

Evaluación de las aguas subterráneas y la dinámica de la intrusión marina en el acuífero costero de Las Tablas (Península de Azuero, Panamá)

Assessment of groundwater and the dynamics of marine intrusion in the coastal aquifer of Las Tablas (Azuero Peninsula, Panama)

Avaliação das águas subterrâneas e dinâmica da intrusão marinha no aquífero costeiro de Las Tablas (Península de Azuero, Panamá)

Valentina Opolenko¹

Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), Panamá

Manuel Olías²

Universidad de Huelva, España

Francisco Moral³ y Antonia Jiménez⁴

Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España

José Fábrega⁵

Universidad Tecnológica de Panamá

- 1 Doctora en Tecnología Ambiental y Gestión del Agua. Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe, CATHALAC, Panamá, República de Panamá. Correo electrónico:  valentina.opolenko@cathalac.int  ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8734-9349>
- 2 Doctor en Ciencias Geológicas. Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Huelva, España. Correo electrónico:  manuel.olias@dgyp.uhu.es  ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5394-3449>
- 3 Doctor en Ciencias Geológicas. Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España. Correo electrónico:  fmormar@upo.es  ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6406-6725>
- 4 Doctora en Biología. Área de Ecología de la Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España. Correo electrónico:  ajimrodr@upo.es  ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7495-4358>
- 5 Doctor en Ingeniería Civil. Investigador Centro de Investigaciones Hidráulica e Hidrotécnicas Universidad Tecnológica de Panamá. Correo electrónico:  jose.fabrega@utp.ac.pa  ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1536-0386>



Resumen

El istmo de Panamá posee una importante longitud de costas, donde se concentra la población y por tanto la demanda de recursos hídricos. El incremento de la perforación de pozos de forma no planificada para satisfacer esta alta demanda puede provocar problemas de salinización por intrusión marina de los acuíferos costeros. El objetivo de la investigación fue evaluar las aguas subterráneas y la dinámica de la intrusión marina en la zona costera del distrito de Las Tablas, en la península de Azuero, con una extensión de 180 km². La metodología se basó en la realización de estudios geológicos, una campaña geofísica mediante sondeos eléctricos verticales (SEV) y la realización de muestreos para caracterizar los niveles freáticos, la conductividad eléctrica del agua y las características del manto freático. Los resultados obtenidos, muestra que los materiales con un mayor potencial hidrogeológico son aglomerados y, sobre todo, basaltos. Su conductividad hidráulica tiene valores medios de 1,5 a 2 m/día, constituyendo un acuífero pobre. En condiciones naturales la penetración de la cuña salina tierra adentro se estima en 150 m. A pesar de existir una extracción significativa del agua subterránea (más del 70 % de los recursos), todavía no se ha llegado a una situación crítica, observándose solamente signos de contaminación por salinidad en una zona al SE de la costa, con conductividad eléctrica de hasta 10 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La situación podría agravarse si se incrementa la explotación por efecto del cambio climático. Este estudio sienta las bases metodológicas para la gestión sostenible de las aguas subterráneas en zonas costeras de Panamá.

Palabras clave: acuífero, intrusión marina, aumento nivel del mar, contaminación.



Abstract

The Isthmus of Panama has a significant coastline, where the population is concentrated, and consequently, so is the demand for water resources. The unplanned increase in well drilling to meet this high demand can lead to salinization problems due to seawater intrusion of coastal aquifers. The objective of this research was to evaluate groundwater and the dynamics of seawater intrusion in the coastal area of the Las Tablas district, on the Azuero Peninsula, covering an area of 180 km². The methodology was based on conducting geological studies, a geophysical survey using vertical electrical soundings (VES), and sampling to characterize groundwater levels, water electrical conductivity, and the characteristics of the water table. The results obtained show that the materials with the greatest hydrogeological potential are agglomerates and, above all, basalts. Their hydraulic conductivity has average values of 1.5 to 2 m/day, constituting a poor aquifer. Under natural conditions, the penetration of the saline wedge inland is estimated at 150 m. Despite significant groundwater extraction (more than 70% of the resources), a critical situation has not yet been reached, with only signs of salinity contamination observed in an area southeast of the coast, with electrical conductivity up to 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The situation could worsen if exploitation increases due to climate change. This study establishes the methodological basis for the sustainable management of groundwater in coastal areas of Panama.

Keywords: Aquifer, marine intrusion, rising sea levels, contamination.



Resumo

O istmo do Panamá possui um extenso litoral, onde a população se concentra e, conseqüentemente, a demanda por recursos hídricos também. O aumento desordenado da perfuração de poços para atender a essa alta demanda pode levar a problemas de salinização devido à intrusão de água do mar nos aquíferos costeiros. O objetivo desta pesquisa foi avaliar as águas subterráneas e a dinâmica da intrusão de água do mar na área costeira do distrito de Las Tablas, na Península de Azuero, abrangendo uma área de 180 km². A metodologia baseou-se na realização de estudos geológicos, um levantamento geofísico utilizando sondagens elétricas verticais (SEV) e amostragem para caracterizar os níveis de água subterrânea, a condutividade elétrica da água e as características do lençol freático. Os resultados obtidos mostram que os materiais com maior potencial hidrogeológico são aglomerados e, sobretudo, basaltos. Sua condutividade hidráulica apresenta valores médios de 1,5 a 2 m/dia, constituindo um aquífero de baixa capacidade. Em condições naturais, a penetração da cunha salina no interior é estimada em 150 m. Apesar da significativa extração de água subterrânea (mais de 70% dos recursos), ainda não se atingiu uma situação crítica, havendo apenas indícios de contaminação salina numa área a sudeste da costa, com condutividade elétrica de até 10.000 µS/cm. A situação poderá piorar se a exploração aumentar devido às mudanças climáticas. Este estudo estabelece as bases metodológicas para a gestão sustentável das águas subterráneas em áreas costeiras do Panamá.

Palavras-chave: Aquífero, intrusão marinha, elevação do nível do mar, poluição.

INTRODUCCIÓN

Los efectos del cambio climático en las últimas décadas, a causa del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, al ser ellos en su gran parte producto de las crecientes actividades antrópicas, conducen a las inevitables futuras subidas de las temperaturas y disminución de las precipitaciones, contribuyendo de esta manera al calentamiento global del planeta (WMO, 2024). Como resultado, los cambios de patrones de temperatura y precipitaciones respectivamente conllevan a que los fenómenos climáticos extremos se presentan cada vez más largos e intensos, y también se dan con mayor frecuencia, incrementando el nivel medio global del mar, entre otros (IPCC, 2019).

Se considera que el aumento del nivel medio del mar es uno de los cambios ambientales más influyentes y, según estudios recientes (Hamlington *et al.*, 2024), esto afecta directamente a ecosistemas costeros en todo el mundo. La amenaza constante de la subida del nivel del mar también trastorna a los sistemas sociales y económicos, rompiendo el equilibrio entre la naturaleza y seres humanos. Está previsto que la

variabilidad climática cause mayores variaciones en precipitaciones y evapotranspiración, por lo tanto, las fuentes de agua superficial sufrirán mayor estrés hídrico en el futuro ([BBC Mundo, 2012](#)).

La creciente incertidumbre ya está provocando que la demanda por fuentes subterráneas aumente notablemente como mecanismo de protección contra las sequías, específicamente en regiones tropicales donde existe un significativo desarrollo socioeconómico de la población y de la agricultura de regadío. Al aumentar la presión sobre los acuíferos costeros se agravan los fenómenos de intrusión marina. La dinámica de la intrusión marina en acuíferos costeros a consecuencia del aumento del nivel del mar y de la intensiva explotación, es un tema de extrema relevancia actual y futura, ya que estos son a menudo la fuente principal, o a veces la única, de agua potable para los habitantes.

Se define por la intrusión marina en acuíferos costeros a un proceso natural o causado por actividades humanas, en el cual el agua salada incursiona permanente o temporalmente tierra adentro, desplazando el agua dulce debido a su mayor densidad. Al introducirse el agua de mar tierra adentro, se produce una mezcla de ambos tipos de fluidos, reduciendo a su vez la calidad de las reservas de agua subterránea. Debido a esto, la intrusión marina se considera un fenómeno muy complejo desde el punto de vista hidrodinámico e hidrogeoquímico, ya que conlleva aspectos de evaluación, cálculo, predicción y corrección, que son conceptual y cuantitativamente difíciles, entre los cuales se resaltan las características locales por tener una influencia dominante ([Custodio, 2013](#); [Martínez-Pérez et al., 2022](#)). Además, la penetración de la cuña salina en depósitos litorales es un fenómeno difícil de remediar ([Werner et al., 2023](#)).

Dicha situación tiene especial relevancia en Panamá, que posee una significativa longitud de costas, de casi 3 000 kilómetros ([IHCantabria, 2023](#)). La extensa zona costera de la provincia de Los Santos, que se localiza en la vertiente del Pacífico y forma parte de la Península de Azuero, es una región muy importante en el nivel nacional debido a su gran valor socioeconómico y, en contraste, la más degradada ambientalmente, donde la presión demográfica aumenta constantemente, provocando el incremento en la deforestación y ocupación de tierras, disminuyendo la capacidad de infiltración de los suelos, afectando a la recarga de acuíferos, generando un estrés hídrico que va en constante aumento ([MiAMBIENTE, 2020](#)).

La sobreexplotación de acuíferos que conlleva a su paulatino agotamiento, específicamente en estas zonas litorales con alta concentración de la población en la región, la creciente actividad turística, la expansión del cultivo de regadío y la presencia de distintos complejos industriales, pone en riesgo el abastecimiento de amplios sectores de la población y de las distintas actividades, especialmente en épocas de sequía.

