsat 5 y 8.

3.1. Método de agrupamiento k-medias

La evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas mediante métodos estadísticos comienza con la selección de los atributos a utilizar. Este proceso implica la identificación de variables predictivas que no estén correlacionadas entre sí. Una vez definidas las variables, se realiza un análisis de las características del conjunto de datos seleccionado con el fin de identificar tendencias y detectar valores atípicos, así como determinar el número de clases de vulnerabilidad existentes. Esta fase es esencial para clasificar y agrupar los datos mediante técnicas estadísticas multivariadas de clasificación.

En este estudio, se utilizó el método k-medias, una técnica estadística multivariada de clasificación que se ajusta automáticamente y permite formar grupos a partir de grandes volúmenes de datos. Así, los elementos de cada grupo son muy similares entre sí, mientras que difieren marcadamente de los elementos de otros grupos. Este algoritmo asigna cada objeto al grupo más cercano, logrando esto al calcular una medida de similitud entre el objeto y el centroide de cada clúster (Alfonso, 1989; Vías; Perles; Andreo, 2003; Valcarce *et al.*, 2021; Valcarce; Solís, 2022).

Existen diversas medidas de similitud, cada una con diferentes grados de efectividad según la naturaleza cuantitativa, cualitativa o binaria de las variables que definen los objetos a clasificar, así como en función de la presencia parcial de datos y el nivel de correlación entre las variables. La elección adecuada de la medida de similitud es fundamental, dado que impacta significativamente en la fiabilidad de los resultados finales. En esta investigación, se eligió el coeficiente de distancia euclidiana, que se recomienda cuando las variables están expresadas de forma cuantitativa y presentan una baja correlación estadística entre ellas (Alfonso, 1989).

El algoritmo comienza determinando de manera aleatoria tanto el número de grupos como los centroides iniciales. Después de realizar la primera asignación de objetos a cada grupo, se recalculan los centroides basándose en la media de las variables de los puntos asignados. Una vez que los centroides de cada clúster se actualizan, los objetos se reasignan al grupo más cercano. Este proceso se repetirá hasta que no haya cambios en las asignaciones de los puntos o hasta que se alcance un número predeterminado de iteraciones.

La principal ventaja de este método es su simplicidad y rapidez; sin embargo, el algoritmo es notablemente sensible a la elección aleatoria de los centroides iniciales. Su eficacia aumenta cuando las variables empleadas no son redundantes y tienen un rango de variación similar. Por esta razón, se recomienda estandarizar las variables, llevándolas a un rango de 0 a 1, lo que se logra restando el valor mínimo de cada variable y dividiendo por su rango. Las variables seleccionadas tienen un papel crucial en la evaluación de la vulnerabilidad. Estas variables, representadas espacialmente con una distancia de 250 metros entre cada punto, han sido digitalizadas, resultando en un total de 43,876 puntos. A continuación, se presentan y justifican las variables utilizadas:

- Tipo de roca (litología): Dado que la litología es una variable cualitativa, se transformó en cuantitativa siguiendo el método GOD (Foster; Hirata, 1988), clasificándose en un rango de 0,4 a 1. En este sistema, un valor de 0,4 indica menor vulnerabilidad, mientras que un valor de 1 señala una mayor vulnerabilidad.
- Densidad de fallas tectónicas: La densidad de las fallas tectónicas es un factor clave en la vulnerabilidad de los acuíferos, ya que pueden actuar como rutas preferenciales para la contaminación. Estas fracturas en la corteza terrestre aumentan la porosidad secundaria y la permeabilidad de las rocas, acelerando así el movimiento de agua y contaminantes a través de los acuíferos, lo que eleva considerablemente el riesgo de contaminación.
- Pendiente topográfica: En áreas con pendientes marcadas donde el agua fluye rápidamente, el riesgo de contaminación es relativamente bajo. Por el contrario, las pendientes más suaves pueden ser más susceptibles a la contaminación, ya que favorecen la acumulación y el transporte de contaminantes hacia el suelo.
- Índice de atenuación del suelo (IA): Este índice refleja la capacidad del suelo para frenar o demorar la migración vertical de contaminantes. Se elabora a partir de los valores de profundidad efectiva, contenido de materia orgánica y arcillosidad, extraídos del Mapa de Suelos de Cuba a escala 1:25.000. Un suelo con un índice de atenuación elevado actúa como un escudo para el acuífero, mientras que uno con un índice bajo aumenta la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas, ya que resulta menos eficaz en la retención y degradación de contaminantes. El cálculo de este índice se realiza utilizando la siguiente ecuación:

$$\mathrm{IA} = \frac{1}{\mathrm{Tx+PE+H}} \quad (1)$$

Donde Tx representa la textura del suelo, PE la profundidad efectiva y H el grado de humificación. La Tabla 1 presenta la puntuación asignada a Tx, PE y H, obtenidas del mencionado mapa.

