

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-04-10

Artículos

**Evaluación de vulnerabilidad a la intrusión marina
mediante el método GALDIT en acuífero costero de Las
Tablas, península de Azuero, Panamá**

**Assessment of vulnerability to marine intrusion using
the GALDIT method in the coastal aquifer of Las Tablas,
Azuero Peninsula, Panama**

Valentina Opolenko¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8734-9349>

Manuel Olías², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5394-3449>

Francisco Moral³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6406-6725>

Antonia Jiménez⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7495-4358>

José Fábrega⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1536-0386>

¹Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), Panamá, valentina.opolenko@cathalac.int

²Universidad de Huelva, Huelva, España, manuel.olias@dgyp.uhu.es

³Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España, fmormar@upo.es

⁴Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España, ajimrodr@upo.es

⁵Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, jose.fabrega@utp.ac.pa

Autora para correspondencia: Valentina Opolenko,
valentina.opolenko@cathalac.int

Resumen

La escasez de agua constituye un desafío debido a presiones y conflictos que surgen por su uso. Panamá, un país tropical, con grandes extensiones de costas, donde habita el 50 % de la población, enfrenta los efectos del cambio climático que afectan drásticamente la disponibilidad del agua subterránea, específicamente en la región de Azuero. Debido a este problema, la temática del uso sostenible de recursos hídricos subterráneos cobra especial relevancia; al respecto, el distrito de Las Tablas, un importante polo de actividad económica y turística, se abastece en gran parte del agua subterránea. Así, para evaluar la vulnerabilidad de su acuífero costero, se aplicó el método GALDIT, que integra la información de seis parámetros que gobiernan la susceptibilidad intrínseca del acuífero a la intrusión marina, facilitando el cálculo del índice de vulnerabilidad. Como resultado, se construyeron mapas de vulnerabilidad actual del acuífero ante la intrusión marina y también con proyecciones al 2050 con distintos escenarios de cambio climático. La mayor parte del sector estudiado presenta una baja vulnerabilidad a la intrusión marina. Solo en una franja de aproximadamente 2 km desde la línea de costa se obtiene una vulnerabilidad moderada o alta, con los mayores valores en la zona situada más al noreste, donde el nivel piezométrico es más bajo y la conductividad eléctrica del agua es mayor. Los mapas generados serán relevantes para los gestores de recursos hídricos en su toma de decisiones, ya que facilitarán el manejo sostenible de los acuíferos, al crear programas de monitoreo de la calidad del agua subterránea y sus volúmenes de extracción.

Palabras clave: agua subterránea, gestión de los recursos hídricos, zona costera, cambio climático, previsión hidrológica, Panamá.

Abstract

Water scarcity is a challenge due to the pressures and conflicts that arise from its use. Panama, a tropical country with extensive coastlines and home to 50 % of the population, faces the effects of climate change that drastically affect groundwater availability, specifically in the Azuero region. Due to this problem, the issue of sustainable use of groundwater resources takes on special relevance, with the district of Las Tablas, a major hub of economic and tourism activity, largely supplied by groundwater. To assess the vulnerability of its coastal aquifer, the GALDIT method was applied. This method integrates information from six parameters that govern the aquifer's intrinsic susceptibility to marine intrusion, facilitating the calculation of the Vulnerability Index. As a result, maps of the aquifer's current vulnerability to marine intrusion were constructed, as well as projections to 2050, under different climate change scenarios. Most of the sector studied presents a low vulnerability to marine intrusion. Only in a strip approximately 2 km from the coastline is moderate or high vulnerability observed, with the highest values in the northeasterly zone, where the piezometric level is lowest and the electrical conductivity of water is highest. The generated maps will be relevant to water resource managers in their decision-making, as they will facilitate the sustainable management of aquifers, creating monitoring programs for groundwater quality and extraction volumes.

Keywords: groundwater, water resources management, coastal zones, climate change, hydrological forecasting, Panama.

Recibido: 02/06/2025

Aceptado: 09/11/2025

Publicado *ahead of print*: 12/12/2025

Versión final: 01/07/2026

Introducción

En los acuíferos costeros, los materiales permeables generalmente tienen una continuidad debajo del mar y, al ser el agua marina más densa que el agua dulce, existe de forma natural una cuña de agua salada que se introduce tierra adentro por debajo del agua dulce. Se denomina intrusión marina cuando la cuña de agua salada penetra tierra. La intrusión marina es un problema que afecta a muchos acuíferos costeros, donde se concentran la población mundial y las extracciones de aguas subterráneas (Custodio, 2010). En algunas zonas, la extensión de la intrusión marina es local y solo afecta algunos sondeos de extracción; mientras que en otras, la extensión es regional, con gravísimas consecuencias para el abastecimiento de agua a la población o a las industrias (Barlow & Reichard, 2010).

La vulnerabilidad a la intrusión marina puede definirse según las numerosas referencias en la literatura técnica como una probabilidad de penetración con que un contaminante —en este caso concreto sería el agua salada— alcanza una posición específica en un sistema acuífero costero. Esta introducción de agua salada en alguna posición de la zona saturada genera el desplazamiento de agua dulce, teniendo como una principal consecuencia la alteración de la calidad de las aguas del acuífero

por la mezcla entre agua dulce y salada. El concepto de vulnerabilidad fue introducido en 1968 por el hidrogeólogo francés J. Margat, y se refiere al riesgo de que las aguas subterráneas se contaminen con sustancias en concentraciones que superen los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Desde 1968 existe un número variado de definiciones sobre el mismo, y metodologías de su cualificación y representación cartográfica. Por ejemplo, según Foster *et al.* (2013), citando a Margat, el concepto trató de representar la sensibilidad de un acuífero al ser impactado negativamente en un punto determinado por una presión (o carga) contaminante impuesta desde la superficie terrestre, y se basa en la tesis de que el medio geológico y la cubierta edafológica proporcionan un cierto grado de protección de las aguas subterráneas frente a contaminantes de origen tanto natural como derivados de actividades humanas.

Mientras tanto, el otro concepto estrechamente asociado con la vulnerabilidad es el de riesgo de contaminación a la intrusión marina, que depende de factores intrínsecos determinados básicamente por las características del acuífero, su tipo y tamaño, así como por los parámetros hidráulicos, que son relativamente estáticos (es decir, permanentes a escalas razonables de tiempo), y por la existencia de factores extrínsecos, como la recarga natural o artificial, la explotación del acuífero (bombeo) y las actividades potencialmente contaminantes, que son esencialmente dinámicas (MOP, 2004). Debido a la influencia e interrelación de estos factores múltiples, la caracterización del proceso de la intrusión marina en la zona costera es considerada compleja y solo en aproximaciones muy simples se puede hacer con criterios universales. Por ello, la evaluación espacial y temporal de la intrusión marina requiere un tratamiento específico en cada caso, que debe fundamentarse en el conocimiento del

funcionamiento hidrogeológico del acuífero afectado, y en la información obtenida de las redes de control y seguimiento (IGME, 2009).

Tomando en consideración los grandes cambios que se han producido a nivel mundial, así como en la República de Panamá, a consecuencia de nuevos conocimientos científicos y tecnológicos, este acelerado desarrollo ha impactado de manera directa en seres humanos, en el medio ambiente, así como en la disponibilidad de los recursos hídricos. A medida que aumenta la escasez de agua y la variabilidad hidrológica es mayor, afrontar los cambios provocados por el desarrollo constituye un desafío extraordinario debido a enormes presiones, riesgos y conflictos que surgen por el uso de recursos hídricos (Opolenko, 2022). Siendo Panamá un país tropical, con grandes extensiones de costas de aproximadamente 3 000 kilómetros de longitud, de los cuales 1 700 km corresponden al litoral Pacífico y 1 300 km al Caribe, se caracteriza por su gran diversidad de ecosistemas y accidentes costeros, y por su relevancia socioeconómica (MiAMBIENTE, 2023). De hecho, el 50 % de la población panameña habita en las zonas costeras (IHCantabria, 2023).

Esta presión demográfica, que va en constante aumento nacional, el creciente desarrollo económico de la región y los efectos del cambio climático con la disminución de lluvias y la subida de temperaturas (IPCC, 2019), afectan drásticamente la disponibilidad de los recursos hídricos, incluyendo al agua subterránea. El área de estudio se localiza en la península de Azuero, que forma parte del Arco Seco de Panamá. Es una vasta zona costera abastecida en gran parte por el agua de los pozos profundos, y se caracteriza como vulnerable debido a la falta de este preciado líquido durante la estación seca (verano) o el evento climático El Niño. Como resultado, al utilizar los recursos hídricos de forma insostenible, sobreexplotando los numerosos pozos, es probable que con

el avance del tiempo se genere el estrés hídrico en sitios con mala o deficiente distribución hídrica (MiAMBIENTE, 2020), lo que daría origen y/o intensifique el problema de contaminación de los acuíferos por la intrusión marina. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es evaluar la vulnerabilidad a la intrusión marina en el acuífero de Las Tablas, sometida a una fuerte presión por extracciones de aguas subterráneas para el desarrollo económico de la zona. Ello contribuirá al uso sostenible de los recursos hídricos en la provincia de Los Santos, localizada en el Arco Seco de Panamá.

Área de estudio

El área de investigación se ubica en la zona costera del distrito de Las Tablas de la provincia de Los Santos. Forma parte de la cuenca hidrográfica núm. 126, denominada “Ríos entre Río Tonosí y Río La Villa”, localizada en la vertiente del Pacífico, en el extremo sureste de la Península de Azuero (IGNTG, 2007).

El área total evaluada es una franja de unos 180 km², con una longitud por la costa de unos 15 kilómetros y 12 km lineales tierra adentro (Figura 1). Como el área de trabajo se encuentra al límite con el mar, su elevación inicia desde cero metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), y se llega hasta niveles de 80 a 100 m.s.n.m. Tiene una población estimada, según el Censo Nacional de Población y Vivienda 2023 (INEC, 2023), de unas 27 mil personas.