La progresión de la intrusión marina por alteración del régimen de flujo debido al bombeo excesivo o a la ubicación inadecuada de los pozos en acuíferos costeros conectados hidráulicamente con el mar, provoca el avance de una cuña salobre tierra adentro, al disminuir el movimiento de agua dulce hacia la costa. También se prevé que esta situación empeorará cada vez más con el cambio climático: aumentará la evaporación, lo que disminuirá la capacidad de los ríos para diluir las sales y, además, el agua salada entrará en los actuales espacios costeros a causa de la subida del nivel del océano a nivel mundial.

De ahí surge la necesidad creciente de contribuir al conocimiento y la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos a partir de la realidad actual que vive el distrito de Las Tablas de la provincia de Los Santos, donde la explotación de aguas subterráneas para distintos usos se realiza a través de una gran cantidad de pozos profundos, operados en su mayoría sin ningún tipo de control y monitoreo.

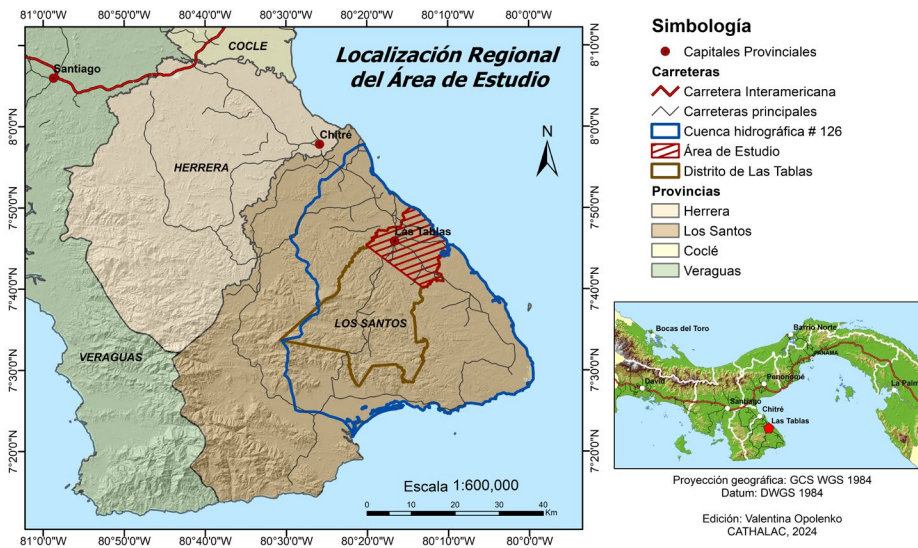
El aumento de la salinidad del agua dulce provoca efectos adversos para la salud humana y el funcionamiento de los ecosistemas. Además, la salinización de acuíferos en esta zona costera también puede tener costes económicos muy elevados por la pérdida de servicios ecosistémicos y por los gastos directos relacionados con el intento de descontaminar un acuífero afectado por la intrusión salina, debido a la complejidad y dificultad técnicas que estas operaciones conllevan. Comúnmente este proceso induce al abandono del recurso hídrico afectado y su sustitución por agua de otro origen, lo que, prácticamente, sería catastrófico para la parte baja de la cuenca hidrográfica “Ríos entre Río Tonosí y Río La Villa”.

De este modo, el propósito principal de este trabajo es evaluar la vulnerabilidad a la contaminación por intrusión marina en acuíferos costeros en la región de Azuero, debido al incremento en el nivel del mar asociado al cambio climático y la presión sobre el recurso hídrico por el desarrollo de actividades humanas.

ÁREA DE ESTUDIO

Comprende un sector central de la parte baja de la cuenca hidrográfica n.º 126 “Ríos entre Río Tonosí y Río La Villa”, que se localiza en la vertiente del Pacífico, en extremo sureste de la Península de Azuero (IGNTG, 2007), a unos 300 km de la ciudad de Panamá, capital de la República (figura 1).

Figura 1. Ubicación regional y división administrativa del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

Es una zona costera del distrito de Las Tablas, que cuenta, según el Censo Nacional de Población y Vivienda 2023 (INEC, 2023), con unas 27 mil habitantes. El área de estudio, de aproximadamente de 180 km², representa una franja que tiene la longitud por la costa de unos 15 kilómetros y 12 km lineales tierra adentro. Este distrito se considera como un importante centro económico de la provincia de Los Santos, que se ubica en el extremo este de la península de Azuero.

El área mencionada forma parte del llamado Arco Seco de Panamá, una región que comprende las llanuras y colinas costeras orientales de las provincias de Los Santos y Herrera, así como el litoral Sur de Coclé. Es un territorio desfavorecido climáticamente, con las precipitaciones

anuales menores del país, variando entre los 900 y 1500 mm/año, que frecuentemente enfrenta los mayores períodos de déficit hídrico y sequías a consecuencia de la variabilidad climática natural de la zona y los eventos meteorológicos extremos.

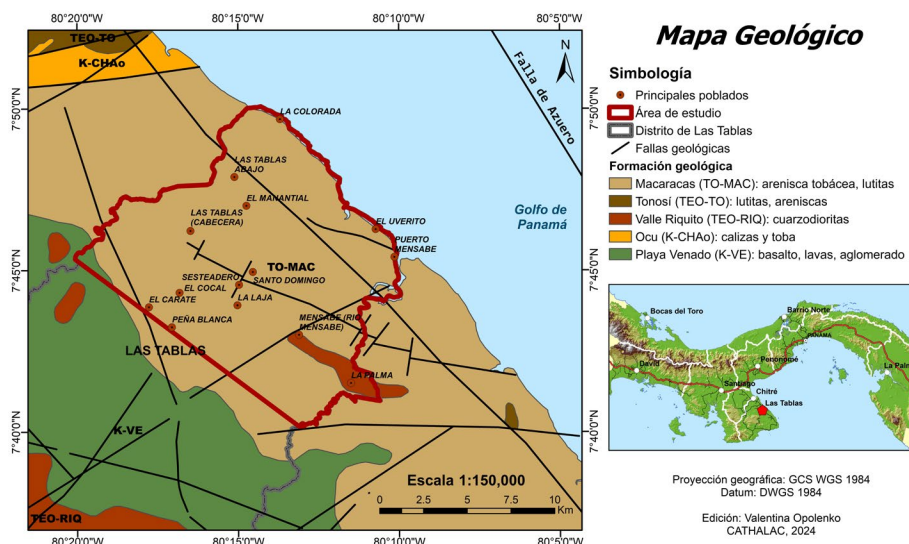
Además, fue sometido durante décadas a una intensa degradación ambiental, en especial de los suelos y recursos hídricos, que se manifiesta a través del uso intensivo de agroquímicos, las prácticas de cultivos no apropiados para la vocación del suelo, sobreexplotación de acuíferos y la falta de sistematización de la gestión de sistemas de riego agrícola, entre otros, con los consiguientes perjuicios para el buen funcionamiento de muchos de los ecosistemas de la zona (Opolenko, 2016).

El relieve se caracteriza por la presencia de un amplio sector de tierras bajas (llanuras) y por colinas suaves, cuyos alineamientos muestran signos de avanzados procesos de erosión y efecto degradante de las actividades agropecuarias. La elevación media en esta zona es de unos 80 metros sobre el nivel del mar (IGNTG, 2007).

La geología de la zona costera del distrito de Las Tablas, que comprende el área de la investigación, se desarrolla en un ambiente complejo por su evolución histórica de pequeño arco de islas y mares poco profundos en un istmo 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 Panamá (DGRM, 1991), el conjunto litológico que constituye el área de estudio presenta rocas asociadas a la actividad volcánica de la península de Azuero (figura 2).

Consiste en tres formaciones geológicas: la sedimentaria Macaracas (TO-MAC), que es de mayor extensión, la plutónica Valle Riquito (TEO-RIQ) y la volcánica Playa Venado (K-VE). Estas dos últimas afloran en una extensión muy pequeña. Cabe destacar que en el área de estudio también se encuentran presentes de manera dispersa algunas estructuras conocidas como diques, que son intrusiones más recientes de escapes de lava u otro tipo de material ígneo por lo general de forma tabular, incrustadas en materiales preexistentes.

Figura 2. Mapa geológico del área de estudio



Fuente: elaboración propia con base en [DGRM \(1991\)](#).

La formación Macaracas (TO-MAC) del período Paleógeno, que aflora en superficie en gran parte del área de estudio, se halla fuertemente meteorizada y presenta una potente cubierta edáfica. La composición de esta formación geológica está representada principalmente por rocas como areniscas, tobas y lutitas. La recarga de agua procede fundamentalmente de la infiltración parcial de las lluvias, aunque puede tener un componente lateral de flujo subterráneo procedente de las tierras altas vecinas.

La formación Valle Riquito (TEO-RIQ), también del Paleógeno está constituida principalmente por rocas plutónicas intrusivas, masivas y compactas como la cuarzodiorita. Por lo tanto, es una formación con escasas propiedades acuíferas, teniendo alguna posibilidad menor en la cubierta de suelo y la capa de roca meteorizada de los sectores donde aflora en superficie.