Para las variables consideradas, se calculó una matriz de correlación lineal con el fin de determinar si estas variables son independientes entre sí y no contienen información redundante, una condición esencial para obtener resultados más precisos con el algoritmo de k-medias. Se implementó este método para agrupar los datos en cuatro clústeres. Cada punto se asigna al grupo más cercano, evaluando la distancia euclidiana (D) de acuerdo con la ecuación 2, donde n es el número de variables, x_i, son las componentes del centroide de cada clúster y p_i representan las coordenadas de cada punto.

$$D = \sqrt{\boldsymbol{\Sigma_1^n}(\boldsymbol{x_{i-}p_i})^2} \quad (2)$$

El grado de vulnerabilidad de cada grupo se determina analizando las características de los centroides de cada clúster en relación con la protección del acuífero. Para simplificar este análisis, se definió un punto ideal para la cuenca que representa la situación de menor vulnerabilidad del acuífero (Vías; Perles; Andreo, 2003). Las coordenadas de este punto se establecieron en función de la litología menos permeable en la zona no saturada, la menor densidad de fallas tectónicas, la mayor pendiente topográfica y el índice más alto de atenuación del suelo. Para asignar el nivel de vulnerabilidad correspondiente a cada clúster, se calculó la distancia euclidiana entre los centroides de cada grupo y el punto ideal.

Tabla 1 – Puntuación de los parámetros del suelo

Textura	Puntuación	Profundidad efectiva	Puntuación	Humificación	Puntuación
Arcilla montmorillonita	1	Muy profundo (mayor de 100 cm)	1	Muy humificado (mayor del 6%)	1
Arcilla caolinita	2	Profundo (entre 61 y 99 cm)	2	Humificado (entre 4.1 y 6%)	2
Arcilla	3	Medianamente profundo (entre 41 y 60 cm)	3	Medianamente humificado (entre 2 y 4%)	3
Arcilla loamosa	4	Poco profundo (entre 21 y 40 cm)	4	Poco humificado (menor del 2%)	4
Arcilla arenosa	5	Muy poco profundo (entre 11 y 20 cm)	5		
Loam arcilloso	6				
Loam arcilloso arenoso	7				
Loam arenoso	8				
Arena arcillosa	9				

3.2. Evaluación de índices espectrales NDVI y NDSI

Con el propósito de investigar las variaciones en la cobertura vegetal y los niveles de salinidad del suelo que podrían incrementar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso, se realizó el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice de salinidad de diferencia normalizada (NDSI). Para ello, se utilizaron imágenes satelitales de Landsat 5 y 8 correspondientes a los meses de mayo de los años 2000 y 2023. A partir de estas imágenes, se delimitó una zona de estudio denominada "sector 11-46", lo que permitió evaluar los cambios y transformaciones que ha experimentado la cuenca durante un periodo de 23 años.

El NDVI es un indicador que se obtiene a partir de la relación normalizada entre la reflectancia espectral en las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo, y se correlaciona eficazmente con la cantidad y la estacionalidad de la producción primaria neta (Hutchinson *et al.*, 2015). Este índice fue diseñado matemáticamente para medir la cantidad y estado de la vegetación verde sobre el suelo, teniendo en cuenta la normalización de las propiedades del sensor, así como la topografía y las condiciones de iluminación (Lausch *et al.*, 2013).
Un descenso abrupto en los valores de NDVI puede ser un indicativo del deterioro en la salud vegetal (García-Reyes *et al.*, 2021). El índice tiene un rango de valores que va de -1 a 1, donde los valores negativos están relacionados principalmente con la presencia de nubes, agua y nieve, mientras que los valores cercanos a cero corresponden principalmente a rocas y suelos expuestos. Los valores muy bajos (0,1 o menos) reflejan zonas arídas rocosas, arena o nieve; los valores moderados (de 0,2 a 0,3) indican la presencia de arbustos y praderas; y los valores altos (de 0,6 a 0,8) son característicos de bosques templados y tropicales (Giraldo, 2018).

Por otro lado, el NDSI es una herramienta valiosa en el estudio de la salinidad en diferentes entornos, incluyendo cuerpos de agua y suelos, a través del análisis de imágenes satelitales. Se puede entender como una medida de la diferencia relativa de reflectancia entre bandas espectrales específicas que son sensibles a la existencia de sales disueltas, tanto en el agua como en el suelo (EOS, 2023). Los valores del NDSI también oscilan entre -1 y 1, con valores altos que indican una mayor concentración de sales y, por ende, una salinidad incrementada en el área analizada (Aslanov *et al.*, 2021).