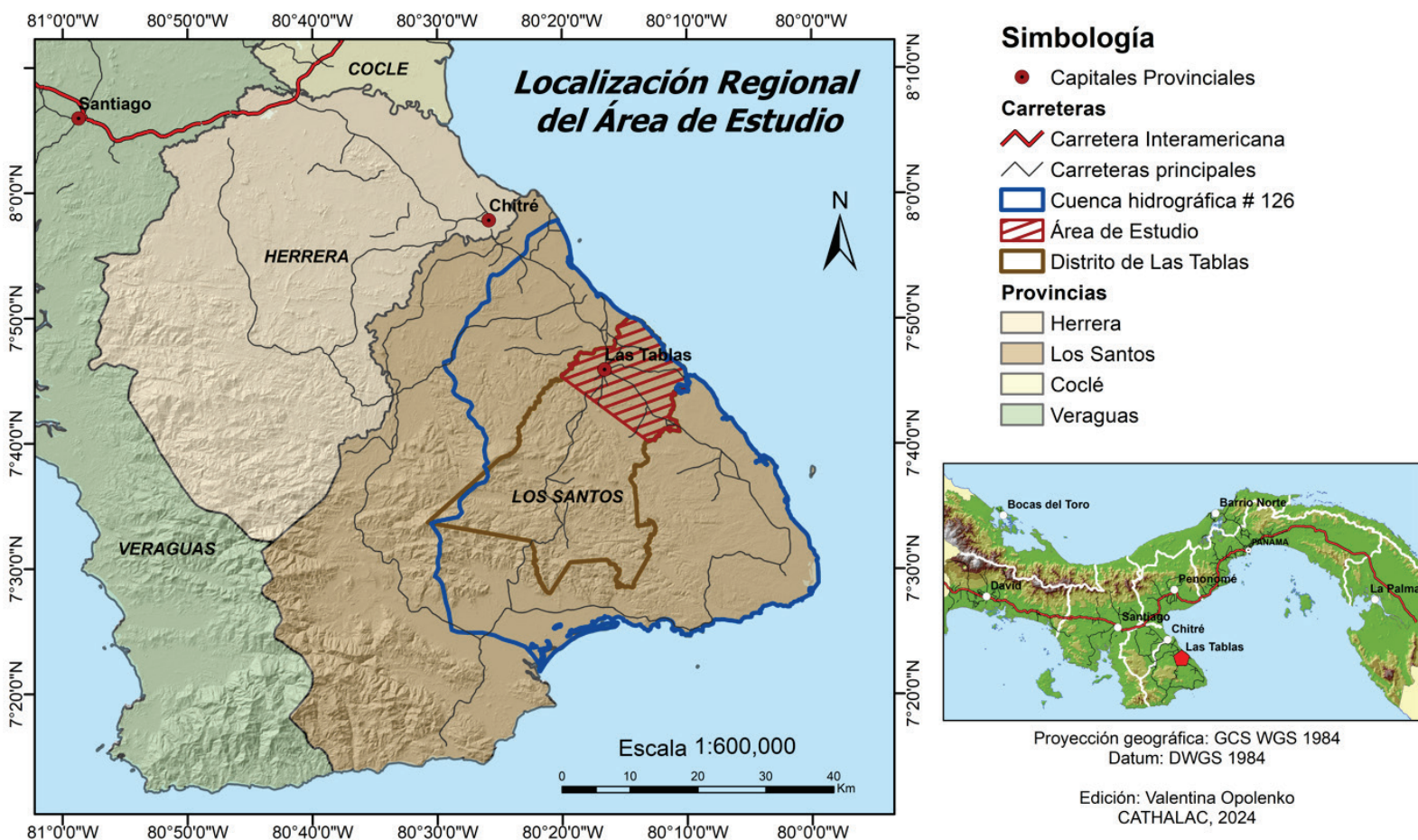


Figura 1. Localización regional del área de estudio.

Es una importante región a nivel nacional, que se caracteriza por el creciente desarrollo agroindustrial y ganadero, así como turístico, a pesar de formar parte del denominado Arco Seco de Panamá, una amplia zona que comprende las llanuras y colinas costeras orientales de las provincias de Los Santos y Herrera, así como el litoral sur de la provincia de Coclé (ANAM, 2009). El Arco Seco panameño integra el Corredor Seco Centroamericano, una franja continua de territorio altamente vulnerable a eventos climáticos extremos, que atraviesa Costa Rica, Nicaragua,

Honduras, El Salvador y Guatemala, incluyendo las zonas de Panamá ya mencionadas. Por lo tanto, la región donde se desarrolló la presente investigación es un territorio desfavorecido climáticamente y sometido durante décadas a una intensa degradación ambiental, en especial de los suelos y recursos hídricos, que se manifiesta a través del uso intensivo de agroquímicos, las prácticas de cultivos no apropiados para la vocación del suelo, sobreexplotación de acuíferos y la falta de sistematización de la gestión de sistemas de riego, entre otros, con los consiguientes perjuicios para el buen funcionamiento de muchos de los ecosistemas de la zona (Opolenko, 2015).

El comportamiento climático de la zona costera del distrito de Las Tablas, que forma parte del área de estudio, es un factor muy relevante, ya que de él depende en gran medida la capacidad de recarga o reposición de los acuíferos por infiltración profunda. Según la Zonación de los Regímenes Hídricos en América Latina y el Caribe, incluyendo a Panamá (UNESCO, 2007), la superficie de Arco Seco se clasifica como un territorio subhúmedo, con 5-6 meses secos, con clima tropical seco y precipitaciones anuales inferiores a 1 500 mm (las menores del país, entre 900 y 1 500 mm/año), y escasez de agua en comparación con el resto del territorio. Como consecuencia de la variabilidad climática natural de la zona y los eventos meteorológicos extremos, la región enfrenta periódicamente unos extensos períodos de déficit hídrico y sequías. Esta situación climática desfavorable —sumada a los efectos antrópicos— debido al uso intensivo de recursos hídricos subterráneos por la población para sus distintas actividades implica que los acuíferos costeros del área de estudio están siendo explotados a través de una gran cantidad de pozos profundos.

El marco geológico de la zona costera del distrito de Las Tablas, que comprende el área de investigación, se desarrolla en un ambiente complejo por su evolución histórica de pequeño arco de islas y mares poco profundos a un istmo, luego afectado por intensa actividad volcánica acompañada de emersiones, regresiones y movimientos tectónicos con vectores multidireccionales, erosión y sedimentación (CATAPAN, 1968). Según el mapa geológico de la República de Panamá (DGRM, 1991), el conjunto de formaciones geológicas que constituyen el área investigada es representado por rocas de origen ígneo y sedimentario. Entre las rocas ígneas se distinguen dos tipos: plutónicas y volcánicas. La evolución de la geología histórica de la zona investigada muestra un cuadro de intercalamientos de formaciones sedimentarias, ígneas efusivas e intrusivas, que posteriormente fueron afectadas por levantamientos y movimientos tectónicos, que han moldeado con importantes fallas regionales su configuración actual.

En concreto, en la zona investigada afloran rocas de tres distintas formaciones geológicas: la formación sedimentaria Macaracas (TO-MAC), siendo de mayor extensión; la formación volcánica Playa Venado (K-VE); y la formación plutónica Valle Riquito (TEO-RIQ), que aflora en una extensión muy pequeña (Tabla 1 y Figura 2). Dichas formaciones, en su conjunto, representan el sistema acuífero de la zona evaluada.

Tabla 1. Formaciones geológicas y litología del área de estudio.

Periodo	Formación	Símbolo	Descripción
Formaciones sedimentarias			
Paleógeno	Macaracas	TO-MAC	Areniscas tobáceas, lutitas
Formaciones plutónicas (intrusivas)			
Paleógeno	Valle Riquito	TEO-RIQ	Cuarzodioritas
Formaciones volcánicas (extrusivas)			
Cretácico	Playa Venado	K-VE	Basaltos, lavas y aglomerado

Fuente: elaboración de los autores con base en DGRM (1991).