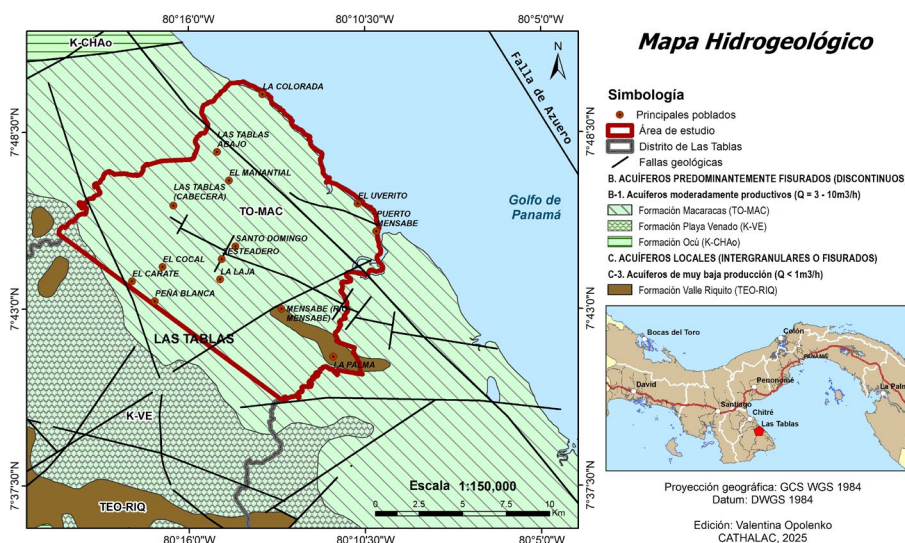
La formación Playa Venado (K-VE) está compuesta mayormente por coladas basálticas extrusivas y capas depositadas en ambiente marino con estructura de pillow lavas. Además, tiene en su composición algunos sectores con aglomerado. Son estratos pertenecientes al Cretácico superior, con unos 93 millones de años de antigüedad aproximadamente, y está entre

los horizontes geológicos más antiguos de la República de Panamá, al ser originalmente parte del lecho marino que constituye el basamento de las otras formaciones más jóvenes en el país.

Con respecto a tectónica, en el área de estudio las tectolineales tienen direcciones principales noroeste-sureste y noreste-suroeste. También en la zona costera, a unos 3 km tierra adentro del distrito de Las Tablas, hay presencia de una falla menor con dirección noroeste-sureste y que es paralela a la falla mayor denominada Falla de Azuero (figura 2), que se localiza en el Golfo de Panamá, a una distancia de 10 km de la costa este de la Península de Azuero (DGRM, 1991). Además de estos fracturamientos regionales y locales, existen otros de menor dimensión, y que crean una extensa red de fallamientos, diaclasas y fisuras, estructuras relevantes desde el punto de vista hidrogeológico, ya que permiten almacenar y circular las aguas subterráneas.

En lo que se refiere a la hidrogeología, según el Mapa Hidrogeológico de Panamá (ETESA, 1999), en la zona costera del distrito de Las Tablas están presentes dos tipos de acuíferos, denominados B-1 y C-3, la determinación y localización de los cuales se basa en las características físicas de las rocas de diferentes formaciones geológicas (figura 3).

Figura 3. Mapa hidrogeológico del área de estudio



Fuente: elaboración propia con base en ETESA (1999).

La clase B-1 pertenece a un grupo de acuíferos predominantemente fisurados (discontinuos), con permeabilidad variable y una moderada producción de 3-10 m³/h, que se caracteriza por ser pequeños sistemas restringidos a zonas fracturadas. Está constituido por las formaciones sedimentarias Macaracas (TO-MAC) y la volcánica Playa Venado (K-VE). El segundo tipo es el C-3, característico de las áreas con reservas de agua locales (intergranulares o fisurados), con permeabilidad baja a muy baja y de productividad limitada o poco significativa, menor de 1 m³/h. Este tipo de acuífero está representado por la unidad litoestratigráfica plutónica Valle Riquito (TEO-RIQ). En general, la ocurrencia de aguas subterráneas está limitada a la zona de meteorización o fracturación de rocas adyacentes.

MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

La intrusión marina en los acuíferos costeros es un fenómeno natural o inducido en el cual la cuña salina penetra tierra adentro por debajo de la capa de agua dulce (Custodio, 2017). Generalmente, este fenómeno es considerado complejo a escala de detalle, con cambios rápidos en tres dimensiones, muy afectado por las heterogeneidades y la anisotropía y con gran importancia de los flujos preferenciales, en el cual influyen la porosidad de las rocas y los suelos en la costa; las mareas; el espesor de la capa de agua dulce y su extracción mediante pozos, entre otros (Martínez-Pérez *et al.*, 2022).

Como indica Custodio (2017), el término intrusión marina tiene dos interpretaciones habituales: la estática que es la simple constatación de la presencia de agua salada en los acuíferos de la zona litoral, que puede ser natural o por algunas causas antrópicas. Entretanto, la dinámica hace referencia a un movimiento permanente o temporal de la cuña salina a lo largo del tiempo, al alterarse equilibrio natural de ambos tipos de flujos, generado principalmente por la extracción de aguas por bombeos cerca de la costa, provocando un descenso de la superficie piezométrica y en consecuencia la penetración de la cuña salobre adentro (López y Gómez, 2007). Como resultado, esta intrusión inducirá el aumento de la salinidad en las aguas subterráneas con la consiguiente contaminación del acuífero costero y la limitación de su aprovechamiento para determinados usos. Los acuíferos costeros se caracterizan generalmente por variaciones en la salinidad del agua subterránea en el espacio y el tiempo (Post y Abarca,

2010), debido a la interacción agua dulce y salada. Ambos líquidos son miscibles, por tal motivo su comportamiento en la interfaz no se presenta como un límite brusco, sino que se pasa de un fluido a otro a través de una zona de mezcla, también llamada de transición (Custodio y Llamas, 1976; Barlow, 2003).

Como consecuencia, la concentración de cloruro del agua subterránea puede variar de unos 250 a 19 000 mg/L. Por lo tanto, en acuíferos costeros, la intrusión marina provoca cambios fisicoquímicos notables (Langmuir, 1997; Liu *et al.*, 2017). Esto se debe a que la salinidad en un acuífero da lugar a la mezcla de dos fluidos de composiciones distintas, uno con alto contenido de cloruros y elementos alcalinos, característico del agua del mar; otro representado por agua dulce, generalmente rica en bicarbonatos y cationes alcalinotérreos (Custodio y Llamas, 1976).

La salinidad se puede definir de distintas maneras, al ser el método más común la medición del contenido en gramos de sales disueltas por kilogramo de agua (Cognetti *et al.*, 2001). Con base en la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT) se puede clasificar el agua en diferentes tipos, dependiendo de la cantidad de estas sales disueltas.

Como alternativa complementaria para cuantificar este parámetro comúnmente se utiliza el registro de conductividad eléctrica (CE), debido a su alta correlación con la concentración salina, y esto tiene que ver con la facilidad que posee la corriente eléctrica para atravesar una solución con sales disueltos, la cual es proporcional a la concentración de SDT, clasificándose el agua según su conductividad eléctrica (APHA, 2017), como se detalla en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de salinidad de agua en función de la conductividad eléctrica (CE)

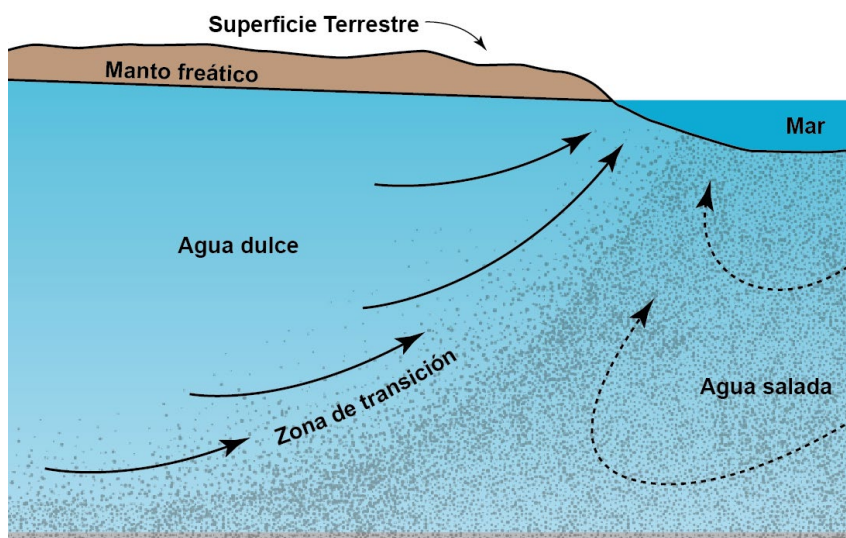
Tipo de salinidad	µS/cm
Dulce	<1 000
Ligeramente salina	1 000 a 3 000
Moderadamente salina	3 000 a 10 000
Salina	10 000 a 35 000
Muy salina	>35 000

Fuente: APHA (2017).

Estos valores de salinidad son clave para evaluar si un agua es apta para el consumo humano, necesita tratamiento, o debe descartarse para cierto tipo de uso. Se considera que la conductividad del agua dulce en condiciones normales suele ser baja, entre 50 y 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aunque puede aumentar según la cercanía a zonas industriales o agrícolas.

En la figura 4 se observa cómo se induce una circulación de agua salada desde el mar hacia la zona de transición y luego de regreso mediante la mezcla de agua dulce y salada en la zona mencionada (Barlow, 2003). La mezcla por dispersión, citando al mismo autor, es causada por variaciones espaciales (heterogeneidades) en la estructura geológica, las propiedades hidráulicas de un acuífero y por fuerzas dinámicas que operan en un rango de escalas de tiempo, incluyendo fluctuaciones diarias en los niveles de marea, variaciones estacionales y anuales en las tasas de recarga de agua subterránea y cambios a largo plazo en la posición del nivel del mar.

Figura 4. Patrones de flujo y zona de transición de agua dulce a agua salada en un acuífero costero idealizado



Fuente: adaptada de Barlow (2003).