La salinidad del agua y del suelo juega un papel fundamental en la gestión de los recursos hídricos y agrícolas. Un alto nivel de sal puede afectar significativamente la calidad del agua destinada al consumo humano, así como la productividad de los cultivos y la salud de los ecosistemas acuáticos (Rodríguez; Riverón, 2024). Para afrontar este desafío, se utiliza de manera eficaz y a gran escala el NDSI, que permite monitorear la salinidad en diversos entornos y llevar a cabo medidas correctivas para mitigar sus efectos adversos.

A través del sistema informático QGis, se realizaron diversas transformaciones a las imágenes satelitales, lo que facilitó el cálculo de índices espectrales, como se ilustra en las ecuaciones (3) y (4). Los resultados obtenidos fueron representados en mapas ráster a una escala de 1:100.000.

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\text{Infrarrojo cercano} - \text{Rojo}}{\text{Infrarrojo cercano} + \text{Rojo}} \tag{3}$$

$$NDSI = \frac{\text{Verde} - \text{Infrarrojo de onda corta}}{\text{Verde} + \text{Infrarrojo de onda corta}} \tag{4}$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis de los resultados obtenidos empleando el algoritmo k-medias en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso

El análisis clúster k-medias, como ya fue señalado, es más eficiente en la medida que las variables a emplear no sean redundantes, es decir, que no estén correlacionadas. La matriz de correlación lineal calculada entre las variables empleadas en este artículo se presenta en la Tabla 2. Como se aprecia, no existe correlación entre las variables, no tienen información redundante y cumplen con esta condición exigida por el análisis clúster.

Tabla 2 – Matriz de correlación lineal de las variables empleadas para la aplicación del algoritmo k-medias

	Pendiente	**Parámetro O**	**Índice de atenuación**	**Densidad de fallas**
Pendiente	1	0.3260	0.2175	0.2744
Parámetro O	0.3260	1	0.0981	0.3636
Índice de atenuación	0.2175	0.0981	1	0.0997
Densidad de fallas	0.2744	0.3636	0.0997	1

Los resultados del análisis clúster k-medias se presentan en la Tabla 3, donde aparecen los centroides de cada grupo y la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas que ellos representan, la que fue definida teniendo en cuenta la distancia de cada uno de los centroides al punto ideal. Esta distancia al punto ideal fue calculada normalizando todas las variables entre 0 y 1 a partir de sus valores máximo y mínimo en la cuenca.

Se aprecia que la baja vulnerabilidad representada por el grupo 2, está asociada con la menor distancia al punto ideal, la cual se caracteriza por presentar la litología más arcillosa, una pendiente moderada, pequeña densidad de fallas tectónicas y un índice de atenuación elevado; mientras que la vulnerabilidad muy alta representada por el grupo 4, se relaciona con la mayor distancia al punto ideal, caracterizado por presentar la mayor pendiente del conjunto, pero posee la mayor densidad de fallas tectónicas y una litología carbonatada cárstica. La vulnerabilidad moderada representada por el grupo 3, se caracteriza por presentar una litología arcillosa, índice de atenuación moderado con una densidad de fallas pequeñas. Es importante destacar que, a pesar de que el grupo 3 presenta la misma distancia al punto ideal que el grupo 4, se le asigna una vulnerabilidad moderada debido a que los centroides del grupo 3 tienen pendiente, litología, índice de atenuación y densidad de fallas tectónicas más pequeños en comparación con el grupo 4. La vulnerabilidad alta representada por el grupo 1, se caracteriza por presentar una litología carbonatada arcillosa, índice de atenuación elevado, baja densidad de fallas tectónicas y mayor pendiente que el grupo 2.

Tabla 3 – Resultados del análisis clúster (k-medias) en la cuenca Guantánamo-Guaso

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Pendiente topográfica [%]	8.5	6.6	3.1	13.4
Litología	0.85	0.59	0.5	0.85
Índice de atenuación (multiplicado por 10^2)	8.6	0.59	7.5	8.7
Densidad de fallas tectónicas [km/km^2]	0.5	0.2	0.2	2.7
Número de instancias	5305	28042	8866	1663
Distancia al punto ideal	1.12	0.71	1.41	1.41
CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	**ALTA**	**BAJA**	**MODERADA**	**MUY ALTA**

La Figura 4 presenta el mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso empleando el algoritmo k-medias. Se destaca que las zonas de baja vulnerabilidad se localizan hacia el extremo oeste y parcialmente al centro-norte de la cuenca, asociada al complejo acuífero clástico-carbonatado del Paleógeno-Cretácico con presencia de la Fm. San Luis, caracterizada por presentar la litología más arcillosa, la menor densidad de fallas tectónicas, el mayor índice de atenuación del suelo y pendiente topográfica moderada.