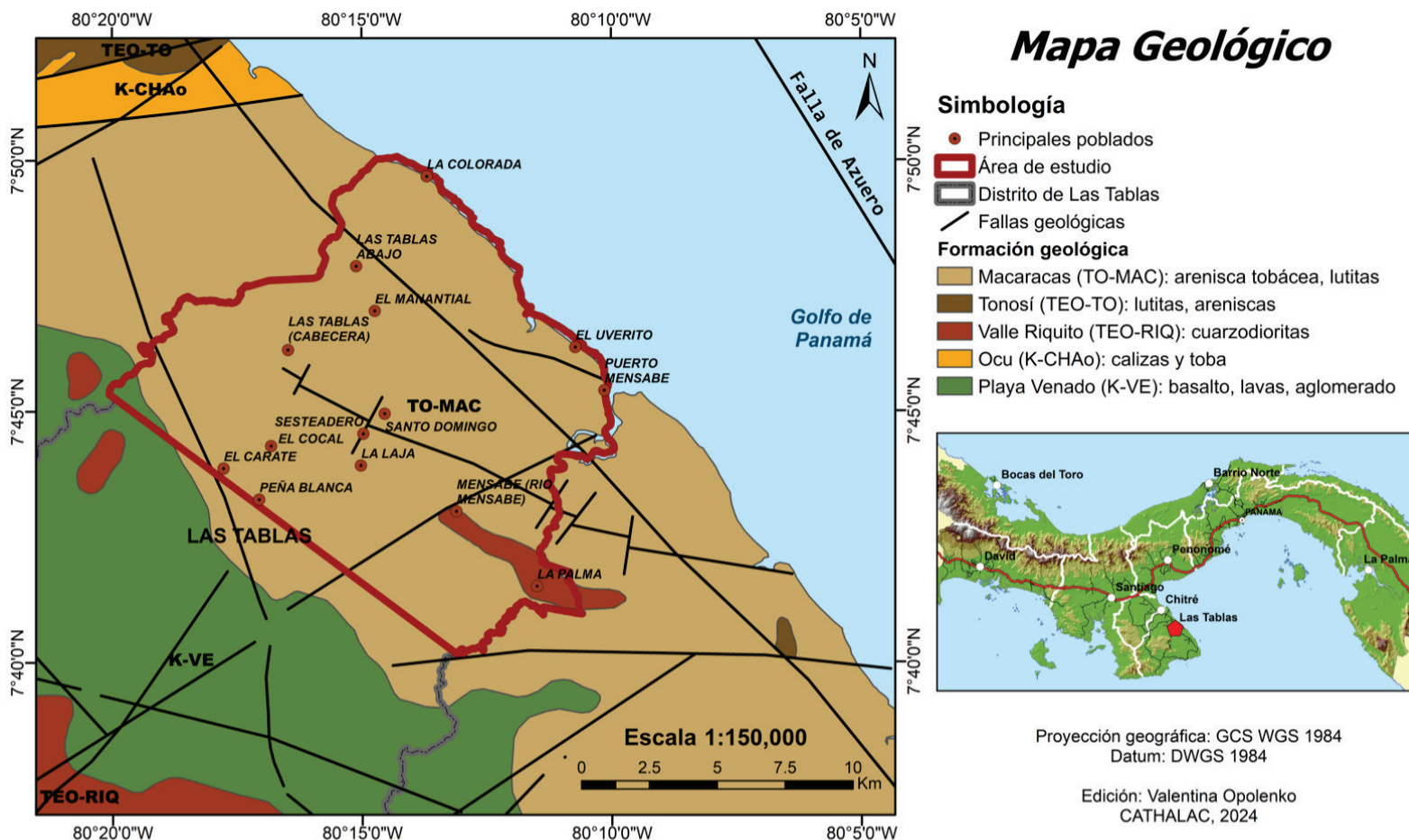


Figura 2. Mapa geológico del área de estudio. Fuente: elaboración de los autores con base en DGRM (1991).

En lo que se refiere a la hidrogeología, el Mapa Hidrogeológico de Panamá (ETESA, 1999), en la zona costera del distrito de Las Tablas hay dos tipos de acuíferos, cuya determinación y localización se basa en las características físicas de las rocas de diferentes formaciones geológicas existentes en la zona del estudio:

Unidad hidrogeológica B-1. Acuíferos predominantemente fisurados (discontinuos), con permeabilidad variable y moderadamente productivos ($Q = 3-10 \text{ m}^3/\text{h}$). Representada por dos formaciones geológicas:

- Formación geológica Macaracas (TO-MAC), constituida por tobas, areniscas tobáceas y lutitas. Son acuíferos locales, restringidos a zonas fracturadas, conformados por una mezcla de rocas volcánicas fragmentarias, consolidadas y poco consolidadas, sobrepuestas a rocas ígneas consolidadas.
- Formación geológica Playa Venado (K-VE), constituida por basaltos, pillow lavas y aglomerados. Son acuíferos locales restringidos a zonas fracturadas; comprenden un conjunto de rocas efusivas, en su mayoría básicas, cuyas fisuras han sido en muchos casos selladas por la deposición de minerales secundarios.

Unidad hidrogeológica C-3. Áreas con acuíferos locales (intergranulares o fisurados) de productividad limitada o poco significativa. Acuíferos de muy baja producción ($Q < 1 \text{ m}^3/\text{h}$), con permeabilidad baja a muy baja. Representada por la formación geológica Valle Riquito (TEO-RIQ), constituida por cuarzodioritas. Son cuerpos geológicos prácticamente con ausencia de acuíferos, con una estructura masiva, afectada por una serie de fallas y una fisuración poco desarrollada. La ocurrencia de aguas subterráneas está limitada a la zona de meteorización o fracturación de rocas adyacentes.

Para la evaluación del flujo de las aguas subterráneas en el área de estudio, que se caracteriza por una hipsometría muy baja, típica de las llanuras cercanas al mar, se tomaron en consideración las condiciones geológicas y topográficas presentes. Según estas características, una gran parte del territorio investigado se define como zona de descarga de

acuíferos, con dirección del flujo hacia el mar. En términos generales, el sistema acuífero que conforma la zona de descarga está constituido por un acuífero libre poco profundo, desarrollado en las tobas y areniscas tobáceas de la formación sedimentaria Macaracas (TO-MAC). La calidad química de las aguas es generalmente buena, con una composición mayoritaria bicarbonatada cálcica (ANAM, 2012). En cuanto al balance hídrico del acuífero, la recarga media se estima en 150 mm/año, lo que en la zona de estudio equivale a un volumen de 27 hm³/año (Figura 3).

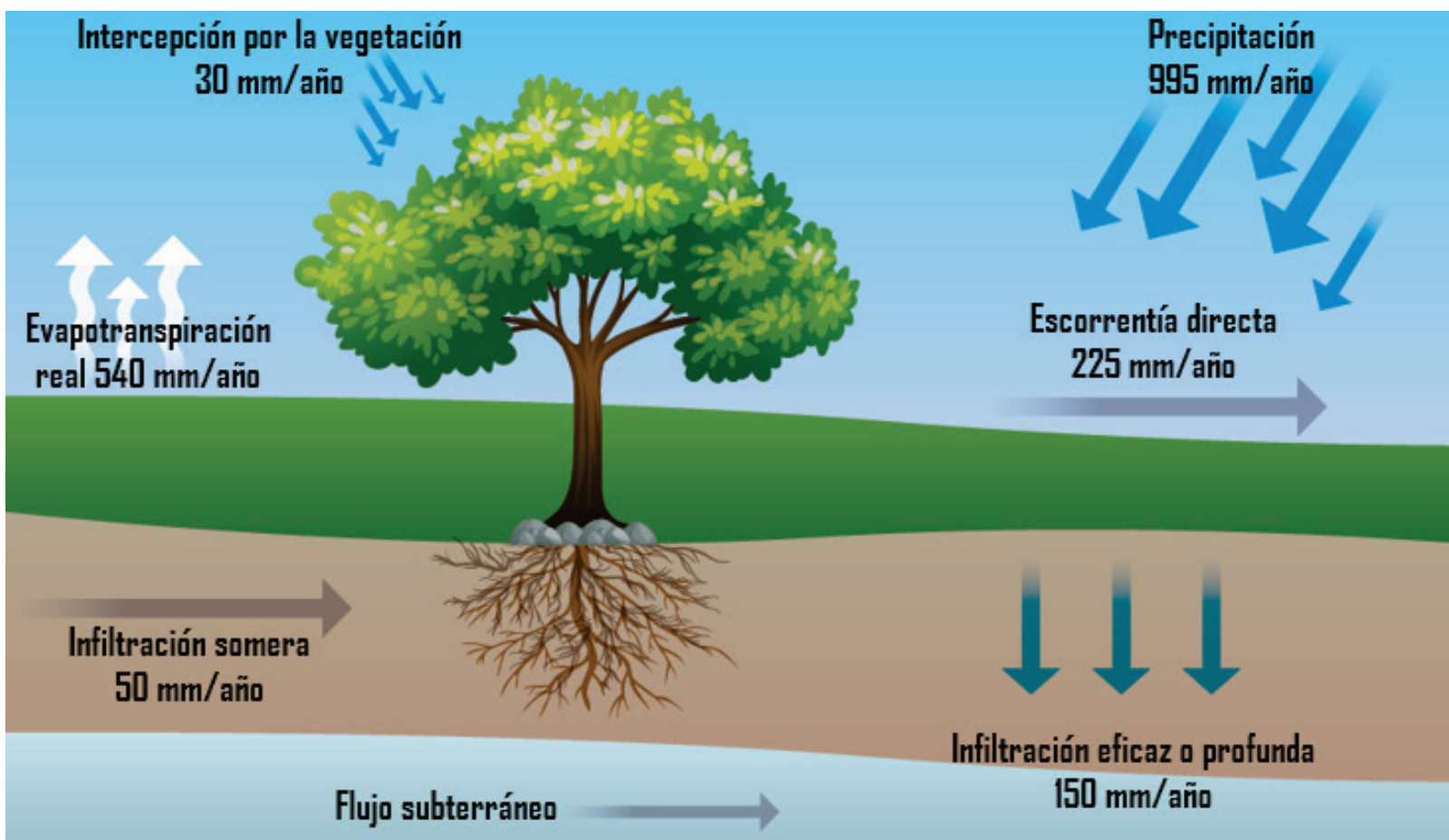


Figura 3. Balance hidrológico del área de estudio.

El acuífero es explotado por numerosos pozos de poca profundidad (entre 30 y 80 metros), cuyas aguas se utilizan para suplir diversas demandas, como el consumo doméstico, industrial y agrícola, entre otros, siendo este último el mayor usuario de agua subterránea por las características propias de la actividad, especialmente durante la temporada seca de diciembre a abril. Los pozos tienen una productividad de unos 150 a 200 m³/día.

Se estima que el volumen promedio anual de extracción del agua subterránea para consumo humano, industrial y otros usos, es de 4 hm³/año. Mientras tanto, el uso de agua para actividades agrícolas es de 16 hm³/año. El total de estos volúmenes de extracción es de 20 hm³/año, lo que representa el 74 % de la recarga anual del acuífero. A pesar de tener el balance hidrológico positivo, es una alerta temprana, pues se encuentra, según la clasificación de la FAO y UN Water (2021), en el rango “Medio” (50-75 %) del nivel de estrés hídrico, pero muy próximo a pasar al rango de estrés “Alto” (75-100 %).

Materiales y métodos

Para la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la intrusión marina del distrito de Las Tablas, se empleó el método GALDIT, desarrollado por Chachadi y Lobo-Ferreira (2001), que permite prevenir o reducir los riesgos de contaminación. Este método, ampliamente utilizado a nivel internacional (Yang *et al.*, 2022; Abishek *et al.*, 2024), y aplicado por primera vez en Panamá, integra la información de seis parámetros hidrogeológicos y topográficos que, en gran medida, gobiernan la susceptibilidad intrínseca de un acuífero costero a la intrusión marina. Los principales parámetros que incluye este método son:

G = tipo de acuífero (*Groundwater occurrence*). Un acuífero no confinado será menos vulnerable a la intrusión salina comparado con un acuífero confinado, porque durante el bombeo, el cono de depresión es comúnmente más grande que el de acuífero libre.

