

Vulnerabilidad intrínseca del acuífero Arenas Algaba como fuente de abasto de agua a Trinidad

Juan José Martín LozadaE-MAIL: jjosem0121@gmail.com

Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara, Cuba

Michael Álvarez GonzálezE-MAIL: michaelalvarezglez@gmail.com

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba

RESUMEN

La ciudad de Trinidad y la península Ancón son importantes polos turísticos de Sancti Spíritus que enfrentan un déficit de abasto de agua por el crecimiento de su población residente y temporal. Esta situación requirió localizar nuevas fuentes como son los acuíferos aluviales o costeros. Este artículo tuvo por objetivo, determinar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero aluvial en la zona .Arenas Algaba. ante procesos naturales que pueden degradar la calidad del agua. Para la zonificación de las áreas de riesgo, se empleó el software ArcGIS 10.2 y el método DRASTIC para proyectar una explotación segura y racional de esta fuente de agua. Los resultados obtenidos fueron presentados a partir de mapas temáticos, que posibilitaron determinar las características naturales del acuífero y el grado de vulnerabilidad a los contaminantes.

PALABRAS CLAVE: *abasto de agua, acuífero, mapas, vulnerabilidad*

Assessment of the intrinsic vulnerability of the Arenas Algaba aquifer as a source of water supply to Trinidad

ABSTRACT

The city of Trinidad and the Ancón Peninsula are important tourist destinations in Sancti Spíritus province, but they face a water supply deficit due to the growth of their resident and seasonal populations. This situation necessitated the identification of new sources, such as alluvial or coastal aquifers. This article aimed to determine the intrinsic vulnerability of the alluvial aquifer in the .Arenas Algaba. area to natural processes that can degrade water quality. ArcGIS 10.2 software and the DRASTIC method were used to zone the risk areas and project a safe and rational exploitation of this water source. The results were presented using thematic maps, which allowed for the determination of the aquifer's natural characteristics and its degree of vulnerability to contaminants.

KEYWORDS: *water supply, aquifer, maps, vulnerability*

01 INTRODUCCIÓN

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.

Según León y Gómez (2023) la isla de Cuba, se extiende sobre 109 884,01 km², en ella se distinguen tres tipos de acuíferos cuyos recursos potenciales se considera que ascienden a 6 934,35 hm³/año y que, en orden de importancia por su extensión superficial y productividad son los siguientes:

- 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 (León & Gómez, 2023).
- 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 (León & Gómez, 2023).
- 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 (León & Gómez, 2023).

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.

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, ambas zonas presentan un déficit con el abasto de agua a la población residente o temporal va en constante crecimiento poblacional, por lo que obliga ubicar nuevas fuentes de abasto para esta región 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 la tesis de maestría de San Román Pérez (2012) se centró en caracterizar la geometría del acuífero, calcular sus reservas, determinar parámetros hidrodinámicos (permeabilidad, transmisividad, caudales) y evaluar la calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua todo ello para declarar al acuífero como apto para el abasto a Trinidad.

El presente artículo introduce el análisis de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero mediante el método DRAS-TIC. Esto permite no solo conocer la cantidad y calidad del agua subterránea, sino también que zonas del acuífero son más susceptibles a degradarse ante procesos naturales, lo cual es crucial para la planificación territorial y el abasto a las poblaciones.

El método DRASTIC se aplicó de manera estándar, con los siete parámetros y ponderaciones clásicas, aunque se realizó una calibración local en la asignación de rangos como en el caso de la recarga neta, calculada mediante balance hídrico específico para el área de estudio.

Por tanto, a partir de estos antecedentes se plantea como objetivo de esta investigación, determinar la vulnerabilidad por contaminación del acuífero que se encuentra en la zona de "Arenas Algaba", elaborando mapas de vulnerabilidad que permitan conocer el mayor o menor grado de vulnerabilidad que presenta el acuífero debido a la acción de contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie, para lo cual se emplean herramientas de análisis geoespacial como ArcGIS 10.2 y el método DRASTIC.

El aporte científico no se limita a la creación de mapas temáticos, sino que ofrece un modelo metodológico que puede ser aplicado a otros acuíferos aluviales de Cuba que enfrentan condiciones naturales similares, brindando a las empresas implicadas en este tema, una herramienta para la planificación y explotación segura de los pozos previstos y actuales, contando para ello con softwares de análisis geoespacial como ArcGIS 10.2 y fuentes de información local, que permite priorizar los pozos más idóneos en cantidad y calidad para el consumo humano y turístico.

02 METODOLOGÍA APLICADA A LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DEL ACUÍFERO

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. En este sentido, 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, los que permiten ciertas estimaciones en caso de no contar con la información necesaria, ellos son:

- **GOD:** Es el método más sencillo y de fácil aplicación. Es un método que brinda un enfoque cualitativo que analiza la vulnerabilidad con un valor entre 0 y 1, obtenido al multiplicar tres factores, los cuales son el tipo de acuífero o grado de confinamiento del agua, la litología de la zona no saturada y la profundidad del nivel freático. Por su simplicidad y bajos requerimientos de datos, es ideal para una evaluación preliminar o regional del acuífero cuando hay poca información disponible.
- **DRASTIC:** Es el método paramétrico más difundido a nivel mundial. Evalúa la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero mediante el análisis ponderado de siete parámetros hidrogeológicos. Su versatilidad y detalle lo hacen aplicable a una amplia gama de contextos hidrogeológicos, especialmente a nivel regional, siempre que se cuente con los datos necesarios del acuífero.
- **SINTACS:** Se trata de un método paramétrico de origen italiano que constituye una adaptación y mejora del método DRASTIC. Al igual que DRASTIC, valora la vulnerabilidad a partir de siete parámetros. Su principal ventaja es la flexibilidad, ya que permite asignar diferentes pesos a los parámetros en función de las condiciones hidrogeológicas específicas del terreno (como en medios porosos, fisurados o cársticos).
- **AVI:** Se basa en la resistencia hidráulica de los estratos geológicos subyacentes al acuífero ante un flujo vertical de contaminantes. Su cálculo se define como la relación entre el espesor de las capas sobre el acuífero (D) y su conductividad hidráulica (K). Básicamente, determina con la rapidez de un contaminante para llegar al agua subterránea desde la superficie. Su enfoque en la resistencia del sustrato lo hace adecuado para acuíferos donde la zona no saturada juega un papel clave.

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.