Las zonas de vulnerabilidad alta ubicadas predominantemente al sureste de la cuenca, están asociadas a los complejos acuíferos palustre-terrígeno del Cuaternario (depósitos palustres) y clástico-terrígeno del Cuaternario (depósitos aluviales), y también por el complejo clástico-carbonatado del Paleógeno-Cretácico con presencia de la Fm. San Luis. Esta zona se caracteriza por una litología carbonatada arcillosa cárstica y baja pendiente topográfica y moderada densidad de fallas tectónicas.

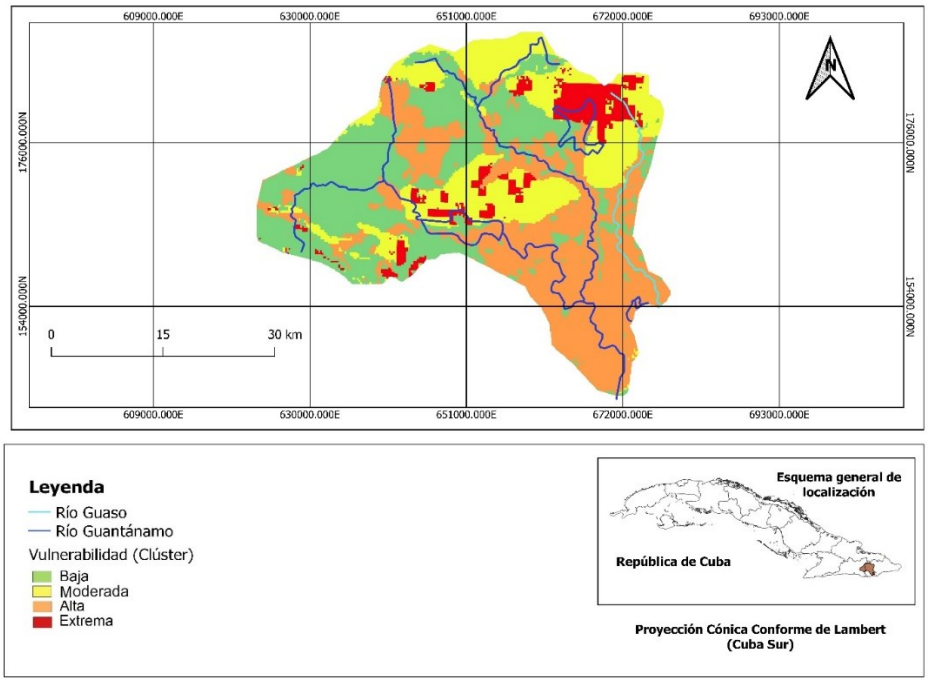

Figura 4. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso empleando el algoritmo k-medias.

Por otra parte, al norte y centro de la cuenca se aprecia una vulnerabilidad entre moderada y muy alta asociada al complejo acuífero carbonatado-clástico del Paleógeno-Cretácico representado por las Fms. Charco Redondo y Puerto Boniato, caracterizadas por presentar la mayor densidad de fallas tectónicas y litología carbonatada cárstica.

Es importante resaltar que la clasificación no supervisada (k-medias) está evidenciando una elevada variabilidad y discriminación espacial de la vulnerabilidad natural a la contaminación de las aguas subterráneas, la que ha sido obtenida por métodos estadístico matemáticos.

4.2. Análisis de la variación espacio temporal del NDVI y NDSI en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso

La Figura 5 presenta los resultados obtenidos del cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para los años 2000 y 2023 en la cuenca de interés, basado en la ecuación (3) presentada anteriormente. El color verde indica áreas con mayor densidad de vegetación, mientras que el color rojo muestra zonas donde no hay presencia de vegetación.

La representación de la vegetación escasa en la leyenda del mapa se ha establecido considerando los valores máximos y mínimos obtenidos del NDVI, siendo los valores máximos de vegetación de 0,4 en el año 2000 y 0,6 en el año 2023; mientras que los valores mínimos en el año 2000 fueron de -0,7 y en el año 2023 de -0,2.