A = conductividad hidráulica del acuífero (*Aquifer hydraulic conductivity*). La mayor conductividad hidráulica permite mayor penetración de la cuña salina, lo que implica un aumento en la magnitud del movimiento del frente de agua de mar y, en consecuencia, una mayor vulnerabilidad a la intrusión marina.

L = altura del nivel piezométrico sobre el nivel del mar (*Height of groundwater level*). El nivel piezométrico es muy importante debido a que a mayor altura del agua dulce sobre el nivel del mar, la interfase de agua dulce/salada se encontrará a mayor profundidad.

D = distancia a la costa (*Distance from the shore*). La intrusión salina disminuye por lo general con el incremento de la distancia en dirección perpendicular a la línea de la costa. Por lo tanto, esta distancia tierra adentro y la altura del nivel del agua subterránea (nivel freático) sobre el nivel del mar se consideran como los factores con mayor influencia en la potencial intrusión marina.

I = impacto del estado actual de la intrusión de agua de mar (*Impact of existing status of seawater Intrusion*). Originalmente, el factor utilizó la relación $\text{Cl}^-/(\text{HCO}_3^{-1} + \text{CO}_3^{2-})$, propuesta por Chachadi y Lobo-Ferreira (2001). Luego, este factor fue modificado por Dörfliger *et al.* (2011), que presentaron la conductividad eléctrica del agua subterránea como un indicador alternativo de la salinidad del agua subterránea cuando no se dispone de datos sobre la química del agua subterránea para la relación cloruro/bicarbonato.

T = espesor del acuífero (*Saturated aquifer thickness*). Se considera que a mayor espesor del acuífero, la cuña de agua salada tiene una mayor penetración tierra adentro, sobre todo en acuíferos no confinados o libres.

El índice de vulnerabilidad GALDIT se calcula aplicando la Ecuación (1):

$$\text{Indice GALDIT} = \frac{\sum_{i=1}^6 W_i * R_i}{\sum_{i=1}^6 W_i} \quad (1)$$

Donde:

R_i = factor de valoración o calificación de importancia del i -ésimo indicador

W_i = factor de ponderación o el peso del i -ésimo indicador

A cada variable se le da un valor, que tiene el rango 2.5 a 10, y la ponderación o el peso, que está en el rango entre 1 y 4, siendo el valor 1 de menor importancia y el valor 4 de mayor importancia de la intrusión marina (Tabla 2).

Tabla 2. Puntuación y pesos asignados a los parámetros empleados en cálculo del índice GALDIT. Fuente: Adaptado de Chachadi y Lobo-Ferreira (2005).

Parámetro o indicador	Rango de variables de factores modificados	Factor de valoración o puntuación (R)	Factor de peso (W)
G: tipo de acuífero	Acuífero confinado	10	1
	Acuífero no confinado	7.5	
	Acuífero semiconfinado	5	
	Acuífero limitado	2.5	
A: conductividad hidráulica del acuífero (m/día)	> 40	10	3
	10-40	7.5	
	5-10	5	
	< 5	2.5	
L: altura del nivel del agua subterránea sobre el nivel del mar (m)	< 1	10	4
	1.0-1.5	7.5	
	1.5-2.0	5	
	> 2.0	2.5	
D: distancia desde la costa (m)	< 500	10	4
	500-750	7.5	
	750-1 000	5	
	> 1 000	2.5	
I: impacto del estado actual de la intrusión de agua de mar, EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	> 3000	10	1
	2 000-3 000	7.5	
	1 000-2 000	5	
	< 1 000	2.5	
T: espesor del acuífero (m)	> 10	10	2
	7.5-10	7.5	
	5-7.5	5	
	< 5	2.5	

El índice de vulnerabilidad se calcula con la fórmula establecida, multiplicando los puntos asignados a cada parámetro por su peso relativo y sumando estos seis productos obtenidos. Una vez calculado el índice GALDIT, que permite determinar un valor numérico para cualquier entorno hidrogeográfico, es posible en función de la magnitud de este índice clasificar las zonas costeras en varias categorías de vulnerabilidad a la intrusión marina. El rango de puntuaciones mínimas y máximas del índice GALDIT —que varía entre 2.5 y 10— se divide en tres grupos.

Cuanto menor es el índice, menos vulnerable es la zona costera a la intrusión marina. Así, el método permite clasificar la vulnerabilidad de los acuíferos costeros a la intrusión marina en tres grupos de rangos: alta, mediana o moderada, y baja (Tabla 3).

Tabla 3. Clases de vulnerabilidad.

Rango del índice de vulnerabilidad GALDIT	Clasificación de la vulnerabilidad
≥ 7.5	Alta vulnerabilidad
5 a 7.5	Mediana vulnerabilidad
< 5	Baja vulnerabilidad

Fuente: Chachadi y Lobo-Ferreira (2005).

Para identificar las zonas vulnerables a la intrusión salina en el acuífero costero del distrito de Las Tablas y construir el mapa de vulnerabilidad, se emplearon las herramientas del sistema de información geográfica (SIG). Todos los parámetros del método GALDIT, según la metodología descrita, han sido evaluados, ponderados y digitalizados, creando las respectivas capas temáticas para cada factor. Las capas

temáticas —luego de superponerlas y combinar los datos, aplicando las funciones de análisis espacial y de una función matemática dentro del SIG, llamada “calculadora ráster”— facilitaron el cálculo del índice de vulnerabilidad, generando el mapa final de vulnerabilidad con zonificación en el área de estudio con diferentes vulnerabilidades a la intrusión marina.

Resultados

En total, durante la investigación se generaron seis mapas temáticos reclasificados según los respectivos factores de valoración, que caracterizan cada parámetro o indicador según la Tabla 2, dando como resultado lo siguiente (Figura 4):

- **G:** tipo de acuífero (*Groundwater occurrence*). La presencia de agua subterránea en el área evaluada se caracteriza por estar en gran parte en el sistema acuífero que se encuentra en condiciones no confinadas, por lo que se le asignó una calificación de 7.5; una pequeña parte se clasifica como acuífero limitado con valores de clasificación 2.5 (Figura 4-a).

- **A:** conductividad hidráulica del acuífero (*Aquifer hydraulic conductivity*). Para el área de estudio, los valores de conductividad se obtuvieron de las pruebas de bombeo realizadas, por lo general cuando se perforaron los pozos. La conductividad hidráulica del área de estudio varía de 0.15 a 5.71 m/día. En casi toda la extensión de la zona estudiada, la conductividad hidráulica es menor a 5 m/día, por lo que el valor asignado al parámetro A es de 2.5 (Figura 4-b).

- **L:** altura del nivel piezométrico sobre el nivel del mar (*Height of groundwater level*). Para el área de evaluación, la mayor parte de la superficie se clasifica con el valor de 2.5. El resto del polígono fue

clasificado con los valores de 5, 7.5 y 10. El impacto máximo de la intrusión de agua se observa en la proximidad de la costa y disminuye a medida que se avanza hacia el interior de la zona evaluada (Figura 4-c).

- **D:** distancia a la costa (*Distance from the shore*). Para el caso concreto del área estudiada, la gran parte de la superficie se clasifica con el valor de 2.5 y el resto del polígono obtuvo valores de 5, 7.5 y 10, teniendo los tres últimos la mayor influencia a lo largo de la costa (Figura 4-d).

- **I:** impacto del estado actual de la intrusión de agua de mar (*Impact of existing status of seawater Intrusion*). En el presente estudio se utilizaron los registros de conductividad eléctrica de agua de pozos ubicados en la zona costera del acuífero. Las mediciones permitieron establecer que la mayor parte del polígono evaluado está clasificada con el valor 2.5, lo que representa el rango de conductividad eléctrica del agua de pozos (EC) menor de 1 000 $\mu\text{S/cm}$. Mientras tanto, el resto del polígono obtuvo valores de clasificación de 5, 7.5 y 10, teniendo los rangos de 1 000 a 2 000 $\mu\text{S/cm}$, 2 000 a 3 000 $\mu\text{S/cm}$ y mayor de 3 000 $\mu\text{S/cm}$, respectivamente (Figura 4-e).

- **T:** El área de estudio, que prácticamente es representada por el acuífero libre de la formación geológica Macaracas (TO-MAC), ha sido clasificada con el valor de 10, teniendo un rango de espesor del acuífero mayor de 10 metros (Figura 4-f).

