



XIV SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ESTRUCTURAS 2025
TALLER DE RESILIENCIA HIDRÁULICA A TRAVÉS DE LA
DIGITALIZACIÓN

Título

**Análisis geoespacial de la vulnerabilidad del acuífero Arenas Algaba
como fuente de abasto a Trinidad**

Title

***Geospatial analysis of the vulnerability of the Arenas Algaba aquifer as a
supply source for Trinidad***

Ing. Juan José Martín Lozada¹, DrC. Ing. Michael Álvarez González²

1-Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos, Cuba, jjosem0121@gmail.com

2- Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

E-mail: michaelalvarezglez@gmail.com

Resumen: La ciudad de Trinidad en la provincia de Sancti Spíritus constituye uno de los polos turísticos más importante del país que incluye la península Ancón, ambos polos turísticos presentan un déficit con el abasto de agua a la población debido a su población residente o temporal va en constante crecimiento poblacional, por lo que se requiere localizar nuevas fuentes de abasto para esta región turística de acuerdo a las estrategias de desarrollo del turismo. Esta situación motiva analizar la vulnerabilidad por contaminación del acuífero que se encuentra en la zona de Arenas Algaba ante el impacto de actividades antrópicas que pueden degradar la calidad de las aguas y realizarlo a través de la elaboración de mapas de vulnerabilidad de acuíferos, estos mapas posibilitan evaluar las características naturales de la región y determinar el mayor o menor grado de vulnerabilidad que presenten los acuíferos a la acción de contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie. El empleo de herramientas de análisis geoespacial como el ArcGIS y el método DRASTIC, permitirá localizar, valorar y tomar decisiones a corto, mediano o largo plazo, del uso de las reservas de agua que tiene esta zona acuífera para



explotarla como fuente de abasto a Trinidad y por tanto permitir una adecuada planificación territorial y ambiental de la fuente de agua subterránea.

Palabras claves: Acuífero; Vulnerabilidad; Contaminación; Abasto de agua

Summary: The city of Trinidad in the province of Sancti Spíritus constitutes one of the most important tourist poles of the country that includes the Ancón peninsula, both tourist poles present a deficit with the water supply to the population due to its resident or temporary population is in constant population growth, so it is required to locate new sources of supply for this tourist region according to the strategies of tourism development. This situation motivates the analysis of the vulnerability due to contamination of the aquifer in the Arenas Algaba area to the impact of anthropic activities that can degrade the quality of the water and to do so through the preparation of aquifer vulnerability maps. These maps make it possible to evaluate the natural characteristics of the region and determine the greater or lesser degree of vulnerability of the aquifers to the action of contaminants that can infiltrate from the surface. The use of geospatial analysis tools such as ArcGIS and the DRASTIC method will make it possible to locate, evaluate and make short, medium or long term decisions on the use of water reserves in this aquiferous zone to exploit it as a source of supply for Trinidad and therefore allow for adequate territorial and environmental planning of the groundwater source.

Keywords: Aquifer, Vulnerability, Contamination, Water supply

1. Introducción

Hoy en día, los recursos hídricos subterráneos desempeñan un papel importante para satisfacer la demanda de suministro de agua debido al cambio climático regional y a la escasez o inadecuación de las fuentes de agua superficial. La contaminación de las aguas subterráneas es un problema importante, ya que los acuíferos y las aguas subterráneas que contienen son inherentemente susceptibles a la contaminación causada por el uso del suelo y otros impactos antropogénicos o naturales.



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Análisis geoespacial de la vulnerabilidad del acuífero
Arenas Algaba como fuente de abasto a Trinidad

A nivel mundial, desde principios del siglo XXI, el caudal de los acuíferos ha disminuido de forma acelerada debido a la intensificación del regadío con agua subterránea, y es que, solo la industria agrícola depende del 40% del agua subterránea para el riego de los alimentos.

Según la fundación AQUAE radicada en España, explica que España es el país con mayor sobreexplotación de agua de Europa. Uno de cada cuatro acuíferos de este país se encuentra sobreexplotado o en riesgo de secarse.

Otro de los problemas a los que se enfrentan los acuíferos guarda relación con el uso excesivo del agua subterránea para fines industriales. Según explica AQUAE, la Unión Europea utiliza el 60% del agua para la agricultura y en el caso de España, este porcentaje asciende hasta el 70%.

Según (León & Gómez, 2023) la isla de Cuba, la mayor del archipiélago cubano se extiende sobre 109 884,01 km². Tres tipos de acuíferos distinguen la hidrogeología cubana cuyos recursos potenciales se considera que ascienden a 6934,35 Hm³/año y que, en orden de importancia por su extensión superficial y productividad son los siguientes:

1. **Cársicos:** Acuíferos fisurados cársicos en rocas carbonatadas de todas las edades desde el Jurásico medio-superior al reciente que morfológicamente se expresan en llanuras, montañas medias y bajas y alturas.
2. **Fisurados no cársicos:** Presentan productividad baja a media, que se expresan mayormente en llanuras, pero también en montañas medias, constituidas por metamorfitas del Cretácico fundamentalmente, concentradas en la región centro oriental y oriental del país.
3. **Intergranulares (porosos):** Circunscritos a las terrazas de los ríos y no son muy extensos por el modo en que se organiza la red fluvial en Cuba, cuya forma, larga, estrecha y mayormente llana, presenta una red fluvial corta y distorsionada por el karst, agrupada en dos vertientes (Norte y Sur) y muy pocas corrientes importantes de Oeste a Este, Grandes llanuras aluviales se concentran en la parte oriental del país conteniendo acuíferos independientes, algunos de muy buena productividad pero, por lo común ciertos acuíferos en los depósitos aluviales con espesores



**V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Análisis geoespacial de la vulnerabilidad del acuífero
Arenas Algaba como fuente de abasto a Trinidad**

importantes que cubren las llanuras cársicas algunas formando criptokarst mantienen ciertas relaciones hidráulicas con el karst subyacente y no son, estrictamente, acuíferos intergranulares.

En Cuba, el 33 % (4 490 millones de m³) proviene de fuentes subterráneas, evidenciando la importancia de este recurso para el desarrollo socio económico del país. Por otro lado, el bajo índice de recursos hidráulicos disponibles por habitante al año para todos los usos (1 200 m³/habitante/año) ubican a Cuba en la categoría de países con elevada intensidad en la presión sobre sus recursos hídricos, con situación de escasez.(Valcarce-Ortega et al., 2020)

La situación presentada necesita de investigaciones que aporten la información suficiente para implementar acertadas políticas dirigidas a la protección de las aguas subterráneas. En tal sentido, el desarrollo de métodos para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos adquiere cada vez mayor importancia a nivel mundial y nacional.

A partir de estos aspectos tratados, los estudios de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas adquieren en Cuba cada vez mayor relevancia. Son varios los investigadores que han elaborado mapas de vulnerabilidad a la contaminación de los principales acuíferos cubanos.

En la actualidad, el Proyecto Nacional "Elaboración del Mapa Hidrogeológico de Cuba a Escala 1: 100 000" facilitará el estudio y manejo de las más de 100 reservas hídricas subterráneas, además de que planifica incluir el estudio de la vulnerabilidad intrínseca de las formaciones acuíferas.