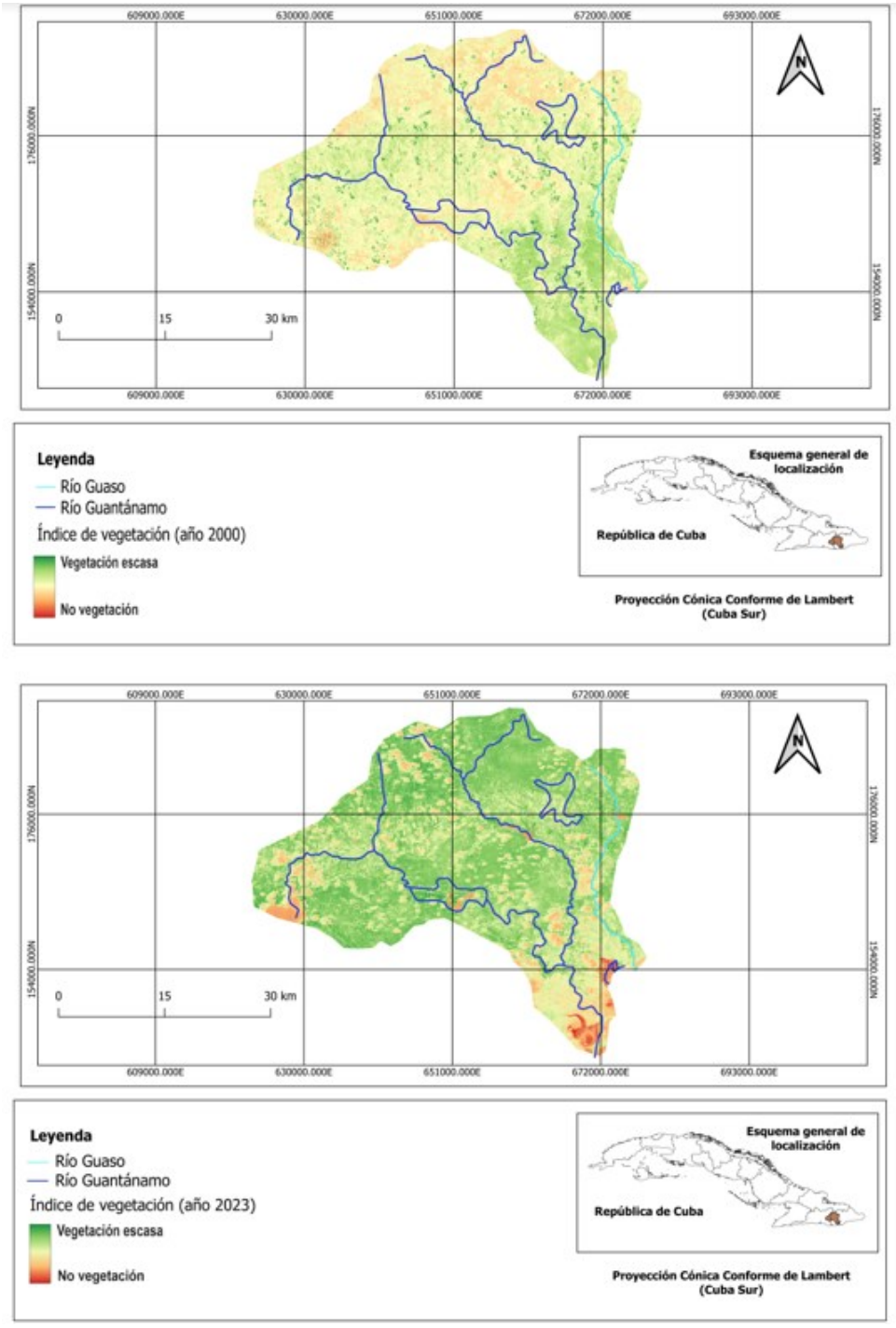

Figura 5. Variación espacio-temporal del NDVI entre los años 2000 (arriba) y 2023 (debajo) en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso.