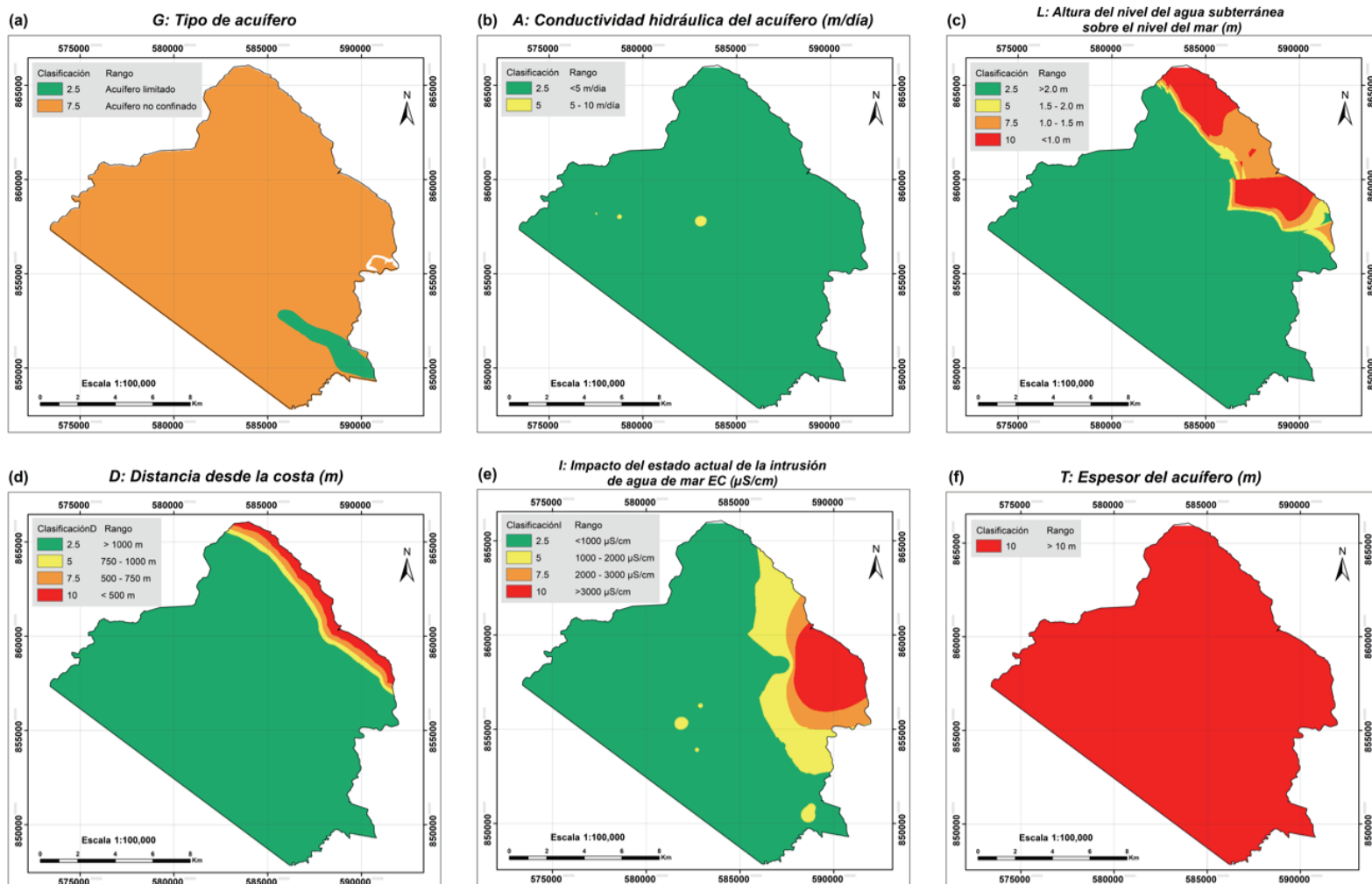


Figura 4. Capas temáticas de los parámetros GALDIT: (a) tipo del acuífero; (b) conductividad hidráulica del acuífero; (c) altura del nivel del agua subterránea sobre el nivel del mar; (d) distancia desde la costa; (e) impacto del estado actual de la intrusión marina; (f) espesor del acuífero.

El índice de vulnerabilidad del acuífero a la intrusión marina GALDIT en situación correspondiente al año 2024 —calculado para la zona costera del distrito de Las Tablas— varía en el rango de 3 a 8, dando como resultado en el mapa generado tres clases de la distribución espacial de

este índice de vulnerabilidad (Figura 5): baja (< 5), mediana o moderada ($5-7.5$) y alta (> 7.5).

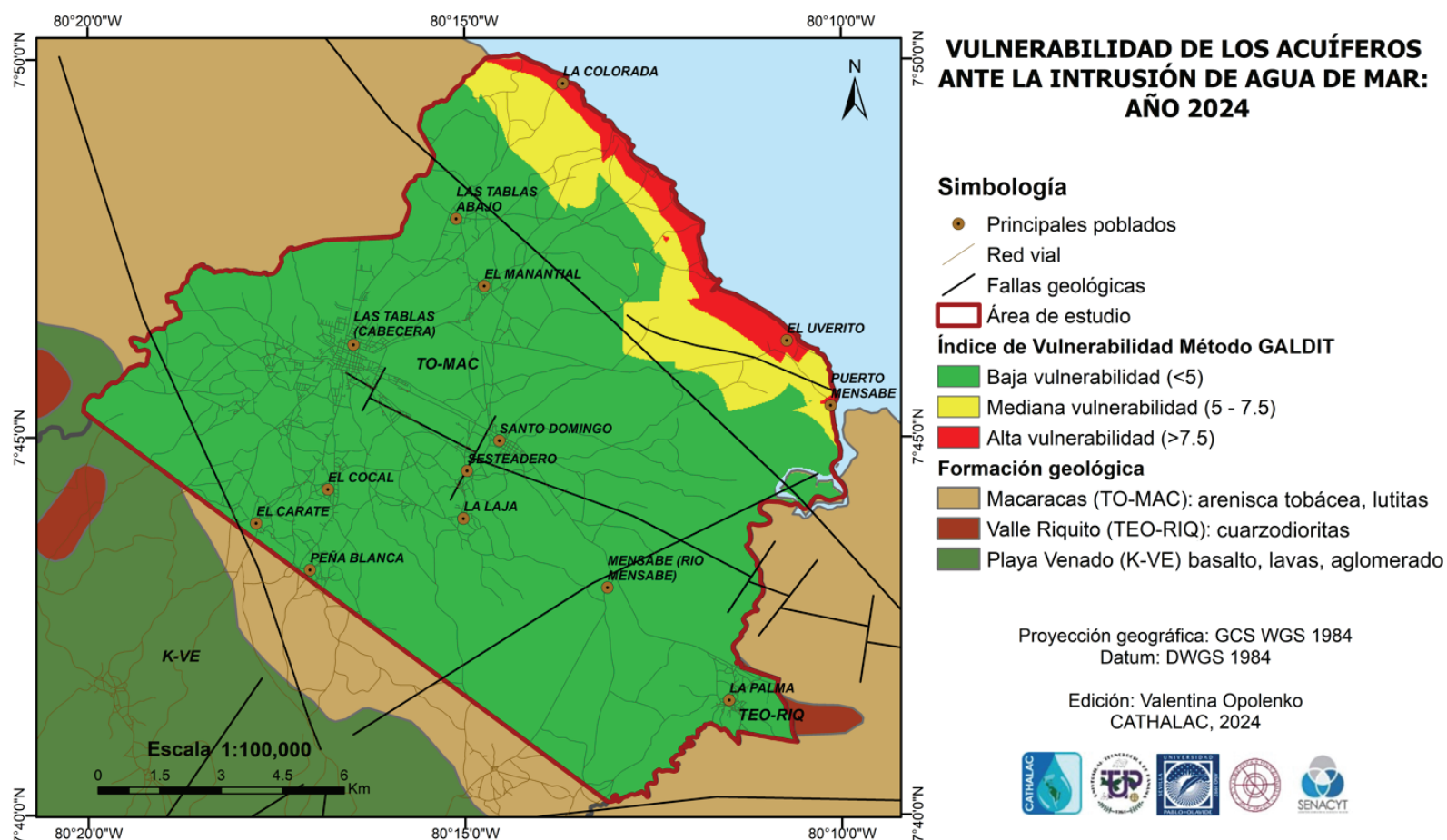


Figura 5. Mapa de vulnerabilidad de los acuíferos a la intrusión marina año 2024 en la zona costera del distrito de Las Tablas.

La **vulnerabilidad baja** cubre la mayor parte del polígono valorado (87.65 %), lo que representa 157.77 km². La zona delimitada en el mapa de vulnerabilidad inicia aproximadamente a unos 1 500 a 2 500 metros de la costa, y se caracteriza por valores relativamente bajos de la

conductividad eléctrica del agua subterránea y altos del nivel piezométrico. Esta condición favorable de distribución espacial de vulnerabilidad baja indica que existe una limitada posibilidad de afectación por intrusión marina tierra adentro, a pesar de un volumen significativo de extracción de agua subterránea por los numerosos pozos para distintos usos, que es aproximadamente de 20 hm³/año, lo que representa el 74 % de la recarga anual del acuífero.

El 9.11 % del área restante (16.39 km²) del polígono valorado se caracteriza por una **vulnerabilidad moderada**, que en este caso particular es una franja irregular de unos 1 500 a 2 500 metros, paralela a la costa, donde los valores de la conductividad eléctrica del agua subterránea aumentan de forma notable, que llegan (durante el muestreo de pozos realizado) a unos valores extremos del orden de 10 000 µS/cm en el sector este del área de estudio, en la zona aledaña a los manglares cercanos al Puerto Mensabé y a la comunidad de El Uverito. Con los resultados del muestreo se pudo precisar que la presencia de muy elevada conductividad eléctrica del agua subterránea en esta zona se debe mayormente a la explotación de pozos privados para el uso agropecuario, localizados a muy poca distancia entre ellos, esto es, unos 50 metros (Figura 6).