En el año 2017, comenzó la ejecución del sub-programa para la realización del Mapa Hidrogeológico de Cuba a escala 1:100 000, el cual se confecciona en 97 hojas. El trabajo de este mapa lo realizan las empresas del Grupo Empresarial Gestión de Aguas Terrestres (GIAT) del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, previéndose su terminación en el año 2030, como se muestra en la figura 1:



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Análisis geoespacial de la vulnerabilidad del acuífero
Arenas Algaba como fuente de abasto a Trinidad

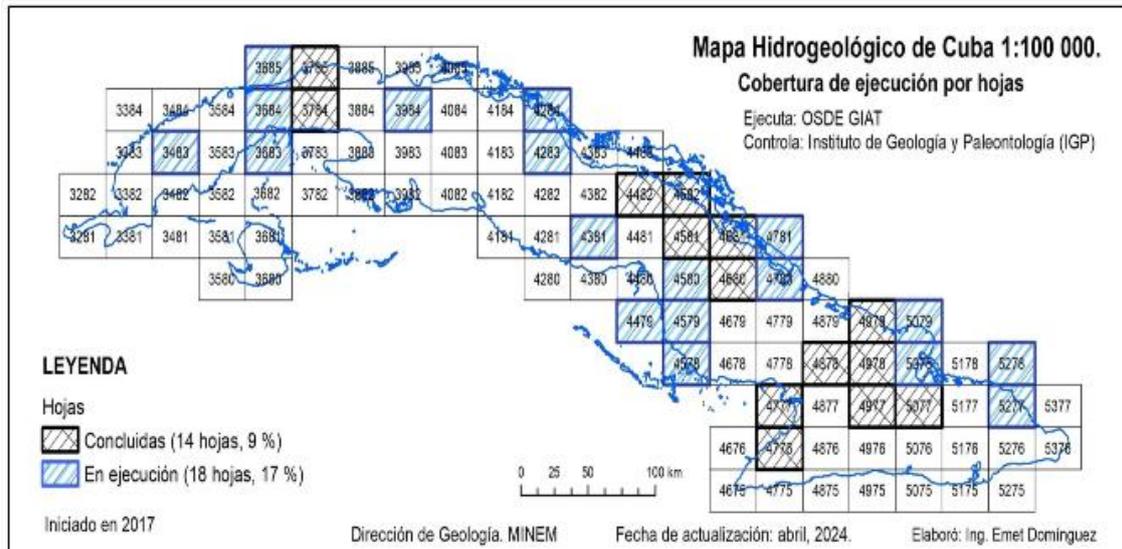


Figura 1. Actualización del mapa hidrogeológico de Cuba hasta el año 2024

Fuente: Ministerio de Energía y Minas de la República de Cuba

La ciudad de Trinidad en la provincia de Sancti Spíritus constituye uno de los polos turísticos más importante del país que incluye la península Ancón, ambos polos turísticos presentan un déficit con el abasto de agua a la población debido a su población residente o temporal va en constante crecimiento poblacional, por lo que obliga ubicar nuevas fuentes de abasto para esta región turística de acuerdo a las estrategias de desarrollo del turismo. Es por ello que se han desarrollado diferentes investigaciones hidrogeológicas en búsqueda de soluciones que permitan ampliar las fuentes de abasto, y en este sentido (San Román Pérez, 2012) demuestra que el acuífero localizado en los sedimentos aluviales cercanos al poblado "Algaba", puede abastecer a Trinidad u otras poblaciones que se encuentran dentro del valle de Los Ingenios, perteneciente a esta región turística. Por tanto, el presente artículo se caracteriza por ser descriptivo-analítico ya que se parte de la recolección y descripción de los parámetros hidrogeológicos y a partir de este punto se realiza la evaluación de la vulnerabilidad a través de mapas temáticos para predecir los diferentes niveles de vulnerabilidad de este acuífero aluvial, ante el impacto de actividades antrópicas o procesos naturales que pueden degradar la calidad de las aguas. A partir de estos antecedentes se plantea como objetivo de este artículo, analizar la vulnerabilidad por contaminación del acuífero que se encuentra en la zona de "Arenas Algaba", a través de la elaboración de mapas de vulnerabilidad del acuífero y determinar



el mayor o menor grado de vulnerabilidad que presenta el acuífero a la acción de contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie, empleando herramientas de análisis geoespacial como el ArcGIS y el método DRASTIC.

2. Metodología

El término “vulnerabilidad del acuífero a la contaminación” pretende representar el nivel variable de protección natural que ofrece la capacidad de atenuación de contaminantes de la zona no saturada o de los estratos semiconfinantes por encima de un acuífero, como resultado de procesos fisicoquímicos (filtración, biodegradación, hidrólisis, adsorción, neutralización, volatilización y dispersión), todos los cuales varían con su textura, estructura, contenido de arcilla, materia orgánica, pH, equilibrio redox y de carbonatos.(Foster et al., 2013)

A partir de esta definición se han desarrollado y aplicado diferentes métodos para evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos. Cada método tiene sus ventajas y desventajas, y ninguno puede ser considerado el mejor para todas las situaciones, el uso de unos u otros depende de la información disponible y de las características hidrogeológicas del área de estudio.

La mayoría de las estrategias de evaluación de la vulnerabilidad están basadas en Métodos Paramétricos de Rangos Ponderados, debido a restricciones en la calidad y disponibilidad de datos necesarios para desarrollar métodos determinísticos y estadísticos que permitan formular matemáticamente el proceso.

Los Métodos Paramétricos de Rangos Ponderados se basan en la selección de parámetros representativos para evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea en cada celda o polígono en que se subdivide el área de estudio. Cada uno de estos parámetros tiene un rango de variación que se divide en intervalos jerárquicos discretos y a cada intervalo se asigna un valor que refleja el grado de sensibilidad del acuífero a la contaminación. A cada parámetro se asigna también un factor de peso que expresa su importancia en el análisis. Para obtener el valor numérico final que refleja la vulnerabilidad de cada celda o polígono en el área de estudio, se suman los rangos de cada parámetro multiplicados por el peso asignado. (Valcarce-Ortega et al., 2020)



Algunos de los Métodos Paramétricos de Rangos Ponderados más empleados a nivel internacional ya que poseen mayor flexibilidad, en cuanto al conocimiento básico de la zona, aceptando ciertas estimaciones en caso de no contar con la información necesaria, ellos son, el método GOD, DRASTIC, AVI y SINTACS.

Método DRASTIC y su cartografía de la vulnerabilidad del acuífero aluvial de "Arenas Algaba"

La forma más adecuada de representar los parámetros durante una evaluación de vulnerabilidad, y los resultados que se obtienen de tal evaluación, es a través de mapas. La exactitud en la elaboración del mapa condicionará su fiabilidad, ya que los datos requeridos se obtienen con distintos grados de precisión dependiendo de la extensión del área que se pretende evaluar. Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas que muestran zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, los que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático.

En este estudio se emplea el software ArcGIS, el cual constituye un Sistema de Información Geográfica que permite el manejo confiable de una gran cantidad de datos y la elaboración de escenarios dinámicos, en el plano o en el espacio en tiempo real.

El método DRASTIC desarrollado por (Aller et al., 1987) y patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) es un método empírico, que clasifica y pondera parámetros intrínsecos, que reflejan las condiciones naturales del medio y es el más difundido para determinar la vulnerabilidad de acuíferos a nivel internacional.

La metodología DRASTIC es un sistema paramétrico de evaluación que incluye siete características fundamentales, a las que asigna valores, y un índice de ponderación, según su importancia.

D (Depth): Profundidad del nivel de agua.

R (Recharge): Recarga neta que recibe el acuífero.

A (Aquifer): formación geológica que constituye el acuífero.

S (Soil): cubierta edáfica bajo la superficie del terreno



T (Topography): pendiente del terreno.

I (Impact of vadose zone): impacto de la zona no saturada según su litología.

C (hydraulic conductivity): conductividad hidráulica del acuífero (permeabilidad).

Para aplicar este método debe asumirse que el posible contaminante tiene la misma movilidad en el medio que el agua, que se introduce por la superficie del terreno y que se incorpora al agua subterránea mediante la recarga (lluvia y/o retorno de riego).

Según plantea (DIAZ GUTIERREZ, 2018), las hipótesis en las que el índice DRASTIC se basa son las siguientes:

1. El contaminante debe ser introducido en la superficie del terreno.
2. El contaminante penetra con el agua de recarga.
3. El contaminante tiene la movilidad del agua.
4. El área evaluada es mayor o igual a 45 ha.

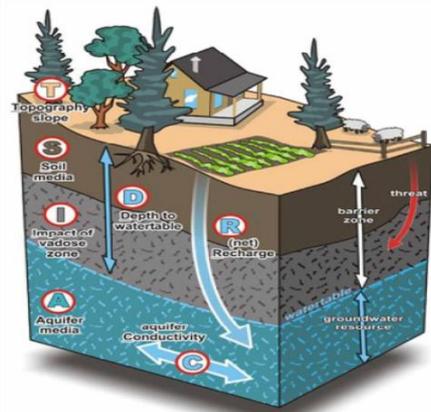


Figura 2. Esquema general de los parámetros del método DRASTIC

Fuente:(Patel et al., 2022)

$$\text{Contaminación potencial} = (Dw \cdot Dr) + (Rw \cdot Rr) + (Aw \cdot Ar) + (Sw \cdot Sr) + (Tw \cdot Tr) + (Iw \cdot Ir) + (Cw \cdot Cr). \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:



Dw, Rw, Aw, Sw, Tw, Iw y Cw: corresponden a la ponderación de cada uno de parámetros o factores señalados anteriormente.