Según los autores Custodio y Llamas (1976), los primeros estudios matemáticos de la posición de la cuña de agua marina en ausencia de mezcla en zonas costeras fueron realizados por Ghyben en 1889 y Herzberg

en 1901, considerando que existe el equilibrio estático entre columnas de fluidos de diferente densidad. Hipotéticamente, se asume que no hay movimiento de agua salada, que el agua dulce es perfectamente horizontal en un acuífero homogéneo e isótropo y la interfase es un plano, sin la zona de mezcla. En estas condiciones, en un punto cualquiera A (figura 5) de la interfase, debe equilibrarse la presión de ambas aguas, respondiendo a las siguientes ecuaciones 1 y 2:

$$(h_d + z) \gamma_d = z \gamma_s \quad (1)$$

$$z = (\gamma_d / (\gamma_s - \gamma_d)) h_d = h_d / \beta \quad (2)$$

Donde:

h_d = cota sobre el nivel del mar del agua dulce en la vertical del punto A (m)

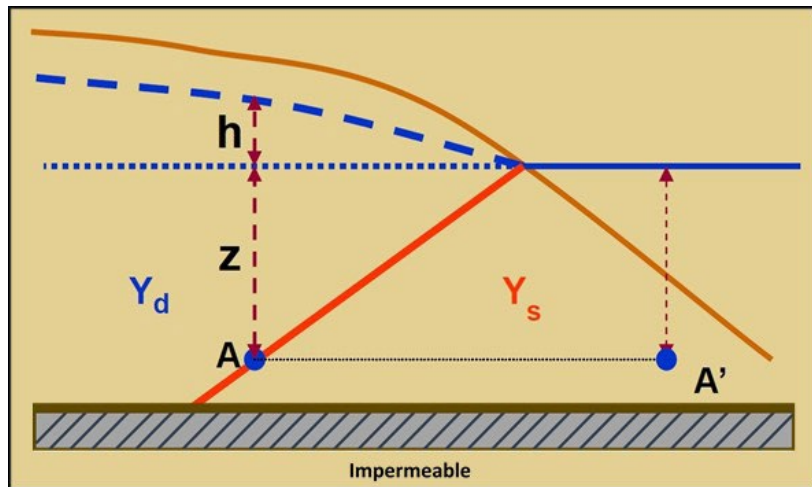
z = profundidad bajo el nivel del mar del punto A (m)

γ_d = peso específico del agua dulce = 1000 kg/m³

γ_s = peso específico promedio del agua salada = 1025 kg/m³

$1/\beta = \gamma_d / (\gamma_s - \gamma_d)$

Figura 5. Equilibrio hidrostático del agua dulce y marina en una zona costera



Fuente: adaptada de IGME (2009).

Aunque la diferencia entre la densidad del agua dulce y la de mar es pequeña, este contraste da como resultado, teóricamente, 40 metros de agua dulce por debajo del nivel del mar por cada metro de esta agua por

encima de la cota cero (Barlow, 2003). Esta fórmula (2) conlleva un error elevado en la zona próxima a la línea de costa, dado que en esta franja el flujo del agua dulce tiene una componente vertical importante. Por tanto, es más exacta a medida que se aleja de la parte litoral.

Para poder establecer la relación agua dulce-agua salada en acuíferos costeros y realizar los cálculos de la posición de la interfase, considerando que no existe una zona de mezcla, Glover en 1959 propuso un análisis más riguroso, aplicando la ecuación para la interfase que lleva su nombre y asume las siguientes condiciones (Custodio y Llamas, 1976):

- a) La interfase entre agua dulce y salada se considera como un plano, no existiendo zona de mezcla.
- b) El acuífero es confinado y su techo coincide con el nivel del mar.
- c) El agua dulce sale al mar por una superficie horizontal de longitud x_0 .
- d) El mar no sufre fluctuaciones de nivel y el agua salada en el acuífero es estática.
- e) El acuífero es de gran espesor, de modo que en la zona de estudio la interfaz no toca a la base de este.

De esta manera, la fórmula de Glover de la interfase viene dada por la ecuación 3 y el agua escapa al mar por una franja de ancho x_0 , cuyo valor es según la ecuación 4:

$$z^2 - (2 q_0 x / (\beta k)) - (q_0^2 / (k^2 \beta^2)) = 0 \quad (3)$$

$$x_0 = q_0 / (2 k \beta) \quad (4)$$

Donde:

x = distancia de un punto en estudio a la costa (m)

z = profundidad de la interfase bajo el nivel del mar (m)

q_0 = caudal de agua dulce hacia al mar por unidad de longitud de costa ($m^3/día/m$)

k = conductividad hidráulica (m/día)

$\beta = (\gamma_s - \gamma_d) / \gamma_d \approx 1/40 = 0.025$

A valores grandes de x , las ecuaciones de Glover y Ghyben Herzberg, tienden a dar los mismos resultados (Vélez, 2011). A pesar de que uno de los supuestos mencionados establece que el acuífero debe ser confinado, la fórmula de Glover también puede aplicarse sin gran error a acuíferos libres con pequeño gradiente piezométrico y con perfil del terreno suave en la zona costera.

La explotación de un acuífero costero supone alteraciones importantes de las condiciones de flujo, que dependen de distintos factores, como el tipo de acuífero, tamaño, sus parámetros hidráulicos, la recarga y las extracciones (bombeos), que afectan las relaciones entre el agua dulce y el agua salada (IGME, 2009). Además, estas relaciones en acuíferos costeros están muy influenciadas por los cambios en las condiciones que controlan la dinámica de las masas de agua, tales como las variaciones del nivel del mar y del nivel piezométrico del agua dulce (González *et al*, 2013).

Por lo tanto, sin una buena comprensión de los procesos asociados, no es posible interpretar correctamente las heterogeneidades de detalle que afectan en gran manera a las relaciones agua dulce-agua salada, pues a las dificultades habituales para un estudio del movimiento del agua subterránea, se suma la existencia de fluidos de diferentes densidades debido a que ambos tipos de agua son totalmente miscibles y originan mezclas que aumentan la dificultad de valoración de la dinámica de la intrusión salina (Custodio, 2017).

MARCO METODOLÓGICO

Para la evaluación del estado de avance de la intrusión marina en el acuífero costero del distrito de Las Tablas, se estableció una estructura metodológica de la investigación y sus principales fases, que comprendieron la recopilación e inventario de la información existente, sistematización y análisis de datos de campo generados por la ejecución de los estudios multidisciplinarios, que abarcaron las áreas de la geología, hidrogeología e hidrogeoquímica. Tras esta primera fase se realizó una exploración geológica y geofísica junto a un estudio hidrogeológico, que se detallan a continuación.

La distribución de los puntos de cateo fue establecida directo en campo durante la ejecución de los trabajos, en función de incidencias del terreno y su accesibilidad (figura 6).

La apertura máxima de electrodos, aplicada en el área de estudio, fue de AB/2 de 100 metros y de MN/2 de 20 metros. La resistividad aparente de los materiales que componen el subsuelo hasta una determinada

profundidad se calculó a través de coeficientes propios de cada arreglo geofísico con el uso de *software* W-GeoSoft/WinSev 6.4. En total fueron ejecutados 36 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), la mayoría de los cuales (22), están situados junto a los pozos existentes, lo que permitió calibrar el corte geoeléctrico con el litológico, así como delimitar la geometría del acuífero, formando una imagen tridimensional del bloque modelo litológico que constituye el área de estudio.

• Estudio hidrogeológico

El estudio hidrogeológico realizado como parte de las actividades de la investigación, tuvo por objetivo disponer de un conocimiento adecuado y completo del acuífero costero del distrito de Las Tablas, lo que fue posible lograr con la aplicación de las herramientas hidrodinámicas e hidroquímicas.

Debido a que la posición de la manto freático sobre el nivel del mar, así como sus características hidráulicas y químicas, son parámetros muy importantes en la valoración del avance de la intrusión marina en un acuífero costero, las actividades desarrolladas durante la ejecución del estudio comprendieron los registros de los niveles estáticos en captadores existentes en el área investigada, pertenecientes a las distintas instituciones gestoras del recurso hídrico, como el IDAAN, MIDA, MINSA y el sector privado. Además del monitoreo de los niveles freáticos en los pozos, se efectuaron cálculos de los parámetros del flujo subterráneo con el fin de valorar el potencial del depósito acuífero.

El coeficiente de permeabilidad (K) y la transmisividad (T) se determinaron mediante ensayos de bombeo. El marco conceptual dentro del cual se desarrollan estos cálculos hidráulicos ha sido el de las fórmulas de Theis y Jacob ([Custodio y Llamas, 1976](#)), de flujo radial laminar hacia un pozo en régimen de no equilibrio.

El medio acuífero investigado se considera de tipo freático, es decir, no-sujeto a presión de confinamiento y a su vez de característica granular. El coeficiente de transmisividad se calculó a partir del caudal de bombeo y de la pendiente de la recta de *tiempo – abatimiento*, aplicando la ecuación de Theis y Jacob:

$$T = 0.183Q/\Delta s \quad (5)$$

Donde:

T = Coeficiente de Transmisividad (m³/día/metro)

Q = Descarga del pozo de bombeo (m³/día)

Δs = Pendiente de la recta de diferencia de abatimientos entre dos valores (m)

El coeficiente de permeabilidad se calculó con la ecuación 6:

$$K = T/m \quad (6)$$

Donde:

K = Coeficiente de permeabilidad (m/día)

m = Espesor saturado del acuífero antes del bombeo (m)

Para la evaluación del flujo de las aguas subterráneas y la estimación de la recarga del acuífero, también se realizó el balance hídrico en el área de estudio, que se caracteriza por una hipsometría muy baja, típica de las llanuras cercanas al mar.

Este balance representa una evaluación del equilibrio entre las entradas y salidas de agua de un acuífero durante un período determinado. Se calculó mediante la aplicación del principio de conservación de la masa y considera la precipitación, la escorrentía directa, la infiltración, la recarga, la extracción de agua, la evapotranspiración y la intercepción por vegetación, así como lo que sale por infiltración somera.

