

Modelo hidrogeofísico conceptual mediante inversión de datos Electromagnéticos Transitorios (TEM) para La Isla de Tierra Bomba, Bolívar, Colombia.

Ángel Fabián Salazar Álvarez

Trabajo de Investigación para Optar al Título de Magíster en Geofísica

Director

Sergio Andrés García-Arias

Geólogo Mgtr.

Codirector

José David Sanabria Gómez

Físico PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Maestría en Geofísica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Pensar en terminar sólo era el comienzo de la difícil y muy importante aventura también llamada “hacer una maestría mientras trabajo”, por eso esta dedicatoria va a todos y cada uno de los personajes que directa o indirectamente estuvieron presentes en este proceso, mi Familia, porque me hicieron entender la palabra “incondicionalidad”. A mis mejores amigos Jesús y Leidy, un cactus y un bonsai, si de amistad conversamos. A mis compañeros de estudio de la maestría y de paso de vida Latorre, Lorena, Víctor y Álvaro. A Keth, Angie y Julietd, por presionar para que esto saliera adelante. A Fernanda, por su apoyo y paz en mis batallas más duras. A mis amigos en general, que, con un aliento, una sonrisa y/o un empujón, me enseñaron a cruzar, pedalear, remar y continuar con este arduo y tedioso camino. Considero que la meta es importante, pero el proceso y los que intervienen en el mismo hacen todo más importante y trascendental.

¡Gracias Totales!, como dijo Adrián.

Agradecimientos

Agradezco inicialmente a mi director Sergio Andrés García-Arias, por su acompañamiento, dedicación y esfuerzo, ya que fueron claves en mi crecimiento académico y profesional.

Al profe José Sanabria, por su apoyo y orientación en los momentos decisivos en pro de culminar con éxito este proyecto de investigación.

A la Universidad Industrial de Santander, el *alma mater*, proveedora de insumos intelectuales en diversas fases de mi vida académica y profesional.

A CARDIQUE e Hydroingenieria S.A.S., que en conjunto fueron de gran apoyo gracias a los insumos y equipos brindados para el desarrollo de este proyecto.

A Novambientti S.A.S., empresa en la cual al momento de finalizar este proyecto de investigación me brindó herramientas y espacios para poder culminar con satisfacción este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Localización	17
3. Marco teórico	18
3.1 Marco geológico regional	18
3.1.1 Estratigrafía.....	19
3.1.2 Formación la Popa (Qpp).....	19
3.1.2.1 Litología.....	20
3.1.2.2 Posición estratigráfica y edad.	22
3.1.3 Depósitos de Playa (Qmp)	22
3.1.3.1 Nivel superior (Qmpa).....	22
3.1.3.2 Nivel inferior (Qmpb).....	23
3.2 Marco hidrogeológico.....	25
3.2.1 Hidrogeología regional	25
3.2.2 Hidrogeología costera.....	29
3.2.3 Características fisicoquímicas del agua subterránea.....	33
3.3 Marco hidrológico.....	36
3.3.1 Características morfométricas de la isla Tierra Bomba	36

3.3.2	Análisis de la información hidrometeorológica	36
3.3.2.1	Precipitación (P).....	36
3.3.2.1.1	Análisis Temporal de la Precipitación	37
3.3.2.1.2	Análisis Espacial de la Precipitación	38
3.3.2.2	Temperatura (T)	39
3.3.2.2.1	Análisis Temporal de la Temperatura.....	39
3.3.2.3	Evapotranspiración	42
3.4	Marco geofísico	43
3.4.1	Leyes de Maxwell.....	45
3.4.2	Sondeos Electromagnéticos Transitorios (TEM).....	46
3.4.3	Consideraciones y limitaciones en la exactitud	50
3.5	Modelamiento directo e inversión de datos geofísicos.....	52
4.	Metodología	59
4.1	Etapa 1	60
4.1.1	Proceso de adquisición geofísica	61
4.2	Etapa 2	63
4.3	Etapa 3	66
4.4	Etapa 4	67
5.	Resultados.....	67
5.1	Actividades de campo.....	68
5.2	Modelación directa.....	68
5.3	Inversión de datos electromagnéticos - TEM	75

5.4	Modelos geológicos – geofísicos	76
5.4.1	Modelos unidimensionales.....	77
5.4.2	Cortes geológicos – geofísicos.....	80
5.4.3	Modelación hidrogeológica conceptual	84
5.4.3.1	Unidades hidrogeológicas.....	84
5.4.3.1.1	Rocas y/o sedimentos con flujo esencialmente intergranular / porosidad primaria..	85
5.4.3.1.2	Rocas porosas y/o fracturadas / porosidad primaria y/o secundaria.	88
5.4.3.2	Modelos y esquemas hidrogeológicos.	91
5.5	Divulgación de resultados.....	93
6.	Discusión	94
7.	Conclusiones	97
8.	Recomendaciones	99
9.	Referencias bibliográficas	
10.	Apéndices	

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Definición de unidades de análisis hidrogeológicos</i>	27
Tabla 2 <i>Clases de salinidad del agua subterránea en función de la conductividad eléctrica</i>	32
Tabla 3 <i>Concentraciones promedio de principales constituyentes del agua marina</i>	34
Tabla 4 <i>Pozos reconocidos en la isla de Tierra Bomba</i>	35
Tabla 5 <i>Rangos de valores de resistividad para las unidades geológicas, isla de Tierra Bomba</i>	77
Tabla 6 <i>Parámetros medidos y calculados para la unidad hidrogeológica Qmpb - A2</i>	87
Tabla 7 <i>Parámetros medidos y calculados para la unidad hidrogeológica Qpp – B1</i>	90

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Columna estratigráfica levantada para la Formación La Popa en la perforación realizada por la empresa Colclinker</i>	18
Figura 2 <i>Columna estratigráfica levantada para la Formación La Popa en la perforación realizada por la empresa Colclinker</i>	21
Figura 3 <i>Mapa geológico a escala 1:100.000 para la isla de Tierra Bomba</i>	24
Figura 4 <i>Provincias y Sistemas Hidrogeológicos donde se distribuye el área de estudio</i>	29
Figura 5 <i>Representación idealizada de la cuña marina que intruye en un acuífero libre costero</i>	30
Figura 6 <i>Relación entre la resistividad del fluido intersticial y la resistividad total del sistema fluido-roca</i>	32

Figura 7. *Temperatura media anual en la estación hidrometeorológica Escuela Naval CIOH (1981-2010).*..... 40

Figura 8. *Boxplots de temperatura media mensual multianual para la estación Escuela Naval CIOH. Temperaturas más altas (Cuadro Rojo) - Temperaturas más bajas (Cuadro Azul)*..... 41

Figura 9. *Estimación de la ETP para la isla de Tierra Bomba usando varios métodos. Temperaturas más altas (Cuadro Rojo) - Temperaturas más bajas (Cuadro Azul).*..... 42

Figura 10 *Principio operativo del método TEM* 47

Figura 11 *Señales producidas y medidas mediante el método TEM.* 48

Figura 12 *Rangos de resistividad eléctrica de rocas y sedimentos.* 50

Figura 13 *Representación de la curva de decaimiento del voltaje respecto al tiempo.*..... 55

Figura 14 *Curva de resistividad aparente (pa) vs. Tiempo (t).*..... 57

Figura 15 *Resultado de la inversión suavizada ID.* 58

Figura 16 *Resultado de la inversión robusta ID.* 59

Figura 17 *Metodología para generación de modelo hidrogeofísico conceptual*..... 60

Figura 18 *Partes del equipo WalkTEM*..... 62

Figura 19 *Esquema de campo para adquisición de datos TEM mediante equipo WalkTEM.* 62

Figura 20 *Distribución y geología de la prospección geofísica mediante el método TEM.*..... 63

Figura 21 *Esquema de la hipótesis asociado al presente proyecto de investigación* 64

Figura 22 *Modelamiento teórico directo preliminar mediante diversas hipótesis* 69

Figura 23 *Modelamiento directo TEM para el Caso 1 con 1% error* 72

Figura 24 *Modelamiento directo TEM para caso 1 con 10% de error* 73

Figura 25 *Modelamiento directo TEM para caso 1 con 20% de error* 74

Figura 26 <i>Inversión del TEM_09 realizada con el software SPIA y ZONDTEM1.</i>	76
Figura 27 <i>Distribución de los cortes geológicos – geofísicos por sectores teniendo en cuenta la información geológica.</i>	81
Figura 28 <i>Cortes geoeléctricos para cada uno de los sectores.</i>	82
Figura 29 <i>Mapa de unidades hidrogeológicas para la isla de Tierra Bomba.</i>	91
Figura 30 <i>Modelo hidrogeofísico para la isla de Tierra Bomba.</i>	92

Lista de apéndices

Apéndice 1. Código implementado en Python para modelación directa.

Apéndice 2. Cortes geológicos detallados.

Apéndice 3. Escenarios de adquisición de los diferentes casos de estudio.

Apéndice 4. Informe hidrológico para la isla de Tierra Bomba.

Apéndice 5. Interpretación geológica de sondeos TEM.

Apéndice 6. Resultados de la inversión de datos TEM con SPIA y ZondTEM1.

Glosario

- ***Ambientes costeros:*** ecosistemas únicos ubicados en el límite entre la tierra y el mar, son vitales debido a su gran diversidad de vida, incluyen aguas costeras, marinas, estuarinas y áreas cercanas a las orillas de grandes lagos y mares. En estas zonas existe interacción entre el agua dulce y agua salada.
- ***Campos electromagnéticos (EM):*** campo físico generado a partir de partículas cargadas eléctricamente las cuales se ven afectadas producto de la carga generada por otras partículas. Este campo combina dos componentes principales, el campo eléctrico y el campo magnético, los cuales se interrelacionan y se propagan a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas.
- ***Modelo hidrogeofísico:*** representación conceptual usada para describir y entender el comportamiento de las unidades hidrogeológicas en un sistema geológico específico, el cual contempla la unión de información hidrogeológica y geofísica para dar una visión general y completa de las características y dinámicas de las unidades acuíferas.
- ***Métodos de prospección geofísica:*** técnicas indirectas usadas para la exploración del subsuelo para estudiar las características físicas y químicas sin necesidad de realizar excavaciones.
- ***Sondeos electromagnéticos transitorios (TEM):*** técnica de prospección geofísica usada para la investigación de las propiedades eléctricas del subsuelo, mide la respuesta del terreno a pulsos transitorios de corriente eléctrica que penetran el subsuelo.
- ***Intrusión salina:*** fenómeno natural (en ocasiones, con incidencia antropogénica) que ocurre en acuíferos costeros donde el agua de mar avanza en el subsuelo al continente de manera temporal o permanente, desplazando el agua dulce. Este proceso incide directamente en la calidad y gestión del agua subterránea.

Resumen

Título: Modelo hidrogeofísico conceptual mediante inversión de datos electromagnéticos transitorios (TEM) para la isla de Tierra Bomba, Bolívar, Colombia *

Autor: Ángel Fabián Salazar Álvarez**

Palabras Clave: Acuífero costero, intrusión salina, geofísica, Sondeos Electromagnéticos Transitorios, TEM, PyGIMLi.

Descripción:

El presente proyecto se enfoca en la caracterización hidrogeológica para la construcción de un modelo hidrogeofísico conceptual de la Isla de Tierra Bomba, Bolívar, Colombia, integrando datos geológicos y geofísicos obtenidos mediante Sondeos Electromagnéticos Transitorios (TEM). La evaluación del potencial hidrogeológico de la isla enfrenta desafíos debido a la falta de modelos de alta resolución, asociada a los métodos tradicionales, como la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), los cuales presentan limitaciones en la identificación de estructuras profundas, lo que expone la necesidad de usar métodos alternativos. Anteriores estudios llevados a cabo en la isla no integran completamente la información geofísica con la información geológica en entornos costeros. Esta investigación aborda dicho problema mediante la aplicación de técnicas de inversión geofísica para mejorar la caracterización hidrogeológica del subsuelo. Se empleó un modelamiento sintético directo a partir de herramientas de código abierto en Python para evaluar las condiciones hidrogeológicas y validar los resultados de la inversión, posteriormente, se procesan e invierten 61 sondeos TEM con distintos *softwares*, integrando los resultados e interpretándolos en un contexto geológico costero. La adquisición de datos TEM, junto con levantamientos geológicos y análisis de información secundaria, permitió correlacionar los modelos de resistividad sintéticos propuestos con observaciones en campo. Se seleccionaron los modelos geofísicos más representativos del subsuelo para generar cortes y esquemas hidrogeológicos, caracterizando la distribución y el potencial de las unidades hidrogeológicas de la isla mediante la construcción del modelo geofísico conceptual donde se identificaron niveles con posible presencia de agua subterránea en la Formación la Popa a profundidades no mayores a 30 m.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Maestría en Geofísica. Director: Sergio Andrés García-Arias. MsC. Codirector: José David Sanabria Gómez. PhD.

Abstract

Title: Conceptual hydrogeophysical model through Transient Electromagnetic (TEM) data inversion for Tierra Bomba Island, Bolívar, Colombia. *

Author(s): Ángel Fabián Salazar Álvarez**

Key Words: Coastal aquifer, Saline intrusion, Geophysics, Transient Electromagnetic Soundings, TEM, PyGIMLi.

Description:

This project focuses on the hydrogeological characterization required for developing a conceptual hydro geophysical model of Tierra Bomba Island, Bolívar, Colombia. It integrates geological and geophysical data obtained through Transient Electromagnetic Soundings (TEM). Assessing the island's hydrogeological potential presents challenges due to the lack of high-resolution models. Traditional methods, such as Electrical Resistivity Tomography (ERT), exhibit limitations in detecting deep structures, emphasizing the need for alternative approaches.

Previous studies on the island have not fully integrated TEM data with geological information in coastal environments. This research addresses this gap by applying geophysical inversion techniques to improve subsurface hydrogeological characterization. A direct synthetic modeling approach was implemented using open-source Python tools to evaluate hydrogeological conditions and validate inversion results. Subsequently, 61 TEM soundings were processed and inverted using different software, with results integrated and interpreted within a coastal geological framework. The acquisition of TEM data, combined with geological surveys and secondary data analysis, enabled the correlation of synthetic resistivity models with field observations. The most representative geophysical models of the subsurface were selected to generate cross-sections and hydrogeological schemes, characterizing the distribution and potential of the island's hydrogeological units through the construction of a conceptual geophysical model where levels with the possible presence of groundwater were identified in the La Popa Formation at depths no greater than 30 m.

** Faculty of Sciences. School of Physics. Master in Geophysics. Director: Sergio Andrés García-Arias, MSc. Codirector: José David Sanabria Gómez, PhD.

Introducción

La isla de Tierra Bomba (ITB), ubicada al sur del casco urbano de la ciudad de Cartagena de Indias, en el departamento de Bolívar, Colombia, cuenta con una población de alrededor de 9.000 habitantes, distribuidos en cuatro (4) localidades: Punta Arenas, Bocachica, Tierra Bomba y Caño del Oro, con un área aproximada de 20 km² y una altitud promedio de 20 m s.n.m., la isla se caracteriza por un entorno costero típico

Uno de los principales retos en la ITB es la disponibilidad del recurso hídrico, problemática para la cual las técnicas de prospección geofísica han demostrado ser herramientas fundamentales. Estas técnicas permiten investigar de manera indirecta las propiedades físicas del subsuelo mediante la medición de distintas propiedades geofísicas como la resistividad eléctrica, densidad, magnetismo, entre otras, con la finalidad de inferir la composición, estructura y distribución de las rocas que imperan en el terreno.

De la misma manera, una dificultad recurrente en el ámbito geofísico es la interpretación de las condiciones y características hidrogeológicas, mediante el uso de métodos de prospección geofísica y el posterior procesamiento de datos precisos y confiables, lo anterior de conformidad con la complejidad de los métodos y la incertidumbre asociada a las características del subsuelo.

La geología del sistema Tierra se caracteriza por presentar escenarios heterogéneos, resultado de las características intrínsecas de la roca y los ambientes de depositación, lo que obliga a los científicos e ingenieros a buscar soluciones que no solo sean matemáticamente aceptables a los problemas de estimación de parámetros e inversión, ya que múltiples modelos pueden ajustarse a los datos obtenidos en campo (Aster & Thurber, 2013). En este contexto, es necesaria la automatización y el desarrollo de métodos que optimicen los tiempos en la toma de decisiones para

generar herramientas de alto valor. La ITB enfrenta desafíos importantes en la caracterización de sus recursos hidrogeológicos, por tal motivo, comprender la distribución y el potencial de las unidades hidrogeológicas presentes en la isla es fundamental para garantizar una gestión sostenible de los recursos hídricos y el desarrollo adecuado de infraestructuras relacionadas con el abastecimiento de agua.

Actualmente, la caracterización hidrogeológica de la isla es limitada, debido a la falta de herramientas y metodologías que permitan obtener información detallada y precisa sobre la distribución de los recursos hídricos subterráneos. Aunque se han empleado métodos convencionales, como son las técnicas geofísicas de Tomografías de Resistividad Eléctrica y los Sondeos Electromagnéticos Transitorios (TEM), método geoelectrico y electromagnético, respectivamente, representan una alternativa más eficiente, ya que ofrecen una mayor resolución en este tipo de ambientes, asimismo, optimizan la inversión de datos y la integración de la información geológica. Como resultado, estos métodos permiten obtener una caracterización más precisa de la geometría y resistividad de las unidades geológicas, proporcionando información clave para la interpretación hidrogeológica detallada y la construcción de modelos hidrogeofísico conceptuales. Debido a la proximidad de la línea de costa a la ubicación de muchos de los pozos en el área, es fundamental definir la geometría de la intrusión marina y la dinámica de su frente de avance en la isla, con el fin de evaluar el posible impacto en los acuíferos existentes.

El presente proyecto de investigación titulado: “*Modelo hidrogeofísico conceptual mediante inversión de datos electromagnéticos transitorios (TEM) para la isla de Tierra Bomba, Bolívar, Colombia*” tiene como objetivo la adquisición, procesamiento e interpretación de 61 TEM, a partir de los cuales se seleccionaron los modelos de inversión que mejor representan las

condiciones geológicas del terreno y la correlación con los modelos sintéticos generados. Esto permitió obtener información detallada sobre las características geológicas e hidrológicas de la Isla de Tierra Bomba y de este modo, lograr una comprensión más precisa del comportamiento del agua subterránea mediante esquemas y modelos hidrofísicos conceptuales, como por ejemplo, la profundidad de la unidad más superficial asociada a los Depósitos de playa (de 3 a 20 m), el espesor de la Formación la Popa (23 m) y la profundidad de la Formación la Popa con posible presencia de agua subterránea (30 m).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Generar un modelo hidrogeofísico conceptual ajustado, utilizando la modelación directa y la información geofísica adquirida mediante Sondeos Electromagnéticos Transitorios en el ambiente costero de la isla Tierra Bomba.

1.2 Objetivos Específicos

- Revisar la caracterización geológica del área de estudio a partir de información geológica existente y cartografía general mediante una salida de campo.
- Realizar el modelamiento directo y posterior inversión de los datos geofísicos mediante diversos *softwares* de procesamiento y un código libre aplicando Python.
- Integrar la información en esquemas geológicos e hidrogeológicos que ejemplifiquen las condiciones del área de estudio resaltando las profundidades de los acuíferos de interés y la intrusión salina para la construcción de modelo hidrogeofísico.

2. Localización

El presente estudio se enmarca geográficamente en el Archipiélago de las Islas del Rosario y San Bernardo, con un enfoque particular en la Isla de Tierra Bomba. Esta isla, situada en el Mar Caribe colombiano, forma parte integral del municipio de Cartagena de Indias, en el departamento de Bolívar. La delimitación precisa del área de investigación se concentra dentro de los límites geográficos de la mencionada Isla de Tierra Bomba, permitiendo un análisis detallado de sus características particulares y dinámicas internas.

Coordenadas Geográficas Aproximadas:

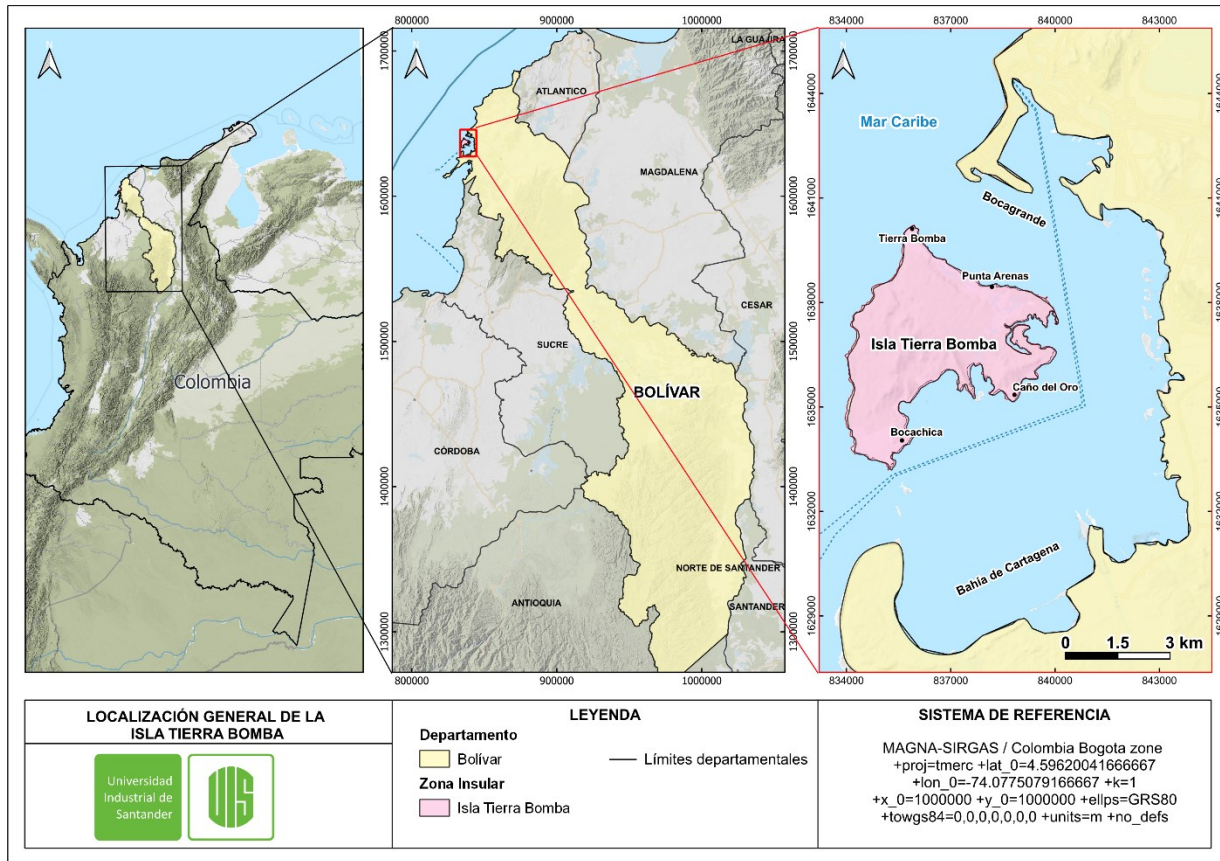
- Latitud: Aproximadamente $10^{\circ} 20' N$

- Longitud: Aproximadamente $75^{\circ} 33' O$

Esta ubicación estratégica en la costa Caribe colombiana, cercana a la ciudad de Cartagena, confiere a la Isla de Tierra Bomba características únicas en términos de accesibilidad, influencia sociocultural y exposición a diversos factores ambientales y de desarrollo (ver Figura 1).

Figura 1

Columna estratigráfica levantada para la Formación La Popa en la perforación realizada por la empresa Colclinker.



Nota. Fuente: Autor.