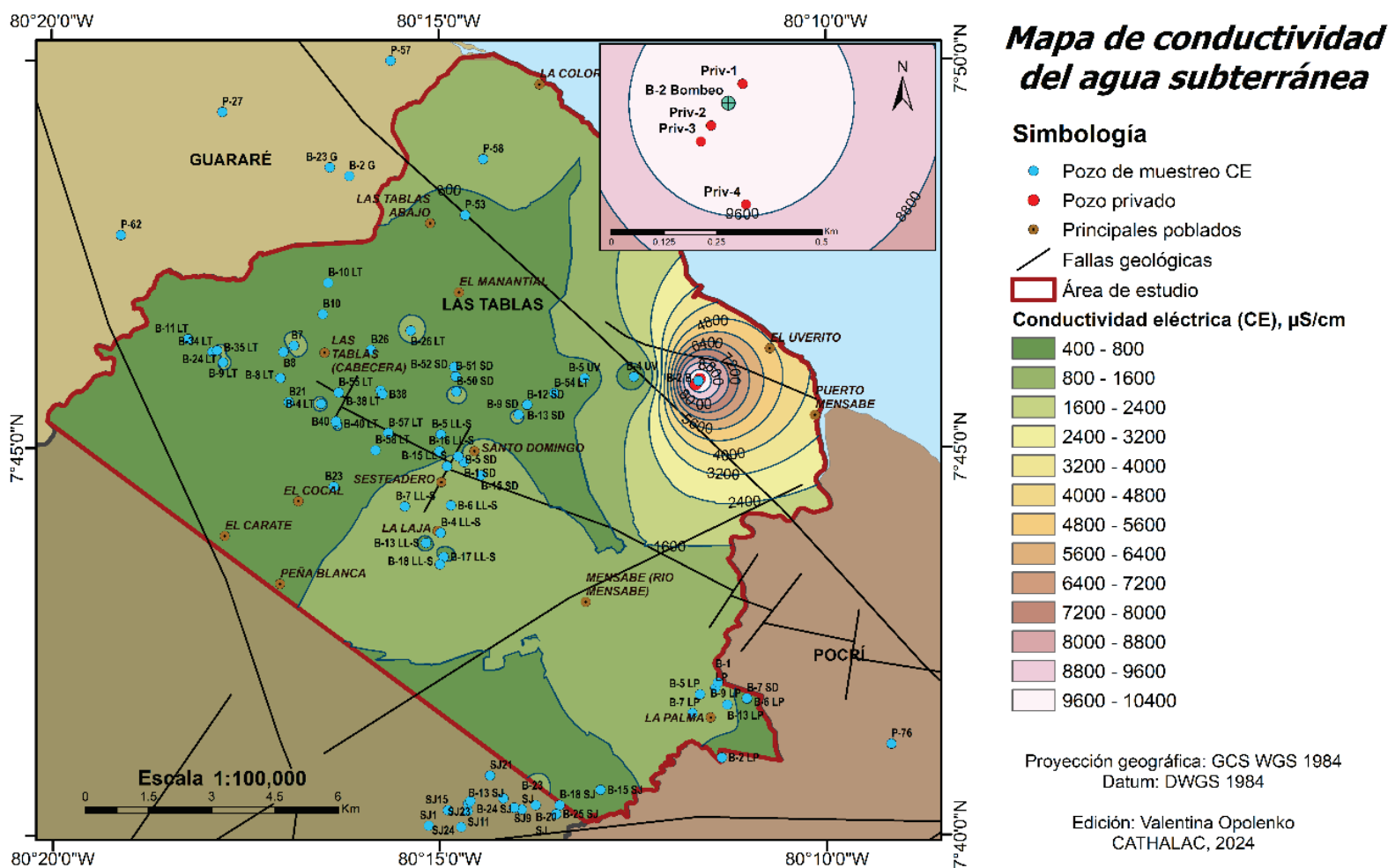


Figura 6. Mapa de conductividad eléctrica del agua subterránea del área de estudio.

Por otro lado, la posición del nivel freático sobre el nivel del mar —un parámetro de suma importancia en el cálculo de la vulnerabilidad— disminuye debido a esta extracción intensa y la presencia de zonas pantanosas salobres de relieve prácticamente plano, característico del ecosistema de manglares (Figura 7).

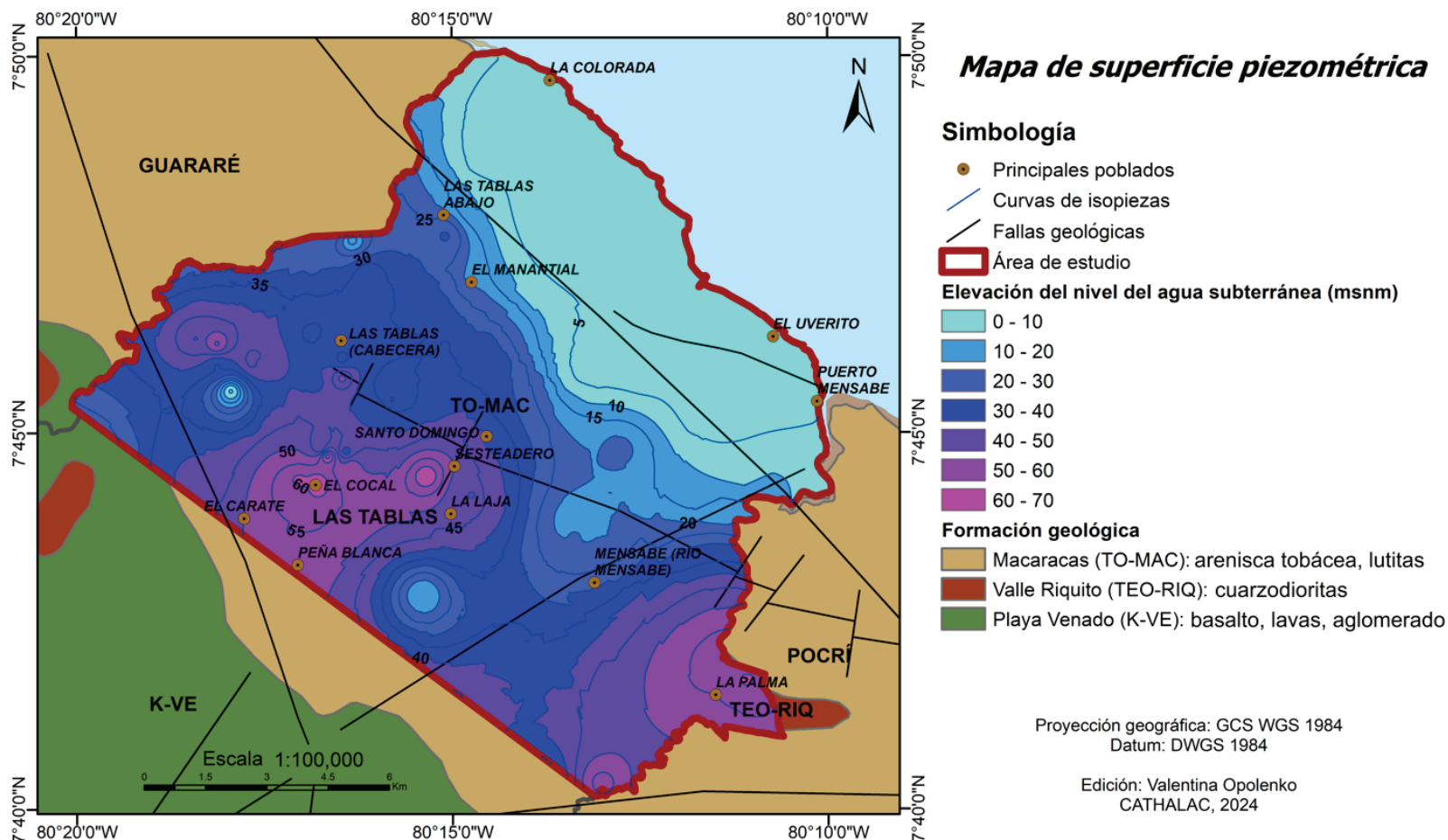


Figura 7. Mapa de superficie piezométrica del área de estudio.

Mientras tanto, la **vulnerabilidad alta** a la intrusión marina se presenta en forma de una angosta franja paralela a la costa, con un ancho aproximado de 500 metros (3.24 % de la superficie) y extensión de 5.84 km². Este sector se caracteriza —al igual que la zona con vulnerabilidad media— por la presencia de manglares en zonas bajas y en las desembocaduras de los ríos, con la intrusión periódica de agua salada del mar durante las mareas.

También se elaboraron dos mapas de vulnerabilidad con proyecciones a mediano plazo; es decir, para el año 2050, de cara a distintos escenarios futuros de cambio climático. Los mapas construidos permiten analizar el efecto del aumento del nivel medio del mar a causa de altas emisiones de CO₂ (WMO, 2024) en los acuíferos de la zona costera evaluada. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su Sexto Informe de Evaluación del Grupo de Trabajo I, AR6 (IPCC, 2022), se presentan nuevas proyecciones correspondientes a un conjunto de escenarios. Para la elaboración de estos dos mapas de vulnerabilidad de acuíferos con proyecciones a mediano plazo (2050) de los seis parámetros de GALDIT previamente calculados para la construcción del mapa de la vulnerabilidad actual de los acuíferos, se modificó solo el parámetro L, tomando en consideración los respectivos ascensos de nivel del mar. Como indica el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria, 2023), para el Pacífico panameño los ascensos serían para el año 2050 de 0.19 metros para el escenario optimista SSP2-4.5 y de 0.26 metros para el escenario pesimista SSP5-8.5. Así, aplicando los nuevos valores de la altura del nivel del agua subterránea sobre el nivel del mar, se construyeron los siguientes dos mapas:

▪ **Mapa de vulnerabilidad de los acuíferos ante la intrusión del agua del mar: año 2050 escenario SSP2-4.5.** Es un escenario con emisiones de GEI intermedias y emisiones de CO₂ que se mantienen en torno a los niveles actuales hasta mediados de siglo. Se consideró que con ese escenario optimista para el año 2050 se registrará un ascenso de nivel del mar de 0.19 m para la costa del Pacífico de Panamá (Figura 8).