Las investigaciones hidroquímicas se efectuaron para determinar la calidad y particularidades fisicoquímicas de las aguas subterráneas. Para tal fin se procedió a realizar el monitoreo de los pozos activos, midiendo aquellos parámetros que pueden relacionarse con un aumento de la salinidad en las aguas subterráneas: pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, salinidad y temperatura.

Los procedimientos de toma de muestra y ensayos para los análisis fisicoquímicos se realizaron con un analizador multiparamétrico (marca Hach), de acuerdo con la última versión del Estándar Methods for

Examination of Water and Wastewater APHAAWWA-WEF; tal cual se indica en el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 21-2019 (MICI, 2019).

Los muestreos, con fines de comparación de los parámetros, se ejecutaron en dos períodos climáticos, uno en marzo de 2024, durante la estación seca y otro, en junio de 2024, a lo largo de la temporada de lluvias. Además, con el fin de determinar el posible riesgo de contaminación del acuífero costero por la intrusión marina en el área de estudio, se realizaron los muestreos de agua y mediciones *in situ* de los pozos que integran la red de abastecimiento de agua para el consumo humano, operada por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAA), evaluando la conductividad eléctrica (CE) del agua, uno de los parámetros de mayor relevancia para los cálculos del avance de la cuña salobre.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se detallan los diferentes recursos aplicados en este proceso y los resultados obtenidos:

- **Exploración geológica y geofísica**

El análisis e interpretación de los patrones de resistividades eléctricas de los 36 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) realizados, revelaron que la secuencia estratigráfica del subsuelo consta de cinco capas geoelectricas, lo que permitió correlacionarlas y caracterizar las principales formaciones geológicas del área de estudio (tabla 2).

Tabla 2. Interpretación de la resistividad eléctrica de los SEV del área de estudio

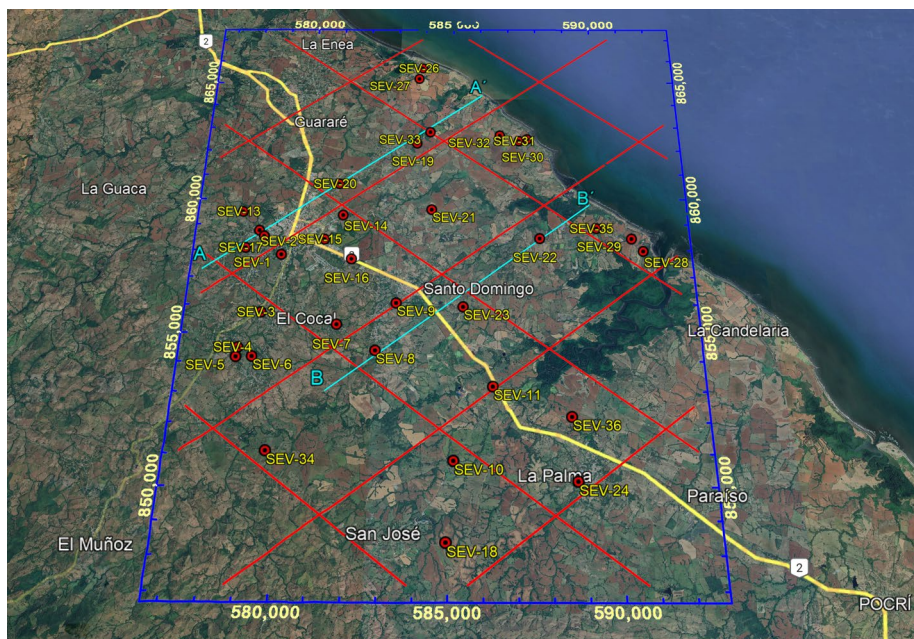
Capas	Rangos de resistividad, Ohm-m	Litología	Formación geológica
1	5 - 10	Lutita	Macaracas (TO-MAC)
2	15 - 35	Toba	
3	1,000 – 3,000	Cuarzodiorita	Valle Riquito (TEO-RIQ)
4	70 - 350	Basalto	Playa Venado (K-VE)
5	30 - 200	Aglomerado	

Fuente: elaboración propia.

Basándose en la interpretación litológica de capas geoelectricas, aplicando el *software* RockWorks, propiedad de RockWare Inc., se elaboró

un bloque modelo tridimensional del área de estudio que representa tipos de estas litologías interpolados y, además, se realizaron 10 cortes o diagrama de cercas del modelo litológico generado, de orientación paralela a la costa y a 90° hacia ella (figura 7).

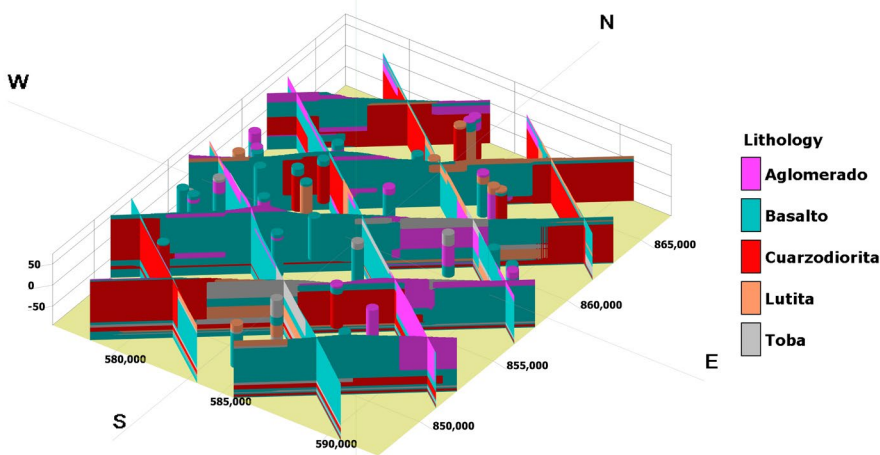
Figura 7. Secciones de cortes del bloque modelo litológico y de perfiles A-A' y B-B'



Fuente: elaboración propia.

Con la generación de este modelo litológico fue posible cuantificar los volúmenes de los distintos materiales que componen el reservorio subterráneo de la zona costera del distrito de Las Tablas, así como también definir su posición espacial dentro de este (figura 8).

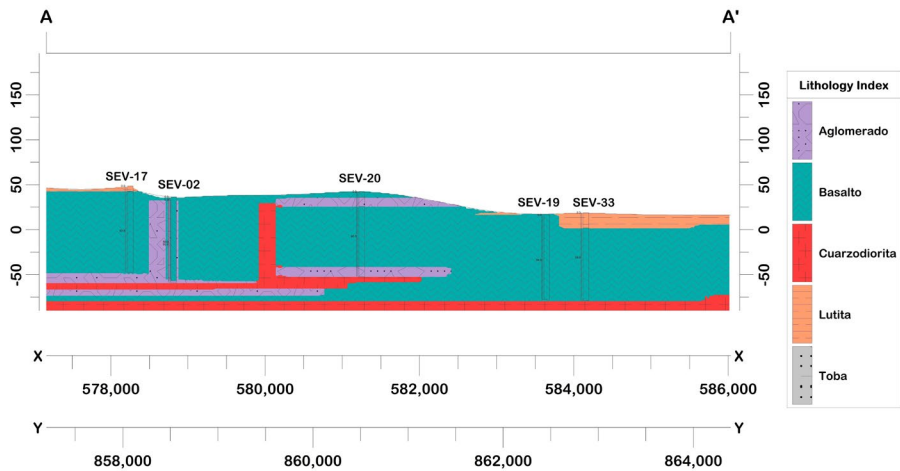
Figura 8. Diagrama de cercas del bloque modelo del acuífero costero del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

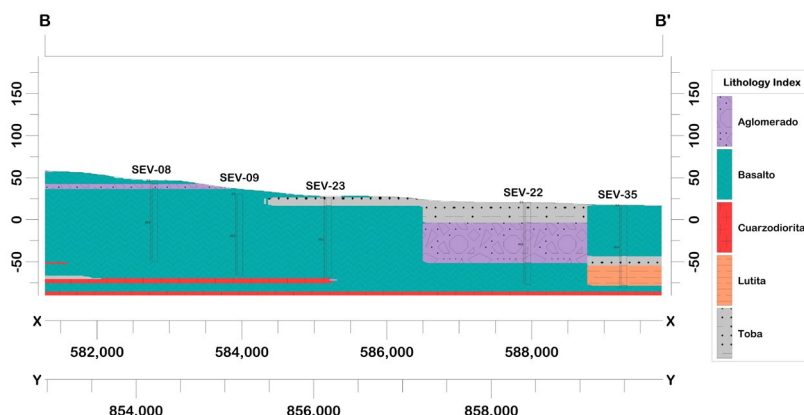
Para validación de la información obtenida con la exploración geoelectrónica, se realizaron dos cortes litológicos perpendiculares a la costa A-A' y B-B' (figuras 9 y 10).

Figura 9. Corte litológico A-A' del área de investigación



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Corte litológico B-B' del área de investigación



Fuente: elaboración propia.

Ambos perfiles confirmaron la posición del muro o de la base del acuífero, que está a unos -75 metros bajo el nivel del mar. Además, se identificó una falla geológica menor, que va paralela a la costa a unos 3 kilómetros tierra adentro. Concretamente, se observa un desplazamiento de bloques en la sección B-B', entre los SEV-22 y SEV-35.