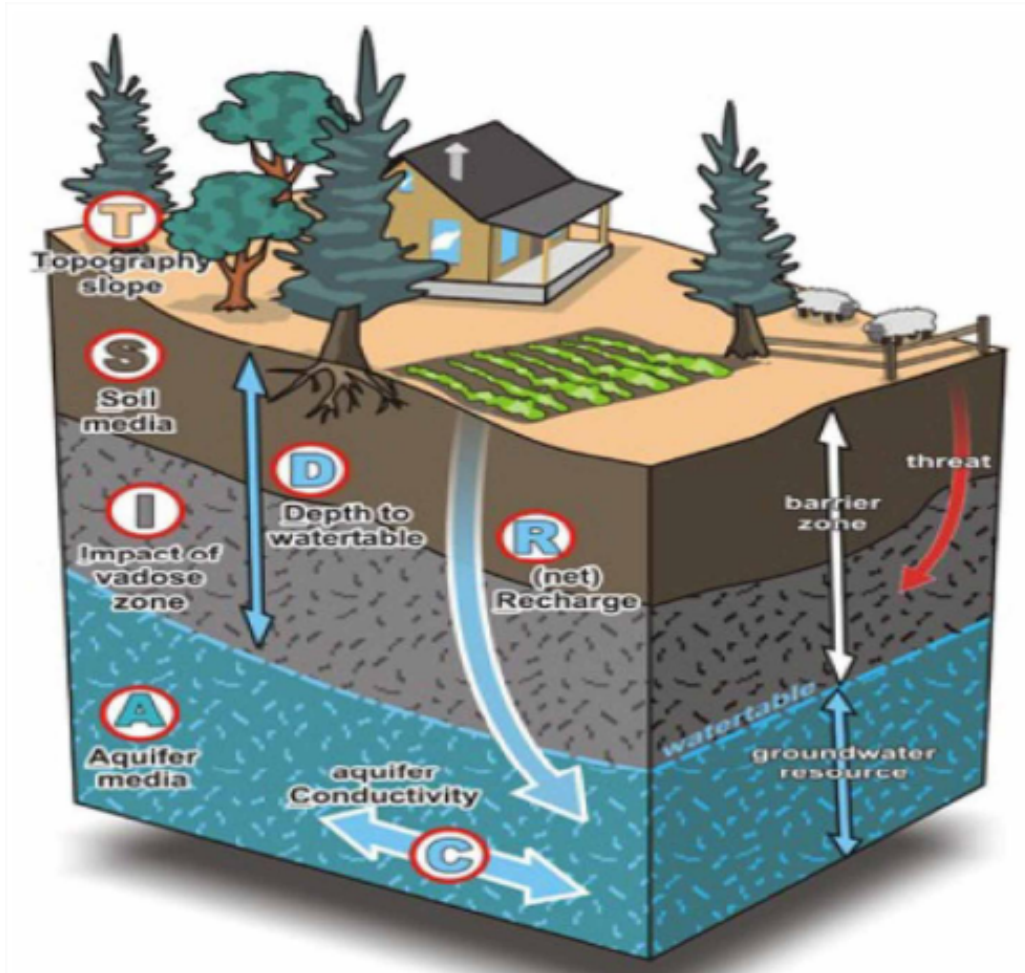


Figura 2.1. Esquema general del método DRASTIC (Patel et al., 2022).

$$CP = D_w \cdot D_r + R_w \cdot R_r + A_w \cdot A_r + S_w \cdot S_r + T_w \cdot T_r + I_w \cdot I_r + C_w \cdot C_r \quad (2.1)$$

Donde:

CP : Contaminación potencial. D_w , R_w , A_w , S_w , T_w , I_w y C_w corresponden a la ponderación de cada uno de parámetros o factores señalados anteriormente. D_r , R_r , A_r , S_r , T_r , I_r y C_r 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 2.1.

Tabla 2.1. Factores de ponderación

Tipo	D_w	R_w	A_w	S_w	T_w	I_w	C_w
Intrínseca	5	4	3	2	1	5	3

Fuente: Aller et al. (1987)

El método DRASTIC identifica los valores de vulnerabilidad desde el valor 23 al 230, según se muestra en la siguiente Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Rangos de variación del índice de vulnerabilidad intrínseca

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

Fuente: Aller et al. (1987)

2.1. Definición de los parámetros del método 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. 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)

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 (Castillo Zamora & Sequeira Gómez, 2023):

$$R = P - ET - R_0 \tag{2.2}$$

Donde: R = recarga neta del acuífero (mm/año); P = precipitación media anual (mm/año); ET = Evapotranspiración real media del cultivo (mm/año); $R_0 = h_o$ = lámina de escurrimiento total (mm/año).

En el municipio de Trinidad 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 (figura 2.2), cuyos datos se muestran a continuación en la Tabla 2.3 y su localización espacial.

Tabla 2.3. Red pluviométrica asociada a la cuenca de estudio

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

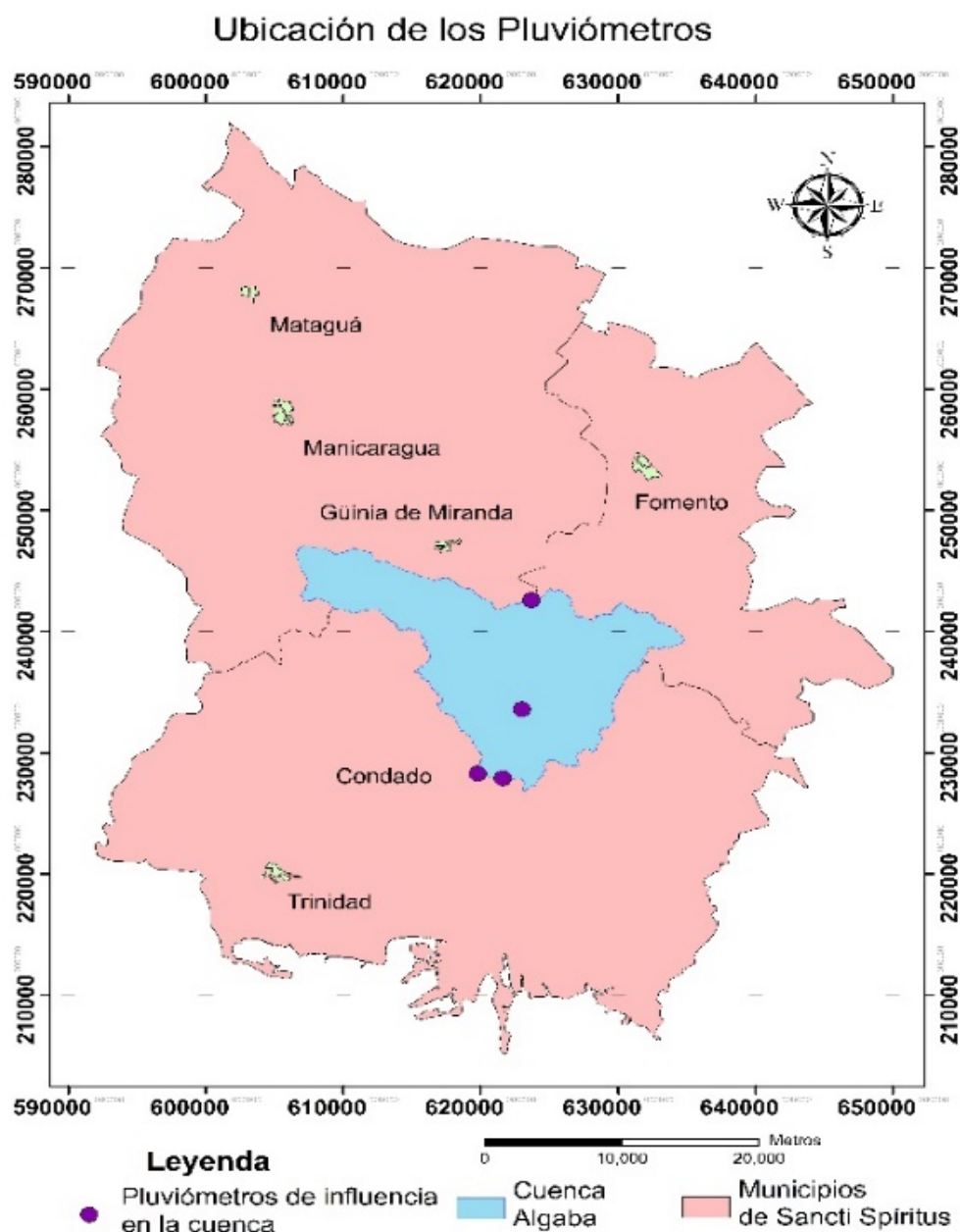


Figura 2.2. Ubicación de la red pluviométrica asociada a la cuenca.