3. Marco teórico

3.1 Marco geológico regional

La isla de Tierra Bomba se encuentra cerrando la Bahía de Cartagena junto a las islas Santa Ana y Barú, ubicada al suroeste de la ciudad de Cartagena. La geología general se presenta en estudios recientes realizado por Reyes *et al.* (2001) en la Memoria Explicativa de las Planchas 23

Cartagena y 29-30 Arjona a escala 1:100.000 y otros estudios asociados a esta zona (Furrier & Cuervo, 2016). Las unidades geológicas que afloran en la Isla de Tierra Bomba corresponden a rocas sedimentarias de origen marino de diferente composición que conforman una secuencia de rocas de edades Pleistoceno y Holoceno.

3.1.1 Estratigrafía

Con el fin de caracterizar la geología de la Isla de Tierra Bomba, se realiza la descripción de las unidades litoestratigráficas allí presentes con base en información disponible y actualizada del Servicio Geológico Colombiano (SGC). A continuación, se presenta la descripción de las unidades geológicas que afloran en esta isla de la más antigua a la más reciente.

3.1.2 Formación la Popa (Qpp)

Inicialmente, De Porta *et al.* (1974) denomina “La Popa Group” a un conjunto de *shales* arenosos, areniscas con corales y arrecifes coralinos expuestos en los alrededores de Cartagena. (Bürgl, 1957) redefine la unidad como Formación La Popa, en el cerro del mismo nombre, constituida por arcillas micáceas arenosas, areniscas y calizas coralinas con un espesor de 150 m (Reyes *et al.*, 2001).

Camacho *et al.* (1968) subdividen la unidad en dos miembros; el inferior compuesto por arcillas plásticas, margosas y areniscas de cuarzo, y el superior compuesto de calizas margosas coralinas, algáceas y con moluscos. Ángel *et al.* (1985) utilizan el término Unidad Detrítica de La Popa para referirse al miembro inferior, y Calizas Arrecifales de La Popa para el superior (Reyes *et al.*, 2001).

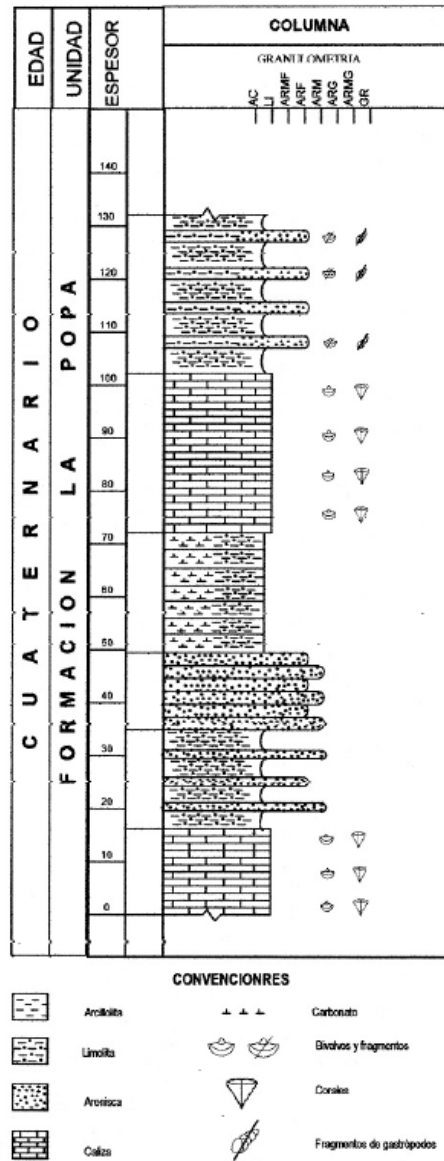
3.1.2.1 Litología.

La descripción litológica de esta unidad se realizó a partir de la descripción de una perforación realizada en la cantera de Albornoz, de la empresa Colclinker, presentó una profundidad de 131 m dentro de la Formación La Popa (ver Figura 2), presentando las siguientes características:

En la parte inferior, se presentan 15 m de calizas arrecifales, color amarillo claro, terrosas o cristalinas, compactas, con abundantes corales y bivalvos en disposición desorganizada; sobre ésta aparecen 18,5 m de arcillas plásticas grises y pardas, alteradas. Ocurren en capas delgadas, con intercalaciones de arenas cuarzosas, de grano fino y medio, amarillo claro, también en capas delgadas con intercalaciones de arenas de cuarzo de grano fino, también en capas delgadas; después aparecen 15 m de arenas; suprayaciendo aparecen 22,5 m de lodolitas calcáreas, gris oscuras, pardas y amarillo claro por alteración, en capas delgadas; sobre éstas se presentan 30 m de calizas arrecifales, amarillo claro a crema, cristalinas y terrosas, compactas o cavernosas, con corales y conchas de bivalvos dispuestos en forma caótica, las capas no están bien definidas; el techo de esta secuencia está constituido por 30 m de arcillas grises, pardas a negras, muy plásticas, en capas delgadas, masivas, alteradas, con intercalaciones de arenas de grano fino, cuarzosas y líticas, gris oscuras, arcillosas; algunas son bioclásticas, con conchas de bivalvos y gasterópodos (Reyes *et al.*, 2001).

Figura 2

Columna estratigráfica levantada para la Formación La Popa en la perforación realizada por la empresa Colclinker.



Nota. Fuente: Reyes *et al.* (2001).

3.1.2.2 Posición estratigráfica y edad.

Al realizar el reconocimiento regional acerca de la posición de los cuerpos calcáreos de la Formación La Popa, se puede reconocer un ambiente de plataforma submarina con pendiente muy suave y por debajo del nivel base de las olas. La determinación de la edad de esta formación fue actualizada por la geóloga Georgina Guzmán, pertenecientes a la parte superior de la Formación Bayunca, revelando edades del Plioceno superior, lo que confirma que la Formación La Popa es del Pleistoceno inferior (Reyes *et al.*, 2001).

3.1.3 Depósitos de Playa (Qmp)

Los depósitos de playa están localizados a lo largo de la línea de costa y constan de arenas de grano fino a grueso, ocasionalmente con gravas; la mayoría son de color amarillo ocre a grises (Reyes *et al.*, 2001). Los sedimentos pleistocenos representados por estos depósitos forman una estrecha pero casi continua faja desde Tierra Bomba a Bocachica, donde se identifican dos tipos de depósitos a partir de su altura sobre el nivel del mar, unos de +3 m y otros depósitos de 20 m; estos dos depósitos se encuentran descritos a continuación.

3.1.3.1 Nivel superior (Qmpa).

El nivel superior tiene un espesor de 20 m aproximadamente. Está representado en el norte de la isla donde forma una amplia superficie de abrasión que alcanza una longitud próxima a los 2 Km. Esta superficie se ha desarrollado a expensas de las calizas arrecifales del Plioceno, posiblemente del Plioceno superior (de Porta & Solé de Porta, 1960).

Este nivel fue ya señalado por Royo y Gómez (1950), quienes consideraron las calizas arrecifales como una terraza de edad Pleistocénica. Estas calizas se continúan hacia el interior de la isla y al parecer enlazan con las calizas de la loma de la Vigía. Los autores también señalaron la

semejanza entre ambas calizas y la posibilidad de confundirlas cuando presentan un aspecto terroso. Debajo de las calizas de la Vigía aparecen unas margas gris-azuladas que también se encuentran debajo de las calizas arrecifales junto al poblado de Tierra Bomba. Esta misma estratigrafía se presenta en la parte superior de La Popa en Cartagena. Análisis polínicos realizados indican posible edad del Plioceno superior (de Porta & Solé de Porta, 1960).

3.1.3.2 Nivel inferior (Qmpb).

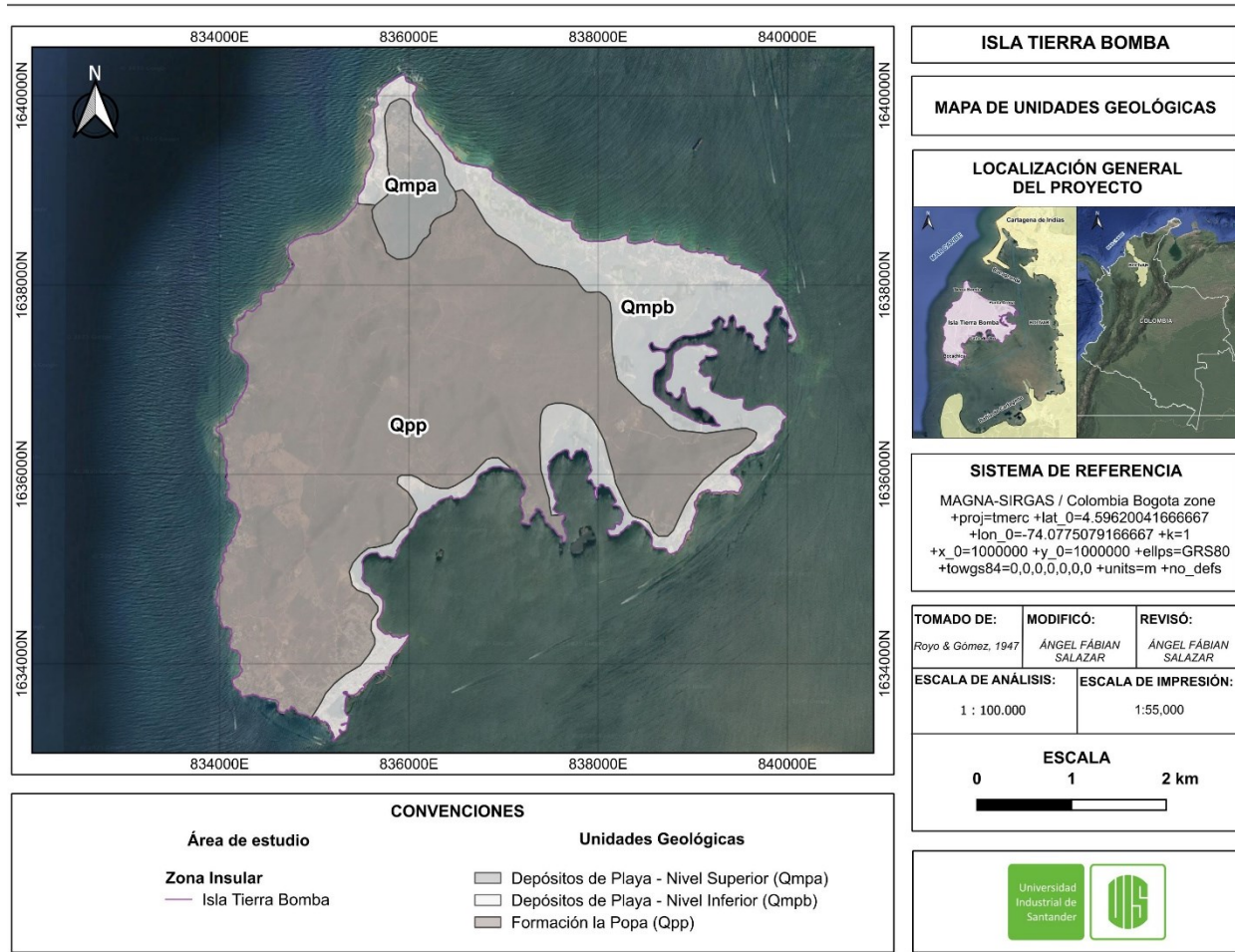
El nivel inferior tiene un espesor de alrededor de 3 m. Se extiende prácticamente por todo el borde nororiental y meridional de la isla. Su altura oscila de una localidad a otra, pero nunca sobrepasan los +3 m. Los sedimentos son semejantes en todos los afloramientos, aunque los conjuntos faunísticos presentan algunas variaciones como consecuencia de las condiciones ecológicas particulares que han reinado en cada yacimiento. Esta antigua línea de costa se encuentra bien desarrollada a lo largo de todo el litoral atlántico de Colombia. Correspondería por su altura al nivel llamado Silver Bluff ampliamente extendido por las costas americanas de Florida y Virginia (de Porta & Solé de Porta, 1960).

Este nivel inferior está formado por una masa continua de arenas calcáreas de grano pequeño procedentes principalmente de los restos de corales y calizas coralígenas de las lomas pliocénicas vecinas. Entre las arenas son frecuentes los fragmentos de margas calcáreas cuyo tamaño oscila entre 1 y 2 cm, generalmente poco gastados y con la superficie completamente agrietada. La proporción de estos fragmentos disminuye de la base a la parte más alta. En los dos niveles inferiores los cantos agrietados representan el 30% del total y disminuyen hacia los niveles superiores (de Porta & Solé de Porta, 1960). En la Figura 3 se presenta el mapa geológico a escala

1:100.000 (Royo y Gómez, 1947) donde se muestra la distribución de las unidades geológicas en la isla.

Figura 3

Mapa geológico a escala 1:100.000 para la isla de Tierra Bomba



Nota. Fuente: Tomado y modificado de Royo y Gómez (1947).

3.2 Marco hidrogeológico

El análisis del marco hidrogeológico en ambientes costeros es fundamental para comprender la dinámica de la interacción entre el agua subterránea y el agua de mar, la cual configura un sistema altamente dinámico y complejo. Este análisis requiere la evaluación de las principales características de la hidrogeología costera, incluyendo los procesos de interacción entre el agua subterránea, la intrusión salina y la circulación de agua salada. Además, implica la consideración de la clasificación hidrogeológica regional establecida en el Estudio Nacional del Agua, que define las provincias hidrogeológicas y los sistemas acuíferos en función de su estructura, extensión y geomorfología. Los ambientes costeros típicos presentan características hidrogeológicas particulares, las cuales se describen a continuación:

3.2.1 Hidrogeología regional

Las aguas subterráneas constituyen una de las principales reservas de agua dulce y en muchas ocasiones potable. Además, en comparación con las fuentes superficiales como ríos, lagos y lagunas, presenta una menor susceptibilidad a procesos de contaminación y degradación por factores naturales y antropogénicos, esta característica resalta la importancia de conocer su ocurrencia, distribución y características, con el fin de garantizar una gestión eficiente y sostenible.

El almacenamiento y flujo del agua subterránea está determinado por las condiciones geológicas del suelo y del subsuelo, así como factores o características físicas, químicas, hidrológicas y climáticas, que influyen en la dinámica de recarga, tránsito y descarga de los sistemas acuíferos. (IDEAM, 2014).

En Colombia, el Estudio Nacional del Agua (ENA), establece una zonificación hidrogeológica basada en las Provincias Hidrogeológicas que agrupan los Sistemas Acuíferos, esta

clasificación constituye criterio de agrupación más general para identificar zonas con características hidrogeológicas similares. Además, se complementa con estudios de mayor resolución, los cuales utilizan información proveniente de investigaciones locales y regionales realizadas por las autoridades ambientales, el Servicio Geológico Colombiano, el IDEAM, ministerios y universidades.

Las provincias hidrogeológicas corresponden a unidades mayores referidas a escalas menores, delimitadas con base en unidades tectonoestratigráficas. Estas provincias están separadas por rasgos estructurales regionales que coinciden con grandes formaciones geológicas, las cuales, desde un punto de vista hidrogeológico, actúan como barreras impermeables, representadas por fallas regionales y altos estructurales (IDEAM, 2022).

Por otra parte, se identifican los sistemas acuíferos, que pueden constituir una fuente de recursos de escala regional (OMM, 2012) Estos sistemas corresponden a dominios hidrogeológicos específicos, limitados tanto en superficie como en profundidad, en los que existen uno o varios acuíferos relacionados o no entre sí, que constituyen una unidad práctica para la investigación y/o explotación de agua subterránea (IGME, 1987). En total, se definieron un total de 12 provincias hidrogeológicas, que incluyen zonas costeras, intramontañas y pericratónicas (en la Orinoquía y la Amazonía colombiana), dentro de las cuales se identifican un total de 66 sistemas acuíferos. En la Tabla 1 se presenta la definición de cada unidad de análisis.

Tabla 1

Definición de unidades de análisis hidrogeológicas

Unidad de análisis	Conceptos
Provincias Hidrogeológicas (IDEAM, 2010)	Corresponden a unidades mayores referidas a escalas menores (entre 1:10.000.000 y 1:500.000), definidas con base en unidades tectono-estratigráficas separadas entre sí por rasgos estructurales regionales, que coinciden con límites de cuencas geológicas mayores y que, desde el punto de vista hidrogeológico y a la escala nacional, corresponden a barreras impermeables representadas por fallas regionales y altos estructurales. Las barreras son consideradas impermeables a la escala nacional, pero a nivel regional pueden albergar sistemas acuíferos importantes con porosidad secundaria.
Sistemas Acuíferos (IDEAM, 2013)	Corresponde a un dominio espacial limitado en superficie y en profundidad, en el que existen uno o varios acuíferos con porosidad primaria o secundaria, relacionados o no entre sí, pero que constituyen una unidad práctica para la investigación o explotación (ITGE, 1971, 1987; WMO, 2012 en IDEAM 2013).
Acuífero (Decreto 1640 de 2012)	“Unidad de roca o sedimento, capaz de almacenar y transmitir agua, entendida como el sistema que involucra las zonas de recarga tránsito y descarga, así como sus interacciones con otras unidades similares, aguas superficiales y marinas”.

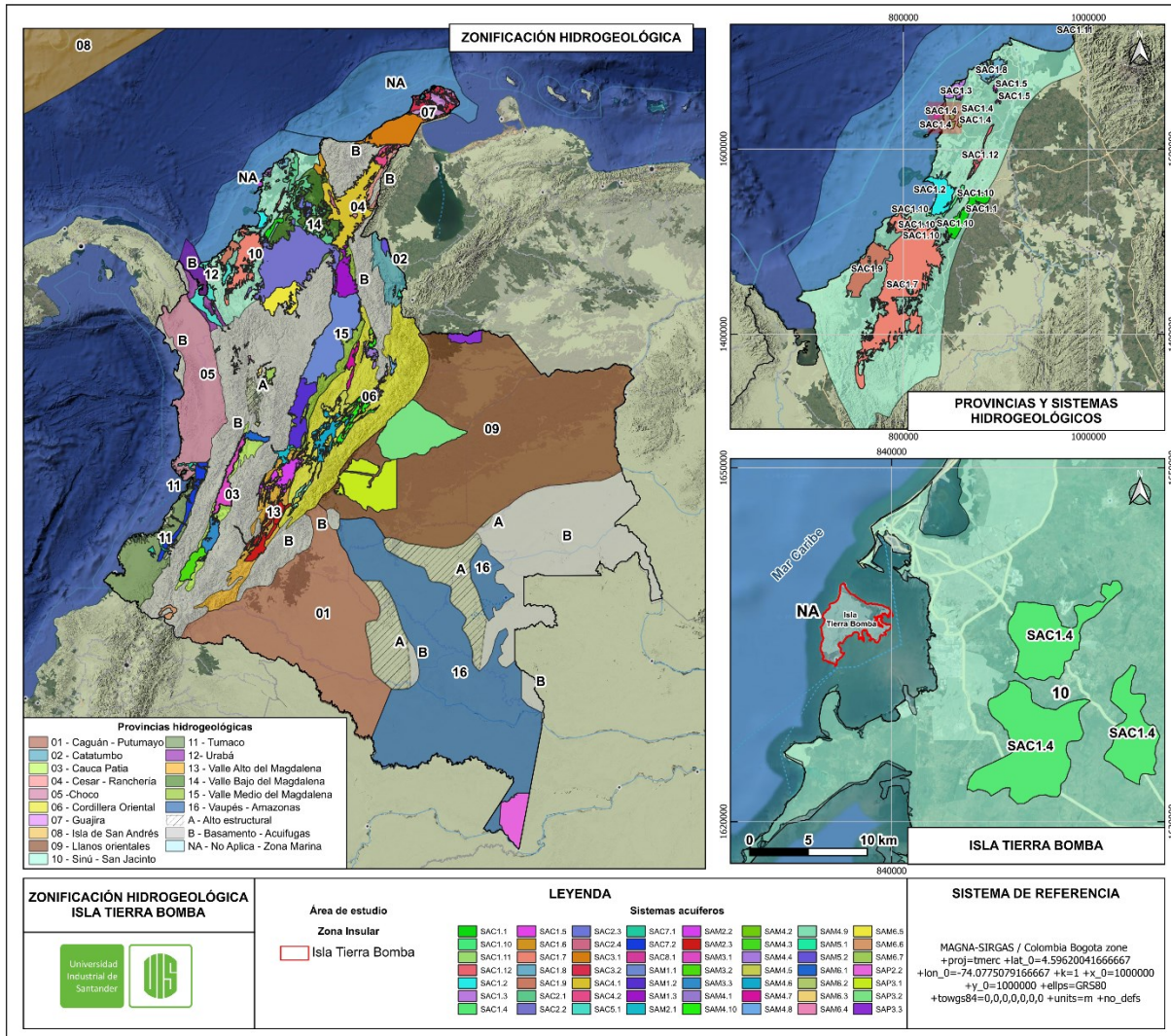
Nota. Fuente: IDEAM (2014).

El área de estudio se localiza en la Provincia Hidrogeológica 10 – Sinú-San Jacinto, donde se identifica el Sistema Acuífero SAC1.3 Arroyo Grande, con una extensión de 243 km² en un solo municipio bajo jurisdicción de CARDIQUE, y su recarga principal proviene de zonas de afloramiento de los acuíferos Arroyo Grande y la Unidad Detrítica de la Popa, con un estimado de 150 mm/año (IDEAM, 2022).

Hidrogeológicamente, es un acuífero costero de tipo libre a confinado, multicapa, con espesores de 20 a 100 m, conformado por el Acuífero Cuaternario, Arroyo Grande y la Unidad Detrítica de la Popa. Este último corresponde a un acuífero de extensión local en rocas sedimentarias finas a medias, poco cementadas, cuya recarga proviene de la infiltración de agua lluvia a través de fracturas y oquedades (IDEAM, 2022). Como principales características hidrogeológicas, se describe como un acuífero costero de tipo libre a confinado, multicapa, con espesores que varían entre 20 y 100 m y conformado por las unidades Acuífero Cuaternario (ac), Acuíferos Arroyo Grande (aT) y Acuífero Unidad Detrítica del Popa (acH), este último, el cual se correlaciona con las sedimentitas de la Unidad Detrítica del Popa de edad Terciario Superior, el cual es un acuífero de extensión local, continuo, en rocas sedimentarias de granulometría fina a media, poco cementadas, donde la principal fuente de recarga del agua subterránea es el agua lluvia infiltrada directamente a través de las fracturas y oquedades (IDEAM, 2022). En la Figura 4 se muestra la distribución del área de estudio del presente proyecto de investigación teniendo en cuenta las provincias hidrogeológicas y sistemas acuíferos a nivel regional en Colombia.

Figura 4

Provincias y Sistemas Hidrogeológicos donde se distribuye el área de estudio.



Nota. Fuente: Tomado y modificado de IDEAM (2022).