Dr, Rr, Ar, Sr, Tr, Ir y Cr: corresponden a la reclasificación o valoración interna de cada parámetro de acuerdo a la variabilidad de la propiedad.

Para el caso de determinación de la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos, los factores de ponderación son los consignados en la siguiente tabla 1.

Tabla 1. Factores de ponderación

Tipo	Variable						
	Dw	Rw	Aw	Sw	Tw	Iw	Cw
Intrínseca	5	4	3	2	1	5	3

Reemplazando los valores correspondientes, la ecuación 1 se transforma en:

$$\text{Contaminación potencial} = (5Dr) + (4Rr) + (3Ar) + (2Sr) + (1Tr) + (5Ir) + (3Cr). \text{ (Ecuación 2)}$$

El método DRASTIC identifica los valores de vulnerabilidad desde el valor 23 al 230, según se muestra en la siguiente tabla 2.

Tabla 2. Rangos de variación del índice de vulnerabilidad intrínseca (Aller et al., 1987)

Grado de vulnerabilidad	Valor DRASTIC	Clasificación
Muy bajo	23-64	1
Bajo	64-105	2
Moderado	105-146	3
Alto	146-187	4
Muy Alto	187-230	5

2.1 Definición y valores de los parámetros del índice DRASTIC

Los factores de ponderación toman valores de 1 a 10, se utilizan para reclasificar la variación de las propiedades de cada uno de los parámetros utilizados.



Profundidad del nivel de agua (D)

Su valor se obtiene como la diferencia entre el nivel topográfico y el nivel al que se encuentra el material saturado, que coincide con el nivel piezométrico.

Tabla 3. Puntajes del parámetro de profundidad del nivel piezométrico DRASTIC (Aller et al., 1987)

Rango de profundidades (D) (m)	
Rango	Clasificación
0.0 - 1.5	10
1.6 - 4.6	9
4.7 - 9.1	7
9.2 - 15.2	5
15.3 - 22.9	3
30.0 - 30.5	2
> 30.5	1

Para la elaboración del mapa de la profundidad del agua del sistema acuífero de la zona de estudio, se recopiló la información disponible de los pozos existentes y las calas perforadas que se realizaron durante los años de investigación hidrogeológica del acuífero aluvial.

Para la obtención de este parámetro se realizó una interpolación de tipo IDW(Gravitacional o Inverso de la Distancia), no es la que generaba el menor error cuadrático sin embargo, la interpolación de los datos es menos brusca con este método de interpolación.

Recarga neta (R)

La recarga es el volumen de agua por unidad de área que ingresa al acuífero durante un período de tiempo, para lo cual debe atravesar la superficie y la zona no saturada.

Para la obtención de este parámetro se calculó la recarga a través de un balance hídrico, siendo este la relación de los procesos de precipitación, escurrimiento, infiltración y recarga, que permite determinar la disponibilidad de agua a partir de la siguiente ecuación:



$$R = P - ET - R_0 \text{ (Castillo Zamora \& Sequeira Gómez, 2023)}$$

Donde:

R = recarga neta del acuífero (mm/año)

P = precipitación media anual (mm/año)

ET = Evapotranspiración real media del cultivo (mm/año)

R₀ = h_o = lámina de escurrimiento total (mm/año)

Los puntajes y rangos considerados para el parámetro de la recarga son los que se muestran en la Tabla 4 (Aller et al., 1987)

Recarga neta (R) (mm/año)	
Rango	Clasificación
0 - 50	1
51- 102	3
103- 178	6
179 - 250	8
> 250	9

Formación geológica (A)

El método DRASTIC valora la litología que constituye el acuífero, considerándose que a mayor granulometría y fracturamiento, mayor permeabilidad y por tanto un grado de vulnerabilidad más alto. Su importancia radica por el grado de influencia en la atenuación de un contaminante, a través de los procesos de absorción, dispersión y dilución.

Tabla 5. Puntajes para el medio acuífero DRASTIC, dependiendo de la litología presente en el acuífero en estudio (Aller et al., 1987)

Medio acuífero (A)		
Tipo	Clasificación	Clasificación típica
Lutita masiva	1 - 3	2
Metamórficas/ ígneas	2 - 5	3
Metamórficas/ ígneas meteorizadas	3 - 5	4
Depósito glacial	4 - 6	5
Secuencias areniscas, caliza y lutitas	5 - 9	6
Arenisca masiva	4 - 9	6



Tabla 5. Puntajes para el medio acuífero DRASTIC, dependiendo de la litología presente en el acuífero en estudio. Conclusión (Aller et al., 1987)

Medio acuífero (A)		
Tipo	Clasificación	Clasificación típica
Caliza masiva	4 - 9	6
arena o grava	4 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Caliza Kárstica	9 - 10	10

Cubierta edáfica (S)

En el presente parámetro al igual que el medio acuífero, los materiales que conforman esta zona influyen en las propiedades del contaminante, atenuándolo, con lo que la vulnerabilidad a partir de este parámetro depende del tipo de materiales que se encuentran en el subsuelo.

Para determinar dicho parámetro se cuenta con la información sobre espesor, estructura, textura, mineralogía, propiedades físicas y químicas, porosidad, permeabilidad, humedad, capacidad de infiltración y compactación del material que constituye la zona en estudio.

Tabla 6. Puntajes para el tipo de suelo DRASTIC (Aller et al., 1987)

Tipo se suelo (S)	
Tipo	Clasificación
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5

Tabla 6. Puntajes para el tipo de suelo DRASTIC(Conclusión)

Tipo se suelo (S)	
Tipo	Clasificación
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol – cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1



Pendiente del terreno (T)

El agua que llega a la superficie del suelo y no se evapora, tiene principalmente dos caminos: escurrir o infiltrarse. El comportamiento que tenga depende en gran medida de la pendiente del terreno. Si la pendiente es grande, el agua escurre superficialmente llevándose consigo parte de las sustancias contaminantes. En cambio, si es pequeña, el agua tiende a encharcarse permaneciendo en la superficie lo suficiente para infiltrar y llevar con ello sustancias al acuífero.

Para este parámetro es necesario conocer las elevaciones, pendientes variables de la superficie del terreno, trayecto de curso de las aguas superficiales entre otros elementos.

Tabla 7. Puntajes para la pendiente del terreno DRASTIC (Aller et al., 1987)

Pendiente %	
Rango	Clasificación
0 - 2	10
3 - 6	9
7 - 12	6
13 - 18	3
>18	1

Impacto de la zona no saturada (I)

El tiempo que demora el agua en recorrer el camino hasta la zona saturada no sólo depende de la longitud, sino también del tipo de material con que se encuentra. Las características del espesor, composición litológica, propiedades químicas de las rocas determinan las condiciones de atenuación del material que se encuentra por debajo del horizonte del suelo y por encima de la capa freática.

Para la obtención de este parámetro se recurrió a la información de pozos construidos en la actualidad y las calas perforadas y afloramientos observados en la zona de estudio; los estudios hidrogeológicos previos brindaron toda esta información o complementaron los estudios de campo que se realizaron durante este año 2025.

Conductividad Hidráulica (C)

La conductividad hidráulica, en el método que se aplica, se refiere a la capacidad de los materiales del acuífero para transmitir agua, lo cual controla el flujo y la velocidad a la que se mueven los contaminantes desde que ingresan al acuífero. Este parámetro se mide



en metros sobre día, y la información es obtenida de informes de los estudios hidrogeológicos previos en la zona de estudio.