Los datos de la precipitación media anual fueron tomados del pluviómetro 360 de la red pluviométrica existente en el país y 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, por tanto, la precipitación media anual fue de 1615,30 mm.

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 realizó 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 cada 10 días por el Instituto de Meteorología (INSMET), a través de su Centro de Meteorología Agrícola.

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

$$ETR = ETo \cdot K_{cp} \quad (2.3)$$

Donde: ETR = Evapotranspiración real del cultivo (mm/año); Kcp = coeficiente del cultivo ponderado; ETo = 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:

$$Kcp = \frac{\sum K_{ci} \cdot A_{cli}}{\sum A_{cl}} \quad (2.4)$$

Donde: A_{cli} = Área del cultivo (ha); A_{cl} = Área total cultivada (ha).

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.

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 26,61 °C, luego, el módulo de escurrimiento medio anual en la cuenca que resultó de 11,08 l/s-km², para una lámina de escurrimiento media anual de 349,50 mm/año.

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.

Cubierta edáfica (S)

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.

Pendiente del terreno (T)

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.

Impacto de la zona no saturada (I)

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.

Conductividad Hidráulica (C)

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. 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 adopta como el mejor entre los demás métodos de interpolación.

03 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio (figuras 3.1 y 3.2) 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: 621 005,94 N 228 018,16 y E: 623 369,51 N 229 230,65. El acuífero aluvial 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.

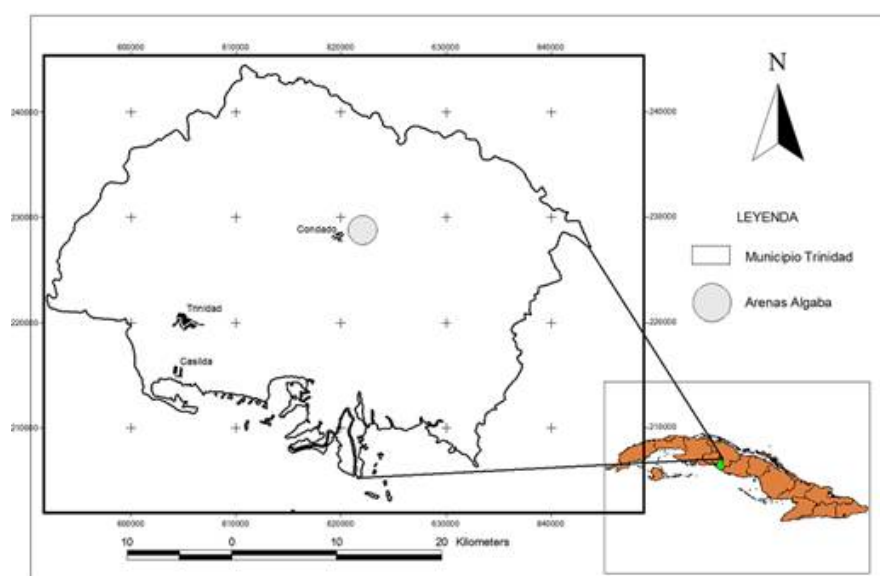


Figura 3.1. Ubicación del área de estudio (Valcarce-Ortega et al., 2020).

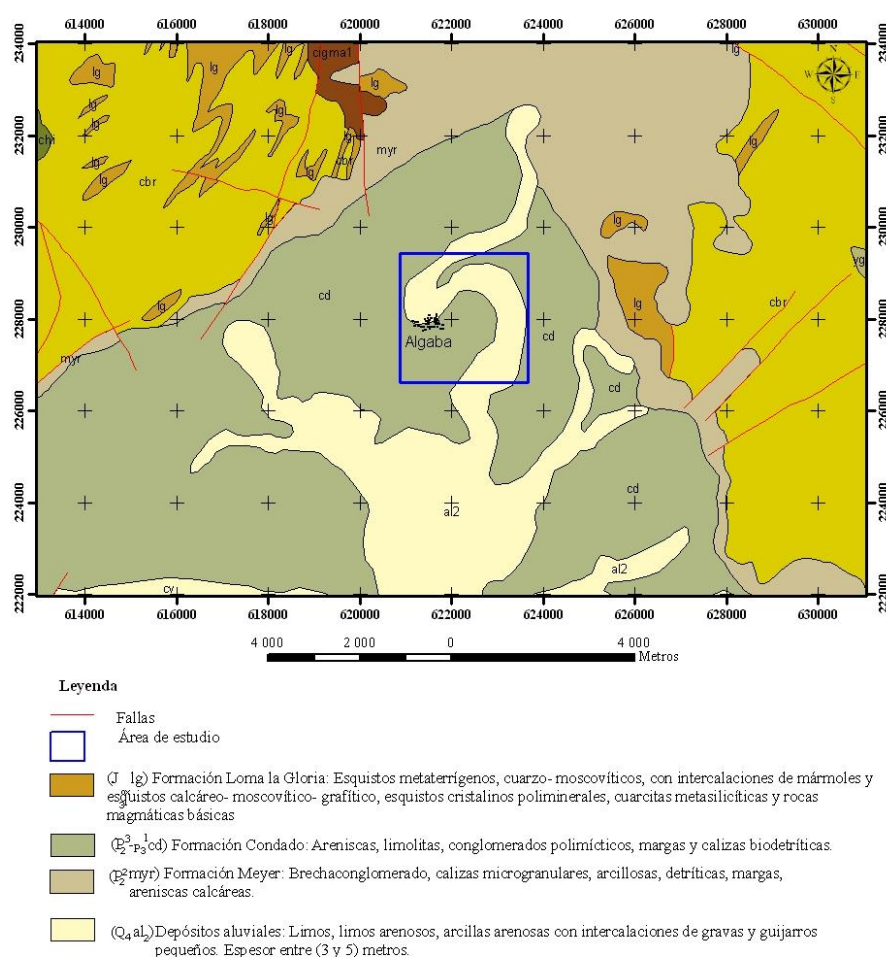


Figura 3.2. Mapa geológico del área de estudio (San Román Pérez, 2012).