El resultado final de la exploración geológica y geofísica realizada permitió visualizar el medio acuífero de la zona costera del distrito de Las Tablas, tanto en el plano vertical como en el horizontal. Desde el punto de vista hidrogeológico, es conveniente hacer una breve reseña de las disposiciones de las tres capas litológicas más relevantes y su papel en el funcionamiento del acuífero costero: cuarzodiorita, lavas basálticas y aglomerado, así como también de otras dos capas presentes, toba y lutita, que se expondrán a continuación.

• Estudio hidrogeológico

1. Características hidrogeológicas de los materiales de la zona

Para comprender las condiciones hidrogeológicas predominantes y determinar el potencial, así como afectación de agua subterránea por la intrusión marina en la zona costera del distrito de Las Tablas, fueron interpretadas las cinco capas geoelectricas del subsuelo (tabla 3) detectadas por la exploración geofísica.

Tabla 3. Caracterización de las unidades hidrogeológicas del área de estudio

Formación geológica	Capas litológicas	Descripción
Playa Venado (K-VE)	Lavas basálticas	Este material fue de mayor relevancia acuífera, por su abundancia en el espesor saturado. Sus condiciones de formación, con características de rápido enfriamiento en ambiente marino, generan estructuras como pillow lavas, formando vesículas de material, dándole mayor porosidad, así como un mayor diaclasamiento.
	Aglomerado	Representa un medio acuífero moderado de permeabilidad secundaria. El agua contenida en este material es producto de discontinuidades interconectadas, tales como fallas, grietas, fisuras y diaclasas, que permiten en el nivel macroscópico tener un flujo de agua homogéneo. La disposición espacial de esta capa litológica en el modelo generado, asociada con el basalto, es coherente con su génesis más común.
Valle Riquito (TEO-RIQ)	Cuarzodiorita	Roca intrusiva que constituye la base impermeable o el piso del área de estudio, la que da forma a la zona acuífera.
Macaracas (TO-MAC)	Toba	Material representado por ceniza volcánica con diferentes grados de consolidación y dureza. Como medio acuífero se caracteriza por tener muy baja permeabilidad, lo que conduce en general a los pozos con rendimiento muy limitado o nulo.
	Lutita	Roca sedimentaria de grano muy fino, integrada por detritos clásticos constituidos por partículas de la arcilla y del limo. Se considera como un material prácticamente impermeable, debido a que sus poros son muy pequeños y no están comunicados entre ellos.

Fuente: elaboración propia.

Del análisis de estas cinco capas litológicas ya descritas en la tabla 3, se pudo inferir que el acuífero costero está representado por dos estratos más productivos, tales como el aglomerado y basalto, de la formación Playa Venado (K-VE). Mientras tanto, la capa de cuarzodiorita impermeable de la formación Valle Riquito (TEO-RIQ), sirve de muro o base del acuífero. Las tobas y lutitas de la formación sedimentaria Macaracas (TO-MAC), tienen muy poca relevancia en este sistema acuífero.

2. Balance hídrico del acuífero o reposición anual

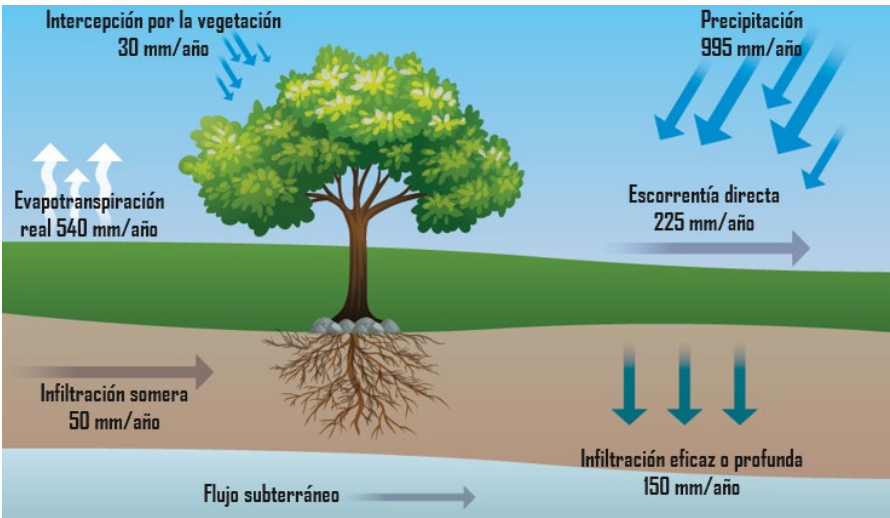
Para la evaluación del flujo de las aguas subterráneas en la zona de estudio, se realizó el balance hídrico del acuífero, estimando su recarga media o infiltración profunda en 150 mm/año, lo que equivale a un volumen de 27 hm³/año para un área de infiltración efectiva global de 180 km² (tabla 4 y figura 11).

Tabla 4. Balance hídrico del área de investigación

Precipitación (P)	+	995 mm/año
Escorrentía directa (ESC)	-	225 mm/año
Intercepción por vegetación (P x 0.03)	-	30 mm/año
Flujo subsuperficial (P x 0.05)	-	50 mm/año
Evapotranspiración real (ETR)	-	540 mm/año
Infiltración eficaz o profunda	=	150 mm/año

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Balance hídrico del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo de la evapotranspiración real anual (ETR) se utilizó la fórmula de Turc, (Custodio y Llamas, 1976). El valor de escorrentía directa (ESC) para el área evaluada fue tomando del Atlas Nacional de la República

de Panamá (IGNTG, 2007), mientras los coeficientes para el cálculo de la interceptación y flujo subsuperficial han sido estimados considerando el grado de alteración de la vegetación original, principalmente por la deforestación para fines agrícolas o ganaderos de la parte baja de la cuenca (ANAM, 2008).

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

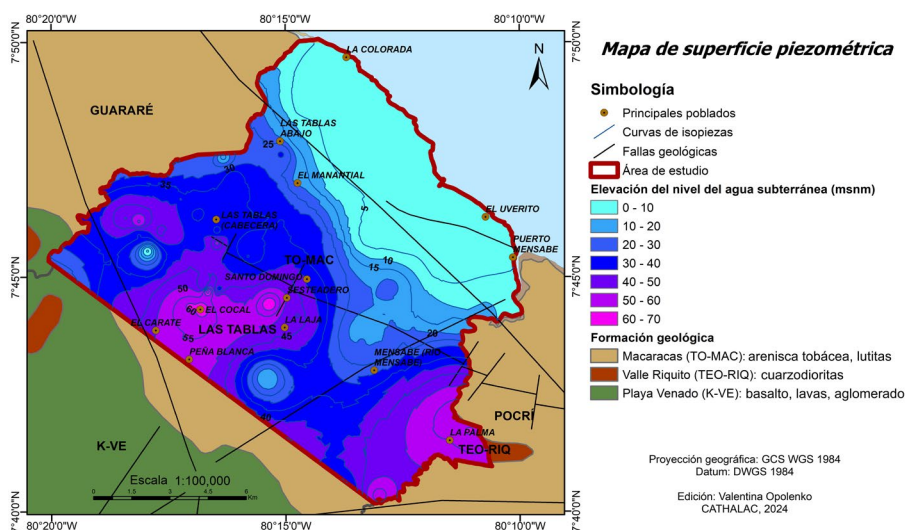
Con el procesamiento de la información obtenida de instituciones rectoras del recurso hídrico en el país, se estimó que el volumen promedio anual de extracción del agua subterránea en el área de investigación para el abastecimiento urbano e industrial fue aproximadamente de 4 hm³/año.

Entretanto, el uso de agua para actividades agrícolas estuvo por el orden de 16 hm³/año. Como resultado, el total de estos volúmenes de extracción es de 20 hm³/año, lo que representa el 74 % de la recarga anual del acuífero, que es el 27 hm³/año. Para estimar el nivel del estrés hídrico sobre el área del proyecto, se aplicó la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO and UN Water, 2021), que utiliza los volúmenes anuales de extracción del agua subterránea con respecto a los aportes por infiltración efectiva, teniendo las siguientes categorías de valoración: sin estrés (<25 %); bajo (25 % – 50 %); medio (50 % – 75 %), alto (75 % – 100 %) y crítico (>100%). Según esta clasificación el valor obtenido del déficit hídrico de la zona evaluada es “medio” y genera una alerta temprana, ya que se encuentra muy próximo a pasar al rango de estrés “alto”, lo que indica que se podrían producir descensos importantes de los niveles piezométricos y problemas de intrusión marina.

3. Monitoreo de la red de pozos

Durante la realización del estudio hidrogeológico, fueron monitoreados 77 pozos existentes, y a partir de los niveles freáticos determinados en la red de muestreo, se elaboró el mapa de superficie piezométrica (figura 12), que luego se utilizó para establecer el gradiente hidráulico y la dirección de flujo del sistema acuífero local.

Figura 12. Mapa de superficie piezométrica del área de estudio

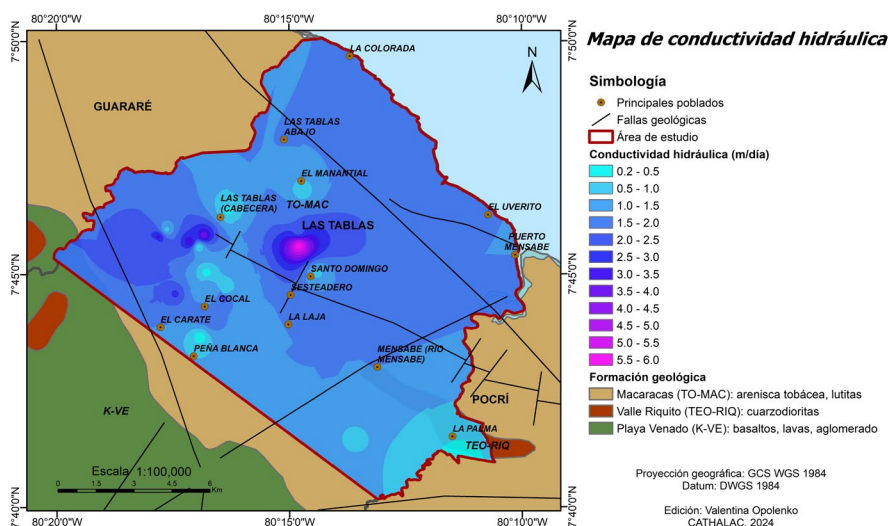


Fuente: elaboración propia.