Tabla 8. Puntajes utilizados para la Conductividad hidráulica DRASTIC (Aller et al., 1987)

Conductividad hidráulica (C)	
Rango	Clasificación
(m/día)	
0,04 - 4,08	1
4.09 – 12.22	2
12.23 – 28.55	3
28.56 – 40.75	6
40.76 – 81.49	8
> 81.49	10

El tipo de interpolación utilizado en este parámetro fue IDW debido a que mostraba homogeneidad y las transiciones son menos marcadas, cuando el distanciamiento entre los puntos de control es muy grande, los variogramas no son posibles de obtener, entonces comparativamente el IDW se perfila como el mejor entre los demás métodos de interpolación.

2.2 Características del área de estudio

Los acuíferos aluviales son formaciones geológicas que almacenan agua subterránea en depósitos sedimentarios, ubicados en valles y llanuras. Su análisis es crucial para evaluar la capacidad de almacenamiento y recuperación del agua, así como valorar su posible contaminación en presencia de agentes contaminantes.

La zona de estudio se encuentra en las cercanías del poblado Algaba a 2.0 km al este de Condado, está ubicada en ambas márgenes del río Agabama a una distancia de 28 km al noreste de la ciudad Trinidad entre las coordenadas conforme de Lambert: E: 621005.9488 N 228018.1698 y E: 623369.5109 N 229230.6546

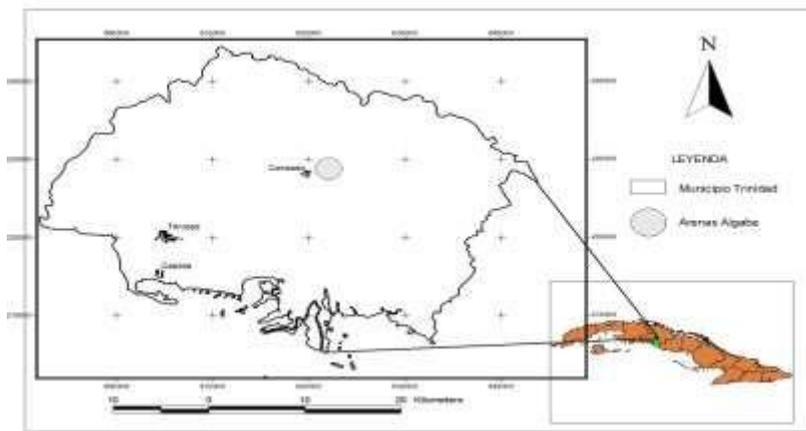


Figura 3. Ubicación del área de estudio.

Fuente: (Valcarce-Ortega et al., 2020)

El acuífero aluvial confinado de "Arenas Algaba" se encuentra ubicado, en la vertiente sur del macizo montañoso Guamuhaya, en el sitio de transición de la morfoestructura del sistema montañoso, al sistema de llanuras aluviales, con una distribución de canales de flujo de corrientes.

La composición geológica de la región se presenta en la Figura 4, destacándose que las principales formaciones geológicas en el área de estudio son:

Formación Condado (P2³ - P3¹ cd): Formada por diferentes litologías como areniscas, limolitas y conglomerados polimícticos, margas y calizas biodetríticas. Es la formación que bordea y contiene a los sedimentos aluviales que forman el reservorio en el área estudiada. Predomina en el área y contacta con los sedimentos aluviales a través de la argilita que constituye el sello del acuífero.

Depósitos Aluviales (Q₂ al): Limos, limos arenosos, arcillas arenosas con intercalaciones de gravas asociadas principalmente a la capa basal aunque aparece también de forma irregular y frecuente en la parte superior del corte. Constituyen el reservorio propiamente dicho.

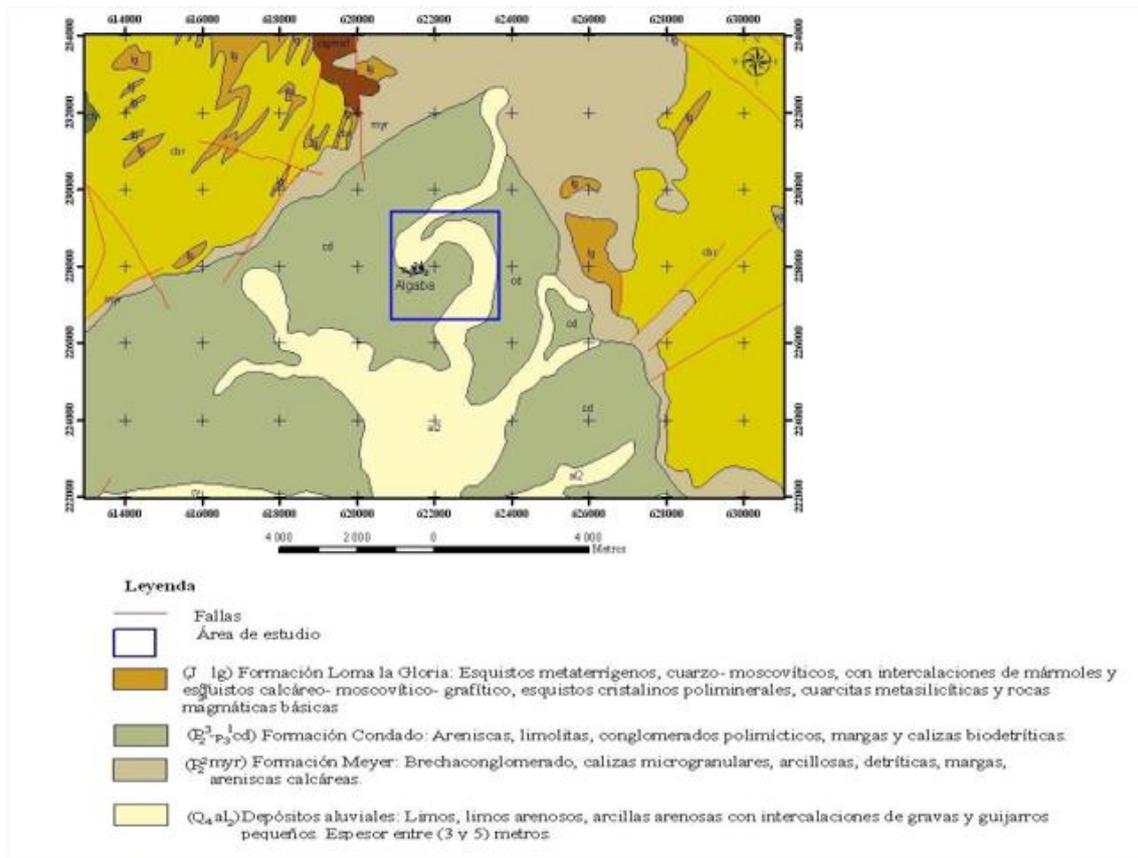


Figura 4. Mapa geológico del área de estudio

Fuente:(San Román Pérez, 2012)

3. Resultados y discusión

A continuación se describe cada uno de los resultados obtenidos durante el proceso de análisis y elaboración de los mapas de vulnerabilidad de cada parámetro que interviene en la metodología descrita por (Aller et al., 1987) del método DRASTIC.

Profundidad del nivel del agua (D)

El parámetro de la profundidad del nivel de agua del acuífero se ajustó de acuerdo a las características de la zona de estudio tomando diferentes intervalos hasta la profundidad máxima de 14 m. Los resultados obtenidos para el índice de vulnerabilidad DRASTIC que se muestran en la Figura 5. Las profundidades mayores entre la superficie del terreno y el nivel estático del acuífero se encuentran en los rangos de (0-3 m) localizadas en la margen del río lo que significa que estas son las más propensas a la contaminación debido al intercambio de sustancias y el arrastre del río durante las avenidas, la zona mayoritaria



del área de estudio que se encuentra con profundidades entre (5-14 m) es la zona menos vulnerable a la contaminación por agentes externos y corresponde con 90% de los pozos previstos a explotar para el abasto a Trinidad y solo 2 pozos se encuentran en el rango de vulnerabilidad moderado por lo que sería necesario medidas de control ante la presencia de posibles focos de contaminación.