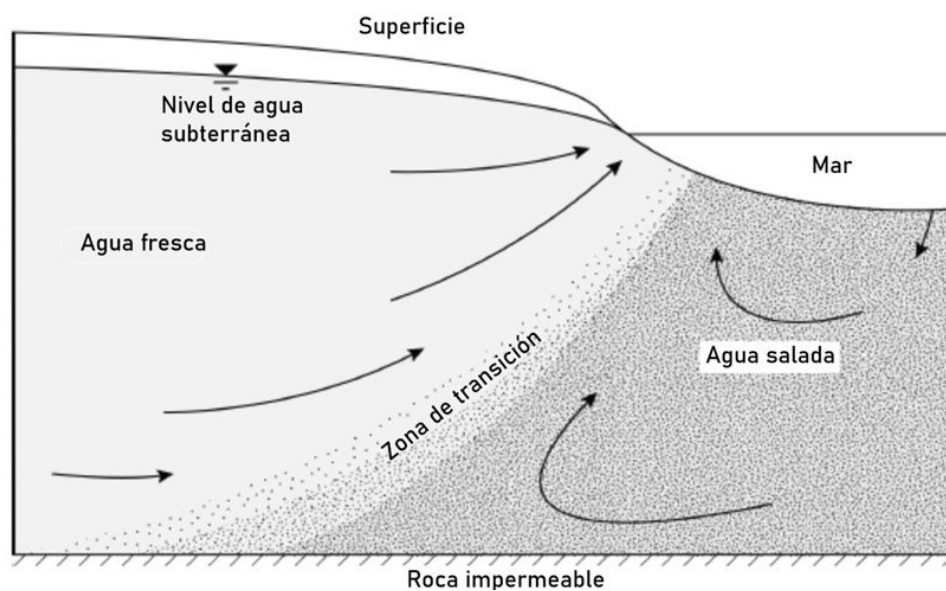
3.2.2 Hidrogeología costera

La hidrogeología costera analiza el agua subterránea en zonas cercanas al litoral, donde interactúan el agua de mar y la continental. Los acuíferos costeros presentan particularidades como flujos de densidad variable, influencia de las mareas y zonación geoquímica por la mezcla con

agua salada (Jiao & Post, 2019). Su estudio es clave para el abastecimiento hídrico en regiones costeras, que suelen tener bajas precipitaciones, altas temperaturas y mayor evapotranspiración, lo que reduce el almacenamiento de agua subterránea. La mayor densidad del agua de mar, 2,5% más que el agua dulce, genera la típica cuña salina que se introduce en el continente.

Figura 5

Representación idealizada de la cuña marina que intruye en un acuífero libre costero.



Nota. Fuente: Jiao & Post (2019), modificado de Cooper (1964).

Uno de los objetivos principales de la hidrogeología costera es el estudio de la intrusión marina como fuente de contaminación de las aguas subterráneas para uso humano. La intrusión marina se define como el incremento de salinidad del agua subterránea, que puede o no estar en contacto hidráulico directo con el mar. Es entonces el resultado de procesos de flujo por los cuales el agua subterránea es desplazada o mezclada con el agua de mar. La principal causa de la intrusión salina es la disminución de la presión en el acuífero, que induce un flujo que modifica la distribución de la salinidad. Esta disminución en la presión puede deberse al bombeo excesivo,

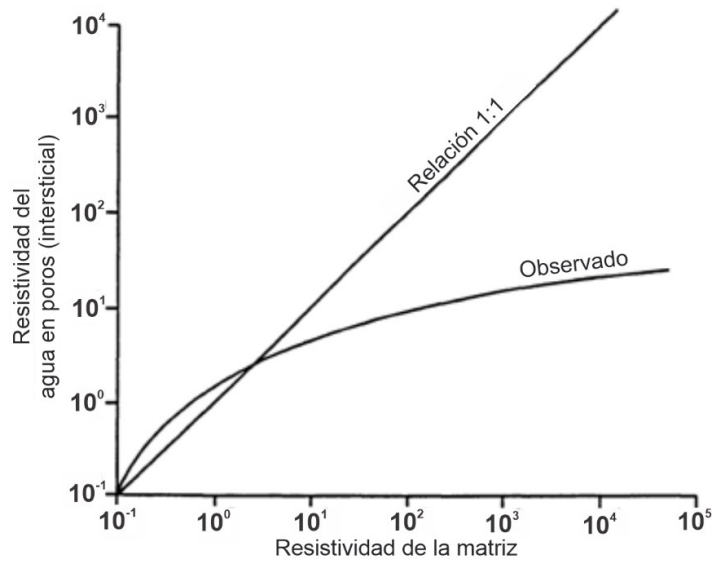
disminución en las tasas de recarga o aumentos en la evapotranspiración. En los casos en que esto ocurra, la cuña marina se desplazará hacia el continente, generando una zona de mezcla o transición entre el agua dulce y el agua salada. Esta zona de transición de agua salobre puede desplazarse hacia el continente o verticalmente hacia arriba (Jiao & Post, 2019).

La intrusión salina se distingue por el movimiento de agua con una alta cantidad de sólidos totales disueltos hacia el agua dulce. Los iones principales en el agua marina, cloruro y sodio, son muy conductivos, por lo tanto, la calidad de las aguas subterráneas en zonas costeras e insulares puede determinarse por medio de su conductividad eléctrica. En medios porosos saturados, la conductividad del fluido es un factor importante que influye en la resistividad total del sistema fluido-roca, por lo cual los métodos geofísicos que permiten estimar la resistividad general de los materiales del subsuelo logran delinear las variaciones de la calidad del agua en ambientes costeros e insulares (Bear & Cheng, 1999). En la Figura 6 se muestra como la resistividad de los fluidos intersticiales influye en la resistividad total del medio poroso, se observa que cuanto menor sea la resistividad del fluido más se aproxima ésta a la del sistema fluido-roca.

La conductividad eléctrica para el agua de mar estándar a 25 °C es de 53.000 uS/cm, lo que equivale a una resistividad de 0,19 Ohm.m. En la Tabla 2 se muestra la clasificación del agua subterránea en función de su conductividad eléctrica (Park *et al.*, 2012).

Figura 6

Relación entre la resistividad del fluido intersticial y la resistividad total del sistema fluido-roca.



Nota. Fuente: Tomado de Bear & Cheng (1999). Modificado de Keller & Frischenecht (1966).

Tabla 2

Clases de salinidad del agua subterránea en función de la conductividad eléctrica.

Conductividad ($\mu S/cm$)	Resistividad ($Ohm.m$)	Tipo
0 - 1.500	$> 6,67$	Agua dulce
1.500 - 3.000	$3,33 - 6,67$	Agua salobre
> 3.000	$< 3,33$	Agua salada

Nota. Fuente: Park *et al.* (2012).

Para obtener información más detallada al respecto, remítase al apartado 1.6.3, "Características fisicoquímicas del agua subterránea", donde se describen con mayor precisión las propiedades de cada tipo de agua.

3.2.3 *Características fisicoquímicas del agua subterránea*

En prospección de aguas subterráneas, la calidad es tan importante como la cantidad, pues sus características fisicoquímicas y bacteriológicas determinan el uso doméstico, industrial o agrícola, es importante destacar que, este análisis incluye compuestos inorgánicos, pH, temperatura, color, turbiedad, sabor y pruebas bacteriológicas para coliformes (Vélez Otálvaro, 2011)

Las aguas naturales nunca son puras, contienen sólidos y gases disueltos cuya concentración depende de minerales en contacto, tiempo de residencia y procesos biológicos, por otro lado, en el caso del agua subterránea, su composición está ligada a la meteorización y descomposición de rocas, por lo que los estudios geoquímicos permiten identificar diferencias en la calidad entre acuíferos y orientar su uso (Vélez Otálvaro, 2011).

El agua con alta concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT) se clasifica como salina, salada o salobre, por otro lado, según el USGS (2003), el agua dulce contiene menos de 1.000 mg/L, mientras que valores superiores corresponden a aguas salinas; las salobres oscilan entre 1.000 y 35.000 mg/L. El agua de mar alcanza unos 35.000 mg/L, siendo el cloruro (Cl⁻) el ión mayoritario.

En Colombia, la salinidad marina promedia 35.000 mg/L (INVEMAR, 2003). Para consumo humano, la norma fija un máximo de 250 mg/L de cloruros y 500 mg/L de SDT (Decreto 475 de 1998). Incluso mezclas con solo 2% de agua marina deterioran la calidad; con 4% el impacto es grave y con 6% resulta prácticamente inútil para potabilización y riego (Bocanegra, 2005).

Tabla 3*Concentraciones promedio de principales constituyentes del agua marina.*

Constituyente	Concentración (mg/L)
Cloruro	19.000
Sodio	10.500
Sulfato	2.700
Magnesio	1.350
Calcio	410
Potasio	390
Bicarbonato	142
Bromuro	67
Estroncio	8
Sílice	6,4
Boro	4,5
Fluoruro	1,3

Nota. Fuente: USGS (2003).

En la isla de Tierra Bomba no existen corrientes de aguas superficiales permanentes, por tanto, la principal fuente de abastecimiento de las poblaciones es el agua lluvia. La comunidad se ve obligada a comprar agua potable en la ciudad de Cartagena a altos precios. Existen algunos pozos y aljibes que fueron reconocidos en la isla por el INGEOMINAS, hoy Servicio Geológico Colombiano, en 1958, quienes adelantaron estudios de abastecimiento con aguas subterráneas para

el municipio de Cartagena. Estos puntos de agua no cuentan con georreferenciación y la fuente fue compartida por CARDIQUE donde solo se cuenta con la información recopilada en la Tabla 4.

Tabla 4

Pozos reconocidos en la isla de Tierra Bomba.

Punto de agua	Localidad	Cloruros (ppm)	Dureza (ppm)	Hierro (ppm)
<i>Pozo Caret</i>	Bocachica	817	1.615	1,1
<i>Pozo Villorio</i>	Bocachica	249	1.199	0,87
<i>Pozo español Rafael Dávila</i>	Bocachica	4.615	3.625	0,93
<i>Pozo Nuevo</i>	Caño del Oro	1.988	1.790	-
<i>Pozo Grande</i>	Caño del Oro	1.079	924	-
<i>Pozo El Mango</i>	Caño del Oro	2.633	2.613	0,28

Nota. En la información suministrada no se evidencian coordenadas para la localización exacta de los pozos. Fuente: INGEOMINAS (1958).

La mayoría de los pozos se ubican cerca de la costa, donde la influencia marina genera altas concentraciones de sólidos disueltos, cloruros y elevada conductividad. En Tierra Bomba no existe aún un modelo hidrogeológico conceptual, pero por sus características litológicas, se estima que, en épocas de lluvia haya alta infiltración en depósitos arenosos, niveles detríticos y calizas arrecifales fracturadas de la Formación La Popa, lo que favorecería la acumulación de agua. Parte de la precipitación probablemente fluye desde las zonas centrales de mayor relieve hacia la costa.

3.3 Marco hidrológico

El análisis hidrológico de la Isla Tierra Bomba permite comprender la disponibilidad y dinámica del recurso hídrico en un entorno insular con características particulares. La interacción entre la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración influye directamente en la sostenibilidad del agua superficial y subterránea, en un territorio sin drenajes permanentes y con un relieve predominantemente plano.

3.3.1 Características morfométricas de la isla Tierra Bomba

La isla posee un área de 19,85 km², con un perímetro de 27,58 km y un índice de compacidad de 1,75. Su relieve es predominantemente plano, con una cota máxima de 80 m.s.n.m. y una cota media de 14,23 m.s.n.m. La pendiente media es de 7,59%, con valores máximos de hasta 51,26%. La ausencia de drenajes permanentes en la isla se debe a su baja pendiente y alta capacidad de infiltración del suelo.

3.3.2 Análisis de la información hidrometeorológica

Para realizar el análisis climático para el presente estudio, se utilizaron cinco estaciones hidrometeorológicas cercanas, de las cuales la Escuela Naval CIOH (Cartagena) es la más representativa, con registros desde 1947 y datos de precipitación y temperatura confiables hasta 2013. A continuación, se muestra en análisis de información hidrometeorológica realizada en el marco del proyecto presentado ante CARDIQUE.

3.3.2.1 Precipitación (P)

La precipitación es la principal fuente de recarga hídrica en la isla Tierra Bomba y de muchos de los ambientes costeros, influyendo directamente en el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua superficial y subterránea. Su análisis permite entender la variabilidad

climática en la región y sus implicaciones en la sostenibilidad de los recursos hídricos. En el presente análisis se consideraron dos enfoques principales análisis temporal y análisis espacial.

El análisis temporal evalúa la distribución de la lluvia a lo largo del tiempo, identificando tendencias estacionales y anomalías climáticas, mientras que el análisis espacial permite conocer la variabilidad de la precipitación dentro del territorio, mostrando zonas con mayor o menor acumulación de lluvias. Ambos enfoques son fundamentales, ya que la precipitación es un factor dinámico que varía no solo entre meses y años, sino también dentro de la misma isla debido a la influencia de patrones atmosféricos y topográficos.

3.3.2.1.1 Análisis Temporal de la Precipitación

El análisis temporal de la precipitación se realizó considerando la precipitación total anual multianual y la precipitación media mensual multianual. A nivel de la precipitación total anual multianual, se observó que en la isla presenta fluctuaciones significativas debido a la influencia de fenómenos climáticos globales como El Niño y La Niña. Durante los años secos (1986, 1991 y 1992) asociados a El Niño, los registros más bajos fueron de 250 mm/año, mientras que en años húmedos (1981, 1999 y 2010) influenciados por La Niña, la precipitación alcanzó valores superiores de hasta 2.400 mm/año. Estas variaciones evidencian la vulnerabilidad de la isla a cambios climáticos extremos, afectando la disponibilidad de agua.

A nivel de la precipitación media mensual multianual, la Isla Tierra Bomba sigue un patrón climático unimodal, caracterizado por dos períodos bien definidos. La temporada seca, que abarca de diciembre a abril, la cual se distingue por precipitaciones mínimas, con registros cercanos a 0 mm en los meses más áridos, especialmente en enero y febrero. En contraste, la temporada lluviosa, que se extiende de mayo a noviembre, presenta un aumento progresivo en las

precipitaciones, alcanzando su punto máximo en octubre, cuando los valores pueden superar los 200 mm/mes, según los registros de estaciones cercanas como la Escuela Naval CIOH. Está marcada diferencia entre estaciones resalta la irregularidad en la disponibilidad hídrica de la isla, lo que influye en la recarga de los cuerpos de agua y en la planificación de su aprovechamiento.

Estos resultados confirman que la mayor parte de la precipitación se concentra en unos pocos meses del año, lo que implica una distribución desigual del recurso hídrico.

3.3.2.1.2 Análisis Espacial de la Precipitación

Para evaluar la variabilidad de la precipitación dentro de la isla, se realizó una interpolación geoestadística basada en los datos de estaciones cercanas. Se identificaron diferencias en la cantidad de lluvia recibida en distintas zonas, influenciadas por factores como la proximidad al mar y las condiciones atmosféricas locales.

Para el análisis espacial de la precipitación se consideraron dos enfoques principales. El primero se centró en la precipitación total anual multianual, cuyos resultados indican que las zonas con mayor acumulación de lluvia se encuentran en el oeste y este de la isla, con valores entre 985 y 987 mm/año. En contraste, las regiones norte y sur presentan registros menores, oscilando entre 974 y 976 mm/año. Aunque la diferencia no es significativa, se evidencia una ligera variabilidad espacial en la distribución de la precipitación, posiblemente influenciada por la orientación del viento y la presencia de microclimas locales.

El segundo enfoque se basó en la precipitación media mensual multianual, donde los valores reflejan una clara estacionalidad. El mes con menor precipitación corresponde a febrero, con registros entre 974 y 976 mm, mientras que el mes con mayor precipitación es octubre, con acumulados que varían entre 186 y 190 mm. Estos resultados destacan la marcada variabilidad de

la lluvia a lo largo del año y la influencia de los patrones climáticos regionales en la disponibilidad hídrica de la isla.

3.3.2.2 Temperatura (T)

La temperatura es un factor clave en la dinámica hidrológica, ya que influye la evaporación, la evapotranspiración y la disponibilidad de agua en el territorio. Su análisis permite comprender las tendencias térmicas en el tiempo y su posible impacto en el balance hídrico de la isla. En el presente análisis se consideraron dos enfoques principales el análisis temporal y el análisis espacial.

El análisis temporal evalúa la variabilidad de la temperatura a lo largo de los años y entre los meses, permitiendo identificar estaciones secas y cálidas. Por otro lado, el análisis espacial busca determinar diferencias de temperatura dentro del territorio, considerando factores como la altitud y la cercanía al mar. Sin embargo, en este caso, el análisis espacial no fue realizado debido a la baja disponibilidad de estaciones meteorológicas cercanas y a la poca variabilidad térmica esperada en la isla. Dado que Tierra Bomba presenta un relieve bajo y uniforme, con cotas máximas de 80 m.s.n.m., no se espera que existan diferencias significativas en la temperatura entre distintas zonas del territorio. Por ello, el estudio se centró únicamente en el análisis temporal de la temperatura.

3.3.2.2.1 Análisis Temporal de la Temperatura

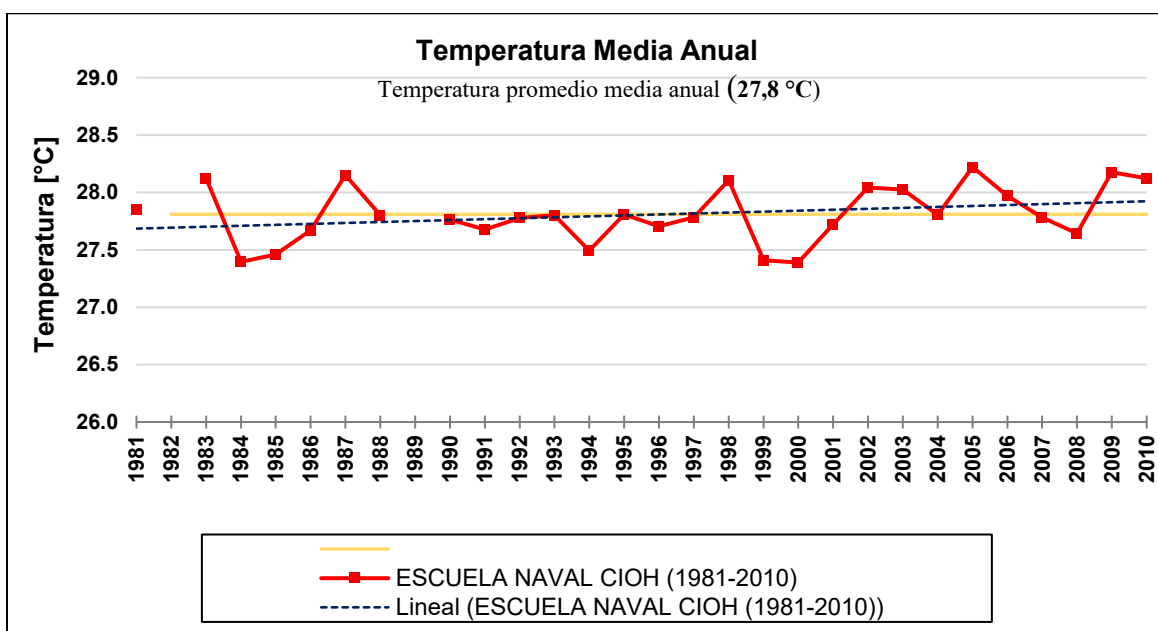
El análisis temporal de la temperatura se realizó en dos enfoques principales temperatura media anual y temperatura media mensual multianual.

La temperatura media anual se calculó a partir de los registros de la estación Escuela Naval CIOH, la más representativa para el área de estudio. Los datos indican que la temperatura media

anual varía entre 27°C y 28,5°C, con una media de 27,8°C en el período de estudio (1981-2013) como se muestra en la Figura 7. Esta estabilidad térmica es característica de climas tropicales influenciados por cuerpos de agua cercanos, como el mar Caribe, que modera las variaciones de temperatura a lo largo del año.

Figura 7.

Temperatura media anual en la estación hidrometeorológica Escuela Naval CIOH (1981-2010).



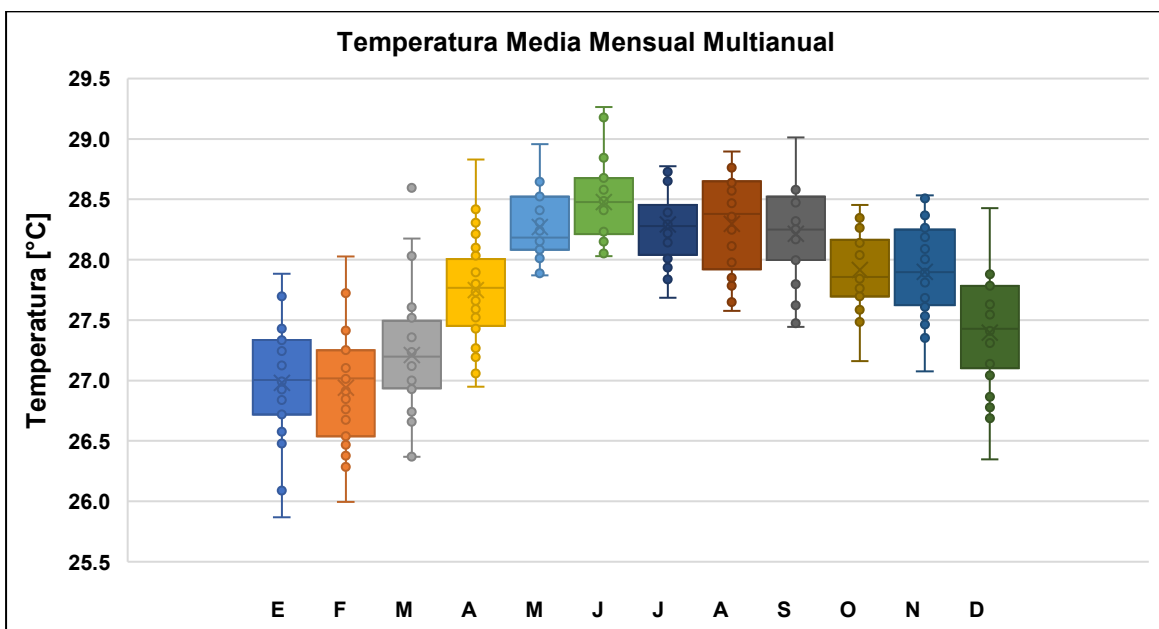
Fuente: Tomado de Hydroingenieria S.A.S. (2020).

Por otro lado, el análisis de la temperatura media mensual multianual permite identificar la estacionalidad térmica dentro del año. Como se muestra en la Figura 7 se observó que los meses más cálidos son junio, julio y agosto, con temperaturas cercanas a los 28,5°C, debido a una mayor incidencia de radiación solar y menor cobertura nubosa. En contraste, los meses más frescos son enero, febrero y marzo, donde las temperaturas oscilan alrededor de 27°C, influenciadas por la presencia de vientos alisios que generan ligeras disminuciones térmicas. Por otro lado, se resaltan

algunos picos importantes en los valores históricos de temperaturas altas (por encima del promedio) en los años de 1983, 1987, 1998, 2005 y 2009, posiblemente asociados a eventos que pueden ser un indicador importante de la evolución del clima terrestre y causas subyacentes, generando estos cambios.

Figura 8.

Boxplots de temperatura media mensual multianual para la estación Escuela Naval CIOH.



Fuente: Tomado de Hydroingenieria S.A.S (2020).

Estos resultados reflejan un clima tropical cálido con variaciones moderadas en la temperatura a lo largo del año. Al no existir cambios altitudinales significativos en la isla, las diferencias espaciales en la temperatura son mínimas, lo que justifica la decisión de no realizar un análisis espacial detallado de este parámetro.