La zona suroeste del área de estudio se caracteriza por tener los mayores valores de elevación del nivel del agua subterránea con más de 60 msnm, mientras que hacia el noreste la capa freática desciende progresivamente. No obstante, en la parte sureste también se distinguen algunos conos de depresión causados por bombeos intensos de los pozos que abastecen a las comunidades para sus distintos usos. Además, se observa una franja costera de unos 3 km de anchura con valores del nivel freáticos menores de 5 msnm. Acorde con estas características, una gran parte del territorio evaluado se define como zona de descarga de acuíferos, con la dirección del flujo noreste hacia el mar y un gradiente hidráulico de $i = 0.56 \%$.

Los datos de pruebas de bombeo analizados permitieron definir el parámetro de la conductividad hidráulica (K) del acuífero costero, con valores promedios de $K=1.5-2.0$ m/día (figura 13), que son coherentes con el tipo de rocas como aglomerados y basaltos fracturados, con permeabilidad secundaria limitada (Custodio y Llamas, 1976). Por lo tanto, se pudo clasificar al acuífero evaluado como “pobre”, concordando con el mapa Hidrogeológico de Panamá (ETESA, 1999).

Figura 13. Mapa de conductividad hidráulica del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

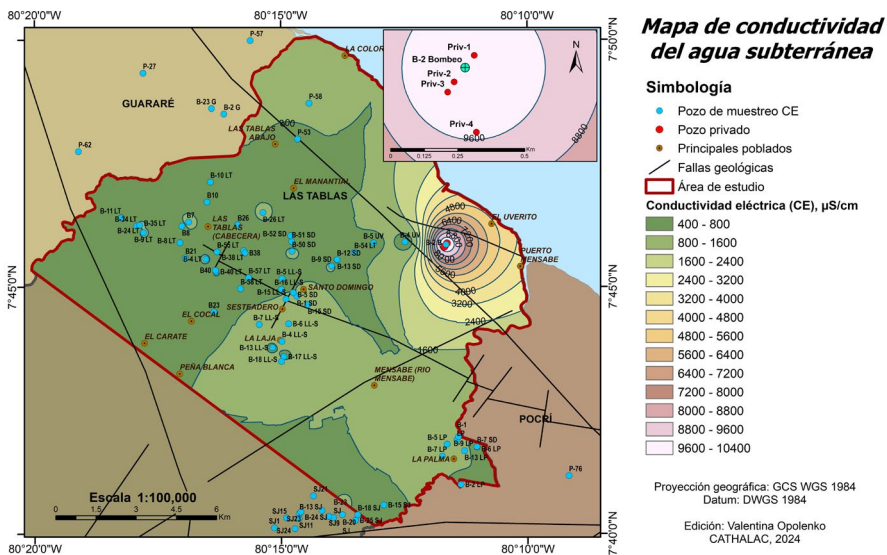
4. Muestreo hidroquímico de pozos

Para determinar el posible riesgo de contaminación del acuífero costero por la intrusión marina en el área de estudio, se realizaron muestreos y mediciones *in situ* de los 77 captadores que integran la red de abastecimiento de agua potable y otros usos, operada por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados (IDAAN).

El parámetro que aportó la información relevante y evidencia de la salinización del acuífero fue la conductividad eléctrica. En la mayoría de los pozos estos valores variaron entre 400 y 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y se encuentran dentro del rango establecido por la normativa nacional vigente sobre la calidad del agua para el consumo humano, cuyo límite máximo permitido es de 850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 21-2019). Sin embargo, algunos de los captadores muestreados, principalmente en las comunidades de San José, Santo Domingo y La Palma, a pesar de estar localizados a una distancia considerable de 8-10 km de la línea de la costa, registraron valores de conductividad eléctrica por encima del límite máximo permitido, lo que puede explicarse probablemente por la existencia de actividades agrícolas intensivas, con el riego y fertilización en la zona.

Por otra parte, los datos de la calidad del agua obtenidos durante la realización de la prueba de bombeo en el pozo B-2 Bombeo, localizado en el área próxima a la costa a unos 1.5 km de la comunidad El Uverito, indican valores de conductividad eléctrica (CE) por encima de los 10 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que representa un fuerte indicativo de posible contaminación por la intrusión marina en el acuífero costero en la zona (figura 14).

Figura 14. Mapa de conductividad eléctrica (CE) del agua subterránea del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

El alto valor de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el sector, que se caracteriza por ser una zona pantanosa salobre influenciada por las mareas, con relieve prácticamente plano y ecosistema de manglares, se debe probablemente a la explotación de varios pozos privados para el uso de ganadería porcina. Además, se observa la presencia de una falla geológica menor, que conecta el área evaluada con el mar (Puerto Mensabé) y que es un posible conducto para la intrusión salina al área de los pozos.

- **Cálculo de la profundidad de la interfase en condiciones naturales**

Para el cálculo de la relación agua dulce–agua salada, correspondiente a la posición de la interfase en el acuífero costero del distrito de Las Tablas en condiciones naturales (ausencia de extracción de agua), fue aplicada la fórmula de Glover expuesta en la metodología.

Tomando en consideración que el espesor del acuífero evaluado en el área del proyecto es de $h = 75$ m, la conductividad hidráulica media $K = 2$ m/día y el gradiente hidráulico $i = 0.56$ %, se determinó el flujo de agua dulce que se descarga al mar por unidad de longitud de costa, siendo $q_0 = k * h * i = 0.84$ m³/día/m. En estas condiciones la profundidad de la interfase agua dulce-agua salada bajo el nivel del mar (z) del acuífero costero del distrito de Las Tablas a una distancia (x) fue la siguiente, según la ecuación 3:

$$z^2 - \frac{2 * 0.84 * 40}{2.0} x - \frac{0.84^2 * 40^2}{2.0^2} = 0$$

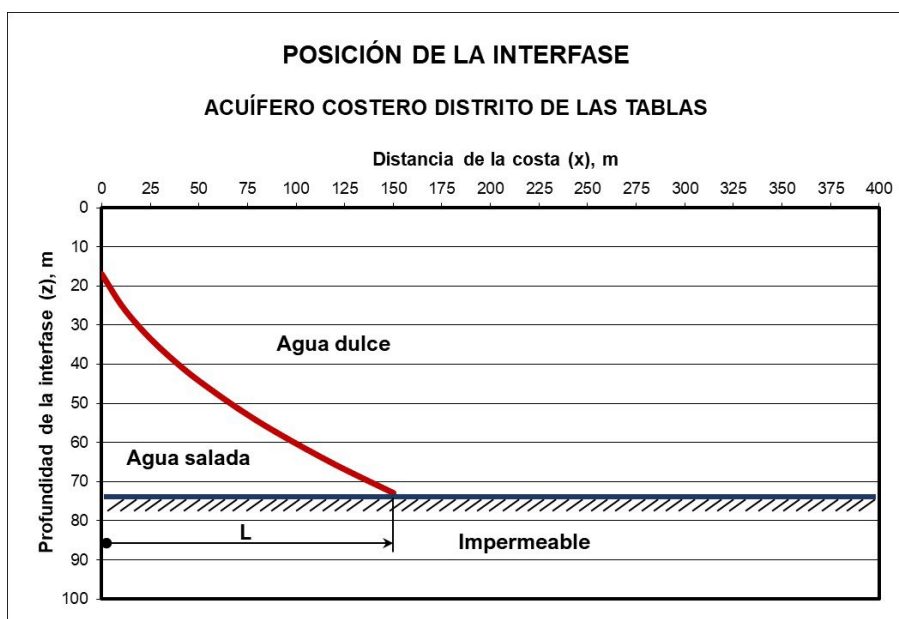
Dando como resultado:

$$z^2 = 33.6 x + 282.24$$

En la figura 15 se muestran los resultados de graficar los valores de la ecuación obtenida para una profundidad máxima de la interfase de -75 m bajo el nivel del mar, donde la cuña de agua salada tocaría la base impermeable del acuífero. La penetración máxima de la intrusión marina en condiciones naturales (L) es de 150 m.

Esta información es fundamental para la futura gestión sostenible del acuífero costero del distrito de Las Tablas. Además, conociendo en forma aproximada la profundidad de la interfase, se puede determinar el caudal de extracción de equilibrio que mantendrá bajo control un ascenso crítico de un eventual domo salobre en los pozos en el sector explotado. Además, se deberá tener en cuenta la prevista elevación del nivel del mar por el cambio climático, lo que favorecerá los procesos de intrusión marina en el futuro (Tarollin *et al.*, 2023)

Figura 15. Posición de la interfase de agua dulce-agua salada del área de estudio en condiciones naturales.



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

El área de estudio, que representa la parte baja del distrito de Las Tablas, se caracteriza por el crecimiento socioeconómico y agroindustrial, con una notable expansión demográfica y turística. La investigación realizada permitió concluir que los recursos hídricos que abastecen todas estas actividades, en su gran parte son subterráneos.

Con los resultados obtenidos a partir del estudio geológico y geofísico fue posible caracterizar la geometría y resistividad eléctrica de los materiales en el área de estudio, identificándose cinco unidades principales que son: lavas basálticas, aglomerado, cuarzodiorita, tobas y lutita. Basándose en la interpretación litológica de estas capas geoelectricas, se elaboró un bloque modelo tridimensional, con diagrama de cercas y perfiles litológicos, lo que permitió cuantificar los volúmenes de los distintos materiales que componen el reservorio subterráneo de la zona costera investigada, así como también definir su posición espacial dentro de este.