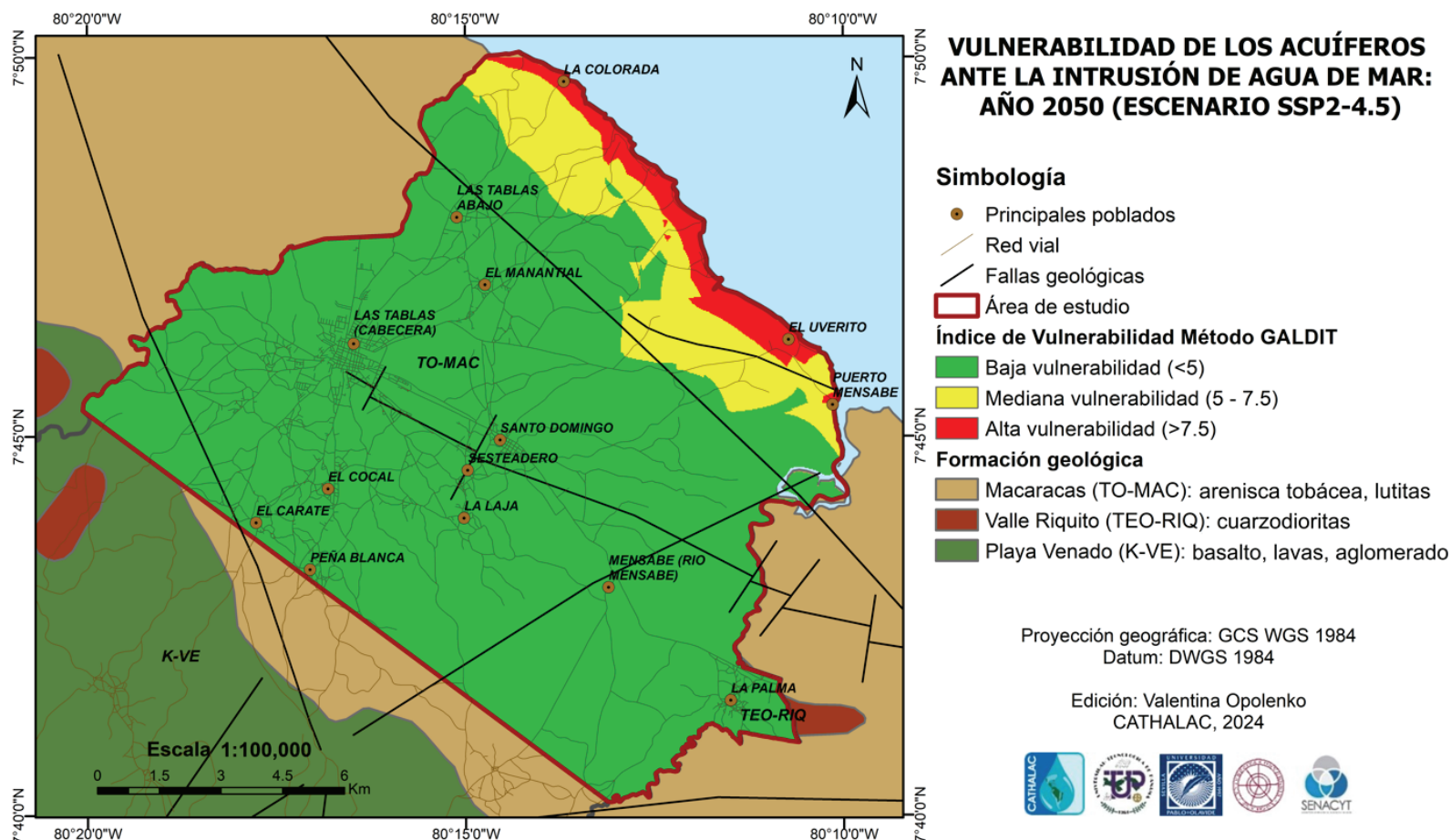


Figura 8. Mapa de vulnerabilidad de los acuíferos ante la intrusión del agua del mar: año 2050, escenario SSP2-4.5.

▪ **Mapa de vulnerabilidad de los acuíferos ante la intrusión del agua del mar: año 2050, escenario SSP5-8.5.** Es un escenario pesimista con emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) muy altas y emisiones de CO₂ que se duplican aproximadamente sobre los niveles actuales para el año 2050. Se consideró que con ese escenario para el año 2050 se registrará un ascenso de nivel del mar de 0.26 m para la costa del Pacífico de Panamá (Figura 9).

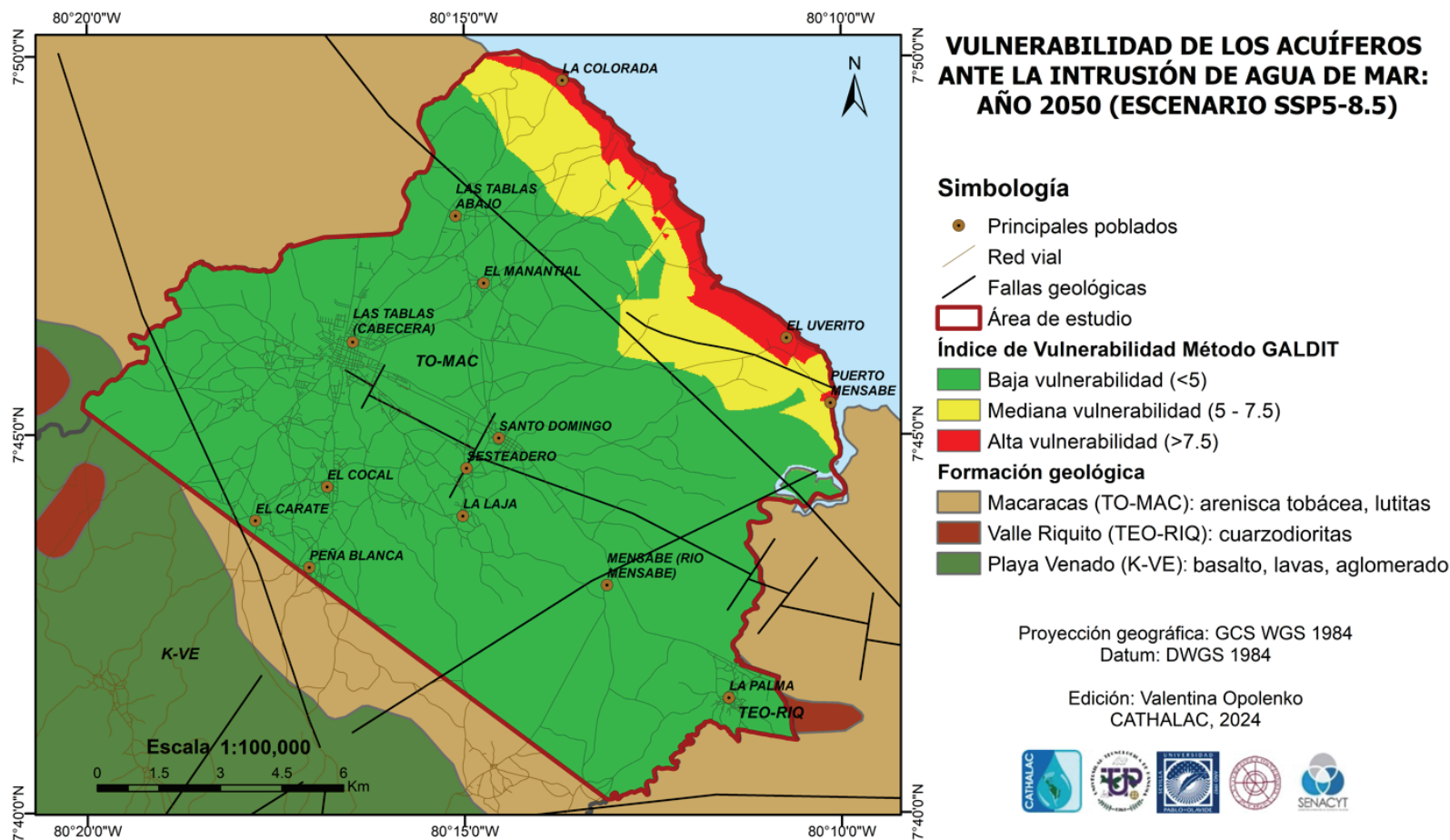


Figura 9. Mapa de vulnerabilidad de los acuíferos ante la intrusión del agua del mar: año 2050, escenario SSP5-8.5.

Cabe destacar que comparando ambos mapas generados con las proyecciones a futuro (Figura 8 y Figura 9) y el mapa de vulnerabilidad actual de los acuíferos a la intrusión marina (Figura 5), se puede observar que realmente no hubo diferencias significativas entre estos tres mapas con respecto a la distribución espacial de las clases del índice de vulnerabilidad en la zona costera del distrito de Las Tablas (Tabla 4).

Tabla 4. Clases de vulnerabilidad GALDIT al año 2024 y futura de la zona costera del distrito de Las Tablas.

Clases de vulnerabilidad	Nivel del mar año 2024 (m)		Nivel del mar previsto en año 2050, escenario SSP2-4.5 (+0.19 m)		Nivel del mar previsto en año 2050, escenario SSP5-8.5 (+0.26 m)	
	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)
Baja	157.77	87.65	155.98	86.66	155.42	86.35
Moderada	16.39	9.11	17.98	9.99	18.35	10.20
Alta	5.84	3.24	6.04	3.35	6.22	3.46

Los resultados obtenidos de la construcción del mapa de vulnerabilidad correspondiente al año 2024 del acuífero costero del distrito de Las Tablas durante la investigación indican que las medidas de mitigación de este fenómeno de contaminación del agua subterránea dulce por el agua salada deben implementarse lo más pronto posible (a corto plazo) para preservar este rango de la vulnerabilidad baja que domina en la actualidad con porcentajes altos de distribución en el área de estudio. El mismo comportamiento también se observó en los mapas de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la intrusión marina elaborados para ambos escenarios del cambio climático a futuro (año 2050), información que permitiría a los gestores de recursos hídricos la planificación de las medidas adecuadas de adaptación a este fenómeno.

Conclusiones

En el presente trabajo se aplicó el método GALDIT, que permitió evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la intrusión marina del acuífero costero del distrito de Las Tablas de la región de Azuero. El área de estudio, con una superficie de 180 km², se caracteriza por el crecimiento socioeconómico y agroindustrial, con una notable expansión demográfica y turística. Los recursos hídricos que abastecen todas estas actividades son, en gran parte, subterráneos (pozos profundos) y están expuestos a la degradación debido a su uso excesivo, a los efectos adversos del cambio climático y a la contaminación provocada por la intrusión marina, además de las distintas actividades antrópicas.

El mapa de vulnerabilidad del año 2024 de los acuíferos ante la intrusión del agua de mar en la zona costera del distrito de Las Tablas mostró con claridad las áreas moderada y altamente vulnerables a la contaminación salina. Dichas áreas se localizan en la proximidad a la costa, dentro de los primeros 1 500 a 2 500 metros, en específico en la parte este del área de estudio, donde se observan distintas actividades agroindustriales con la explotación de numerosos pozos particulares, y una amplia zona de manglares, aledaños al Puerto Mensabé y a la comunidad de Uverito.