3.3.2.3 Evapotranspiración

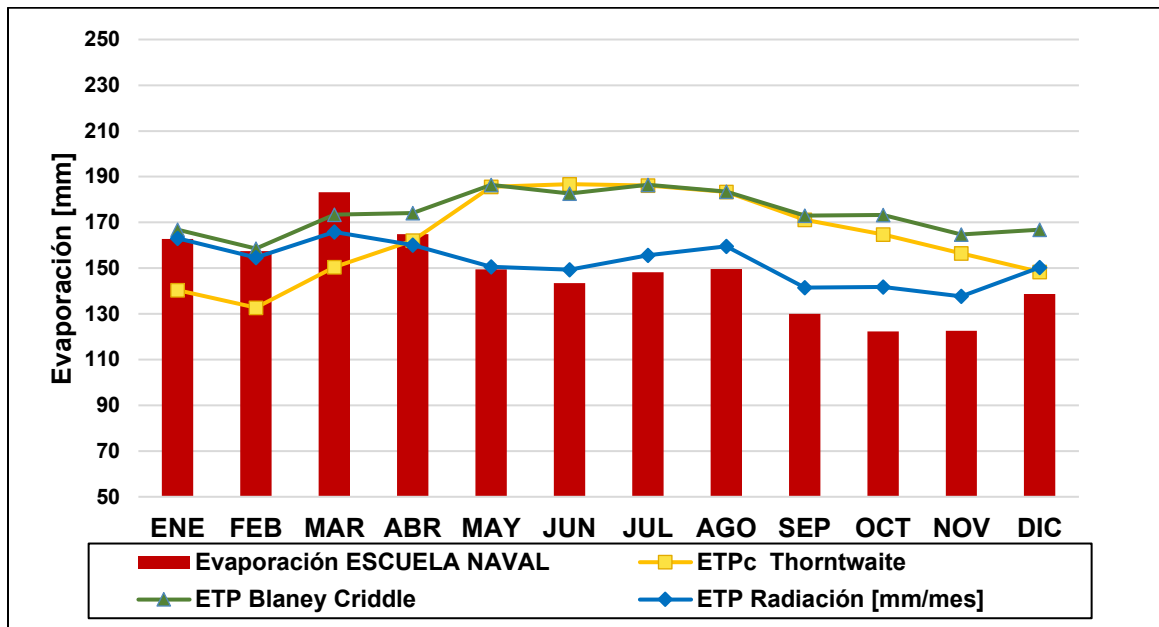
La evapotranspiración es la combinación de la evaporación del agua desde superficies expuestas y la transpiración de las plantas. En este estudio, se estimó la evapotranspiración potencial (ETP), que representa la cantidad máxima de agua que podría perderse a la atmósfera si no existiera restricciones hídricas.

El cálculo de la ETP se realizó utilizando el método de radiación FAO-24, ya que proporciona estimaciones confiables para regiones ecuatoriales e islas pequeñas como Tierra Bomba, basadas en la latitud y radiación solar.

De acuerdo con lo anterior, a partir de los valores mensuales obtenidos por radiación FAO-24, como se muestra en la Figura 9 se determinó que la ETP mensual oscila entre 150 mm y 170 mm, con un promedio aproximado de 152 mm/mes. Esto da como resultado una ETP anual de 1.830 mm/año, lo que confirma la coherencia y representatividad de la estimación para la isla.

Figura 9.

Estimación de la ETP para la isla de Tierra Bomba usando varios métodos.



Fuente: Tomado de Hydroingenieria S.A.S (2020).

De acuerdo con lo anterior, la caracterización hidrológica de la Isla Tierra Bomba evidencia un sistema climático controlado por la variabilidad de la precipitación y la alta evapotranspiración, con una disponibilidad hídrica limitada debido a la falta de drenajes naturales.

Para mayor detalle sobre la metodología, datos completos y análisis de interpolación espacial, se recomienda consultar el Apéndice 4 Informe Hidrológico de la Isla Tierra Bomba, donde se presentan los cálculos específicos y gráficos asociados a cada variable.

3.4 Marco geofísico

La ciencia de la geofísica aplica los principios de la física al estudio de la tierra. Las investigaciones geofísicas sobre el interior de la tierra se basan en la medición de propiedades físicas en (o cerca) de la superficie, las cuales reflejan la distribución interna de dichas propiedades físicas. El análisis de estas mediciones permite identificar como las propiedades físicas del interior

de la tierra varían vertical y lateralmente en la estructura y composición del subsuelo (Kearey *et al.*, 2013).

Los métodos geofísicos pueden aplicarse a escalas regionales o locales, dependiendo de la propiedad física del subsuelo que se estudie, con el propósito de identificar variaciones en las características de los materiales que conforman la corteza terrestre. Una de las principales ventajas de la prospección geofísica es la capacidad de generar medidas indirectas del subsuelo, sin necesidad de perforar, permitiendo representar visualmente las condiciones del terreno por debajo de la superficie, reduciendo los costos de prospección en proyectos geológicos, minero-energéticos, hidrogeológicos, entre otros.

Los Sondeos Electromagnéticos Transitorios (TEM) constituyen un método geofísico eficaz que, a partir del flujo discontinuo de corriente, permiten identificar variaciones y contrastes en los valores de resistividad a profundidad. Es importante destacar que, esta profundidad alcanzada por los TEM depende tanto de la configuración del equipo en campo, como de las propiedades del suelo, lo que resalta la necesidad de conocer las condiciones geológicas del área de estudio para una interpretación más precisa de los resultados.

Esta técnica se basa en la detección de variaciones de resistividad eléctrica, o su inversa, la conductividad en el subsuelo, fundamentándose en los principios básicos del electromagnetismo, establecidos en las leyes de Maxwell, físico escocés del siglo XIX, quien formuló la teoría electromagnética moderna a partir de las observaciones de Michael Faraday y otros científicos destacados.

Unas de las principales ventajas del método TEM es que su aplicación puede alcanzar unos pocos kilómetros, y en estos rangos donde se encuentran los objetivos de exploración geológica

más importantes con una resolución superior (Keller, 1997). También permite identificar contrastes de valores de resistividad bajos, los cuales podrían asociarse a la presencia de agua salada a salobre, típica de este tipo de ambientes insulares. A continuación, se describen el principio físico que lo rige, características del método y sus principales propiedades.

3.4.1 *Leyes de Maxwell*

El fundamento teórico del TEM está basado en el análisis e interpretación de las leyes de Maxwell en el dominio del tiempo y la frecuencia, las cuales describen el comportamiento y la relación que existe entre los campos eléctricos y magnéticos. Estas leyes son un conjunto de ecuaciones fundamentales que permiten entender fenómenos como la inducción electromagnética, que es esencial para la técnica usada en el presente proyecto de investigación.

A continuación, se presentan las leyes de Maxwell, las cuales se aproximan a la interacción entre los elementos que describen cualquier fenómeno electromagnético las cuales se muestran como ecuaciones diferenciales lineales de primer orden en el dominio del tiempo (Kirsh, 2006).

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{h} - \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} = \mathbf{j}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{b} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{d} = \rho$$

Donde:

- **E**: intensidad del campo eléctrico (V/m)
- **b**: inducción magnética (C/m²)
- **h**: intensidad del campo magnético (A/m)

- **d**: desplazamiento eléctrico (W/m^2 o T)
- **j**: densidad de la corriente eléctrica libre (A/m^2)
- ρ : densidad de la carga eléctrica libre (C/m^3)

En las ecuaciones anteriormente presentadas, la permitividad dieléctrica, la permeabilidad magnética y la conductividad eléctrica deben considerarse como funciones tensoriales de la frecuencia angular, la posición, el tiempo, la temperatura, la presión y la intensidad del campo eléctrico y magnético. Sin embargo, para derivar soluciones analíticas es necesario asumir algunas suposiciones relativas a estos parámetros.

La primera suposición es que todas las capas y los materiales que componen el subsuelo se comportan como objetos lineales, isótropos y homogéneos, los cuales poseen propiedades físicas que son independientes del tiempo, la temperatura y la presión, esto implica la presentación escalar de las propiedades físicas en lugar de los tensores. La segunda suposición es que la permeabilidad magnética de todos los medios es igual a la del aire (Petrus, 2005).

3.4.2 Sondeos Electromagnéticos Transitorios (TEM)

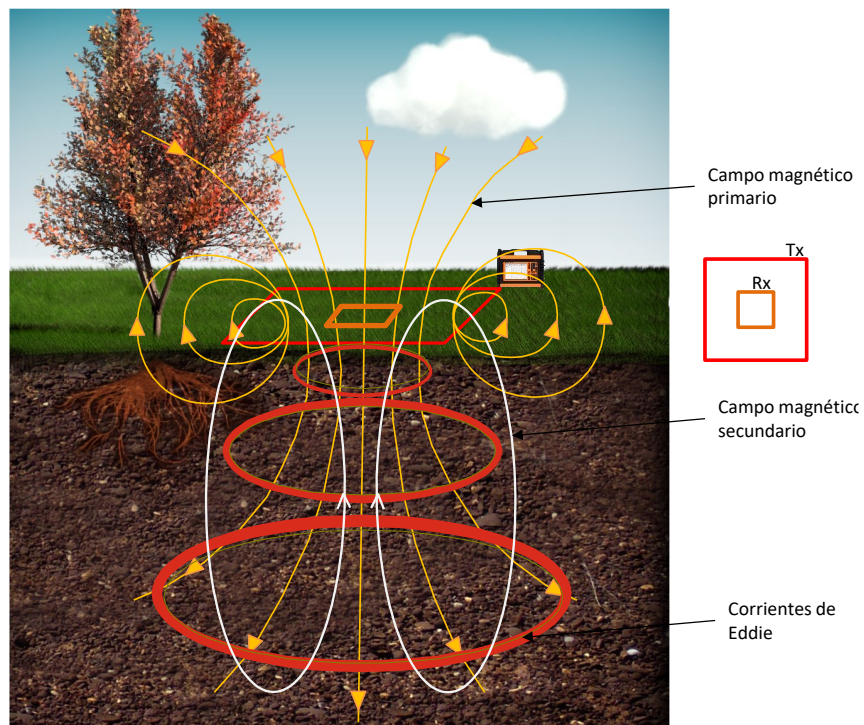
Los sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo (TEM) son un método geofísico basado en la inducción y posterior decaimiento de un campo electromagnético secundario en el subsuelo, generado a partir de un campo primario inducido en superficie. A nivel de superficie, las respuestas obtenidas dependen de propiedades como conductividad eléctrica, permeabilidad magnética e intensidad de señal, lo que permite caracterizar materiales y estratos geológicos en profundidad.

El método consiste en aplicar una corriente cíclica en una bobina transmisora (Tx), la cual origina un campo magnético primario, que, al interrumpirse, este induce corrientes de Eddy, que

migran en profundidad y generan campos secundarios medidos por la antena receptora (Rx). El decaimiento de estos voltajes revela la resistividad del subsuelo: tiempos cortos informan sobre zonas someras y tiempos largos sobre zonas profundas (GuidelineGeo, 2024).

Figura 10

Principio operativo del método TEM



Nota. Fuente: Hydroingeniería S.A.S (2020) y GuidelineGeo (2024).

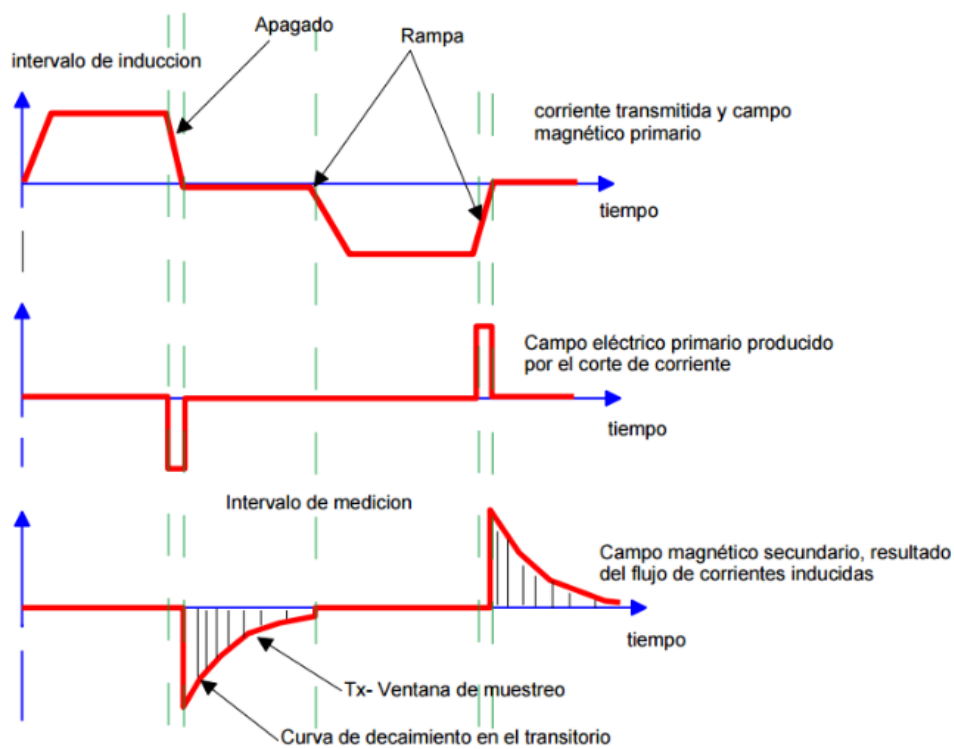
Según Castillo (2012), el decaimiento del voltaje se divide en ventanas de tiempo. En los tiempos tempranos, la corriente varía rápidamente, y las ventanas son angostas, por otro lado, en los tiempos tardíos, el efecto transitorio es más lento, y las ventanas se ensanchan. Estas señales inducen formas cuadradas con múltiples ciclos, o desviaciones de voltaje en el transmisor, incluyendo variaciones en los extremos, debido al tiempo que le toma al transmisor alcanzar su

máxima potencia y el tiempo que le toma la corriente primaria en desaparecer, una vez apagada la antena transmisora (Hydroingeniería S.A.S., 2020), como se ilustra en la Figura 11.

La resistividad, propiedad fundamental analizada mediante este método, se define como la capacidad intrínseca de un material para oponerse al flujo de corriente eléctrica a través de él, dependiendo de su composición y estructura interna.

Figura 11

Señales producidas y medidas mediante el método TEM.



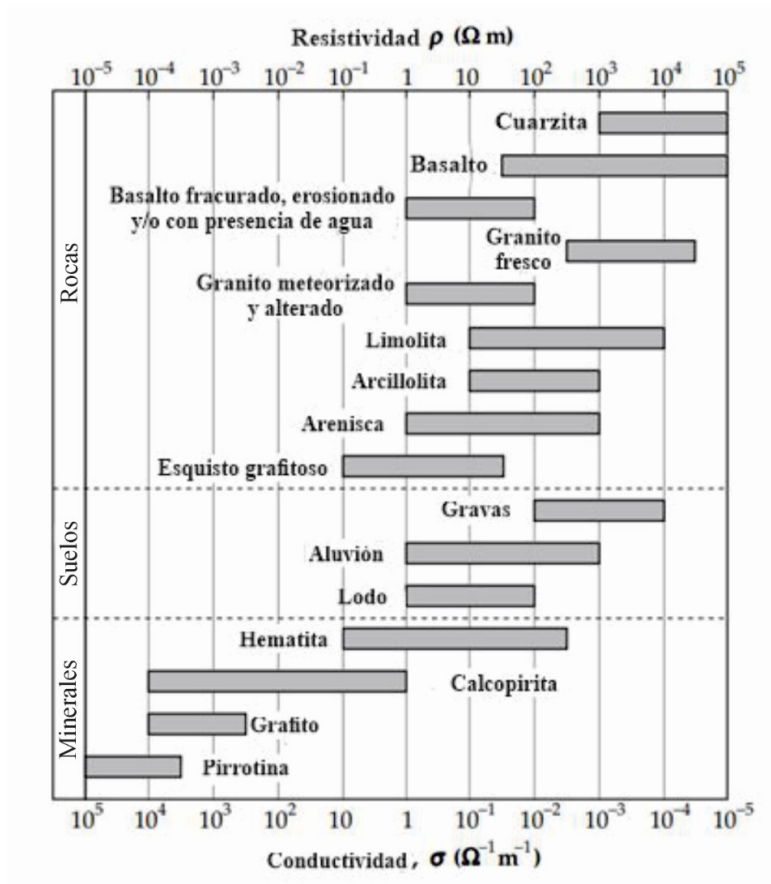
Nota. Fuente: Castillo (2012).

La forma del decaimiento de este voltaje contiene información sobre la resistividad del subsuelo, puesto que la magnitud y distribución de las corrientes inducidas dependen de la resistividad de los materiales que componen el subsuelo, así como de sus principales características

físicas y químicas asociadas a estos materiales. Teniendo en cuenta lo anterior, la medida de la relación de decrecimiento del campo secundario proporciona una forma de detectar la presencia de cuerpos conductores en el subsuelo, así como estimar su conductividad y resistividad (Casas, 2000). Los contrastes en los valores de resistividad de los diferentes materiales geológicos en cada sitio son los que permiten aplicar exitosamente el método de prospección geofísica. En la **Figura 12** se aprecian los rangos teóricos de resistividad eléctrica que caracterizan a las rocas y sedimentos (Lowrie, 2007).

Figura 12

Rangos de resistividad eléctrica de rocas y sedimentos.



Nota. Fuente: tomado y editado de Lowrie (2007).

3.4.3 Consideraciones y limitaciones en la exactitud

Las mediciones obtenidas mediante métodos geofísicos siempre presentan un grado de incertidumbre, dado que se originan tanto de la respuesta de los materiales que conforman la Tierra como de la presencia de ruido electromagnético de fondo, el cual puede dividirse en fuentes naturales y artificiales. Dentro de las fuentes naturales, asociadas principalmente a métodos electromagnéticos, se encuentran las fluctuaciones del campo magnético generadas por los vientos solares, aunque dichas frecuencias son tan bajas que no influyen de manera significativa en las

mediciones transitorias. Una contribución más relevante corresponde a las descargas eléctricas producidas durante tormentas, las cuales, dependiendo de su distancia, pueden generar niveles constantes de ruido o ráfagas de mayor intensidad; este ruido natural es aleatorio, pero suele presentar mayor amplitud durante el día en comparación con la noche.

En áreas pobladas, el ruido de origen artificial también influye, especialmente aquel relacionado con la red de distribución de energía y con instalaciones eléctricas asociadas. En este sentido, la red eléctrica produce una señal armónica de 50 a 60 Hz, a la cual se suman contribuciones aleatorias de campos electromagnéticos transitorios surgidos de variaciones en la tensión de la red (Schamper *et al.*, 2013). Para mitigar estos ruidos en campo se emplean herramientas como el equipo WalkTEM, que permite visualizar en tiempo real la calidad y la tendencia de los datos medidos, así como inspecciones para descartar estructuras eléctricas superficiales o enterradas que puedan afectar los registros. Asimismo, existen además otras fuentes de ruido, como señales electromagnéticas por debajo de 1 Hz provenientes de la ionósfera, mientras que por encima de 1 Hz el espectro está dominado por descargas eléctricas, y en el rango de 10 a 25 kHz se ubican las interferencias procedentes de estaciones de radio (Sandoval Sandoval, 2019).

En este contexto, los modelos geológicos y geofísicos constituyen representaciones gráficas de la geometría y distribución de capas rocosas con diferentes propiedades físicas, elaboradas considerando el marco y las condiciones geológicas locales. En este contexto, una de las estrategias más efectivas para su construcción es la adquisición e inversión de datos geofísicos, pues permiten representar la distribución de propiedades específicas como la conductividad o la resistividad.

No obstante, la precisión y capacidad de representación de estos modelos está condicionada por factores diversos, entre ellos las condiciones meteorológicas, tales como intensidad de precipitaciones y niveles de evapotranspiración que afectan la recarga de acuíferos y, en consecuencia, la respuesta en los métodos de prospección; las condiciones topográficas reflejadas en cambios de pendiente y drenajes naturales; así como las condiciones geológicas vinculadas a la litología predominante, la presencia de fracturas y la heterogeneidad del subsuelo.

A esto se suman factores instrumentales, relacionados con la sensibilidad, calibración y configuración de los equipos utilizados en campo, así como fenómenos físicos como el decaimiento natural de los campos debido a la composición y propiedades de las rocas, la no linealidad en el comportamiento de los campos físicos ocasionada por la heterogeneidad y la influencia de campos electromagnéticos externos no asociados a la Tierra. En consecuencia, todos estos aspectos inciden directamente en la calidad y confiabilidad de los datos, lo que limita su utilidad interpretativa aun cuando se disponga de un mayor volumen de información.

Un ejemplo de estas dificultades es la indeterminación de zonas de baja velocidad en estudios de refracción sísmica, que refleja las restricciones inherentes a la adquisición y análisis de datos geofísicos (Kearey *et al.*, 2013).

3.5 Modelamiento directo e inversión de datos geofísicos

La modelación directa se fundamenta en la simulación, usualmente mediante herramientas computacionales, para representar a través de esquemas y modelos el comportamiento de los materiales del subsuelo frente a la generación de campos electromagnéticos transitorios en el tiempo. A partir de ello, se puede predecir de manera preliminar cómo se propagan y distribuyen dichos campos, lo cual resulta esencial para la posterior interpretación de los datos recolectados

en campo. Entre sus principales funciones está la de evaluar el rendimiento de algoritmos específicos, mediante la construcción de modelos sintéticos que incluyen configuraciones homogéneas, de dos y tres capas, con el fin de definir diferentes escenarios de simulación (Widodo, 2023).

En la prospección geofísica, los datos siempre constan de dos componentes: la medición obtenida y la incertidumbre asociada. Toda medición indirecta conlleva cierto grado de incertidumbre, ya que los resultados reflejan tanto la respuesta de los materiales que conforman el subsuelo como el ruido de fondo (Kirsh, 2006). Dicho ruido puede deberse a contrastes en las propiedades físicas del subsuelo, pero también a causas artificiales relacionadas con objetos de origen antropogénico, tales como líneas eléctricas de alta y baja tensión, materiales ferromagnesianos o desechos metálicos, dichas perturbaciones no deseadas en los datos se diferencian de la señal, que sí contiene la información propia del objeto o estructura a investigar.

La correcta interpretación de los sondeos TEM o en dominio del tiempo depende en gran medida del uso de técnicas de inversión eficaces, capaces de procesar la señal útil frente al ruido y de producir modelos confiables que representen adecuadamente las condiciones del subsuelo (Cai *et al.*, 2021).

La inversión en la geofísica es una herramienta que permite traducir datos adquiridos en un modelo de distribución de la o las propiedades físicas de la tierra de interés, que sea consistente con los datos obtenidos tanto en campo como en el conocimiento geológico (Kearey *et al.*, 2002). La imagen generada del subsuelo se puede obtener midiendo algún tipo de parametrización del espacio a investigar, el cual convierte este espacio en un modelo con parámetros m y

transformaciones a de los datos tomados al modelo G , a esto se le llama como proceso de inversión tal y como se muestra en la expresión

$$G(m) = d.$$

En muchos casos, queremos determinar un número finito de parámetros, para definir un modelo. Los parámetros pueden definir directamente una entidad física (por ejemplo, densidad, voltaje, velocidad sísmica) o pueden ser coeficientes u otras constantes dentro de una relación funcional que describe un proceso físico (Aster *et al.*, 2013).

En la literatura, existen diferentes enfoques para resolver el problema de la inversión de datos (por ejemplo, descomposición de valores singulares, mínimos cuadrados, métodos variacionales, redes neuronales, métodos Bayesianos, etc.). Los datos recolectados en campo están limitados por la cantidad y hay que tener en cuenta el factor asociado al ruido. Teniendo en cuenta lo anterior, se considera que el estudio de las características de la tierra se puede considerar como un sistema físico, cuyas propiedades pueden dividirse en tres etapas (L.R., 2015):

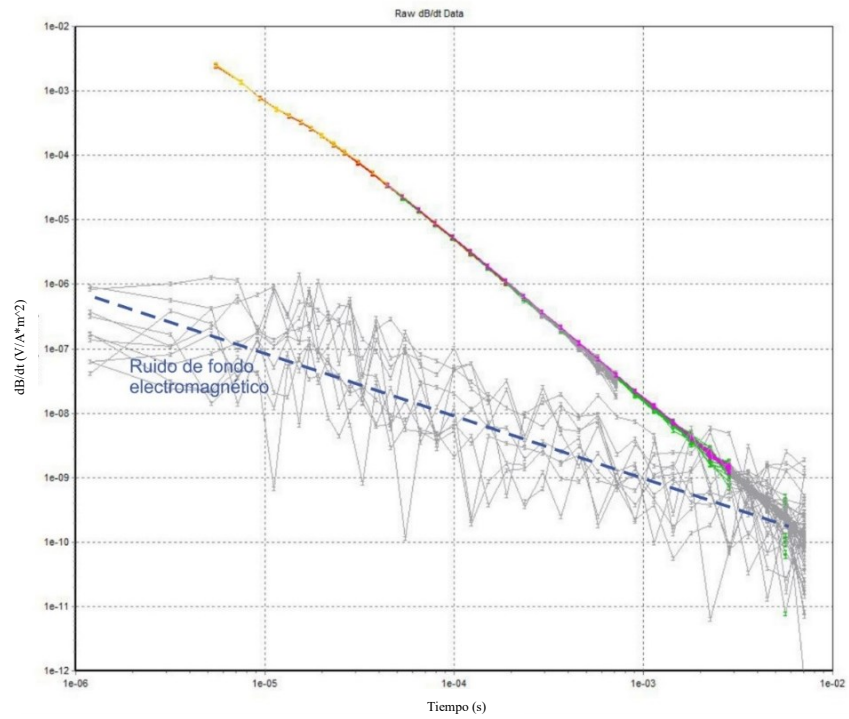
- *Parametrización del sistema*: la finalidad es obtener un conjunto mínimo de parámetros que lo caractericen en su mayoría, desde un determinado punto de vista.
- *Modelado directo*: permite conocer los parámetros del modelo, donde se calculan los valores de dichos parámetros en un modelo conocido d . Para los valores dados de los parámetros del modelo, se pueden hacer predicciones sobre los resultados de las mediciones de acuerdo con algunos datos o parámetros observados.
- *Modelado inverso*: utiliza datos reales de algunas mediciones o datos observados, para inferir valores reales de los parámetros del modelo m .