Tabla 3.1. Ubicación de los pozos a construir en la Primera Etapa

No.	Pozos de la I Etapa	Coordenadas	
		x	y
1	PE 1	621 990,52	228 350,19
2	PE 7	622 137,83	228 127,69
3	PE 2	622 206,00	228 711,00
4	PE 3	622 229,95	228 329,09
5	PE 6	622 335,01	228 591,67
6	PE 9	622 356,26	228 107,35
7	PE 11	622 574,95	227 804,45
8	PE 13	622 796,92	227 889,81
9	PE 14	622 704,93	227 677,73
10	PE 15	622 764,82	227 006,82

Tabla 3.2. Ubicación de los pozos a construir en la Segunda Etapa

No.	Pozos de la II Etapa	Coordenadas	
		x	y
1	PE 16	622 767,39	228 041,62
2	PE 17	622 322,00	228 236,00
3	PE 18	622 493,70	228 015,10
4	PE 20	622 746,14	227 451,12
5	PE 21	622 663,31	228 321,24
6	PE 22	622 880,75	227 711,80

Tabla 3.3. Ubicación de los pozos existentes

No.	Pozos existentes	Coordenadas	
		x	y
1	PP 1	622 410,15	228 152,23
2	PP 4	622 826,54	227 319,66
3	Algaba	621 939,17	228 315,36

Las investigaciones hidrogeológicas de este acuífero aluvial comenzaron a partir del año 2007 por la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara con estudios con un enfoque integral. Entre 2007–2011 se realizaron topografías de precisión (estación total, GPS), geofísica de superficie (tomografía eléctrica, SEV), perforación rotaria, resistividad con salinización para estimar parámetros hidrodinámicos, observaciones sistemáticas de niveles freáticos, ensayos hidroquímicos y bacteriológicos, y análisis hidrológico probabilístico del río Agabama. En 2011 se ejecutaron dos pozos de exploración a percusión (PP1 y PP4). Los caudales obtenidos fueron 36,5 L/s (PP1) y 65,7 L/s (PP4), confirmando la viabilidad para el abasto a Trinidad.

Entre 2019–2020 se continuó la investigación detallada, definiendo la geometría del acuífero (área 2,26 km²), el volumen almacenado aproximado es de 53,5 millones de m³. Se proyectaron 17 pozos de explotación con tecnología de perforación por circulación inversa.

Reyes y Cruz (2013) definen que el acuífero aluvial de “Arenas Algaba”, califica como un acuífero libre de acuerdo

a los siguientes aspectos:

- No existe una capa impermeable superior que someta el agua a presión mayor que la atmosférica.
- La ausencia de una capa confinante superior, lo que permite que el agua se recargue directamente por infiltración de lluvias o del río, y que su nivel fluctúe libremente.
- Relación hidráulica directa con el río Agabama debido a el agua del río puede infiltrarse a través del lecho poroso para recargar el acuífero, y viceversa, el acuífero puede descargar al río cuando el nivel freático supera la cota del cauce.
- Presencia de una zona no saturada deducida a partir de los perfiles geoelectricos y de las tomografías, que muestran resistividades elevadas en los primeros metros (materiales secos o húmedos no saturados) y un descenso brusco de resistividad al alcanzar el nivel freático.

04 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MAPAS TEMÁTICOS PARA EL ACUÍFERO

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)

Las profundidades mayores entre la superficie del terreno y el nivel estático del acuífero estudiado (figura 4.1), 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.

Recarga neta (R)

El mapa de vulnerabilidad de la recarga neta (figura 4.2) del acuífero establece que el 55 % de los pozos propuestos a explotar 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 si no se toman medidas como el control de los posibles contaminantes.

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

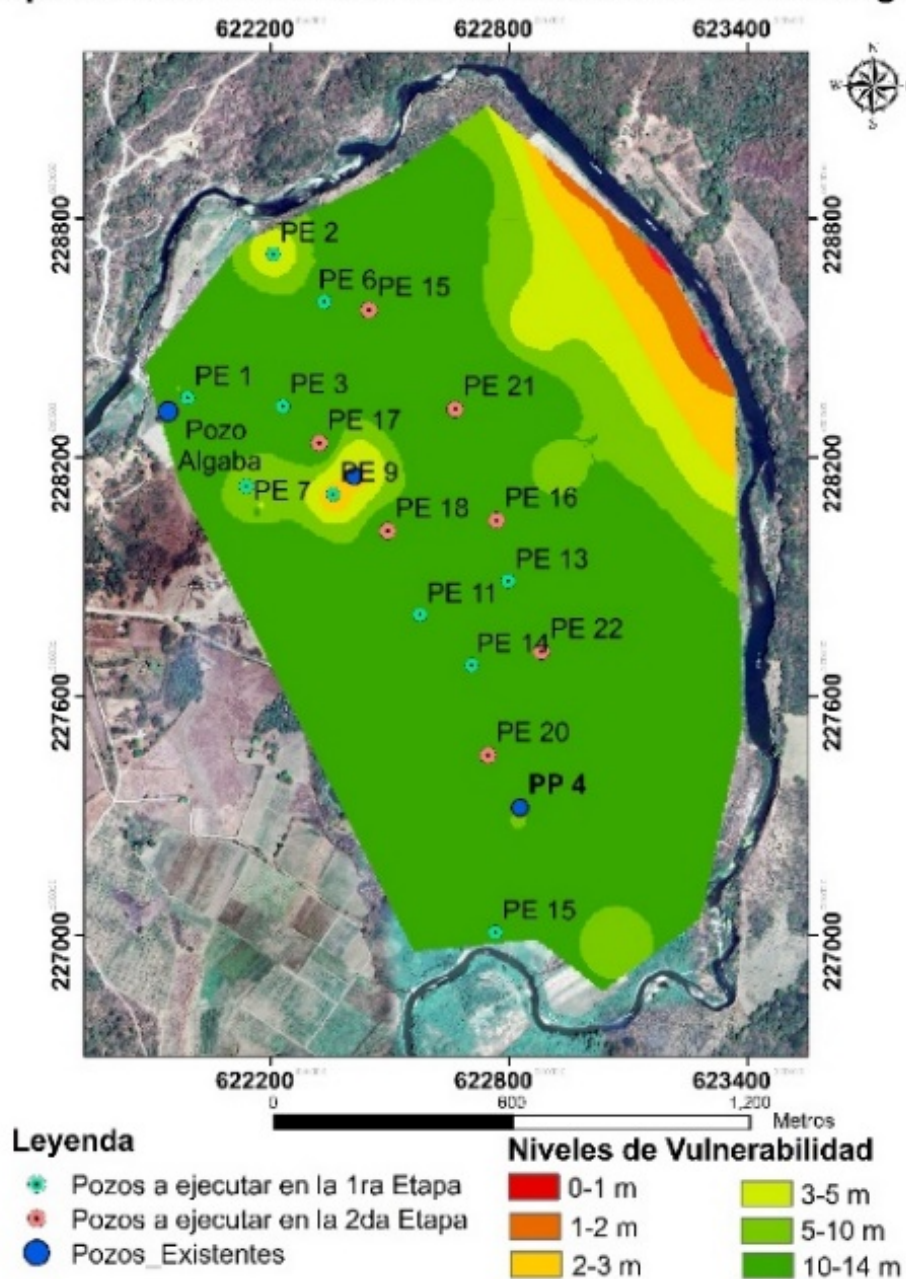


Figura 4.1. Mapa de profundidad del nivel de agua.