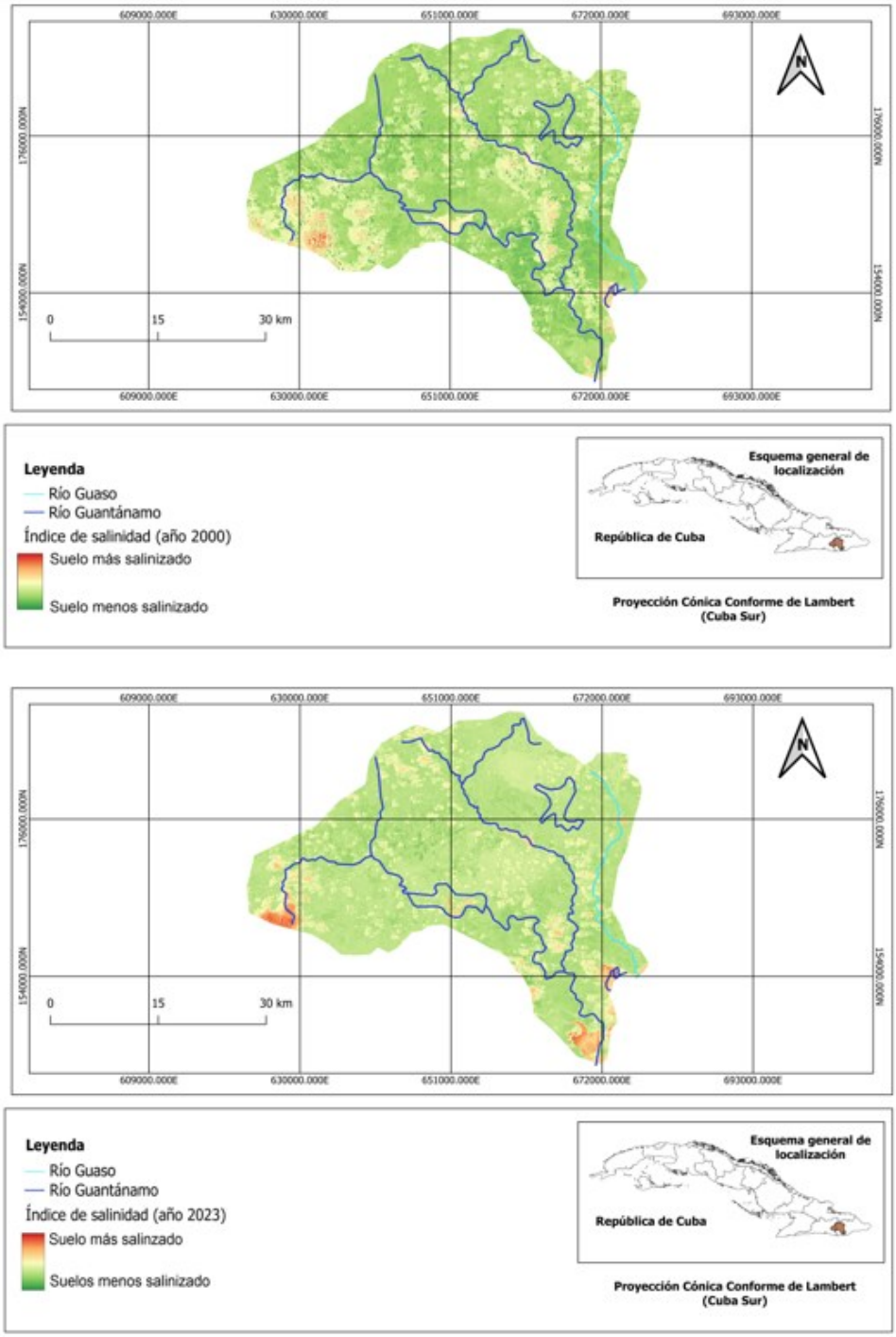

Figura 6. Variación espacio-temporal del NDSI entre los años 2000 (arriba) y 2023 (debajo) en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso.

El análisis espacio temporal mostró un incremento significativo de este índice, observándose una mejor cobertura vegetal al paso de los años. Sin embargo, al sureste de la cuenca se percibe una disminución del NDVI que puede estar asociado a la deforestación, la urbanización o la degradación del suelo. Además, el estrés hídrico, la falta de agua disponible para las plantas, puede causar sequía y marchitar las plantas, reflejando una disminución de este índice. Por otra parte, las plagas pueden debilitar las plantas y dañar sus tejidos, reduciendo su capacidad de realizar fotosíntesis y afectando negativamente al NDVI.

La Figura 6 muestra el resultado del cálculo del índice de salinidad de diferencia normalizada (NDSI) para las imágenes satelitales Landsat en mayo de los años 2000 y 2023, basado en la ecuación (4). El color verde indica áreas con suelo menos salinizado, mientras que el color rojo muestra zonas donde la presencia de sales en el suelo es significativa.

El análisis espacio temporal mostró un incremento de este índice, observándose que las áreas con suelos más salinizados se localizan principalmente al sureste y suroeste de la cuenca. Este incremento puede estar asociado a causas geológicas y a cambios en los patrones de precipitación, que pueden provocar que las sales contenidas en las aguas, debido a una mayor evaporación, queden adheridas en las partículas de suelo, y debido a las escasas precipitaciones no logren ser lavadas provocando incrementos en la concentración de sal. Por otra parte, las actividades agrícolas, el mal manejo de las labores de regadío, la falta de drenaje adecuado, pueden contribuir a incrementar la salinidad de los suelos. La aplicación inadecuada de fertilizantes químicos también puede ser un factor importante que acentúa este problema.