Para la inversión de datos que corresponde a los sondeos TEM, es importante entender que estos datos corresponden a mediciones del decaimiento del voltaje inducido en el subsuelo con respecto a la variable tiempo (ver Figura 13). Estos datos corresponden a información de la resistividad eléctrica de las capas o estratos geológicos, por lo cual pueden ser representadas gráficamente como valores de resistividad aparente (ρ_a) en función del tiempo (t), donde se puede observar cómo, a partir de diferentes filtros que aplica de manera automática el equipo, discretiza el ruido de fondo electromagnético para no perturbar los datos (ver Figura 14).

Las variaciones de resistividad aparente para tiempos cortos ($<100 \mu\text{s}$) están relacionadas a la distribución de los valores de resistividad en las capas más someras, mientras que las variaciones de resistividad aparente para tiempos largos ($>100 \mu\text{s}$) están relacionadas a variaciones de la resistividad en las capas más profundas. La profundidad de investigación depende directamente de la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética de los materiales existentes en el subsuelo (Sorensen *et al.*, 2003).

Figura 13

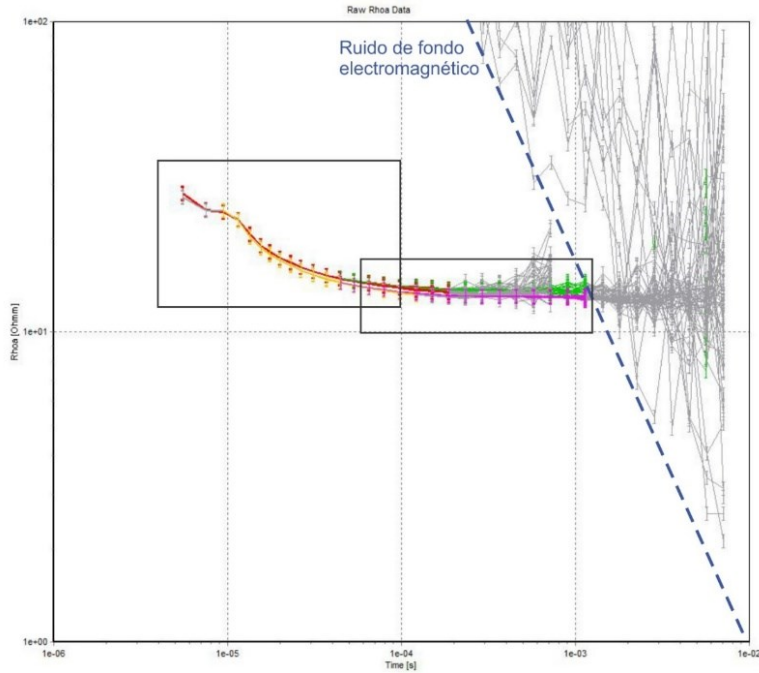
Representación de la curva de decaimiento del voltaje respecto al tiempo.



Nota. Fuente: Autor, generado en *software* SPIA (2024).

Figura 14

Curva de resistividad aparente (ρ_a) vs. Tiempo (t).

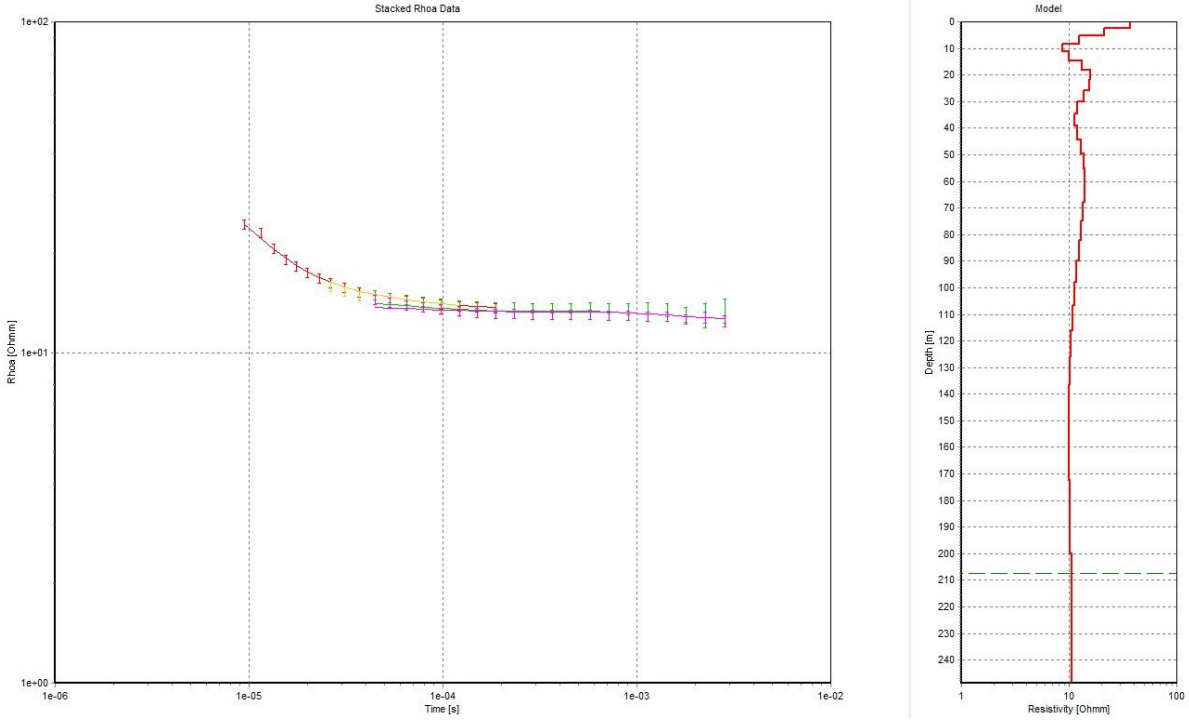


Nota. Fuente: Autor, generado en *software* SPIA (2024).

Antes de la inversión de datos se realiza un filtrado, considerando la incertidumbre de las mediciones y el ruido electromagnético de fondo. Luego, se aplica un ajuste automático con inversión suavizada para estimar la resistividad del subsuelo en un sondeo unidimensional de 20 a 30 capas de espesor definido (Castillo, 2012). Finalmente, mediante un proceso iterativo de inversión robusta, se obtiene el modelo de capas hasta que el residual se sitúe por debajo del valor aceptable de 2.0.

Figura 15

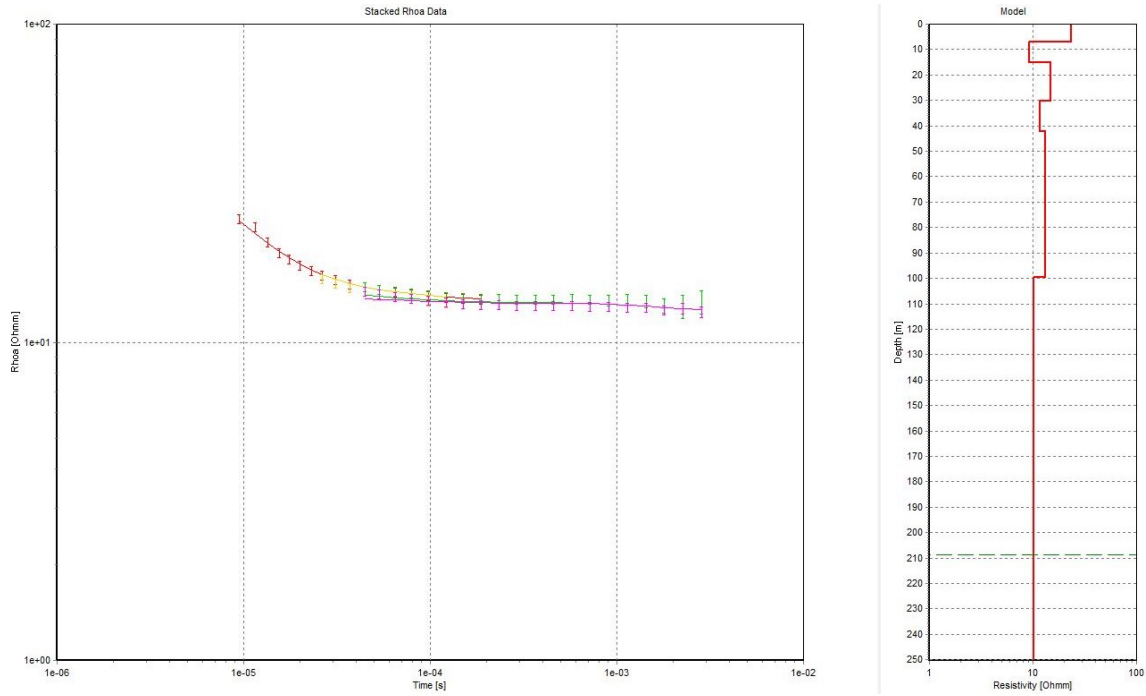
Resultado de la inversión suavizada 1D.



Nota. Fuente: Autor, generado en *software* SPIA (2024).

Figura 16

Resultado de la inversión robusta ID.



Nota. Fuente: Autor, generado en *software* SPIA (2024).

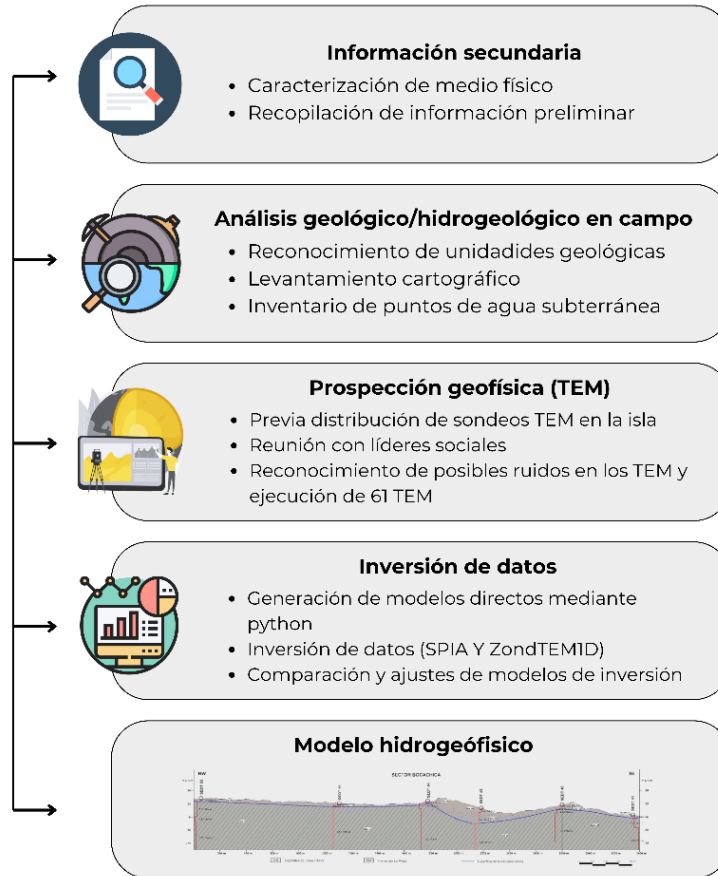
4. Metodología

El presente trabajo de investigación se desarrolló a partir del procesamiento e interpretación de los resultados obtenidos mediante la prospección geofísica haciendo uso de la técnica TEM ya adquiridos dentro de la Isla de Tierra Bomba, con la finalidad de construir un modelo hidrofísico que representara las características hidrogeológicas del área de estudio a través de la aplicación de procesos y técnicas que permitieron obtener resultados integrando aspectos claves como la geológica, geofísica y la hidrogeología. La Figura 17 presenta el esquema

metodológico que se usó para la generación de este modelo hidrogeofísico conceptual. A continuación, se describen las cuatro etapas que conforman esta metodología:

Figura 17

Metodología para generación de modelo hidrogeofísico conceptual



Nota. Fuente: Autor.

4.1 Etapa 1

En esta primera etapa se inició con la búsqueda y análisis de documentación relevante sobre la información geológica e hidrogeológica de la ITB, así como la recopilación de datos cartográficos y e información litológica. También se realizó una localización preliminar de los

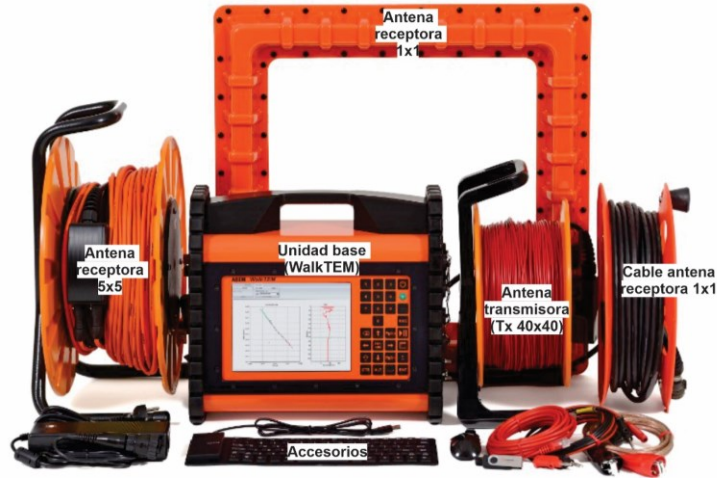
sondeos a realizar, seguido de una salida de reconocimiento y socialización con la comunidad de las actividades a realizar. Durante esta etapa se validó y verificó la información geológica preexistente identificada en oficina, de manera conjunta se procedió a realizar la adquisición de datos geofísicos mediante el método TEM, realizada por el equipo técnico de la empresa consultora Hydroingeniería S.A.S. Esta etapa fue realizada en su totalidad en el marco del proyecto “*Consultoría para determinar la disponibilidad, cantidad, calidad del agua subterránea que conlleve al diseño de programas de manejo y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico e hidrología de la isla Tierra Bomba jurisdicción de la Corporación Ambiental del Canal del Dique – CARDIQUE*”.

4.1.1 Proceso de adquisición geofísica

El instrumento WalkTEM de ABEM, reconocido por su alta sensibilidad a los materiales conductores, y la configuración utilizada para la adquisición de los 61 sondeos TEM en campo del presente proyecto permite diferenciar entre agua dulce, salina e incluso agua con presencia de contaminantes (GuidelineGeo, 2024). El montaje geofísico consta de una antena o bucle transmisor cuadrado (Tx) con tamaño de 40 x 40 m², encargada de inducir corriente al subsuelo y dos bobinas receptoras más pequeñas (1 x 1m² y 5 x 5 m²) responsables de recibir la información en modo de decaimiento de voltaje en el tiempo, una unidad base o controlador, una batería externa y accesorios adicionales. En la Figura 18 se presentan los componentes del equipo WalkTEM.

Figura 18

Partes del equipo WalkTEM



Nota. Fuente: tomado y editado de GuidelineGeo (2024).

Para representar esquemáticamente el proceso de adquisición de datos, la Figura 19 ilustra su funcionamiento, a partir de la antena transmisora encendida (Tx), la corriente comienza a fluir a través del bucle (rojo), generando un campo magnético secundario (amarillo) el cual se registra en las bobinas receptoras ubicadas en el centro del arreglo (GuidelineGeo, 2024).

Figura 19

Esquema de campo para adquisición de datos TEM mediante equipo WalkTEM.

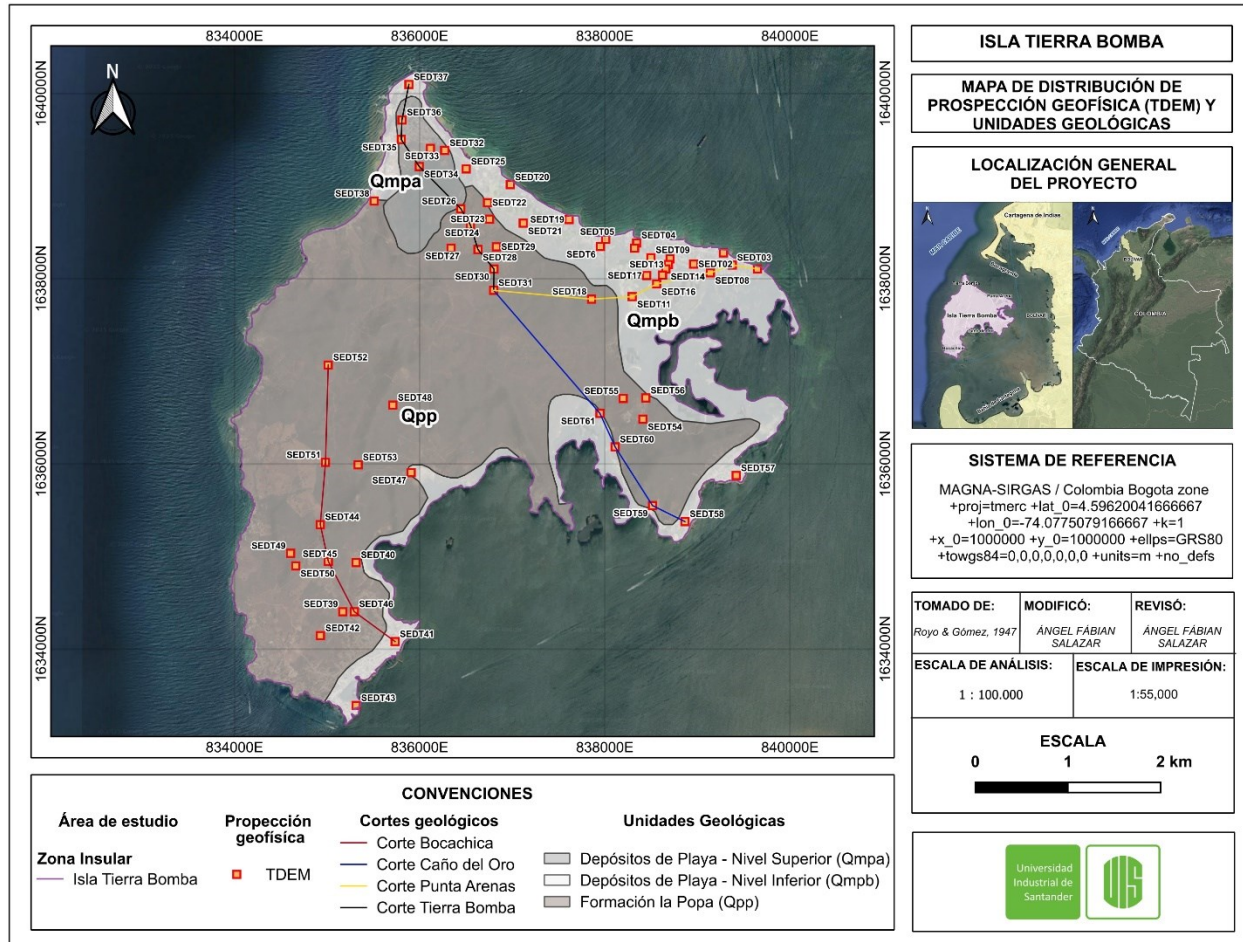


Nota. Fuente: tomado y editado de GuidelineGeo (2024).

La Figura 20 muestra la distribución de los 61 sondeos TEM realizados en la ITB, considerando la disposición de las unidades geológicas presentes en superficie.

Figura 20

Distribución y geología de la prospección geofísica mediante el método TEM.



Nota. Fuente: Autor.

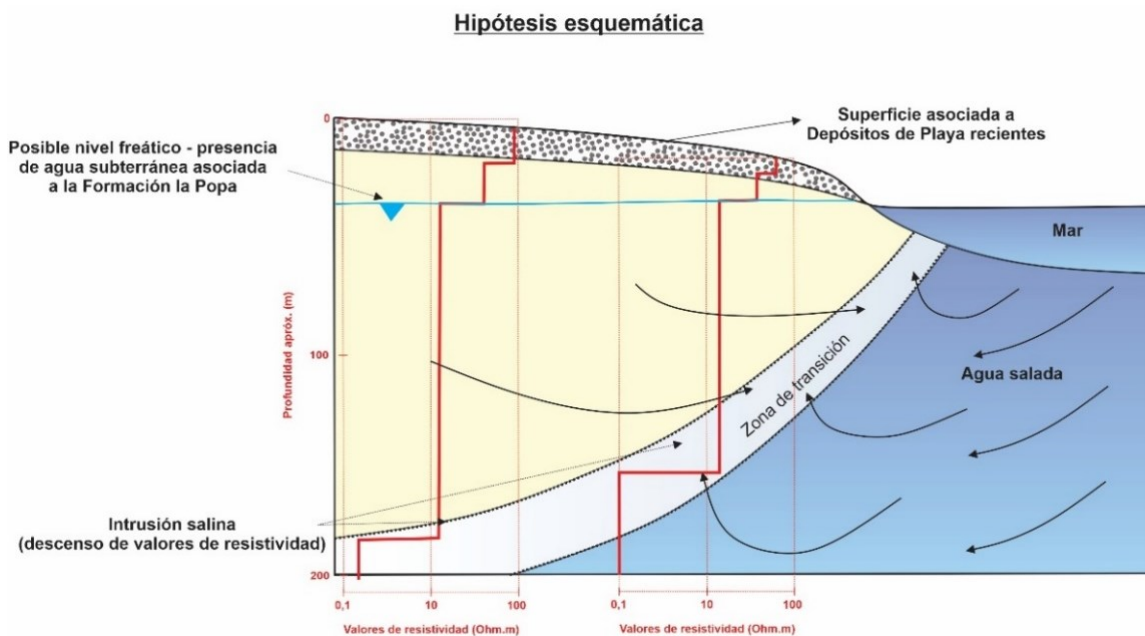
4.2 Etapa 2

En la segunda etapa, se desarrollaron modelos directos utilizando el lenguaje de programación Python, considerando las características geológicas y geofísicas típicas de este ambiente, como la geometría de las capas y valores de resistividad obtenidos de bibliografía y

fuentes relevantes, basados en la configuración de la hipótesis. En la Figura 21 se muestra la hipótesis esquemática del proyecto de investigación el cual muestra de manera general, el comportamiento típico de los ambientes costeros enmarcado con las unidades geológicas tomadas de información secundaria mostrada a detalle en el Capítulo 4.1 Marco geológico regional, donde se relacionan las unidades geológicas identificadas dentro del área de estudio y la información del documento respecto a la intrusión marina y su incidencia en los acuíferos (López Geta & Gómez - Gómez , 2007).

Figura 21

Esquema de la hipótesis asociado al presente proyecto de investigación



Nota. Tomado y editado de López-Geta & Gómez-Gómez (2007).