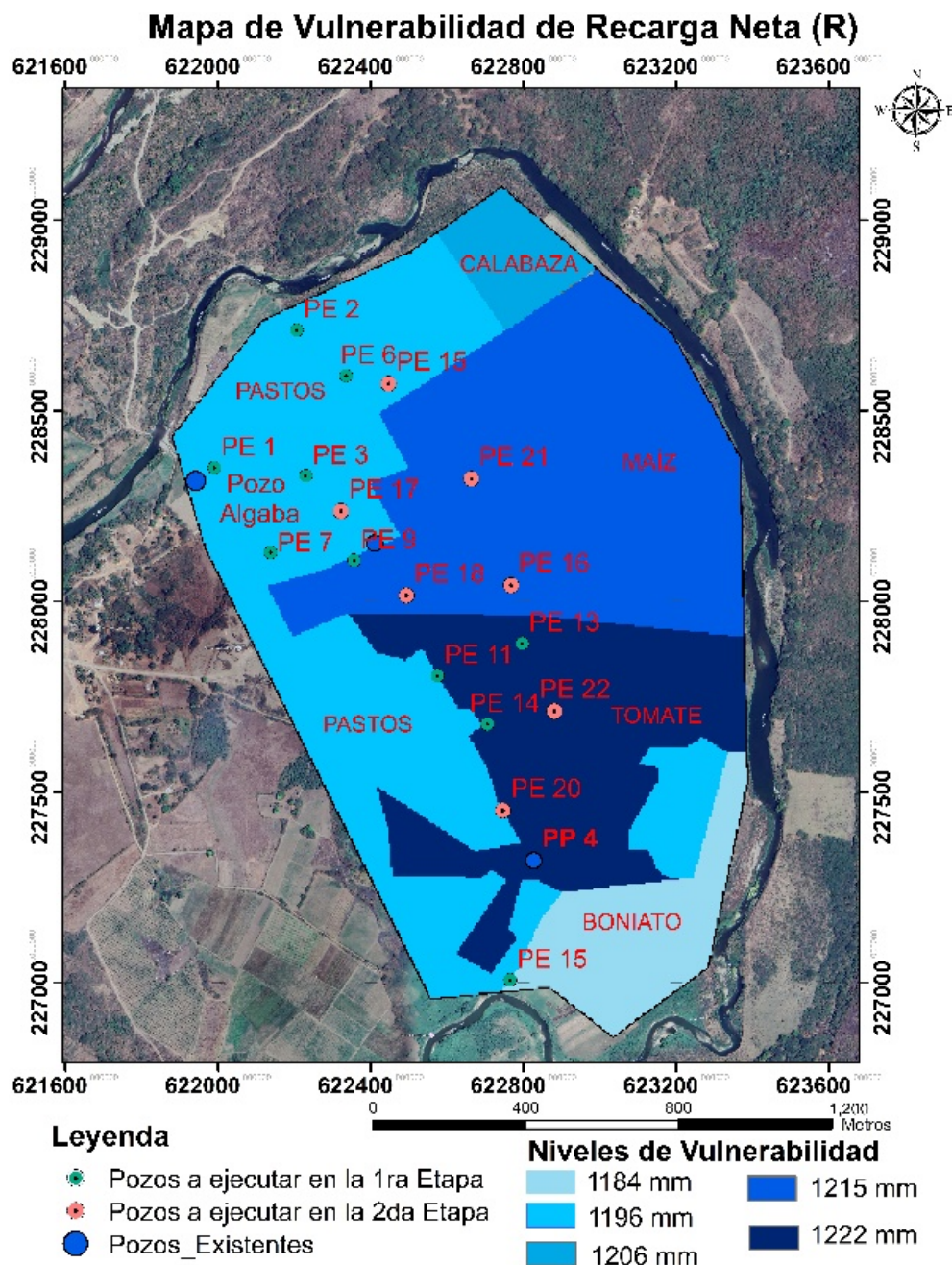


Figura 4.2. Mapa de recarga neta.

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 biotritricas) y la formación de depósitos aluviales (Limos, limos arenosos, arcillas arenosas). La figura 4.3 muestra 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.

Tipo de suelo (S)

En el área de estudio (figura 4.4) 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 tienen un material limoso y solo el 2,5 %

de los pozos presentan gravas y arcillas, por lo que se afirma que, en el área existe un buen intercambio ya que son texturas permeables en su mayoría, sus valores asignados corresponden con los establecidos en el método DRASTIC.

Mapa de Vulnerabilidad Formación Geológica (A)

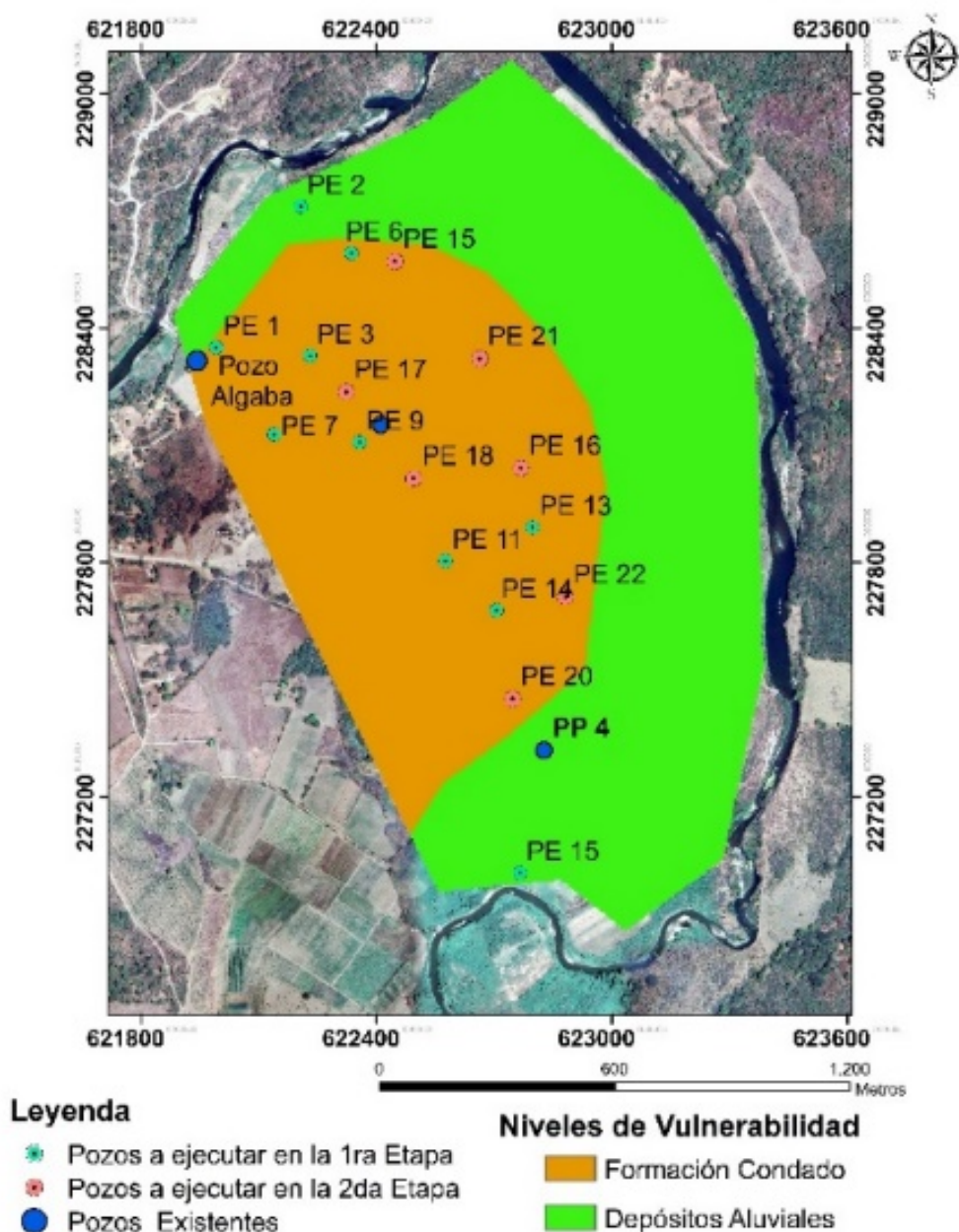


Figura 4.3. Mapa de formación geológica.