CONCLUSIONES

Ha sido elaborado el mapa de vulnerabilidad intrínseca de la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso, lo que permite evaluar la susceptibilidad a la contaminación de sus aguas subterráneas por la migración de potenciales contaminantes depositados en su superficie. Los resultados obtenidos con el empleo del algoritmo k-medias revelaron que las zonas de baja vulnerabilidad se localizan en el extremo oeste y centro-norte, asociadas al complejo acuífero clástico-carbonatado del Paleógeno-Cretácico. Las zonas de alta vulnerabilidad se localizan principalmente al sureste de la cuenca, asociadas a los complejos acuíferos palustre-terrígeno y clástico-terrígeno del Cuaternario, así como al complejo clástico-carbonatado del Paleógeno-Cretácico. Por otro lado, las zonas de vulnerabilidad extrema se ubican en el norte y centro, relacionadas con el complejo acuífero carbonatado-clástico del Paleógeno-Cretácico. La variación espacio temporal de los índices espectrales NDVI y NDSI empleando las imágenes Landsat entre los años 2000 y 2023, evidenciaron un incremento de la cobertura vegetal pero también de los niveles de salinidad del suelo, lo cual no favorece la protección a la calidad de los recursos hídricos de la cuenca.

Se recomienda aplicar esta metodología a escalas mas detalladas incorporando variables que reflejen la presencia de infiltración directa a las aguas subterráneas, como por ejemplo, la presencia de formas exocartiscas en la superficie del terreno. También se recomienda realizar mediciones de la calidad de las aguas subterráneas en las zonas clasificadas de alta y extrema vulnerabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al INRH por facilitar el presupuesto necesario para el desarrollo de esta investigación que como parte del Proyecto Sectorial PS113LH001-021 "Aplicaciones de la teledetección al estudio de la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua", ejecutan el Departamento de Geociencias de la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría y el INRH.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANPP – Asamblea Nacional del Poder Popular. Ley No. 124 de las aguas terrestres. Gaceta Oficial No. 51 Extraordinaria. Cuba, 63p, 2017.

ALFONSO, J.R. Estadísticas en las Ciencias Geológicas, Tomo 2. Editorial ISPJAE, La Habana, 308 p, 1989.

Aslanov I., Kholdorov S., Ochilov S., Jumanov A., Jabbarov Z., Jumaniyazov I., et al. Evaluation of soil salinity level through using Landsat-8 OLI in Central Fergana valley, Uzbekistan. E3S Web of Conferences 258.0312; 2021. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125803012

BLANCO, H.L. Cuenca Hidrográfica Guantánamo–Guaso. Dirección Provincial de Recursos Hídricos, Provincia Guantánamo. Revista Voluntad Hidráulica, 8 p, 2000.

CASTELLANOS, P.I. Informe técnico para la propuesta de rediseño de la red hidrogeológica, provincia Guantánamo. OSDE Gestión Integrada de las Aguas Terrestres. Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Guantánamo, 2023.

DE MIGUEL, C. Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales. Editorial Digital Universitaria Moa, Holguín, Cuba. ISBN: 9591613954, 9789591613950, 384 p, 2012. Disponible en: https://ninive.ismm.edu.cu/handel/123456789/1639. Acceso en: enero 2025.

ECHEMENDIA, M.A. y otros. Metodología para la confección del Mapa Hidrogeológico Provincial a escala 1:100 000. Archivo técnico RAUDAL, 2017.

EOS DATA ANALYTICS, INC. Soluciones espaciales para problemas de la Tierra, 2023. Disponible en: https://eos.com/es/. Acceso en: febrero 2025.

FOSTER, S.; HIRATA, R. Groundwater Pollution Risk Assessment: A Methodology Using Available Data, WHO- PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, 1988.

GARCÍA-REYES R.A.; GONZÁLEZ M.D.; TORRES-CALZADO K.; VILLAZÓN-GÓMEZ J.A.; ABELLÓN-MOLINA M.I.; VELÁZQUEZ–SÁNCHEZ E.C. Sensoramiento remoto de la salinidad en el agroecosistema Mayarí de la provincia Holguín, Cuba. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, v.30, n. 1, p. 26-32, 2021. Disponible en: https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1370. Acceso en: febrero 2025.

GARCIA, F.J.M.; GUTIERREZ, D.J.B. La gestión de cuencas hidrográficas en Cuba. Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. La Habana, Cuba, 96 p, 2015.

GARCIA, J.A.; SACASAS-LEON, C.; DIAZ-DEULOFEU, A. Vulnerabilidad a la contaminación en horizontes acuíferos del sur de Cuba occidental. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 39(1), 73–83 p, 2018. Disponible en: https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/425. Acceso en: marzo 2025.

GEOCUBA – Grupo Empresarial. Modelo digital de elevaciones de la República de Cuba 25x25. La Habana, 2020.

GIRALDO, C.R.A. Análisis de aplicaciones espectrales derivados de imágenes satelitales perúSat-1. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú. ISSN: 0079-1091, 2018. Disponible en: https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.20653. Acceso en: marzo 2025.