Los dos estratos con un mayor potencial hidrogeológico y, por tanto, más productivos son de aglomerado y, sobre todo, basalto. Mientras tanto, el cuarzodiorita impermeable sirve de muro o base del acuífero, y las otras dos capas (tobas y lutitas), tienen muy poca relevancia en este sistema acuífero.

El mapa de superficie piezométrica pone de manifiesto que la parte suroeste del área de estudio se caracteriza por tener los mayores valores de elevación del nivel del agua subterránea con más de 60 msnm, que descienden progresivamente hacia el sector noreste. También se observa una franja costera de unos 3 km de anchura con valores de altura de la capa freática menores de 5 msnm. Acorde con estas características, una gran parte del territorio se define como zona de descarga de acuíferos, con la dirección del flujo noreste hacia el mar y un gradiente hidráulico de $i = 0.56 \%$. Entretanto, con los datos de las pruebas de bombeo, se pudo definir la conductividad hidráulica promedia del acuífero costero evaluado $K = 1.5\text{-}2.0$ m/día. Estos valores permitieron clasificarlo como un “acuífero pobre”, concordando con el mapa Hidrogeológico de Panamá.

El mapa de los valores de conductividad eléctrica revela que en la mayoría de los captadores monitoreados los valores de conductividad se sitúan entre 400 y 800 $\mu\text{S/cm}$, estando dentro del rango establecido por la normativa, cuyo límite máximo permitido es de 850 $\mu\text{S/cm}$. Sin embargo, algunos de los pozos muestreados, localizados a una distancia considerable de 8-10 km de la línea de la costa, registraron valores de conductividad del agua un poco elevados, entre 850 y 1 200 $\mu\text{S/cm}$. Esta situación probablemente corresponde a la ubicación de los mismos en una zona con intensas actividades agrícolas, y no necesariamente se adjudica a la contaminación que podría ser generada por el fenómeno de la intrusión marina.

Por otra parte, es relevante resaltar que, a pesar de que la calidad química de las aguas subterráneas en el área de estudio es generalmente buena, sí existen problemas puntuales de intrusión marina en la parte sureste de la franja costera, con valores de conductividad eléctrica por encima de los 10 000 $\mu\text{S/cm}$.

Se trata de pozos dedicados al uso agropecuario, ubicados en una zona que se caracteriza por la presencia de pantanos salobres afectados por las fluctuaciones de mareas, con relieve prácticamente plano, típico del ecosistema de manglares. En esta zona existe una falla que ha podido contribuir a la penetración del agua de mar tierra adentro.

Se ha determinado que la penetración máxima de la cuña salobre tierra adentro en condiciones naturales (sin explotación del acuífero) es de unos 150 metros. No obstante, estas condiciones pueden ser fácilmente perturbadas si se altera el equilibrio natural entre el agua dulce-agua salada debido al aumento de la demanda, así como la incidencia climática.

Este estudio pionero a escala local en Panamá ha puesto de manifiesto que las aguas subterráneas tienen un gran valor en la solución de problemas de escasez hídrica de la región, pero son sensibles a la intrusión marina y contaminación. Ello servirá de base para las entidades que gestionan los recursos hídricos, no solo en el área de estudio, sino también en el nivel nacional, para tomar decisiones acertadas, así como brindar información necesaria a los usuarios para una adecuada utilización y protección de dichos recursos.

AGRADECIMIENTOS

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, del 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.

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

A un revisor anónimo, que ha contribuido con sus observaciones y comentarios a la mejora del manuscrito original.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Public Health Association (APHA). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition*. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation. ISBN: 9781625762405
- Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM). (2008). *Balances hídricos mensuales oferta-demanda por cuencas hidrográficas y propuesta de modernización de las redes de medición hidrometeorológica*. Documento Técnico. Panamá.
- Barlow, P. (2003). *Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast*. Circular 1262. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- BBC Mundo. (2012). *Cambio climático: el agua subterránea será cada vez más vital*. La British Broadcasting Corporation (Corporación Británica de Radiodifusión), Reino Unido. <https://www.bbc.com/mundo/institucional-36400007>
- Catastro Rural de Tierras y Aguas (CATAPAN). (1968). *Geología. Volumen III*. Comisión de Reforma Agraria. República de Panamá.
- Cognetti, G., Sará, M. y Magazzú, G. (2001). *Biología marina*. Editorial Ariel, S. A. Barcelona. ISBN: 84-344-8031-X
- Comité Científico COP25. (2019). *Océano y cambio climático: 50 preguntas y respuestas*. Santiago, Chile.
- Custodio, E. (2013). La complejidad de la intrusión marina en los acuíferos costeros en la práctica hidrogeológica. *Temas actuales de la hidrología subterránea 2013*, p. 367 -378. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/104214>
- Custodio, E. (2017). *Salinización de las aguas subterráneas en los acuíferos costeros mediterráneos e insulares españoles*. UPC-CETAQUA. Barcelona. ISBN 978-84-9880-687-8
- Custodio, E. y Llamas M. R. (1976). *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona.
- Dirección General de Recursos Minerales (DGRM). (1991). *Mapa Geológico de la República de Panamá; Escala 1:250000*. Panamá: Ministerio de Comercio e Industrias (MICI), República de Panamá.

- Empresa de Transmisión Eléctrica (ETESA). (1999). *Mapa Hidrogeológico de la República de Panamá*. Gerencia de Hidrometeorología de ETESA, República de Panamá.
- FAO and UN Water. (2021). *Progress on Level of Water Stress. Global status and acceleration needs for SDG Indicator 6.4.2, 2021*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb6241en>
- González, N., et al. (2013). *Temas actuales de la hidrología subterránea*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. 367-378. ISBN: 978-987-1985-03-6
- Hamlington, B. D., Bellas-Manley, A., Willis, J. K. et al. (2024). The rate of global sea level rise doubled during the past three decades. *Commun Earth Environ* 5, 601. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01761-5>
- Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria). (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*. Ministerio de Ambiente, Panamá.
- Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia” (IGNTG). (2007). *Atlas Nacional de la República de Panamá*. Panamá: Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia”.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (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. España. https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Documents/Plan-Hidrologico-cuenca-2021-2027/Documentos-iniciales/Referencia%20bibliografica/IGMA-DGA,2009_INDICE_SITE_EstadoIntrusi%C3%B3n.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2023). *XII Censo de Población y VIII de Vivienda 2023*. Resultados Finales Básicos. Panamá. <https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default.aspx>
- IPCC. (2019). *Calentamiento global de 1,5 °C*. Resumen para responsables de políticas. OMM/ PNUMA. ISBN 978-92-9169-351-1. <http://www.ipcc.ch/>

- Langmuir, D. (1997). *Aqueous environmental geochemistry*. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458. ISBN: 0-02-367412-1
- Liu, Y., Jiao, J. J., Liang, W., Kuang, X. (2017). Hydrogeochemical characteristics in coastal groundwater mixing zones. *Applied Geochemistry* 85; 49-60.
- López, J. y Gómez, J. (2007). La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos españoles. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 15.3, pp. 266-273.
- Martínez-Pérez, L., Luquot, L., Carrera, J., Marazuela, M. A., Goyetche, T., Pool, M., Andrea Palacios, A., Bellmund, F., Ledo, J., Ferrer, N., del Val, L., Pezard, P. A., Feliu, M. D., Rodellas, V., Saalting, M. W., Vazquez-Suñé, E., Folch, A. (2022). A multidisciplinary approach to characterizing coastal alluvial aquifers to improve understanding of seawater intrusion and submarine groundwater discharge. *Journal of Hydrology* 607: 127510, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169422000853>
- Ministerio de Ambiente (MiAMBIENTE). (2020). *Plan Nacional de Sequía para Panamá*. Comité Nacional de Lucha Contra la Sequía y Desertificación – CONALSED. [https://www.unccd.int/sites/default/files/country_profile_documents/Plan Nacional contra la Sequia.pdf](https://www.unccd.int/sites/default/files/country_profile_documents/Plan%20Nacional%20contra%20la%20Sequia.pdf)
- Ministerio de Comercio e Industrias (MICI). (2019). *Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 21-2019 Tecnología de Alimentos/Agua Potable. Definiciones y Requisitos Generales*. Publicado en Gaceta Oficial 20 de mayo de 2019. <https://mici.gob.pa/wp-content/uploads/2021/12/21rt-dgnti-copanit-21-2019-1.pdf>
- Opolenko, V. (2016). *Sensibilidad medioambiental a la desertificación en la cuenca del río La Villa, República de Panamá* [Tesis doctoral. Universidad Internacional de Andalucía], España. Repositorio Institucional UNIA <https://doi.org/10.56451/10334/3687>
- Post, V. y Abarca, E. (2010). Preface: Saltwater and Freshwater Interactions in Coastal Aquifers. *Hydrogeology Journal* 18, 1-4. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0561-9>
- Tarollin P., Luon J., Straffelini, E., Liou, Y. A., Nguyen, K. A., Laurenti, R. et al. (2023) *Saltwater intrusion and climate change impact on coastal agriculture*. PLOS Water 2(4): e0000121.

- Vélez O. M. (2011). *Hidráulica de aguas subterráneas*. Tercera Edición. Universidad Nacional de Colombia. ISBN: 958-9352-15-4
- Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E. A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T. & Barry, D.A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51, 3–26.
- World Meteorological Organization (WMO). (2024). *Greenhouse Gas Bulletin*. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023. ISSN 2078-0796