Pendiente del terreno (T)

En el acuífero (figura 4.5) 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 % excepto el posible pozo (PE2). Esta zona de pequeñas pendientes predominantes 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.

Mapa de Vulnerabilidad Cubierta Edáfica (S)

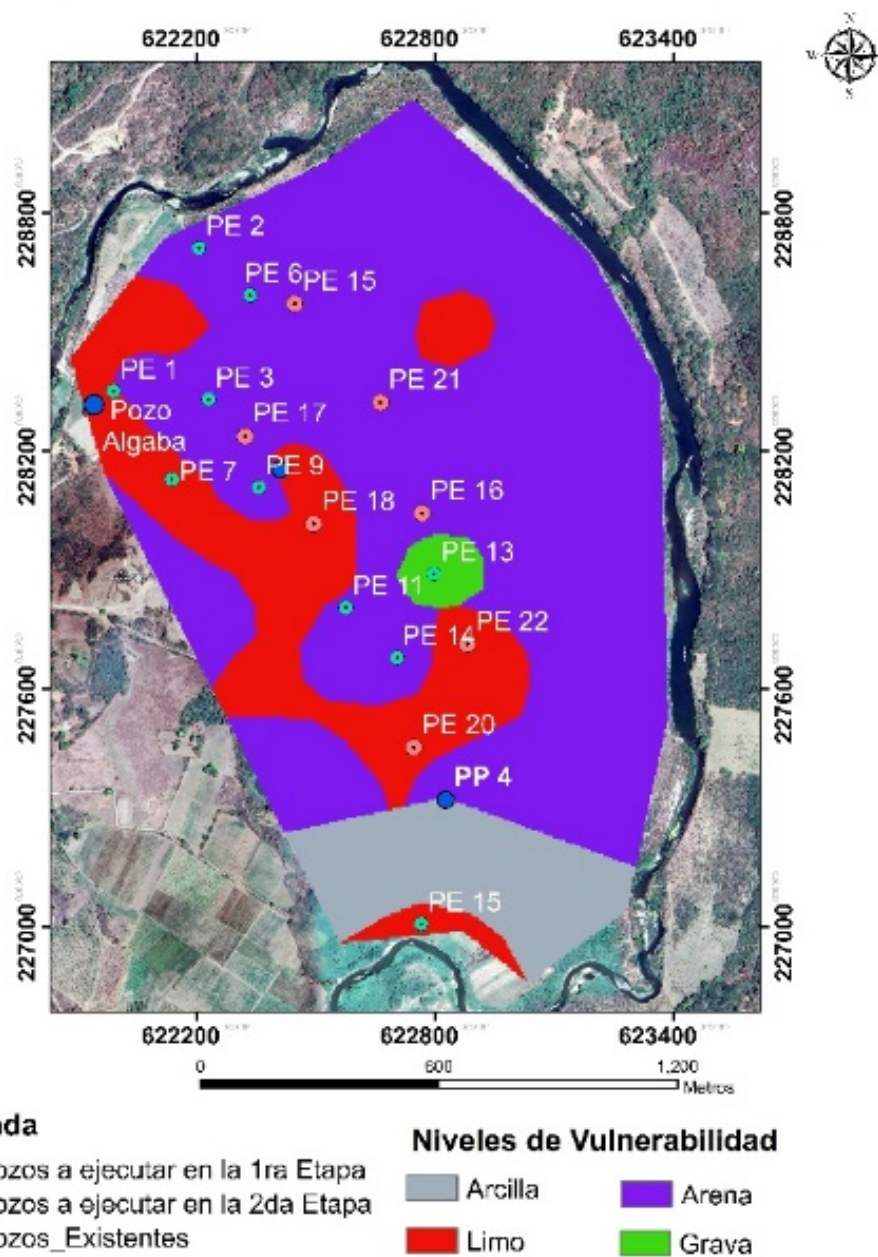


Figura 4.4. Mapa de la cubierta edáfica.

Mapa de Vulnerabilidad Pendiente del Terreno (T)

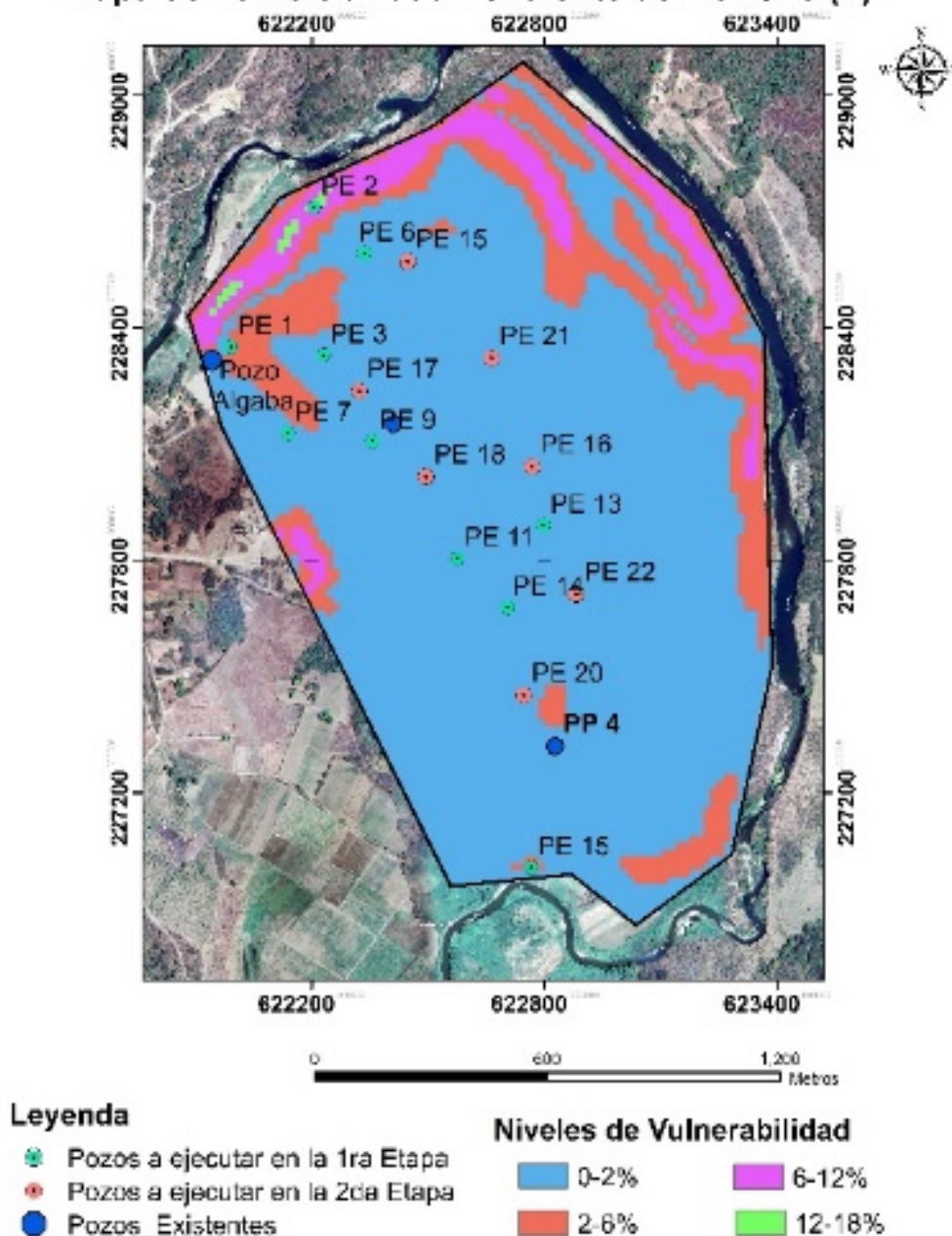


Figura 4.5. Mapa de la pendiente del terreno.