Mapa de Vulnerabilidad de Profundidad del nivel de Agua(D)

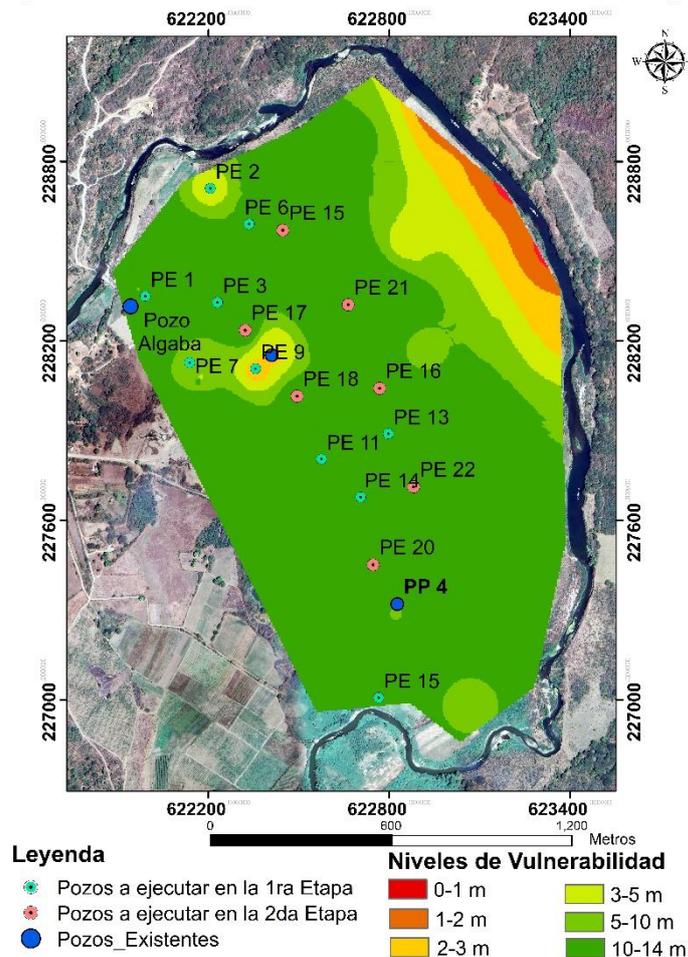


Figura 5. Índice DRASTIC para la profundidad del nivel de agua (D).

Fuente: Elaboración propia

Recarga neta (R)

Este parámetro considera la recarga que penetra la superficie terrestre por unidad de área, está expresada en mm/año. A continuación, se describe el procedimiento que se llevó a cabo para la realización de un balance hídrico, siendo necesario determinar la precipitación, la evapotranspiración real media de los cultivos en la zona de estudio y los



escurrimientos de la cuenca.

Selección de estaciones meteorológicas y agrometeorológicas

La selección de estaciones se utiliza para obtener una descripción espacial de las variables climatológicas que inciden en la producción o consumo de agua en la zona de estudio. En la provincia de Sancti Spíritus existen 4 estaciones meteorológicas de tipo sinóptica y algunas de ellas cuentan con el equipamiento para realizar los estudios agrometeorológicos, estas estaciones están distribuidas en varios municipios de la provincia, en el caso del municipio de Trinidad, la estación ubicada en Trinidad cuenta con los siguientes datos:

Tabla 9. Datos generales de la estación de Trinidad

NC	Municipio	Provincia	X	Y	Altura msnm
78337	Trinidad	Sancti Spíritus	604 487.88	216 797.46	24.10



Figura 6. Distribución de las estaciones meteorológicas y agrometeorológicas

Fuente: Centro Provincial de Meteorología de Sancti Spíritus

En el municipio existe una amplia red de medición de la lluvia, como parte de la red pluviométrica nacional operada por la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de la provincia de Sancti Spíritus.

Para este estudio se ubicaron aquellos equipos que por su ubicación se determinó que tenían influencia directa en el área estudiada, cuyos datos se muestran a continuación en la tabla y su localización espacial en la figura 7.



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Análisis geoespacial de la vulnerabilidad del acuífero
Arenas Algaba como fuente de abasto a Trinidad

Tabla 10. Red pluviométrica

NC	Provincia	Nombre	X	Y
360	Sancti Spíritus	Algaba	621 600	227 900
853	Sancti Spíritus	TC Condado	661 980	228 300
925	Sancti Spíritus	TC Meyer	623 000	233 600
926	Sancti Spíritus	Estación de Aforo Sopimpa	623 700	242 600
359	Sancti Spíritus	Meyer	623 300	233 200

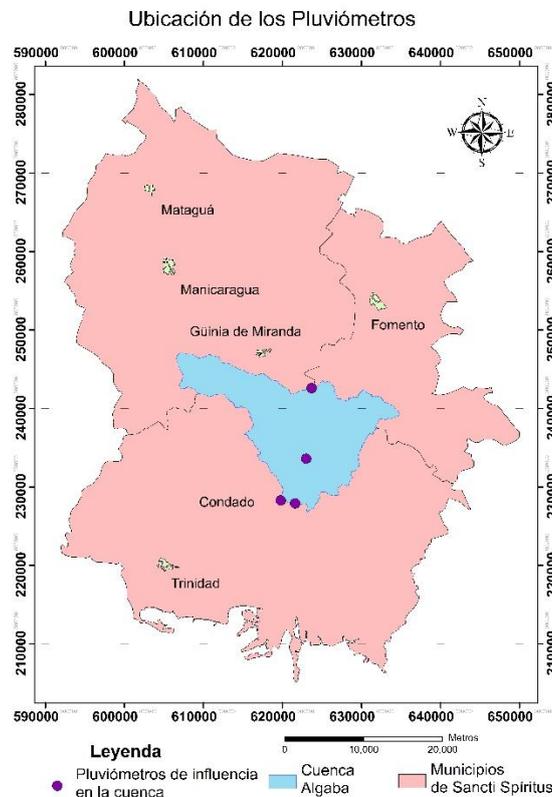


Figura 7. Ubicación de la red pluviométrica asociada a la cuenca

Fuente: Elaboración propia

Los datos de la precipitación media anual fueron tomados del pluviómetro 360 que pertenece al poblado de Algaba ya que constituye el pluviómetro más próximo al área de estudio y cuenta con 70 años de registro de lluvia en la zona de estudio, por tanto, la precipitación media anual fue de 1615.30 mm.

Los datos agrometeorológicos para el cálculo de la evapotranspiración real de los cultivos más frecuentes que se siembran en el área de estudio como son: maíz, tomate, boniato,



calabaza y una porción de pastos, se obtuvieron teniendo en cuenta la ubicación de la estación agrometeorológica y los datos de temperatura y evapotranspiración potencial que aparece en el boletín agrometeorológico nacional que se expide decanalmente, o sea, cada 10 días se emite un informe sobre estos datos agrometeorológicos que son necesarios para la determinación de la evapotranspiración real de los cultivos y el escurrimiento medio anual.

Cálculo de la evapotranspiración

La determinación de la evapotranspiración real se realiza con la ecuación siguiente:

$$ET_R = ET_o * kcp$$

ET_R = Evapotranspiración real del cultivo (mm/año)

Kcp = coeficiente del cultivo ponderado

ET_o = Evapotranspiración potencial media anual (mm/año)

Los datos de la evapotranspiración potencial por año fueron obtenidos del boletín agrometeorológico nacional y la determinación del coeficiente (Kcp) se realizó por la siguiente ecuación:

$$Kcp = \frac{\sum Kc_i * A_{cli}}{\sum A_{cl}}$$

Los coeficientes de cada cultivo fueron obtenidos a partir de (Allen et al., 2006) y el (Herrera et al., 2014), en la tabla 11 se relacionan los Kc_{med} de cada cultivo.

Tabla 11. Determinación del Kcp de los cultivos

Tipo de Cultivo	Kc_{med}	Área total cultivada(ha)	Área por cultivos(ha)	$A_i * Kc_{med}$	Kcp
Tomate	1.17	226	48	56.16	0.94
Maíz	0.94		72	67.68	
Calabaza	1.00		8	8	
Pastos	0.75		81	60.75	
Boniato	1.15		17	19.55	

Fuente: Elaboración propia



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Análisis geoespacial de la vulnerabilidad del acuífero
Arenas Algaba como fuente de abasto a Trinidad

A partir del análisis de los datos de evapotranspiración potencial de los últimos 15 años de registro, se determinó que este es de 37.20 mm/año.