Para el modelamiento, se emplearon las librerías NumPy, Matplotlib y PyGIMLI, además, se tomaron como referencia los datos obtenidos a partir de los 61 sondeos TEM adquiridos en la ITB. A partir de esta información, se realizó un modelamiento directo modificando la resistividad de

las capas, donde, por ejemplo, para una capa de asociada a la Formación la Popa con posible presencia de agua salada, se asocian valores de resistividad muy bajos (por debajo de 5 Ohm.m) y para areniscas calcáreas y calizas con posible presencia de agua dulce de baja calidad, valores de resistividad entre 10 y 50 Ohm.m. A los datos sintéticos se les incluyó un valor de ruido correspondiente a 1, 10 y 20%, con el objetivo de evaluar cómo las condiciones características del área y el ruido en los datos pueden influir en la calidad y la variabilidad de los modelos finales.

Considerando los resultados de los modelos sintéticos, se procedió a realizar la inversión ajustada de datos TEM, integrando los resultados de los modelos geológicos directos, la información secundaria y descripciones litológicas de las unidades. Para la inversión de datos, se utilizó inicialmente el *software* SPIA, el cual genera modelos unidimensionales que muestran la distribución de la resistividad en el subsuelo y su licencia fue suministrada por la empresa consultora Hydroingeniería S.A.S., que además acompañó y avaló el uso y la publicación de los resultados. De manera complementaria, se realizó la inversión de datos con el *software* ZondTEM1, una herramienta de libre acceso que, aunque presenta ciertas restricciones en la configuración de parámetros, opciones de visualización y exportación, permitió comparar los datos obtenidos y evaluar si dichas limitaciones afectan la calidad e interpretación práctica de los resultados.

Para el procesamiento o inversión de datos, se estableció una secuencia metodológica orientada a la generación de modelos de resistividad en profundidad, con el objetivo de obtener información detallada sobre la geometría estructural y las propiedades eléctricas del subsuelo. Este aspecto resulta fundamental para la caracterización geológica e hidrogeológica del área de estudio,

facilitando una interpretación más precisa de las unidades litoestratigráficas y su relación con posibles reservorios de agua subterránea.

En primera instancia, se llevó a cabo un análisis estadístico exploratorio de los datos, con el propósito de identificar el comportamiento general de la resistividad en profundidad, evaluar su variabilidad mediante el cálculo de la desviación estándar y analizar el nivel de ruido presente en cada uno de los sondeos TEM. Tanto el análisis estadístico como la evaluación del ruido se realizaron mediante la visualización y procesamiento en el *software* SPIA, que fundamenta sus cálculos en algoritmos de inversión basados en métodos matemáticos.

Es importante señalar que los modelos generados representan, en cierta medida, una aproximación a las condiciones actuales de la isla y pueden estar sujetos a modificaciones conforme se disponga de nueva información geológica e hidrogeológica, con el objetivo de obtener resultados mediante un *software* libre o de fácil acceso, se realizó la inversión de los 61 sondeos TEM mediante ZondTEM1. Aunque esta versión gratuita presenta limitaciones en cuanto a funciones avanzadas, ofrece una alta versatilidad para la interpretación de datos. ZondTEM1 emplea inversiones 1D con algoritmo de inversión suavizada y focalizada, que permiten obtener distribuciones continuas en las propiedades geo eléctricas.

4.3 Etapa 3

La tercera etapa consistió en el análisis e interpretación de los resultados obtenidos de la inversión geofísica. Para ello, se compararon los modelos directos previamente implementados, con el objetivo de seleccionar aquellos que mejor se ajustaran a las condiciones planteadas en la hipótesis esquemática. Una vez interpretada y validada la información, se elaboraron cortes y esquemas geológicos e hidrogeológicos utilizando el *software Leapfrog*, suministrado por la

empresa Novambientti S.A.S., con fines sin ánimo de lucro. A través de estos esquemas, se buscó identificar las características y distribución de las condiciones del terreno, incluyendo la geometría de las unidades hidrogeológicas, los valores de resistividad y la presencia de intrusión salina o zona de transición.

4.4 Etapa 4

Durante la fase final del proyecto se llevaron a cabo actividades de divulgación y comunicación de los resultados. En primer lugar, se elaboró un documento científico que recopila los avances y hallazgos a lo largo del proyecto de investigación. Paralelamente, a medida que se obtenían resultados, se preparó una ponencia para el Congreso Argentino y XVI Congreso Latinoamericano de Hidrogeología Dr. Emilio Custodio Gimena, con el objetivo de presentar los hallazgos más significativos y propiciar el análisis de la información recolectada mediante el diálogo e intercambio con profesionales de disciplinas relacionadas.

Estas iniciativas de difusión fueron fundamentales para dar visibilidad al estudio, garantizar su validez y rigurosidad científica y aportar al conocimiento existente sobre la hidrogeología de la ITB.

5. Resultados

Con el propósito de proporcionar un análisis detallado, a continuación, se presentan los hallazgos derivados del modelamiento directo, la inversión de datos y la generación de modelos geológicos y geofísicos. Estos elementos fueron fundamentales para la caracterización hidrogeológica de la ITB, ya que permitieron interpretar cualitativamente la estructura del subsuelo, la distribución de unidades hidrogeológicas y la posible presencia de intrusión salina o variaciones en los valores de resistividad del terreno.

5.1 Actividades de campo

En el marco del proyecto “*Consultoría para determinar la disponibilidad, cantidad, calidad del agua subterránea que conlleva al diseño de programas de manejo y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico e hidrología de la isla Tierra Bomba jurisdicción de la Corporación Ambiental del Canal del Dique – CARDIQUE*” se realizó la adquisición de los 61 datos de prospección geofísica mediante la técnica TEM (ver Figura 20). Durante estas actividades de campo se lograron identificar cada una de las unidades geológicas asociadas a la Formación la Popa y los Depósitos de Playa, así como las principales características morfométricas de la isla, altos topográficos y cada una de las comunidades distribuidas en la isla.

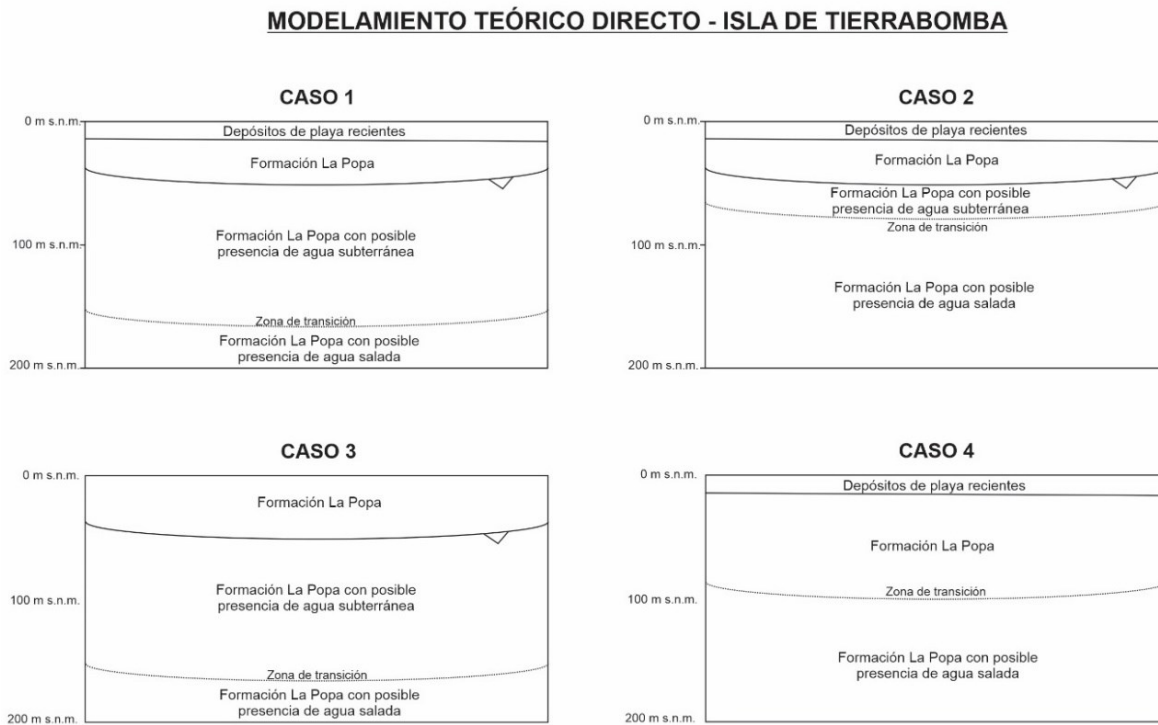
5.2 Modelación directa

En total, se realizó la modelación a partir de cuatro (4) casos base específicos (Figura 22), considerando la hipótesis esquemática presentada en la Figura 16, donde se ilustran las diferentes capas geológicas identificadas a partir de la información preliminar. Este modelamiento directo se realizó usando un código libre implementado en Python (Apéndice 1).

Considerando el esquema hipotético propuesto para la ITB y los distintos escenarios derivados de las hipótesis formuladas, a continuación, se presentan las salidas gráficas correspondiente al Caso 1, donde se ilustran los posibles modelos de adquisición desarrollados a partir de la hipótesis esquemática del proyecto, así como del marco geológico e hidrogeológico, tanto regional como local.

Figura 22

Modelamiento teórico directo preliminar mediante diversas hipótesis



Nota. Fuente: Autor.

Las demás salidas graficas correspondientes a los resultados de los demás casos se encuentran en el Apéndice 3, donde se ilustran los posibles escenarios de adquisición desarrollados a partir de la hipótesis esquemática del proyecto de investigación, así como del marco geológico e hidrogeológico tanto regional y como local. En el Caso 1 se modela la secuencia litoestratigráfica comúnmente observada en la ITB. En la base del modelo se ubica la Formación La Popa, compuesta por intercalaciones de arenas y calizas fracturadas, con posible presencia de agua salada, presentando teóricamente una resistividad de 5 Ohm.m y un espesor aproximado de 30 m. Sobre esta capa se encuentra una unidad con la misma composición litológica, pero con presencia

probable de agua dulce, lo que indica una zona de transición, con una resistividad estimada de 50 Ohm.m y un espesor de 150 m. Encima, se sitúa una tercera unidad de la misma formación, también constituida por arenas y calizas, pero sin evidencia de saturación hídrica, con una resistividad de 20 Ohm.m y espesor de 20 m. Finalmente, en la parte superior del modelo se encuentran los depósitos de playa recientes, con una resistividad de 50 Ohm.m y un espesor estimado de 10 m.

Los resultados de la inversión muestran un rango de resistividades similar entre los modelos generados para este caso, indicando que la incorporación de errores aleatorios bajos (entre 0 y 10%) no altera significativamente la interpretación. No obstante, se observan ligeras variaciones en las profundidades de la investigación, obteniéndose datos confiables entre los 90 m y 120 m. Sin embargo, al introducir un error del 20%, las diferencias en los resultados se vuelven notoriamente significativas, lo que indica una mayor sensibilidad del modelo frente a incertidumbres elevadas en los datos de entrada.

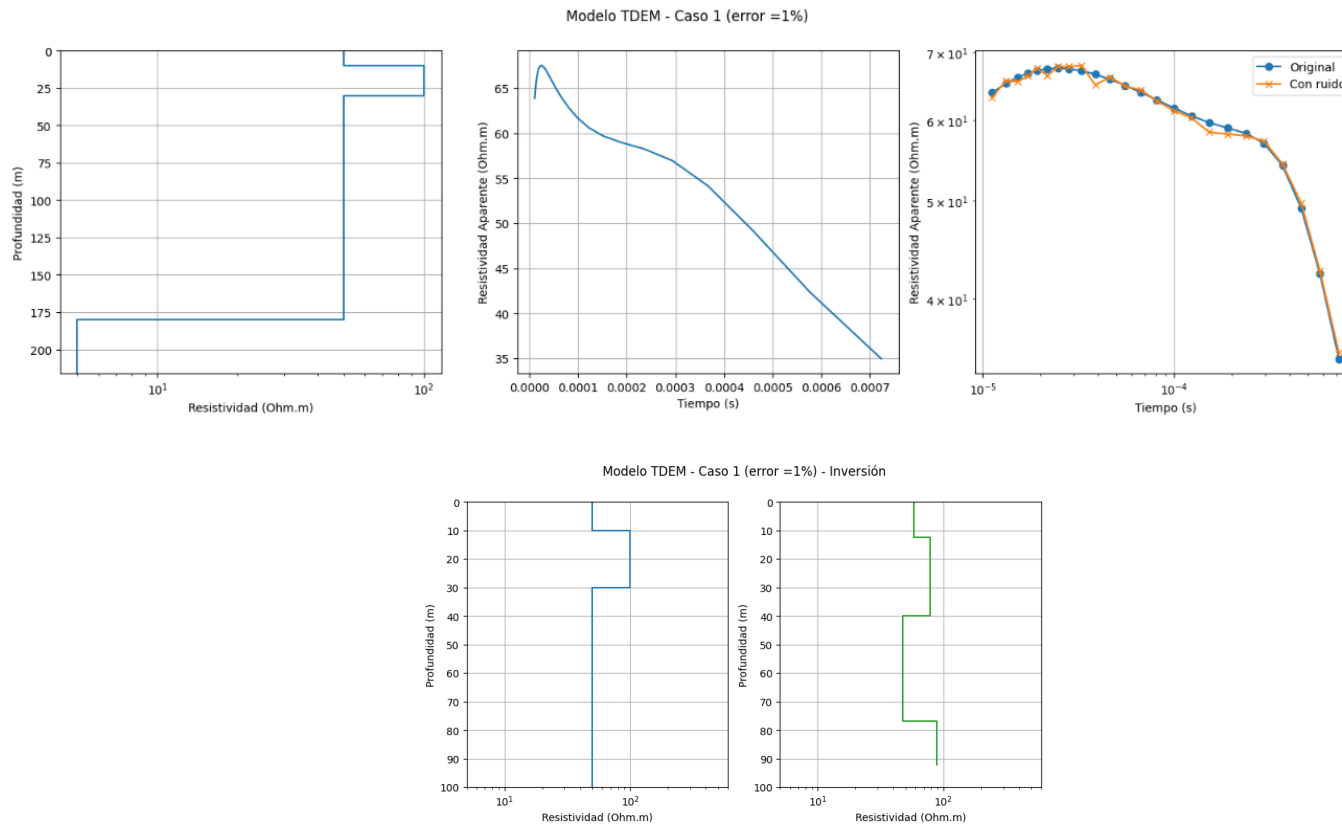
Los resultados del modelamiento directo para este Caso 1 se muestran a detalle en la Figura 23 (error de 1%), Figura 24 (error de 10%) y Figura 25 (error de 20%).

En los diferentes casos se destaca la presencia o ausencia de los Depósitos de Playa (Caso 3), los cuales han sido erosionados debido a la interacción con el ambiente, especialmente por procesos eólicos y marinos, también evidenciado durante la campaña de campo, donde se identifica que en la mayoría de los sectores hacia el interior de la isla (lejos de la línea de costa), aflora la Formación la Popa. Este Caso 3 mostró que, para los diferentes ruidos usados para este modelamiento directo, se logra identificar la capa asociada al Formación la Popa con posible presencia de agua subterránea a una profundidad aproximada de 30 m y la zona de transición entre

agua dulce y agua salada y la inversión básica realizada, no muestra discrepancias con el modelo original usado. Para el Caso 2 se realizó la modelación teniendo como hipótesis la presencia de todas las unidades geológicas como los Depósitos de Playa recientes, infrayaciendo la Formación la Popa, posterior a esta, la misma Formación la Popa, pero con posible presencia de agua subterránea (profundidad aproximada de 30 m), la zona de transición cerca de los 80 m y finalmente, la Formación la Popa con posible presencia de agua salada. Para el Caso 4, se tomó la hipótesis de toda la secuencia litológica descrita anteriormente en el Caso 2, pero sin la Formación la Popa con posible presencia de agua subterránea.

Figura 23

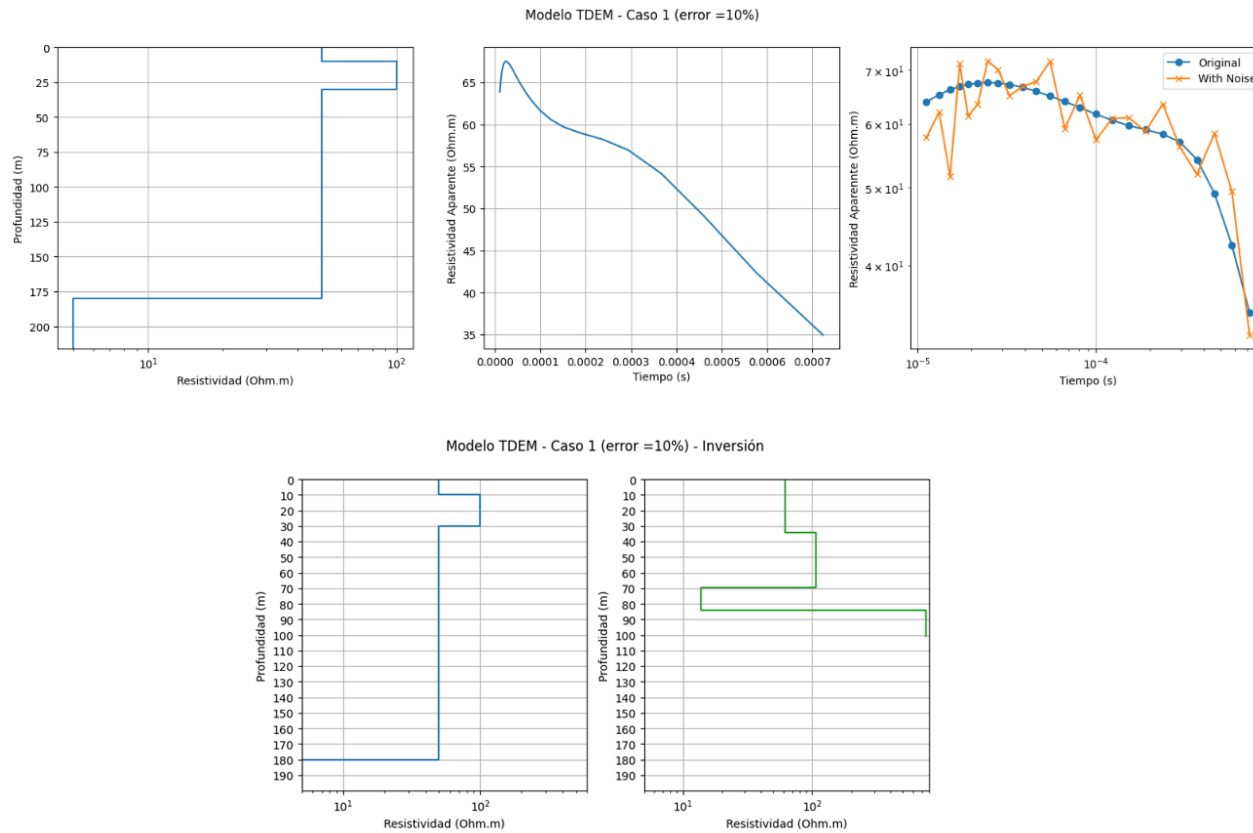
Modelamiento directo TEM para el Caso 1 con 1% error



Nota. Generado en Python. Modelamiento directo TEM en el cual se evidencia que el modelo invertido no presenta discrepancias significativas con el modelo original. Fuente: Autor.

Figura 24

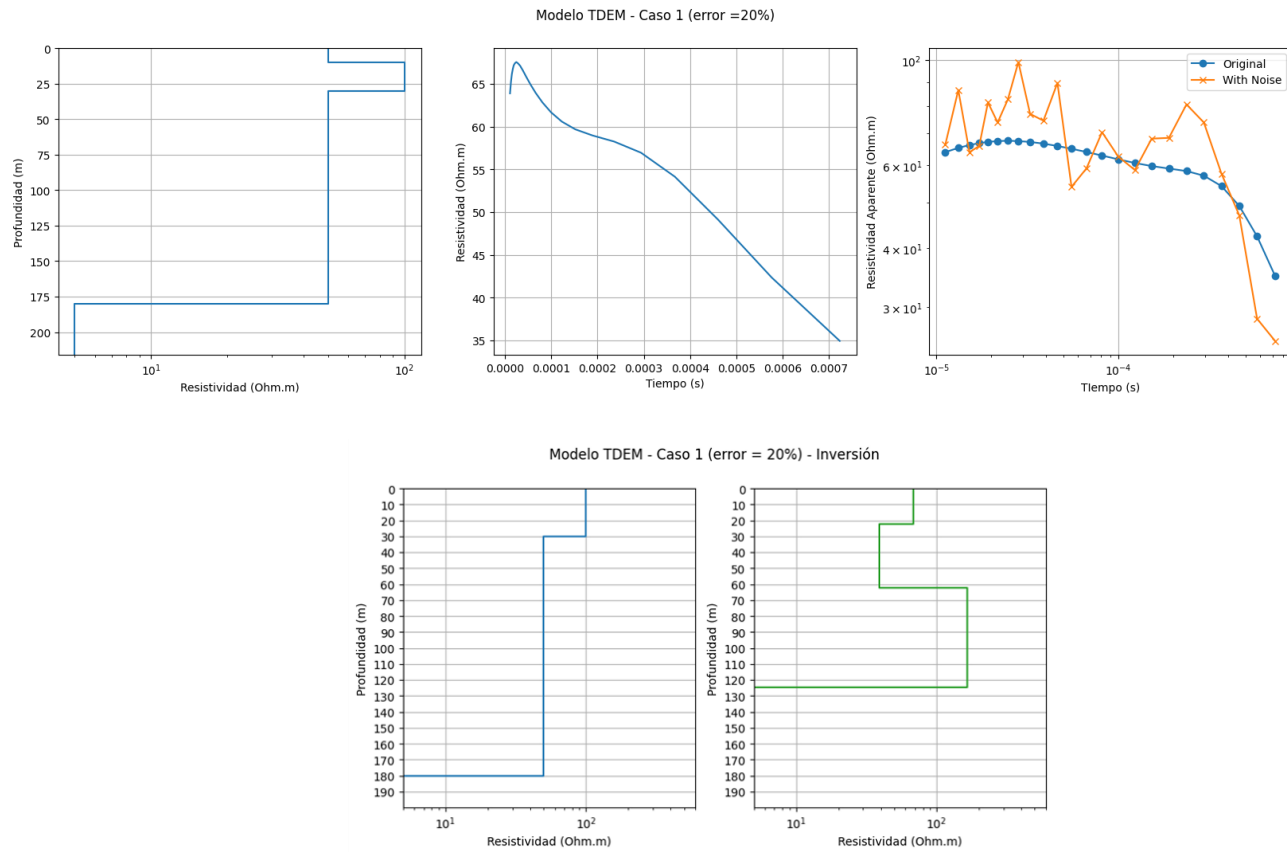
Modelamiento directo TEM para caso 1 con 10% de error



Nota. Generado en Python. Modelamiento directo TEM en el cual se evidencia que el modelo invertido no presenta discrepancias significativas con el modelo original. Fuente: Autor.

Figura 25

Modelamiento directo TEM para caso 1 con 20% de error



Nota. Generado en Python. Modelamiento directo TEM en el cual se evidencia que el modelo invertido no presenta discrepancias significativas con el modelo original. Fuente: Autor.