Zona no saturada (I)

En la zona de estudio (figura 4.6) se cuenta con cuatro texturas donde predominan las arenas, y en menor cantidad, se presentan las gravas. En la figura 4.6 se obtuvo valores del índice de vulnerabilidad DRASTIC (4-9 puntos), siendo la mayor valoración (9 puntos) 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.

Conductividad hidráulica (C)

La figura 4.7 demuestra que el índice de vulnerabilidad determinado por DRASTIC, varía en el rango de 28,55 m/d a más de 81,49 m/d, y es, en este rango, donde 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 Impacto de la zona no saturada (I)

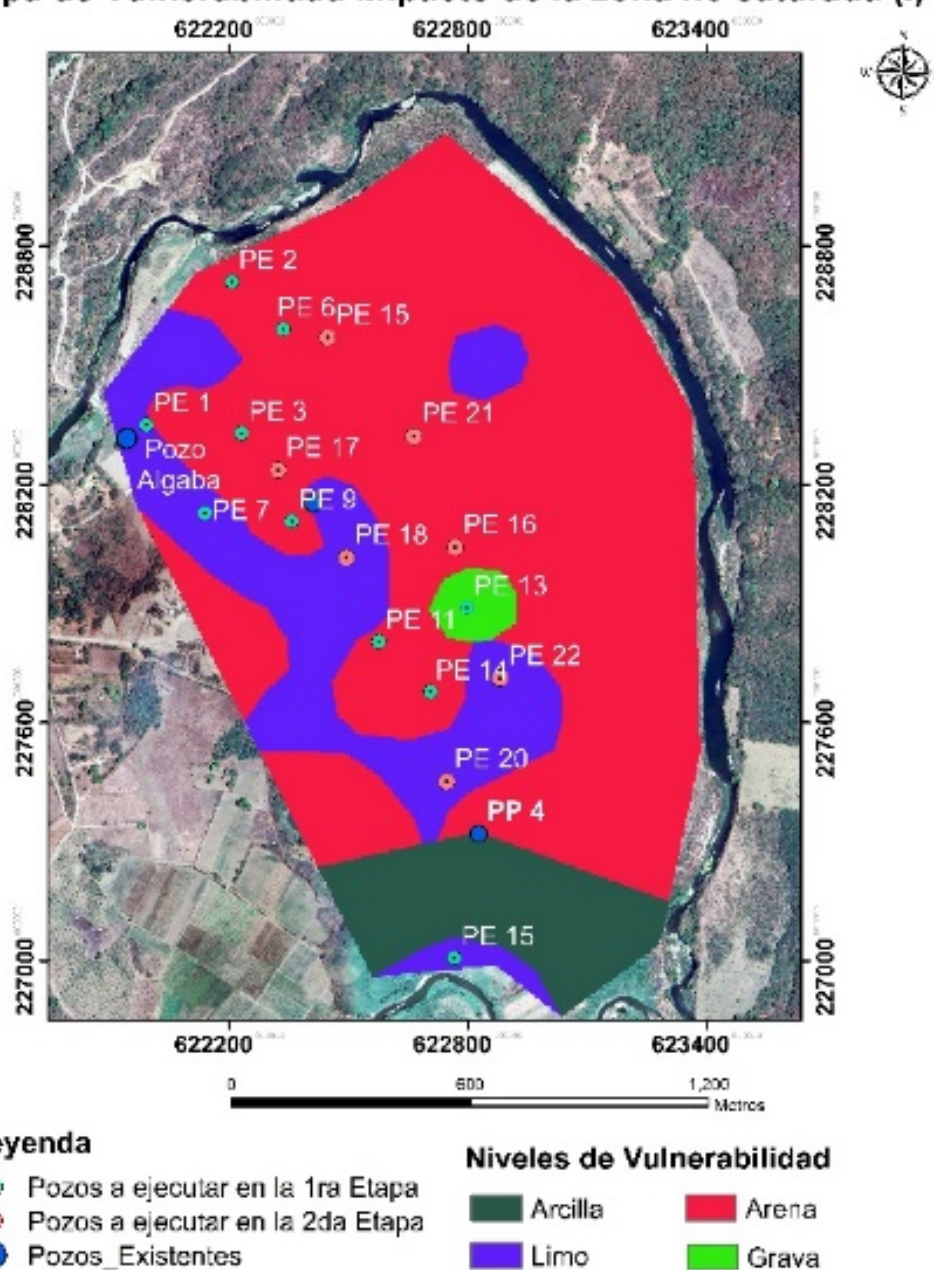


Figura 4.6. Mapa de la zona no saturada.

Mapa de Vulnerabilidad Conductividad Hidráulica (C)