HUTCHINSON, J.M.; JACQUIN, A.; HUTCHINSON, S.; VERBESSELT, J. Monitoring vegetation change and dynamics on US army training lands using satellite image time series analysis. Journal of Environmental Management, 150, 355-366, 2015. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.002.

IGP-SGC – Instituto de Geología y Paleontología. Mapa Geológico de la República de Cuba a escala 1:100 000. La Habana, Servicio Geológico de Cuba, 2011.

INRH – Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. GeneSIG: Sistema de Información Geográfica para el Instituto de Recursos Hidráulicos. GETI-GEOCUBA-UCI, 2024. Disponible en: http://sgia.hidro.gob.cu. Acceso en: marzo 2025.

Instituto de Suelos. Mapa de Suelos de la República de Cuba a escala 1:100 000, La Habana, Ministerio de la Agricultura, 2000.

Instituto de Suelos. Mapa de Suelos de la República de Cuba a escala 1:25 000, La Habana, Ministerio de la Agricultura, 2017.

JIMENEZ, M.A.; CARRASCO, C.F.; MARTINEZ, N.C. Análisis comparativo de la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos carbonáticos (Sierra de Cañete, provincia de Málaga). Boletín Geológico y Minero, Vol. 120, No.1, pp. 81-94, ISSN: 0366-0176, Madrid, 2009. Disponible en: https://web.igme.es/Boletin/2009/120_1_2009/ARTICULO%208.pdf. Acceso en: marzo 2025.

LAUSCH, A.; PAUSE, M.; MERBACH, I.; ZACHARIAS, S.; DOCTOR, D.; VOLK, M.; SEPPELT, R. A new multiscale approach for monitoring vegetation using remote sensing-based indicators in laboratory, field, and landscape. Environmental Monitoring and Assessment, 185(2), 1215-1235, 2013. http://dx.doi.org/10.1007/s10661-012-2627-8.

MARZO-MANUEL, Y.; GOMEZ-LUNA, L. M. Evaluación del potencial hídrico superficial de la cuenca Guantánamo-Guaso, Cuba. Tecnología y Ciencias Del Agua, 15(6), 255–310, 2024. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-06-06.

OLIVERA, V.D. Los suelos de Cuba, 2012. Disponible en: https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2012/01/19/141129. Acceso en: marzo 2025.

PEREZ, F. Informe presentado en el acto de fusión del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos y Desarrollo agropecuario del País (DAP). Ediciones COR. La Habana. Cuba, 1969.

RODRÍGUEZ-HECHEVARRIA, H.; RIVERÓN-ZALDIVAR, Z. A.B. Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas del sector noroeste del Valle del Cauto, Holguín. Revista Ciencia y Futuro, v.14, n. 3, p. 293-305, 2024. Disponible en: https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistacyf/article/view/2591. Acceso en: enero 2025.

RUPERT, C.; EUGENUA, C.M.; BRAVO, V.; FALLAS, J. Vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas en Costa Rica. Estudio preliminar, 2003. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35300.99205.

USGS – United States Geological Survey. EarthExplorer, 2024. Disponible en https://eartexplorer.usgs.gov/. Acceso en: octubre 2024.

Valcarce, R.M.; Scull, R.O. Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca M-IV, Cuba. Revista Avances, Vol.23, No.1, p: 76-91, 2020. Disponible en: https://www.redalyc.org/journal/6378/637869233006/html/. Acceso en: marzo 2025.

Valcarce, R.M.; Suárez, G.O.; Rodríguez, M.W.; Vega, C.M. Aplicación de la minería de datos a la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos. Revista Cubana de Ciencias Informáticas, Vol.15, No.2, ISSN: 2227-1899, p: 1-23, 2021. Disponible en: https://rcci.uci.cu/?journal=rcci&page=article&op=view&path%5B%5D=2006. Acceso en: marzo 2025.

Valcarce, R.M.; Solís, M.E. Aplicación de la minería de datos a la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos en las cuencas Cuyaguateje y Costera Sur de Pinar del Río, Cuba. Universidad Tecnológica de La Habana ``José Antonio Echeverría´´. Revista Geociencias, Vol.41, No.2, pp: 417-426, ISSN: 1980-900X, 2022. Disponible en: https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i02.16509.

VIAS, M.J.M.; PERLES, R.M.J.; ANDREO, N.B. Aplicación del análisis cluster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos. Departamento de Geografía. Universidad de Málaga. España. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, No.3, pp: 199-215, ISSN: 1578-5157, 2003. Disponible en: https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/30. Acceso en: marzo 2025.

ZWAHLEN, F. COST Action 620. Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karstic) Aquifers. Editorial I.F.C.A. 620. Edition ed. Brüssel, Luxemburg: European Commission, 297 p, 2003.