El impacto de la elevación del nivel del mar debido al cambio climático en la vulnerabilidad del acuífero se ha estudiado solo a través del parámetro L (altura del nivel piezométrico sobre el nivel del mar) del método GALDIT para los futuros escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en el año 2050, que suponen una elevación del nivel del mar de 0.19 y 0.26 m, respectivamente. La metodología aplicada para la elaboración de los mapas de vulnerabilidad con proyecciones a mediano plazo se fundamentó

en la disponibilidad y calidad de la información técnica de base del área investigada que, en este caso concreto, ha sido muy escasa y en algunos sectores inexistentes.

A pesar de que según los mapas de vulnerabilidad generados con proyecciones para el año 2050 no se producirán cambios significativos en la vulnerabilidad del acuífero a la intrusión marina, sería necesario en nuevos estudios tomar en consideración el futuro crecimiento de la población, que contribuiría al alza de la demanda del agua subterránea para distintos usos. Además, los cambios en los regímenes de precipitación y, por ende, en la recarga de acuíferos, tendrán efectos negativos en otros parámetros del método GALDIT, como el impacto del estado actual de la intrusión de agua de mar (I) en la zona costera y el cambio de espesor del acuífero (T) por sobreexplotación.

De este modo, la generación de los mapas de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la intrusión salina del área de estudio tiene sus méritos en ayudar a las autoridades locales y a las partes interesadas (propietarios de pozos) a regular el uso del agua subterránea, y planificar políticas y estrategias efectivas para proteger los recursos hídricos costeros, incluida la creación del programa de monitoreo de las aguas subterráneas, tomando en consideración el efecto del cambio climático en el incremento del nivel medio del mar y las disminuciones drásticas de las precipitaciones actuales y futuras.

Tomando en consideración que la presente investigación es un proyecto piloto nacional y el agua subterránea es vital en la zona estudiada, se deben llevar a cabo investigaciones más detalladas para determinar el estado real de la intrusión marina en la zona de estudio. Sería recomendable la inclusión de investigaciones geofísicas que permitan la mejor caracterización espacial de algunos de los indicadores

del método GALDIT. Además, la inclusión de técnicas de teledetección para evaluar la variación espacio-temporal de la vegetación y la salinidad de los suelos permitiría estimar mejor la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en la región debido al impacto negativo de estos indicadores.

Por otra parte, para este fin es importante instalar una red piezométrica, lo que permitirá el desarrollo de modelos del comportamiento dinámico del sistema acuífero bajo fuerzas impulsoras naturales, como el cambio climático, y antrópicas, para poder producir resultados predictivos efectivos y útiles, que concluyan con la comprensión de la gravedad del fenómeno de la intrusión marina en las aguas subterráneas en zonas costeras y tenga un factor multiplicador a nivel nacional.

Agradecimientos

El equipo de investigación del proyecto agradece a las siguientes instituciones y organizaciones que acompañaron y brindaron su valioso apoyo en este esfuerzo investigativo:

A la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Senacyt) por su decidida contribución al desarrollo científico-tecnológico de este país.

Al personal de la Dirección Regional de Los Santos del Ministerio de Ambiente (MiAMBIENTE); del Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA) y, en especial, al Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN).

Al Municipio de Las Tablas, a los miembros del Comité de Cuenca Hidrográfica denominada "Ríos entre Río Tonosí y Río La Villa"; a las

distintas comunidades beneficiarias por su actitud positiva y aporte de conocimiento local.

Al Centro Regional Universitario de Azuero (CRUA), por el apoyo brindado en la coordinación y realización de la jornada de sensibilización y el ciclo de conferencias sobre la gestión sostenible de aguas subterráneas en zonas costeras.

Al todo el equipo de CATHALAC, que apoyó la exitosa ejecución de este proyecto, y al Consultor MSc. Geólogo Roneldo Arjona, por su valiosa participación y aportes en el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- Abishek, R. S., Ravindran, A. A., & Priya, S. R. (2024). Coastal vulnerability assessment using the GALDIT model: A case study of Mukkani and Palayakayal regions in the Thamirabarani delta, Southern Tamil Nadu, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10, 5257-5271. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02062-8>
- ANAM, Autoridad Nacional del Ambiente. (2009). *Atlas de las tierras secas y degradadas de Panamá*. <http://bdigital.binal.ac.pa/bdp/Atlas%20%20de%20la%20tierras%20secas%20y%20degradadas.pdf>
- ANAM, Autoridad Nacional del Ambiente. (2012). *Línea base: diagnóstico biofísico, socioeconómico y potencial energético de la cuenca hidrográfica entre los ríos Tonosí y La Villa-Guararé*. <https://cuencas.miambiente.gob.pa/wp-content/uploads/2020/08/L%C3%ADnea-Base-cuenca-126.pdf>

- Barlow, P. M., & Reichard, E. G. (2010). Saltwater intrusion in coastal regions of North America. *Hydrogeology Journal*, 18, 247-260. <https://doi.org/10.1007/S10040-009-0514-3>
- CATAPAN, Catastro Rural de Tierras y Aguas. (1968). *Geología. Volumen III*. Comisión de Reforma Agraria.
- Chachadi, A. G., & Lobo-Ferreira J. P. (2001). Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. *Proceedings of the Workshop on Modelling in Hydrogeology, Anna University, Chennai*, 143-155. https://www.academia.edu/218681/Modelling_in_Hydrogeology
- Chachadi, A. G., & Lobo-Ferreira, J. P. (2005). Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2 – GALDIT Indicators Description. IAHS and LNEC. *Proceedings of the Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, Portugal*, 1-12. <https://aprh.pt/celtico/PAPERS/26.PDF>
- Custodio, E. (2010). Coastal aquifers of Europe: An overview. *Hydrogeology Journal*, 18(1), 269-280. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0496-1>
- DGRM, Dirección General de Recursos Minerales. (1991). *Mapa geológico de la República de Panamá*. 1:250.000. Ministerio de Comercio e Industrias.
- Dörfliger, N., Dumon, A., Aunay, B., Picot, G., Moynot, C., & Bollard, M. (2011). *Influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salin des aquifères côtiers des DROM/COM, Rapport final*. BRGM RP-60828-FR. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60828-FR.pdf>

- ETESA, Empresa de Transmisión Eléctrica, S. A. (1999). *Mapa hidrogeológico de Panamá*. Gerencia de Hidrometeorología. https://skat.ihmc.us/rid=1NDQGJ59S-NRFG2C-2LK6/Mapa_Hidrogeologico.pdf
- FAO & UN Water. (2021). *Progress on level of water stress. Global status and acceleration need for SDG Indicator 6.4.2, 2021*. FAO, United Nations Water (UN Water). <https://doi.org/10.4060/cb6241en>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1019-7>
- IGNTG, Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia". (2007). *Atlas nacional de la República de Panamá*. Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia".
- IGME, Instituto Geológico y Minero de España. (2009). *Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Actividad 7: Establecimiento de indicadores de intrusión marina y cálculo de los volúmenes ambientales al mar. Volumen I Propuesta de indicador de estado de intrusión marina. Aplicación a las masas de agua subterránea de la provincia de Castellón*. https://info.igme.es/SidPDF/140000/557/140557_0000001.pdf
- INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censo. (2023). *XII Censo de Población y VIII de Vivienda 2023. Resultados Finales Básicos*. Panamá. <https://www.inec.gob.pa/archivos/P0705547520231109105354CUADRO%2010.pdf>

- IHCantabria, Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria. (2023). *Desarrollo de una base de datos de dinámicas marinas en las costas panameñas para evaluar impactos y vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar. Producto 3.2.* Ministerio de Ambiente. <https://sinia.gob.pa/dinamicas-marinas-producto-3-2-base-de-datos-dinamicas-marinas-en-panama/>
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Calentamiento global de 1,5 °C. Resumen para responsables de políticas.* OMM/PNUMA. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability.* Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- MOP, Ministerio de Obras Públicas. (2004). *Manual para la aplicación del concepto de vulnerabilidad de acuíferos establecido en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas D.S. N° 46 de 2002.* Dirección General de Aguas. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/cfb2a034-24ef-44c0-b27b-18a2cddb6c07/content>
- MiAMBIENTE, Ministerio de Ambiente. (2020). *Plan Nacional de Sequía para Panamá.* Comité Nacional de Lucha Contra la Sequía y Desertificación. https://www.unccd.int/sites/default/files/country_profile_documents/Plan_Nacional_contra_la_Sequia.pdf

- MiAMBIENTE, Ministerio de Ambiente. (2023). *Resumen ejecutivo. Riesgo de cambio climático, precipitación, temperatura, ascenso del nivel del mar 2030, 2050, 2070*. Dirección de Cambio Climático. <https://transparencia-climatica.miambiente.gob.pa/wp-content/uploads/2024/02/1-Resumen-ejecutivo-Escenarios-CC-Ascenso-del-nivel-del-mar-2050-editado-ajustado-19-de-junio-2023.pdf>
- Opolenko, V. (2015). *Sensibilidad medioambiental a la desertificación en la cuenca del río La Villa, República de Panamá* (tesis doctoral). Universidad Internacional de Andalucía y Universidad de Huelva, España. <https://doi.org/10.56451/10334/3687>
- Opolenko, V. (2022). Identificación y caracterización de potenciales sistemas acuíferos en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, República de Panamá. *Revista Geográfica de América Central*, (67), 83-120. <https://doi.org/10.15359/rgac.67-2.4>
- UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2007). *Zonación de los regímenes hídricos de América Latina y el Caribe desde una perspectiva climática* (Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 6). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000228182.locale=es>
- WMO, World Meteorological Organization. (2024). The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2023. *Greenhouse Gas Bulletin*, (20). https://library.wmo.int/viewer/69057/download?file=GHG-20_en.pdf&type=pdf&navigator=1

Yang, J. S., Jeong, Y.W., Agossou, A., Sohn, J. S., & Lee, J. B. (2022). GALDIT modification for seasonal seawater intrusion mapping using multi criteria decision making methods. *Water*, 14(14), 2258. <https://doi.org/10.3390/w14142258>