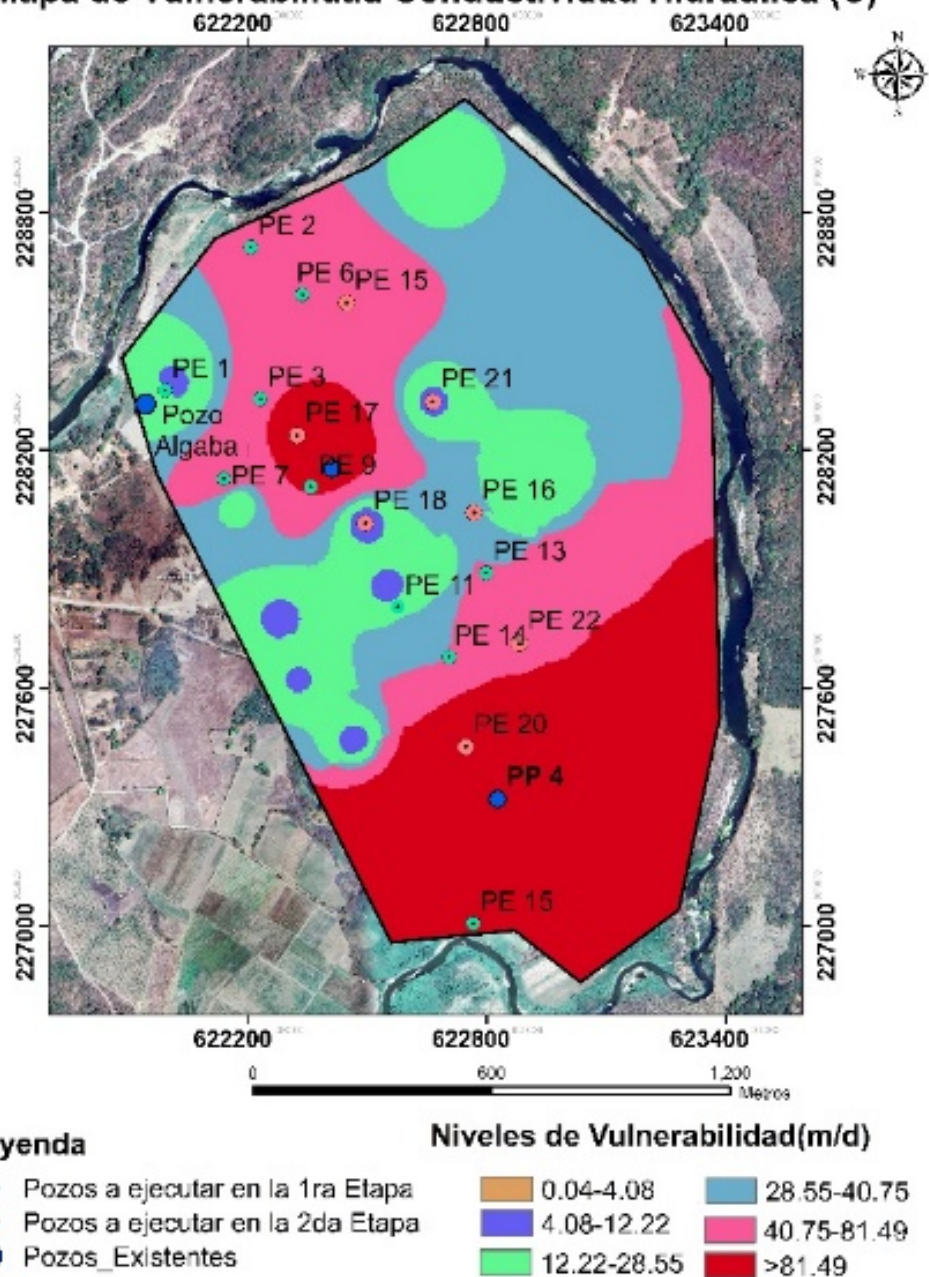


Figura 4.7. Mapa de la conductividad hidráulica.

4.1. Mapa de índice de vulnerabilidad DRASTIC

La zona de estudio (figura 4.8) 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, se debe señalar que este pozo de abastecimiento no tiene riesgo de contaminación en ninguna época del año por lo que el mapa de vulnerabilidad obtenido está acorde a las condiciones reales del área estudiada, además el 60 % de los pozos previstos se encuentran en la zona de vulnerabilidad moderada (figura 4.8) 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 (>81.49 m/d) 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"

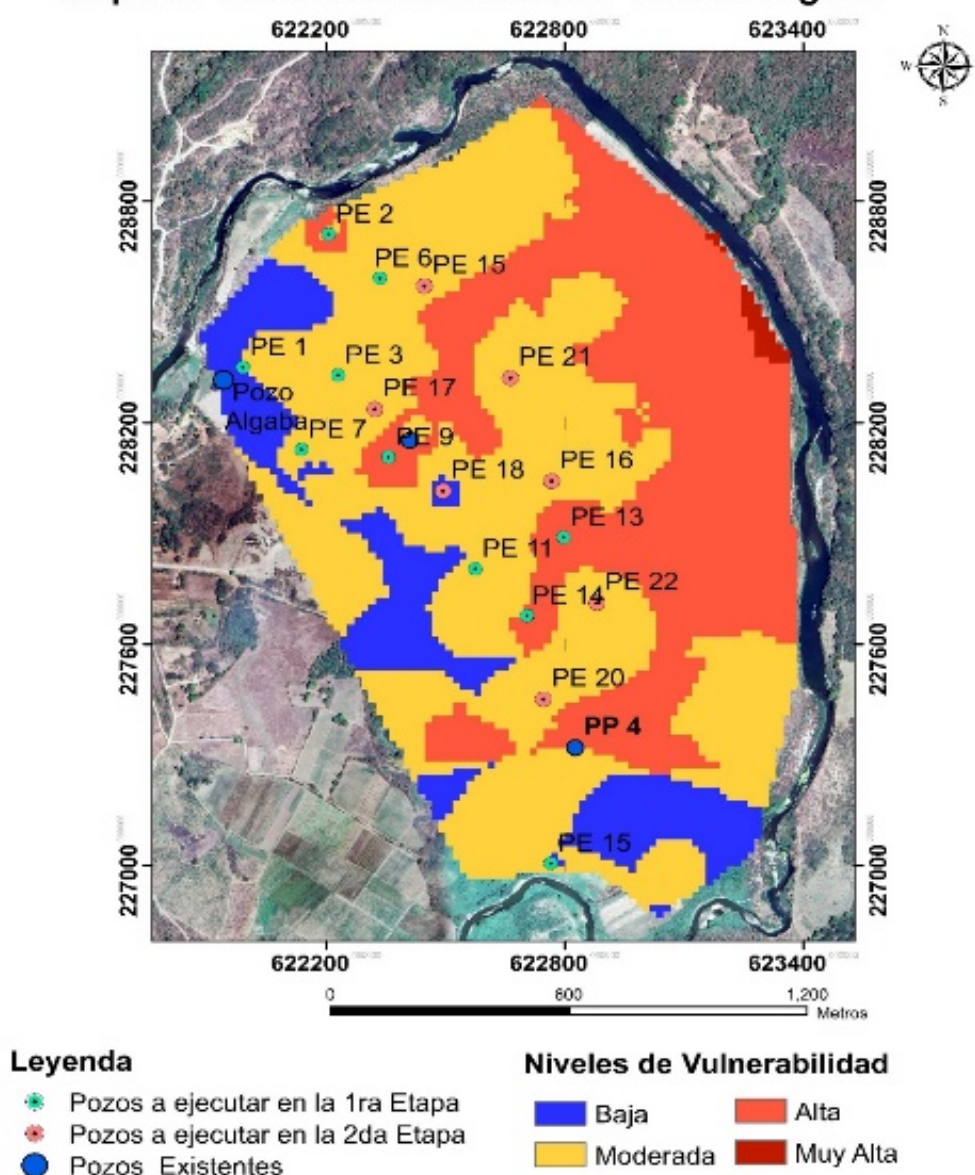


Figura 4.8. Mapa general de la vulnerabilidad del acuífero "Arenas Algaba".

05 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 del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Villa Clara y Sancti Spíritus, 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 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 características propias del medio y otros factores climáticos e hidrológicos presentes en el área. Los parámetros que proporcionaron el mayor peso fueron: la zona no saturada, la recarga neta y la conductividad hidráulica.

06 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2013). Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco Mundial.
- 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.
- Reyes, R. J., & Cruz, E. R. (2013). Geofísica aplicada a la búsqueda de agua subterránea en depósitos aluviales. Caso de estudio Arenas Algaba.
- 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* [Tesis de maestría]. Universidad de Pinar del Río, Hermanos Saíz Montes de Oca.
- 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.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Juan José Martín Lozada <https://orcid.org/0009-0006-9650-1943>

Autor principal del artículo. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados, redacción y revisión.

Michael Álvarez González <https://orcid.org/0000-0003-2953-4762>

Participó en el análisis de resultados.