Por tanto, la evapotranspiración media real del cultivo sería:

$$ET_R = ET_o * kcp$$

$$ET_R = 37.20 * 0.94 = \mathbf{34.97 \text{ mm/año}}$$

El R_0 (escurrimiento medio de la cuenca) o lámina de escurrimiento media (h_0) se calculó a partir de los datos de caudales de escurrimientos medios anuales en la cuenca asociada al pluviómetro 360 perteneciente a la zona de "Arenas Algaba", donde con los datos obtenidos del boletín agrometeorológico para el municipio de Trinidad, se determinó la temperatura media anual que fue de 26.61⁰C, luego, el módulo de escurrimiento medio anual en la cuenca que resultó de 11.08 l/s-km² y se obtiene una lámina de escurrimiento media anual de 349.50 mm/año.

A partir de la ecuación de balance hídrico, se determinó la recarga media anual del acuífero:

$$R = P - ET_R - R_0$$

$$R = 1615.30 - 34.97 - 349.50 = \mathbf{1230.83 \text{ mm/año}}$$

En la tabla 12, se especifican la recarga neta por cultivo para la elaboración del mapa de vulnerabilidad correspondiente.

Tabla 12. Determinación de la recarga neta por áreas de cultivos o calas

Tipo de Cultivo	Kcmed	Área total cultivada(ha)	Área por cultivos(ha)	A*Kc	Kcp	ETP (mm/año)	ETR (mm/año)	RN (mm)
Tomate	1.17	226	48	56.16	0.94	37.2	43.52	1222.28
Maíz	0.94		72	67.68			50.92	1214.88
Calabaza	1		8	8			59.58	1206.22
Pastos	0.75		81	60.75			69.71	1196.09
Boniato	1.15		17	19.55			81.56	1184.24

Fuente: Elaboración propia

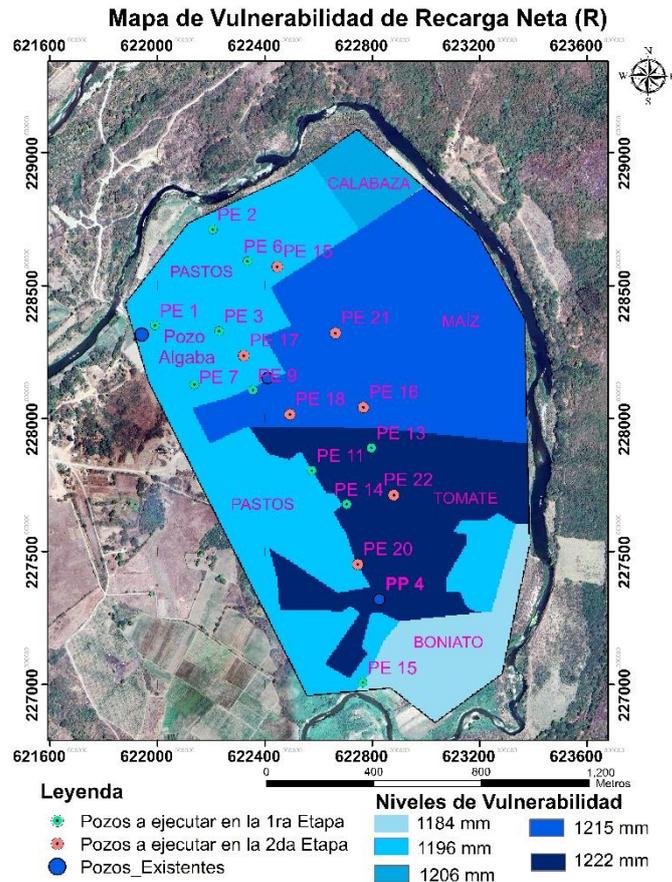


Figura 8. Mapa de vulnerabilidad de Recarga Neta del acuífero

Fuente: Elaboración propia

En la zona de estudio se tienen recargas de agua superficial por encima a las establecidas por el método DRASTIC, esto debido a las abundantes precipitaciones que se producen en el área de la cuenca de estudio, por lo que se consideró conveniente realizar un ajuste a este parámetro para recargas entre 1184 a 1222 mm.

El mapa de vulnerabilidad de la recarga neta del acuífero establece que el 55% de los pozos a ejecutar en las dos etapas previstas se encuentran en zonas de alta y muy alta recarga de agua superficial, lo cual es beneficio ya que el acuífero se alimenta de manera significativa desde la superficie, estos valores también declaran el nivel de vulnerabilidad que pueden presentar todos los pozos en el área de estudio sino se toman medidas como el control de los posibles contaminantes a partir de la construcción de pozos de monitoreo que permitan prevenir posibles afectaciones al acuífero producto a la contaminación del agua superficial ya sea producto de la lluvia o las avenidas que se pueden producir en el

río.

Medio acuífero (A)

La estratificación del medio del acuífero en la zona de estudio está constituida principalmente por las formaciones Condado (areniscas, limolitas, polimícticos, margas y calizas biodetríticas) y la formación de depósitos aluviales (Limos, limos arenosos, arcillas arenosas), La Figura 9 muestra su distribución espacial de las formaciones Condado y aluviales fundamentales en la zona de estudio y a las que se le otorgaron sus valores correspondientes de 6 y 8 respectivamente de acuerdo al método DRASTIC.

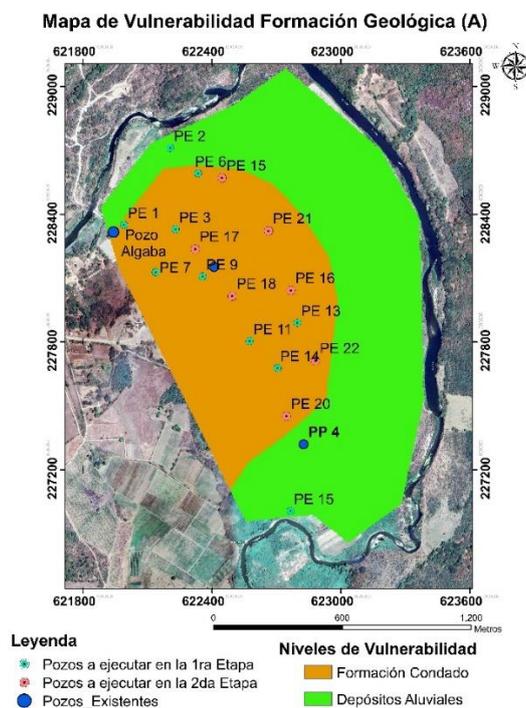


Figura 9. Mapa de vulnerabilidad del medio acuífero

Fuente: Elaboración propia

Tipo de suelo (S)

En el área de estudio predominan las texturas arenosas, las cuales se encuentran en el 60% de los pozos previstos a construir y construidos, el 35% los pozos a explotar se encuentran poseen un material limoso y solo el 2.5% de los pozos poseen gravas y arcillas, por lo que se afirma que, en el área existe un buen intercambio de sustancias ya que son texturas permeables en su mayoría, sus valores asignados corresponden con los establecidos en el método DRASTIC.

Mapa de Vulnerabilidad Cubierta Edáfica (S)

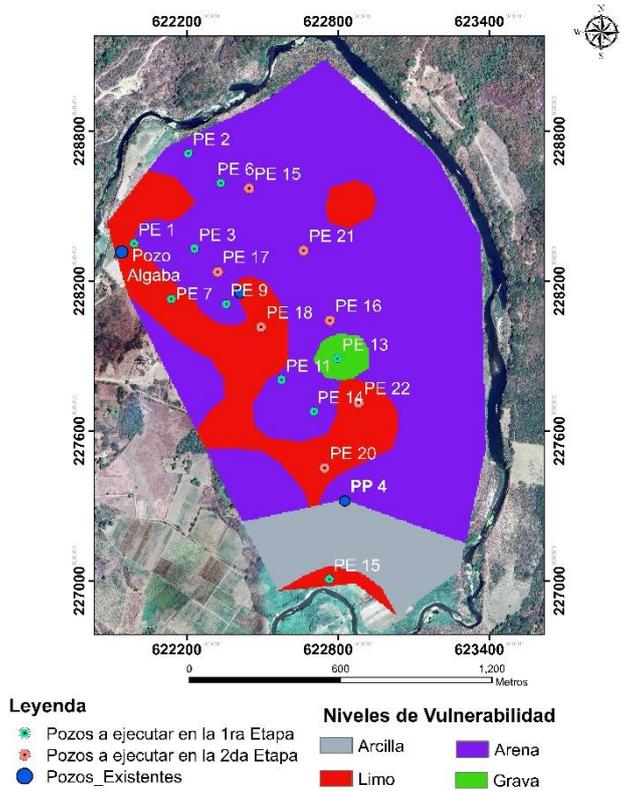


Figura 10. Mapa de vulnerabilidad de la cubierta edáfica

Fuente: Elaboración propia

Pendiente del terreno (T)

La zona de estudio es una región que presenta un relieve premontañoso, entre los valles de los ríos Ay y Magua en la porción oeste y Agabama al este, en el acuífero las cotas más abruptas varían de 6 % a 18%, específicamente el área de estudio y los pozos a explotar se ubican en una zona de llanura aluvial del río Agabama con pendientes menores al 2% exceptuando al posible pozo (PE2). Estos valores de pendientes menores del 2% predominante en la región indica una mayor oportunidad para que los contaminantes se infiltren, ya que el agua se mueva más lentamente y, por lo tanto, mayores probabilidades de llegar los contaminantes al acuífero.