5.3 Inversión de datos electromagnéticos - TEM

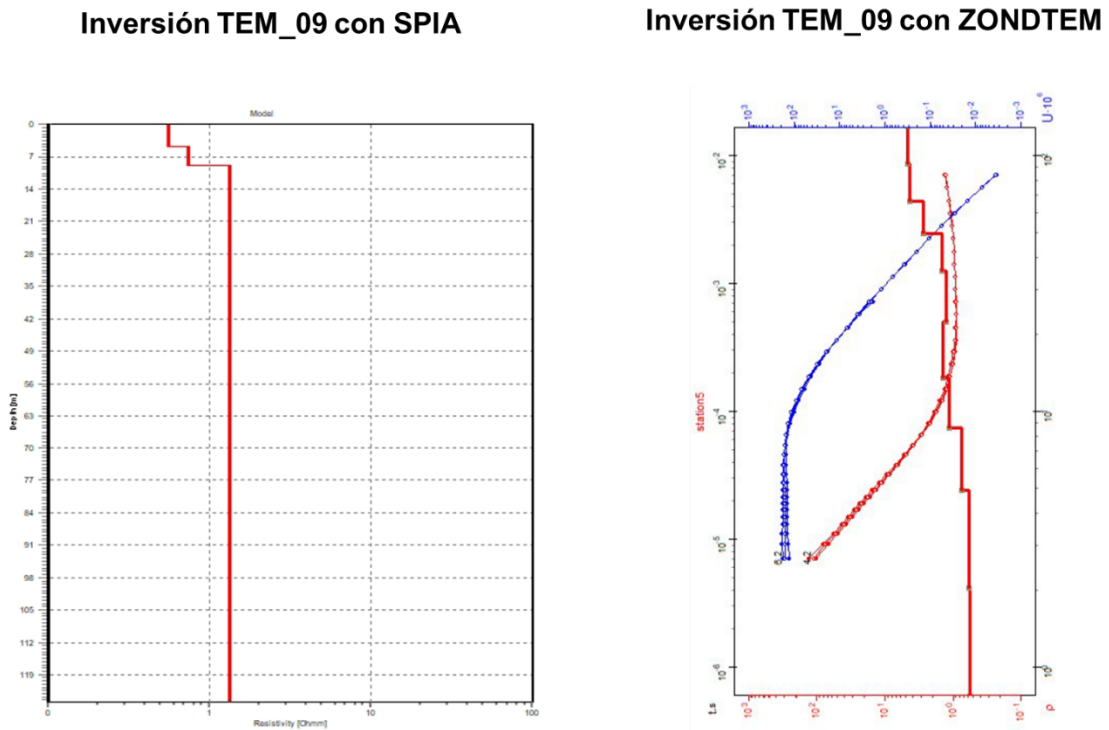
Al comparar los resultados generados por ambos *softwares* de inversión, SPIA (licencia otorgada) y ZondTEM1 (licencia gratuita), se evidenció que los modelos de resistividad eléctrica obtenidos son en general comparables, teniendo en cuenta que para la mayoría de los TEM ejecutados, los contrastes de resistividad se muestran en rangos de profundidad similares, y los valores no se modifican al momento de realizar la inversión de datos con los dos *softwares*.

No obstante, los modelos 1D generados con SPIA, presentan una mejor similitud con los modelos directos generados, con resultados suavizados que permiten identificar con mayor claridad las diferentes capas geológicas de interés, esto podría asociarse a las limitaciones funcionales presentes en la versión libre del software ZondTEM1, por lo cual, los modelos generados en SPIA, fueron los que finalmente se usaron para realizar los modelos geológicos – geofísicos y su respectiva interpretación.

En la Figura 26 se muestra un ejemplo de inversión con los dos *softwares* para el TEM_09 ubicado en sentido noreste de la isla, sobre la unidad geológica Depósitos de playa. En los resultados de la inversión se observa que existen variaciones en la cantidad de capas asociadas a los valores de resistividad, esto se debe a las especificaciones de cada uno de los programas usados, donde para SPIA se puede discretizar una cantidad de capas específicas (un total de 3), mientras que para ZondTEM1 se discretizan un total de 20 capas, sin embargo, los valores de resistividad no cambian significativamente. Es importante resaltar que los ejes del ejemplo de inversión con SPIA (derecha) y con ZondTEM1 (izquierda) presentan en el eje x los valores de resistividad en ohmios por metro y en el eje y la profundidad en metros.

Figura 26

Inversión del TEM_09 realizada con el software SPIA y ZONDTEM1.



Nota. Fuente: Autor.

Los resultados correspondientes a las inversiones realizados con el *software* SPIA y ZondTEM1 se presentan en el Apéndice 6.

5.4 Modelos geológicos – geofísicos

La integración de los datos TEM, los modelos sintéticos y la información secundaria más relevante permitió la construcción de modelos geológicos-geofísicos ajustados a la ITB. Estos modelos representan la distribución espacial de las diferentes unidades geológicas, sus respectivos valores de resistividad y profundidades. La información obtenida en mapas y cortes bidimensionales permite identificar las zonas con mayor potencial hidrogeológico, así como la ubicación preliminar de posibles acuíferos de interés.

Estos modelos una base sólida para el desarrollo de modelos hidrogeológicos integrales. A continuación, se presentan los resultados enfocados en la construcción de estos modelos geológicos – geofísicos:

5.4.1 Modelos unidimensionales

Los modelos geológicos – geofísicos unidimensionales resultan de la interpretación de los datos obtenidos mediante la técnica TEM, y permiten identificar características hidrogeológicas relevantes de la isla, tales como la profundidad, resistividad, y extensión de las capas geológicas. Esta información es clave para comprender el comportamiento del agua subterránea en la zona.

Teniendo en cuenta la inversión de los datos, el análisis previo de la información geológica, los resultados del modelamiento directo y la hipótesis formulada para el presente proyecto de investigación, se estableció un rango de valores de resistividad característico de cada una de las unidades identificadas en la ITB. Esta información, sintetizada en la Tabla 5, constituye un insumo clave para la interpretación de los resultados y posterior construcción de los modelos geológicos-geofísicos 2D

Tabla 5

Rangos de valores de resistividad para las unidades geológicas, ITB.

Formación Geológica	Nomenclatura	Descripción	Rango (Ohm.m.)
Depósitos de playa superior (Qmpa)	Qmpa (a)	Arenas bioclásticas con posible presencia de agua salada	1,14 – 1.64

Formación Geológica	Nomenclatura	Descripción	Rango (Ohm.m.)
	Qmpa (b)	Suelo residual compuesto por arenas y restos de corales y calizas	7,79 -8,46
	Qmpa (c)	Suelo residual compuesto por calizas y restos de corales	36 – 114
Depósitos de playa inferior (Qmpb)	Qmpb (a)	Suelo residual compuesto por arenas lodosas y restos de corales	0,714 – 9,73
	Qmpb (b)	Suelo residual compuesto por arenas calcáreas con restos de corales	10,8 – 42,1
Formación La Popa (Qpp)	Qpp (a)	Suelo residual compuesto por arenas litobioclásticas	0,671 – 20,4
	Qpp (b)	Suelo compuesto de arenas litobioclásticas y calizas coralinas	33,1 - 172
	Qpp (c)	Areniscas lodosas bioclásticas con posible presencia de agua salada	0,209 – 0,985
	Qpp (d)	Areniscas bioclásticas con posible presencia de agua salada a salobre	1 – 9,41

Formación Geológica	Nomenclatura	Descripción	Rango (Ohm.m.)
	Qpp (e)	Areniscas calcáreas y calizas con posible presencia de agua salobre a dulce de baja calidad	11,7 – 50,4

Nota. Fuente: Autor.

Los resultados de la inversión, en términos generales, mostraron la presencia de las unidades geológicas: Deposito de Playa y Formación La Popa, evidenciando variaciones texturales y composicionales tomado a partir de la información geológica encontrada, así como la posible presencia de diferentes tipos de agua, según lo observado durante el trabajo de campo. Para cada unidad se estableció una nomenclatura correspondiente a su formación geológica y se definió un rango de valores de resistividad asociado a cada una de las unidades teniendo en cuenta la información secundaria y sus respectivas descripciones litológicas.

Los modelos TEM fueron interpretados bajo un enfoque simplificado, asumiendo que las propiedades físicas homogéneas dentro de cada una de las capas identificadas, por lo tanto, está interpretación solo representa una aproximación a las condiciones geológicas y estructuras presentes, las cuales pueden implicar cambios tanto físicos como químicos del medio.

Es importante señalar que, para cada unidad asociada a las formaciones geológicas predominantes en el área de estudio, se propuso un rango de valores de resistividad típico, tomando como referencia diversas fuentes bibliográficas y datos conocidos de estas unidades. No obstante, este rango puede ser comparable en otras unidades interés teniendo en cuenta que este parámetro no sólo se relaciona a la resistividad del agua o del material presente, sino también de condiciones físicas y químicas que influyen en la conductividad eléctrica, como la textura, compactación,

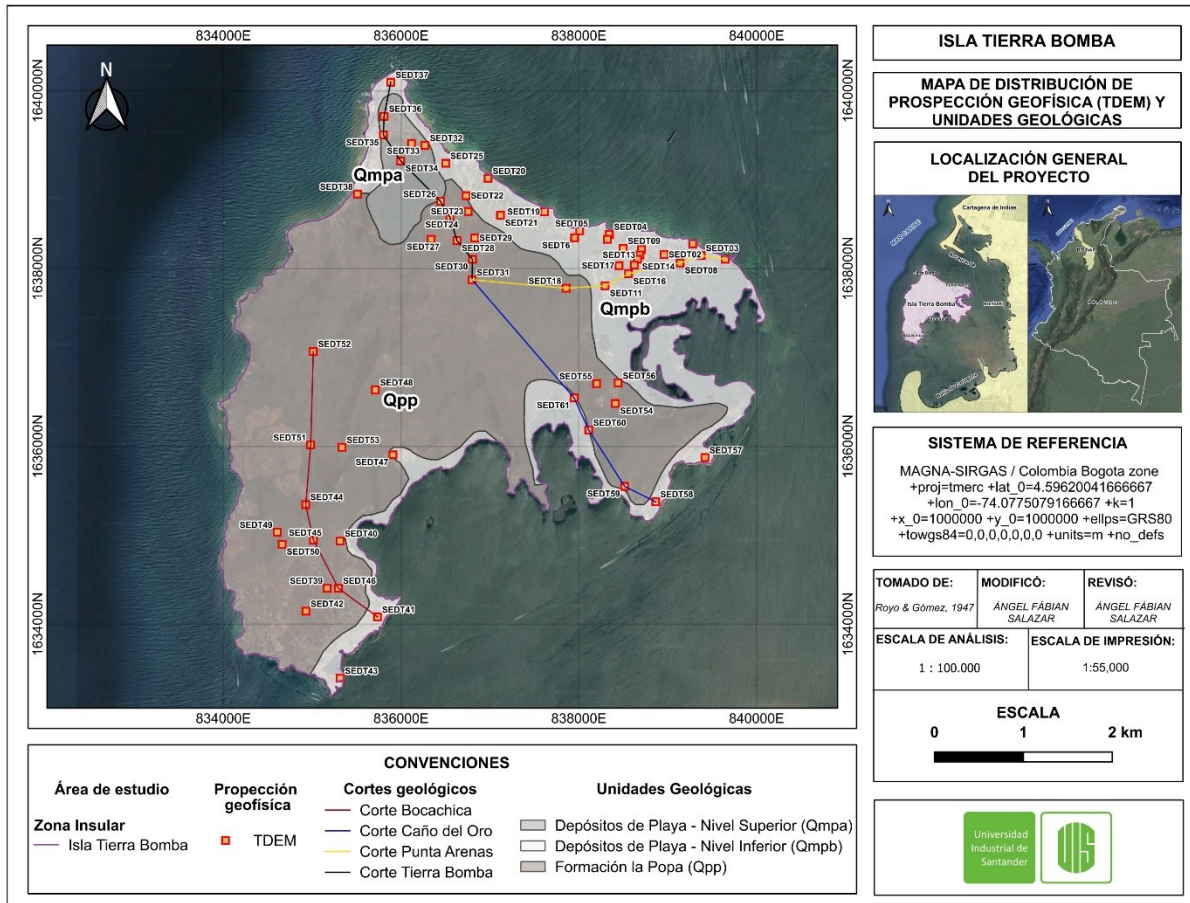
porosidad y otras propiedades de las rocas y sedimentos. La interpretación individual de los modelos unidimensionales de cada sondeo TEM se encuentra detallada en el Apéndice 5.

5.4.2 Cortes geológicos – geofísicos

A partir de la información obtenida del procesamiento e interpretación en 1D mediante el *software* SPIA, en la que se identificaron contrastes significativos en los valores de resistividad, y considerando las descripciones geológicas del contexto regional y local, se construyeron cortes geológicos-geofísicos en 2D. Estos cortes permiten inferir y visualizar la variación lateral de la secuencia litológica con sus respectivas características. En la Figura 27 se muestra la distribución de estos cortes geológicos – geofísicos teniendo en cuenta la información geológica y la distribución de los TEM. En el Apéndice 2 se presentan los cortes geológicos a mayor definición.

Figura 27

Distribución de los cortes geológicos – geofísicos por sectores teniendo en cuenta la información geológica.

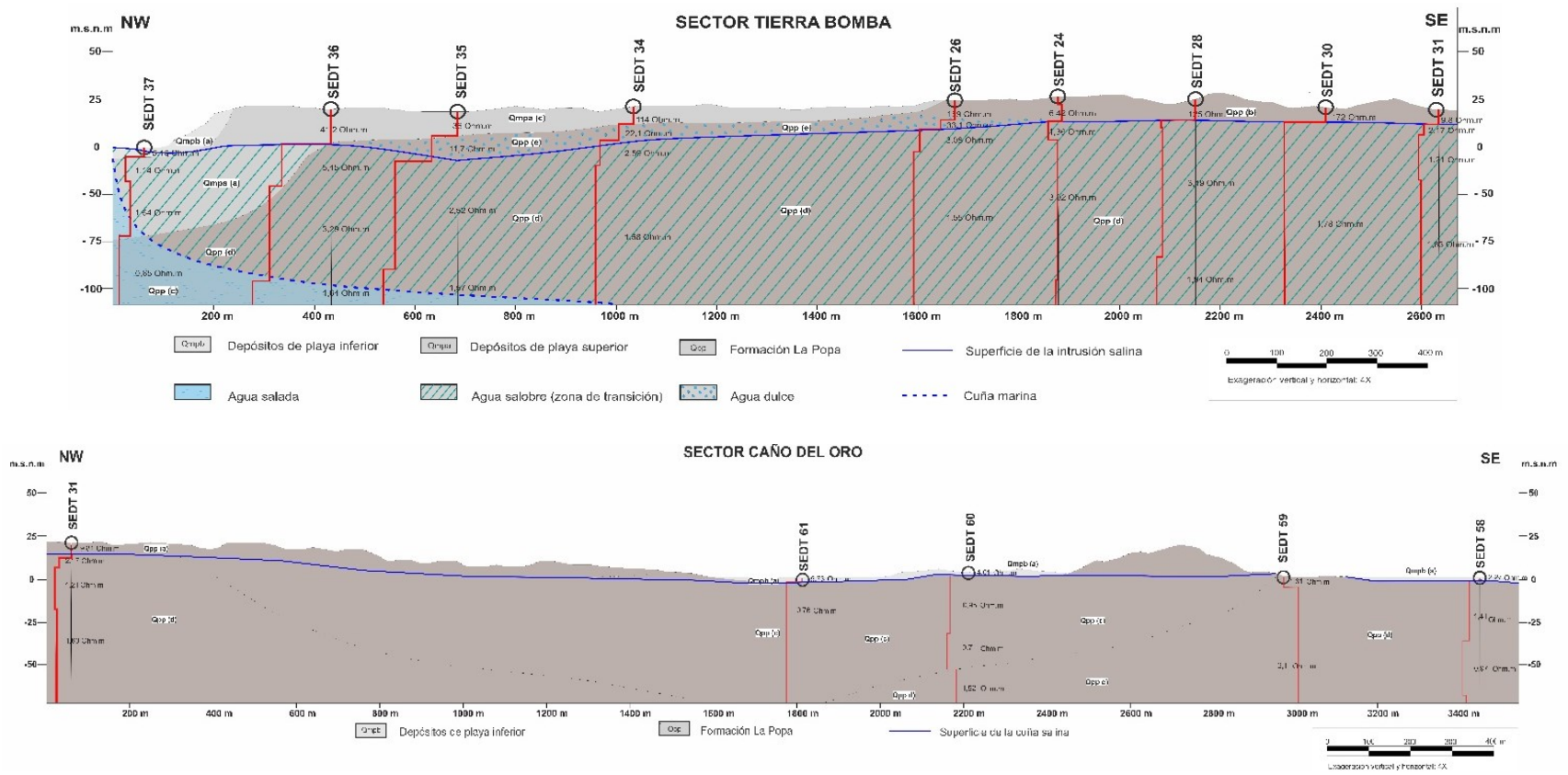


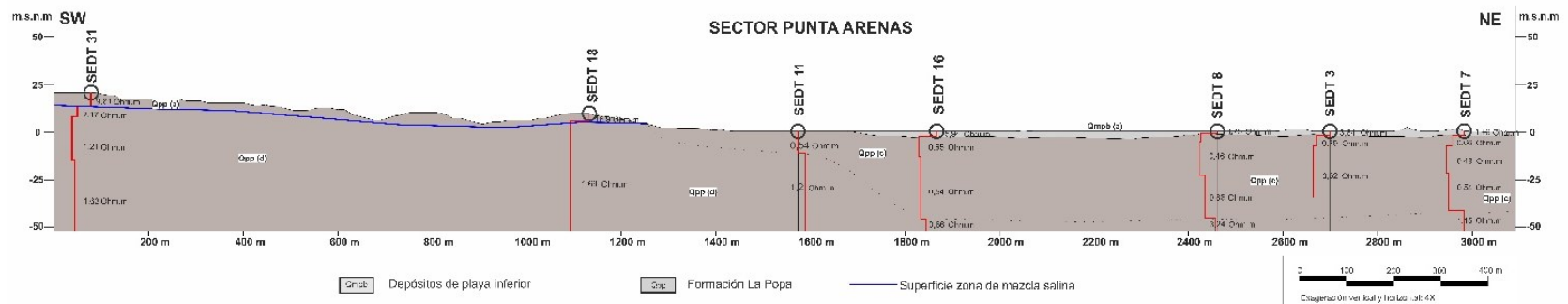
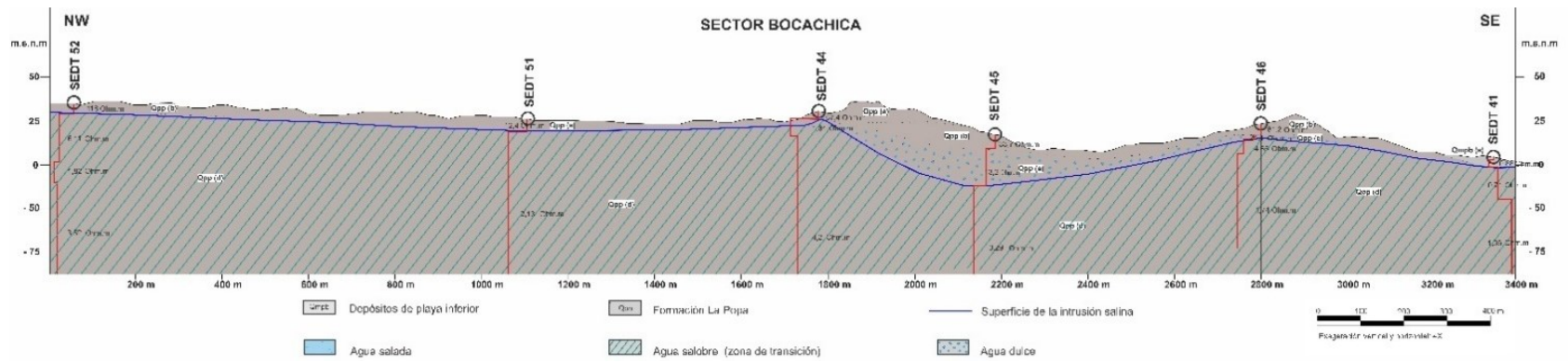
Nota. Fuente: Autor.

A continuación, se presentan los cortes geológicos – geofísicos correspondientes a cada uno de los sectores o comunidades evaluadas:

Figura 28

Cortes geoelectricos para cada uno de los sectores.





Fuente: Autor.

Los resultados a partir de los cortes geológicos – geofísicos muestran una tendencia concordante con lo observado en la distribución de las unidades geológicas, las observaciones en campo y los valores de resistividad obtenidos para cada una de las unidades geológicas. Siendo coherente con las condiciones geológicas típicas para los ambientes costeros como la presencia de una zona de transición, los valores de resistividad disminuyen a partir de la presencia de SDT en el agua (agua salobre a salada). En el corte generado para el Sector Tierra Bomba, se presenta la profundidad aproximada a partir de la posible presencia de agua subterránea en cada uno de los TEM identificados. También, a partir de los contrastes de resistividad, es posible identificar la presencia de agua salobre en la zona de transición de agua dulce a salada y a la base de los TEM ubicados más cercanos a la línea de costa, la presencia de la intrusión o cuña salina.

5.4.3 Modelación hidrogeológica conceptual

Los modelos hidrogeológicos consideran los resultados de la modelación directa de los modelos geológicos y geofísicos, lo que permite comprender la dinámica del agua subterránea en la isla. Estos modelos evidencian la presencia de posibles niveles acuíferos y su capacidad de almacenamiento y transmisión de agua subterránea.

A continuación, se presentan los resultados finales en representaciones bidimensionales y tridimensionales.

5.4.3.1 Unidades hidrogeológicas

En primera medida, se realizó la caracterización de las unidades hidrogeológicas, donde se definieron tres (3) unidades hidrogeológicas las cuales se clasificaron en dos grupos, como se describen más adelante. Es importante indicar que para la interpretación de las unidades hidrogeológicas se tomó información correspondiente al estudio “Consultoría para determinar la

disponibilidad, cantidad, calidad del agua subterránea que conlleve al diseño de programas de manejo y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico e hidrología de la isla Tierra Bomba jurisdicción de la Corporación Ambiental del Canal del Dique – CARDIQUE” realizado por Hydroingeniería S.A.S

5.4.3.1.1 Rocas y/o sedimentos con flujo esencialmente intergranular / porosidad primaria.

Los sedimentos no consolidados con flujo intergranular están conformados por 1). Depósitos de playa, nivel superior (Qmpa) compuestas por arenas y calizas arrecifales de carácter terroso y 2). Depósitos de playa, nivel inferior (Qmpb) compuestas por arenas calcáreas con restos de corales y calizas coralinas.