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Análisis geoespacial de la vulnerabilidad del acuífero
Arenas Algaba como fuente de abasto a Trinidad

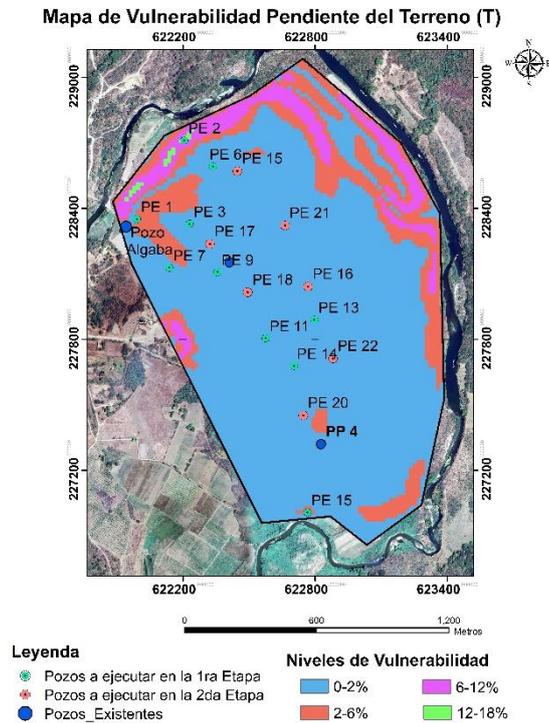


Figura 11. Mapa de vulnerabilidad de pendiente del terreno

Fuente: Elaboración propia

Zona no saturada (I)

La zona no saturada es uno de los parámetros de mayor importancia para el cálculo final del índice de vulnerabilidad DRASTIC, esto se debe a que tiene el mayor de los pesos asignados a algún atributo junto a la profundidad del agua. La zona de estudio se cuenta con cuatro texturas predominando las arenas, y en menor cantidad, se presentan las gravas. Conforme a lo mostrado en la Figura 12 se obtuvieron valores del índice de vulnerabilidad DRASTIC (4-9 puntos), siendo la mayor valoración (9) para las gravas, motivo por el cual poseen una permeabilidad alta, una valoración de 8 puntos para las arenas y la menor con 4 puntos para las arcillas, debido a su baja permeabilidad y por tanto, presenta menor riesgo de vulnerabilidad el acuífero en este tipo de suelo.

Mapa de Vulnerabilidad Impacto de la zona no saturada (I)

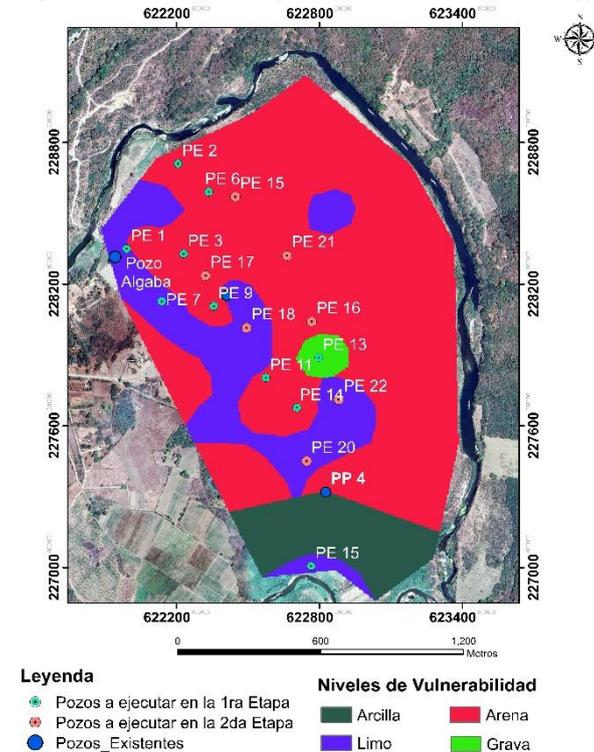


Figura 12. Mapa de vulnerabilidad de la zona no saturada

Fuente: Elaboración propia

Conductividad hidráulica (C)

La conductividad hidráulica se determinó a través de la interpretación de los Métodos de la geofísica de pozo, específicamente el Método de Resistivimetría de calas, dada las posibilidades que los mismos muestran para detectar el movimiento del agua subterránea en los posibles pozos y en el subsuelo, para estimar sus parámetros (dirección, velocidad, caudal) y evaluar las propiedades hidráulicas del acuífero (velocidad de filtración, conductividad hidráulica y transmisividad).

La Figura 13 demuestra que el índice de vulnerabilidad DRASTIC que en el rango de 28.55 m/d a más de 81.49 m/d, se encuentra los mayores valores de permeabilidad lo que refleja la carencia de un sustrato impermeable, ya que está conformada la zona por arenas y limos, siendo vías para la entrada de los contaminantes hacia el acuífero. La mayor parte de la zona de estudio presenta de moderada a muy alta conductividad hidráulica.

Mapa de Vulnerabilidad Conductividad Hidráulica (C)

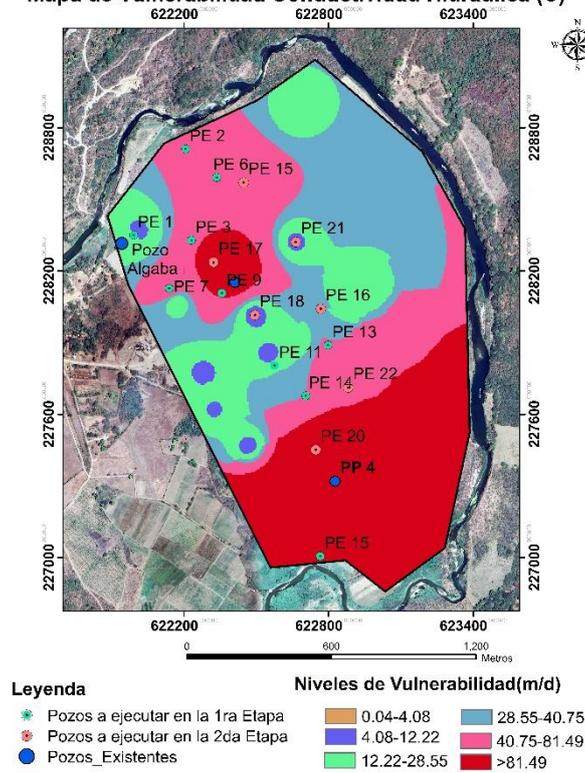


Figura 13. Mapa de vulnerabilidad de la conductividad hidráulica

Fuente: Elaboración propia

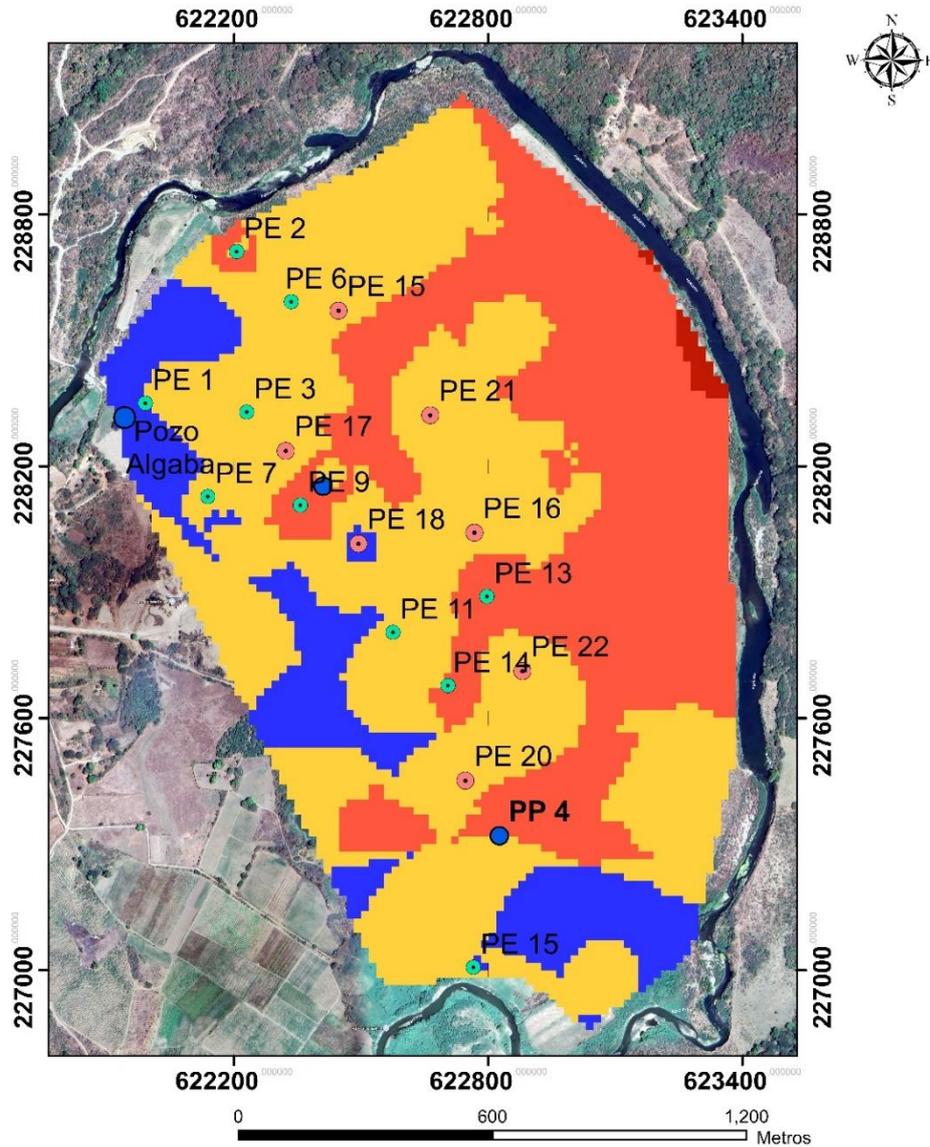
Mapa de índice de vulnerabilidad DRASTIC

Con los resultados obtenidos de la reclasificación de los siete parámetros que emplea el método DRASTIC, se elaboró el mapa que se presenta en la figura 14, la cual muestra la variación espacial del índice del grado de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en la zona de estudio que varían entre 84 a 197, por lo que la zona de estudio presenta cuatro tipos de vulnerabilidad, los cuales son: baja, moderada, alta y muy alta. La zona de estudio se caracteriza por el 20% de la zona encontrarse en baja vulnerabilidad donde además se encuentra en esta zona, el pozo y la estación de bombeo que abastece en la actualidad al poblado de Algaba, el 60% de los pozos previstos se encuentran en la zona de vulnerabilidad moderada y el otro 20% de los pozos a explotar están en la zona alta de vulnerabilidad a la contaminación fundamentalmente por los elevados valores de permeabilidad y la profundidad del nivel de agua del acuífero es menor y por tanto más cercano el nivel estático del acuífero a la superficie. La zona de muy alta vulnerabilidad es casi imperceptible y está localizada en la margen río Agabama, por lo que no significa



un riesgo inminente para los pozos que se pretenden explotar para el abasto de agua a Trinidad.

Mapa de Vulnerabilidad Acuífero "Arenas Algaba"



Leyenda

- Pozos a ejecutar en la 1ra Etapa
- Pozos a ejecutar en la 2da Etapa
- Pozos_Existentes

Niveles de Vulnerabilidad

- | | |
|---|--|
| Baja | Alta |
| Moderada | Muy Alta |

Figura 14. Mapa general de la vulnerabilidad del acuífero "Arenas Algaba"

Fuente: Elaboración propia



4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el análisis de cada parámetro permiten arribar a las siguientes conclusiones:

- ❖ La elaboración del mapa de vulnerabilidad de “Arenas Algaba” constituye una herramienta de gran ayuda en la elaboración de planes de manejo del acuífero y de ordenamiento territorial de las fuentes de abasto a Trinidad, además este mapa de vulnerabilidad debe ser empleado por las empresas provinciales de Aprovechamiento Hidráulico(EAH-SS) y Acueducto y Alcantarillado(EAA-SS) de Sancti Spíritus, como también por la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara(EIPH-VC), para la toma de decisiones para la explotación segura, ordenada y eficiente de los pozos propuestos para el abasto a Trinidad.
- ❖ El método DRASTIC puede ser aplicado a otros acuíferos cubanos no costeros y brindar resultados que avalen la utilización de las fuentes subterráneas para abastecer a las comunidades o capitales provinciales.
- ❖ La suma paramétrica de los mapas temáticos generados para la zona de estudio, indica que la vulnerabilidad natural del agua subterránea, de acuerdo a la metodología DRASTIC, es de baja a muy alta (84-197), los valores más altos del índice del grado de vulnerabilidad DRASTIC son a consecuencia de las actividades antropogénicas que ahí se desarrollan y a las características propias del medio y al ser bordeado por el río Agabama. Los parámetros que proporcionaron el mayor peso fueron: la zona no saturada, la recarga neta y la conductividad hidráulica.

5. Referencias bibliográficas

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Roma: FAO*, 298(0).



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Análisis geoespacial de la vulnerabilidad del acuífero
Arenas Algaba como fuente de abasto a Trinidad

- Aller, L., Lehr, J. H., Petty, R., & Bennett, T. (1987). DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. *Journal Geological Society of India*, 29(1), 23-37.
- Castillo Zamora, C. J., & Sequeira Gómez, H. (2023). Determinación del Balance Hídrico para estimar la recarga potencial del Reservorio Los Lirios, Agua Caliente, Cañas, Guanacaste, Costa Rica.
- DIAZ GUTIERREZ, G. (2018). *Vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero Maneadero, Ensenada Baja California, aplicando los métodos DRASTIC y SEA-GIndex* Universidad Autónoma del Estado de México].
- Foster, S., Hirata, R., & Andreo, B. (2013). The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology Journal*, 21(7), 1389-1392.
- Herrera, E. I. Z., Díaz, C. E. D., González, R. C., Hernández, R. P., & Fundora, M. L. (2014). Coeficientes de cultivos (Kc) en Cuba. *Revista Ingeniería Agrícola*, 4(3), 16-22.
- León, L. F. M., & Gómez, A. M. S. (2023). Evaluación de los recursos hídricos de Cuba (II): Dominio de los acuíferos cársicos, regionalización y recursos potenciales de agua subterránea. *Gota a gota*(29), 33-46.
- Patel, P., Mehta, D., & Sharma, N. (2022). A review on the application of the DRASTIC method in the assessment of groundwater vulnerability. *Water Supply*, 22(5), 5190-5205. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.126>
- San Román Pérez, N. (2012). *Evaluación de acuíferos aluviales para el abasto mediante la integración de un complejo de métodos de estudio. Caso: Arenas Algaba* Universidad de Pinar del Río " Hermanos Saíz Montes de Oca". Facultad de ...].
- Valcarce-Ortega, R. M., Rodríguez-Miranda, W. R., & Jorge-Díaz, Z. (2020). Aplicación de parámetros geoelectrónicos en el estudio de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas. *Minería y Geología*, 36(4), 390-403.