- *Depósitos de playa, nivel superior (Qmpa – A1)*

Estos depósitos se encuentran distribuidos en la parte norte de la isla Tierra Bomba, formando una terraza de poca extensión y pendientes medias; esta terraza presenta una altura de 20 metros sobre el nivel del mar y presentan litologías heterogéneas compuestas por calizas arrecifales con aspecto terroso (de Porta & Solé de Porta, 1960). De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la prospección geofísica se establecen tres rangos de resistividad asociados a estos depósitos. El primer rango de resistividades presentó valores entre 1,14 y 1,64 $\Omega \cdot m$ asociado litológicamente a arenas bioclásticas con presencia de agua salada. El segundo rango presentó valores de resistividad entre 7,79 y 8,46 $\Omega \cdot m$ asociado a suelo residual compuesto por arenas con presencia de restos de corales y calizas. El último rango de resistividades presentó valores entre 36 y 114 $\Omega \cdot m$ asociados litológicamente a suelos residuales compuestos por calizas y restos de corales. A partir de los TEM realizados sobre esta unidad geológica se estimó un espesor entre 3

y 41 metros. De acuerdo con las características litológicas y los resultados de la prospección geofísica, estos depósitos de playa podrían clasificarse como un acuífero con un potencial hidrogeológico bajo, ya que no presentan las características para ser usados como fuente de abastecimiento. Por otro lado, la caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea para la unidad geológica Depósitos de playa, nivel superior (Qmpa – A1), permite clasificarla como agua clorurada sódica la cual se asocia principalmente a agua de mar

- *Depósitos de playa, nivel inferior (Qmpb – A2)*

Estos depósitos se encuentran distribuidos en todo el borde nororiental y suroriental de la isla Tierra Bomba, ubicados en la línea de costa litoral, presentando una extensión relativa sin pendientes importantes con alturas no mayores a 3 metros sobre el nivel del mar, estos depósitos presentan material heterogéneo compuesto por arenas calcáreas de grano fino con presencia de restos corales, calizas coralinas y margas calcáreas (de Porta & Solé de Porta, 1960). De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la prospección geofísica, se establecen dos rangos de valores de resistividad asociados a esta unidad. El primer rango de resistividades presentó valores que están entre los 0,714 y 9,73 $\Omega \cdot m$ asociados litológicamente a suelo residual compuesto por arenas lodosas y restos de corales. El segundo rango presentó valores de resistividad entre los 10,8 y 42,1 $\Omega \cdot m$ asociados litológicamente a suelo residual compuesto por arenas calcáreas con restos de corales. A partir de los TEM realizados sobre esta unidad geológica se estima un espesor no mayor a 7 metros. De acuerdo con las características litológicas y los resultados de la prospección geofísica, estos Depósitos de playa podrían clasificarse como un acuífero con un potencial hidrogeológico bajo, ya que presentan continuidad lateral pero muy poco espesor, además cabe

resaltar que estos depósitos se encuentran directamente afectados por procesos de intrusión salina que afectan la calidad del agua, por lo cual su interés hidrogeológico es muy bajo.

Por otro lado, a partir de la medición de los parámetros fisicoquímicos *in situ* (conductividad eléctrica), la clasificación química del agua subterránea (cloruros y sólidos disueltos totales) y la evaluación hidráulica (transmisividad y coeficiente de almacenamiento) para la unidad geológica Depósitos de playa, nivel inferior (Qmpb – A2), se identificaron los parámetros mostrados en la Tabla 6. Es importante resaltar que la caracterización química del agua subterránea en esta unidad permite clasificarla como agua clorurada sódica, la cual se asocia principalmente a agua de mar.

Tabla 6

Parámetros medidos y calculados para la unidad hidrogeológica Qmpb - A2

Unidad geológica	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	Cloruros (mg Cl/L)	Sólidos	Transmisividad (m^2/d)	Coeficiente de almacenamiento
			disueltos totales (mg SDT/L)		
Qmpb - A2	2.242 – 33.320	1.120 –	3.260 –	$1,45 \times 10^1$ –	$1,04 \times 10\text{E-}1$ -
		7.488	13.880	$1,97 \times 10^1$	$2,09 \times 10\text{E-}1$

Fuente: Hydroingeniería S.A.S. (2020).

Es importante resaltar que la caracterización química del agua subterránea en esta unidad permite clasificarla como agua clorurada sódica, la cual se asocia principalmente a agua de mar.

5.4.3.1.2 *Rocas porosas y/o fracturadas / porosidad primaria y/o secundaria.*

En este grupo se incluyen las rocas sedimentarias del Pleistoceno superior pertenecientes a la Formación la Popa, la cual está constituida por arcillas micáceas arenosas, areniscas y en ocasiones calizas coralinas.

- *Formación la Popa (Qpp – B1)*

Esta unidad sedimentaria se encuentra aflorando en la mayoría del área de estudio, ubicada tanto en la línea de costa como hacia el interior de la ITB, presenta grandes extensiones y continuidad lateral, esta unidad presenta alturas

y pendientes variadas a partir de los diferentes materiales que la componen y la disposición de las capas, está constituida por diferentes niveles o capas caracterizadas por presentar calizas arrecifales, terrosas con presencia de corales y bivalvos, arcillas plásticas intercaladas con arenas cuarzosas y capas de lodolitas calcáreas. En el área de estudio, esta formación presenta un espesor de 131 metros (Reyes *et al.*, 2001). De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la prospección geofísica, se establecen cinco rangos de resistividad asociados a variaciones litológicas presentes en esta unidad geológica. El primer rango de resistividad presentó valores entre 0,671 y 20,4 $\Omega \cdot m$ asociado a suelo residual compuesto por arenas litobioclásticas. El segundo rango presentó valores de resistividad entre 33,1 y 172 $\Omega \cdot m$ asociado a suelo compuesto de arenas litobioclásticas y calizas coralinas. El tercer rango presentó valores de resistividad que van desde 0,209 a 0,985 $\Omega \cdot m$ asociado a areniscas lodosas bioclásticas con presencia de agua salada. El cuarto rango presentó valores de resistividad entre 1 y 9,41 $\Omega \cdot m$ asociado a areniscas bioclásticas con presencia de agua salada a salobre. Por último, un quinto rango con valores de resistividad entre 11,7 y 50,4 $\Omega \cdot m$ asociado a areniscas calcáreas y calizas con presencia de agua

salobre a dulce de baja calidad. A partir de los TEM realizados en el área de estudio se estimó un espesor que va desde los 23 metros hasta la máxima profundidad de investigación de los TEM. Al presentar esta unidad geológica variaciones en su litología, la unidad caracterizada como areniscas calcáreas y calizas con presencia de agua salobre a dulce de baja calidad es la unidad geológica que presenta interés ya que sus características litológicas y los resultados de la prospección geofísica muestran que esta unidad podría clasificarse como un acuífero con potencial hidrogeológico medio. Cabe resaltar que esta unidad presenta extensiones locales y su recarga está directamente relacionada a los volúmenes de precipitación en la isla los cuales son limitados a algunas épocas del año. No fue posible establecer la naturaleza fisicoquímica de estas aguas, por lo cual su interés hidrogeológico podría ser bajo.

Por otro lado, a partir de la medición de los parámetros fisicoquímicos *in situ* (conductividad eléctrica), la clasificación química del agua subterránea (cloruros y sólidos disueltos totales) y la evaluación hidráulica (transmisividad y coeficiente de almacenamiento) para la Formación Popa (Qpp – B1), se identifican los parámetros mostrados en la Tabla 7. Es importante resaltar que la caracterización química del agua subterránea en esta unidad permite clasificarla como agua clorurada sódica, la cual se asocia principalmente a agua de mar.

Tabla 7

Parámetros medidos y calculados para la unidad hidrogeológica Qpp – B1

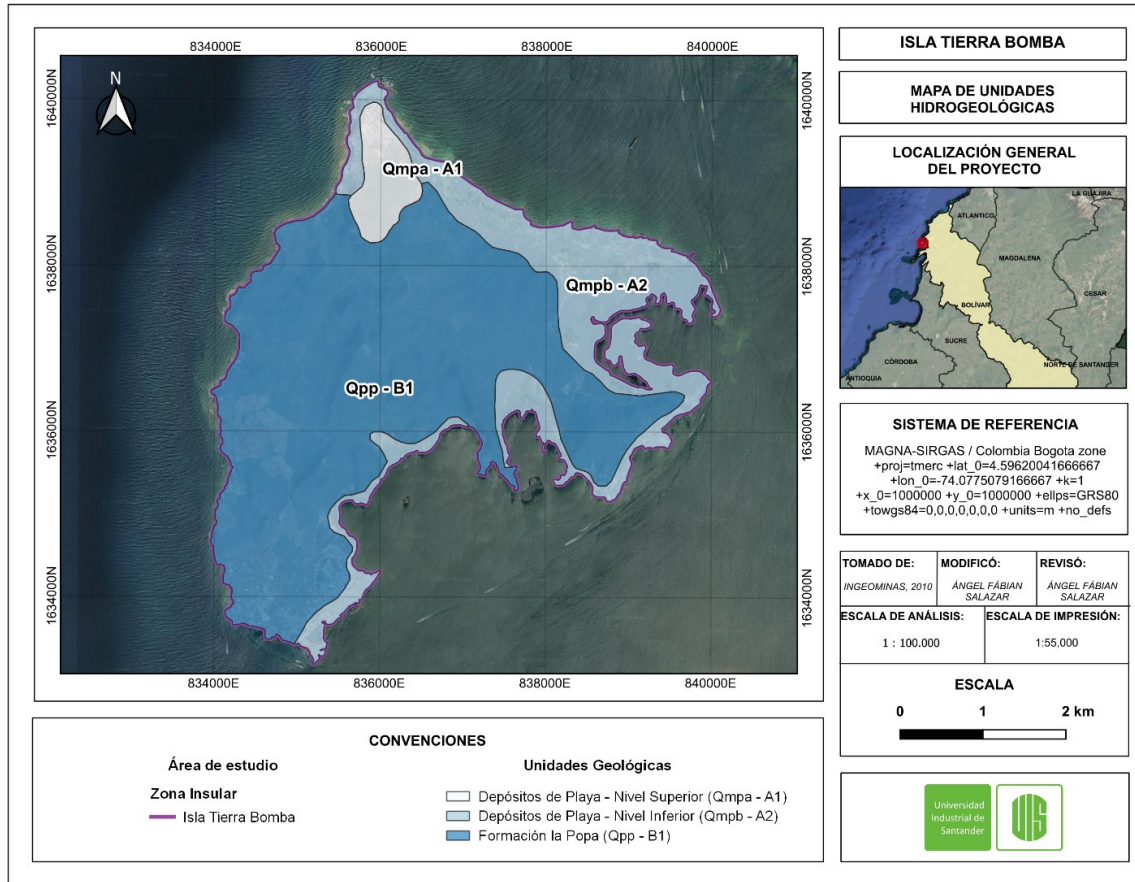
Unidad geológica	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	Cloruros (mg Cl/L)	Sólidos disueltos totales (mg SDT/L)	Transmisividad (m^2/d)	Coefficiente de almacenamiento
Qpp –	3.255 – 24.280	1.733 –	4.220 – 7.040	$1,53 \times 10\text{E-}1$	$1,46 \times 10\text{E-}1$ –
B1		3.205			$5 \times 10\text{E-}1$

Fuente: Hydroingenieria S.A.S (2022).

Teniendo en cuenta la información citada anteriormente, se realiza el mapa de las unidades hidrogeológicas mostrado a detalle en la Figura 29.

Figura 29

Mapa de unidades hidrogeológicas para la ITB.



Fuente: Autor. Tomado de información adquirida y analizada por Hydroingenieria S.A.S (2021).

5.4.3.2 Modelos y esquemas hidrogeológicos.

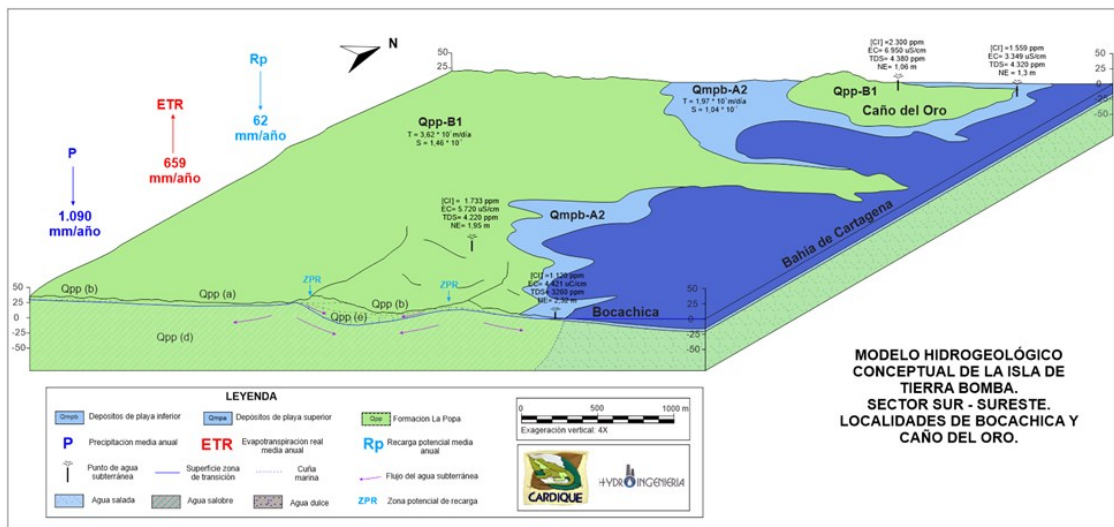
Con toda la información recolectada y la aplicación de la metodología presentada en este proyecto de investigación, se muestran estos modelos hidrogeofísicos los cuales representan de manera gráfica, las condiciones hidrogeológicas de la ITB, donde se pueden observar cada una de

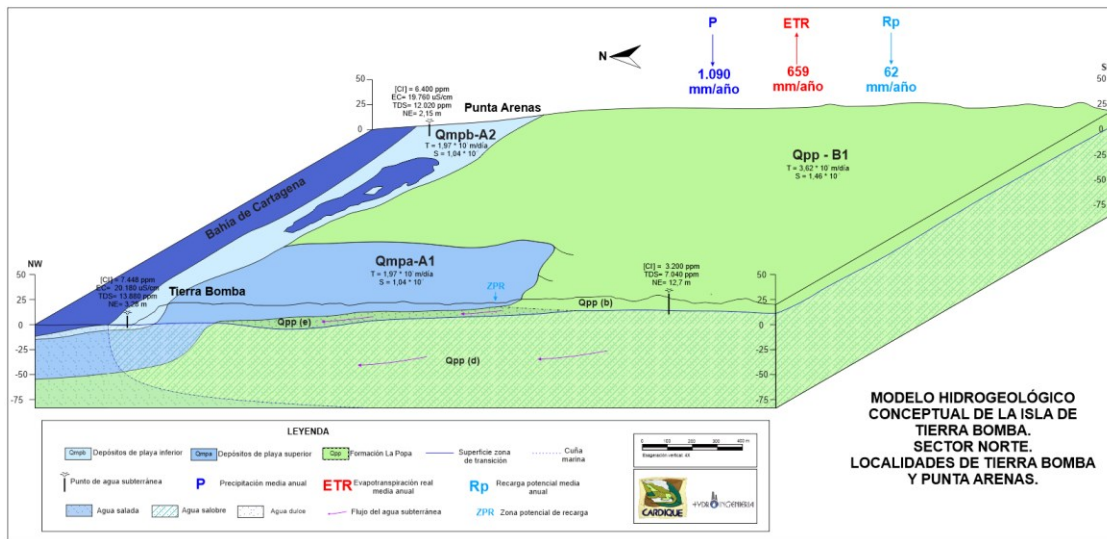
las unidades hidrogeológicas caracterizadas. Este insumo final es muy importante ya que estos esquemas integran los datos generados a partir de la inversión e interpretación de los datos geofísicos mediante la técnica TEM con información geológica e hidrogeológica. Estos modelos coinciden con los esquemas representativos de ambientes costeros, así como la distribución de las unidades identificadas en información preliminar (ver Figura 30).

Estos modelos hidrogeofísicos pueden ser validados y ajustados a partir de nueva información geológica, hidrogeológica y geofísica, lo cual puede mejorar su precisión y utilidad en la toma de decisiones.

Figura 30

Modelo hidrogeofísico para la ITB.





Fuente: Autor. Tomado de la información adquirida y analizada por Hydroingenieria S.A.S. (2020).

5.5 Divulgación de resultados

El congreso XII Congreso Argentino y XVI Congreso Latinoamericano de Hidrogeología Dr. Emilio Custodio Gimena "Agua subterránea, retos para una gestión sostenible", en el que se participó, estuvo dirigido a un público especializado y permitió sintetizar los hallazgos más relevantes del proyecto, destacando su impacto y pertinencia en el contexto de la hidrogeología de la ITB. Esta participación no solo facilitó la difusión de los resultados, sino también el intercambio de conocimientos y retroalimentación con expertos en el área, lo cual enriqueció el análisis y la interpretación de los datos obtenidos. Durante las sesiones de preguntas y respuestas se profundizó en aspectos específicos del estudio y se identificaron oportunidades para futuras colaboraciones.

La estrategia de difusión implementada fue clave para aumentar la visibilidad del proyecto, validar su rigurosidad científica, aportar al conocimiento hidrogeológico de la isla de y fomentar la colaboración y establecimiento de redes con otros investigadores.

6. Discusión

El uso del método electromagnético transitorio TEM en la ITB permitió obtener una caracterización más detallada del subsuelo en un entorno costero donde los métodos eléctricos tradicionales (Tomografía de Resistividad Eléctrica, por ejemplo) presentan limitaciones asociadas a la resolución en vertical o profundidad, requiere una mayor logística en la adquisición de datos y a las variaciones de la conductividad (o su inverso, resistividad) generadas por la influencia marina (disminución de valores de resistividad). En estudios en aguas costeras, en el método TEM ha mostrado ser eficaz en identificar la intrusión salina (también llamada marina), en documentación científica (Nenna *et al.*, 2013) y (Xu *et al.*, 2018). La integración de las respuestas en la modelación directa y los resultados de la inversión de 61 sondeos TEM permitieron analizar el comportamiento de los contrastes de resistividad que se podrían asociar con la distribución lateral y vertical de las principales unidades hidrogeológicas, validando la capacidad del método para diferenciar zonas con posible presencia de agua dulce subterránea de aquellas con presencia de agua salobre, así como conocer la geometría a profundidad, el espesor y la presencia de intrusión salina.

El modelamiento sintético, realizado con la herramienta Python, permitió evaluar la respuesta del subsuelo ante diferentes escenarios de resistividad, lo cual fue fundamental para comprender la sensibilidad del método y ajustar los parámetros de inversión. Esta etapa contribuyó a reducir la ambigüedad inherente a la interpretación geofísica, al proporcionar un marco de referencia para comparar los resultados observados con modelos teóricos, teniendo en cuenta condiciones naturales de estos medios costeros, generalidades y características principales. La coincidencia entre los modelos sintéticos y los perfiles invertidos en campo respalda la validez de

la estrategia metodológica adoptada y aporta un interés por crear un modelo directo antes de realizar el procesamiento de los datos medidos en campo. Trabajos sobre la inversión de datos TEM muestran que diferentes algoritmos pueden dar modelos alternativos para los mismos datos, lo que subraya la importancia del modelamiento previo (Seminsky *et al.*, 2018). La coincidencia entre los modelos sintéticos y los perfiles invertidos en campo respalda la validez de la estrategia metodológica adoptada y aporta un interés por crear un modelo directo antes de realizar el procesamiento de los datos medidos en campo.

Los resultados muestran una clara correlación entre las zonas de alta resistividad y la presencia de materiales arenosos o calcáreos, asociados a formaciones permeables con posible presencia de agua subterránea en su porosidad primaria y secundaria asociada a los niveles arenosos y calcáreo de la Formación la Popa. En contraste, los valores bajos de resistividad se corresponden con unidades de materiales más limo arcillosos y niveles saturados con agua salobre a salada, lo cual concuerda con la información geológica y los antecedentes hidrogeoquímicos disponibles para la isla y este tipo de ambientes costeros. Esta concordancia sugiere que la interpretación geofísica es consistente con el marco geológico regional y refuerza la pertinencia del método TEM para ambientes costeros con alta conductividad superficial. Esta concordancia sugiere que la interpretación geofísica es consistente con el marco geológico regional y refuerza la pertinencia del método TEM para ambientes costeros con alta conductividad superficial. Estudios en entornos costeros han mostrado resistividades muy bajas ($<10 \Omega \cdot m$) en zonas de intrusión marina (Vann *et al.*, 2020). En esta instancia es importante resaltar que, para mejorar y validar la información interpretada, se sugieren estudios adicionales de geología e hidrogeología

detallada, para conocer a más detalles características hidrogeológicas de interés en el área de estudio.

El uso de diferentes softwares de procesamiento como SPIA (con licencia) y ZondTEM1 (libre, con restricciones) indican la posibilidad de usar herramientas comerciales para la inversión de datos geofísicos, estos permitieron reconocer la influencia del algoritmo en la resolución vertical y en la resolución de los resultados. Si bien se observaron diferencias menores en la profundidad de los contactos entre las unidades geológicas / geofísicas, la tendencia general fue coherente entre los distintos modelos, indicando una buena confiabilidad de la información obtenida, sobre todo, mediante el software SPIA, ya que se obtuvieron resultados más concordantes con los modelos sintéticos e hipótesis contempladas en el presente trabajo, así como facilidad del uso de parámetros al momento de realizar la inversión y mejores herramientas de visualización. En la documentación del *software* SPIA se señalan múltiples opciones de modelos de inicio y visualización que facilitan el proceso de procesamiento e interpretación (Aarhus GeoSoftware, 2025). Por otra parte, el uso del software licenciado presenta todas las características para cargar, modificar los parámetros, el número de capas y generar los modelos de inversión.

La integración conjunta de los resultados TEM con la información geológica permitió construir un modelo hidrogeofísico conceptual que describe de manera coherente la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas con posible presencia de agua subterránea en la ITB. Estos modelos representan un avance significativo respecto a estudios previos, al proporcionar una visión tridimensional del subsuelo que puede orientar la planificación y gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo en la región (Nenna *et al.*, 2013).

Finalmente, la experiencia adquirida demuestra que el método TEM, combinado con modelamiento sintético y herramientas de código abierto, constituye una alternativa viable y reproducible para estudios hidrogeológicos en islas y zonas costeras colombianas. Futuras investigaciones podrían incorporar modelos 3D y acoplar la información TEM con datos magnetotéluricos o gravimétricos, con el fin de ampliar la resolución en profundidad y fortalecer la interpretación del sistema hidrogeológico insular. Las revisiones de inversión 3-D y comparación de algoritmos muestran la tendencia hacia métodos más complejos e integrados (Miensoyust *et al.*, 2013).

7. Conclusiones

Mediante la caracterización geológica, hidrogeológica y geofísica, se logró construir un modelo hidrogeofísico conceptual ajustado, teniendo en cuenta en la metodología la construcción de modelos directos y el uso de *softwares* de procesamiento como SPIA y ZondTEM1 con la finalidad de obtener resultados más concordantes con el esquema hipotético definido para ambientes costeros típicos como el observado en la ITB, Colombia.

El incorporar el modelamiento directo como parte de la metodología asociada con la construcción de un modelo hidrogeofísico conceptual, permite conocer la respuesta teórica del subsuelo a diferentes configuraciones geológicas. También, analizar la respuesta ante el ruido natural y antrópico producto de diversas variables en la campaña de campo, lo cual fue crucial para poder entender cómo se comporta el método TEM ante los materiales que componen el subsuelo y sus condiciones específicas, definiendo modelos que representan las unidades geológicas Formación Popa y Depósitos de Playa y sus condiciones. El uso de diferentes porcentajes de ruido

a cada uno de los casos (modelos geológicos) típicos redujo los niveles de incertidumbre asociadas a la interpretación de los datos.

Los resultados de la inversión de los 61 TEM mostraron que el uso del *software* SPIA (licenciado) otorga una mejor respuesta considerando las unidades geológicas y los modelos directos implementados en este proyecto de investigación en comparación con las inversiones realizadas con ZondTEM1 (versión libre).

El modelo hidrogeofísico conceptual generado para el presente proyecto representa las condiciones hidrogeológicas del ambiente costero de la ITB integrando los datos TEM y la información geológica e hidrogeológica disponible, lo que permitió identificar la geometría y distribución de las unidades hidrogeológicas y el alcance de la intrusión salina en la zona. Este modelo resulta ser una herramienta muy valiosa al momento de realizar la gestión y el manejo sostenible de los recursos hídricos en la isla.

8. Recomendaciones

La poca información existente y pública corresponde a la baja investigación en el sitio de estudio, así como los difíciles accesos al área, lo cual condiciona a que los modelos generados a partir de esta investigación sean muy susceptibles a cambios y modificación producto de nuevos estudios geológicos, hidrogeológicos y geofísicos.

Se recomienda en posteriores estudios realizar un análisis estructural detallado de las fracturas, fallas y posibles lineamientos para la Formación la Popa, ya que algunas capas con potencial presencia de aguas subterránea se asocian a calizas fracturadas, por lo cual requiere una investigación más profunda en este aspecto estructural con la finalidad de conocer el potencial hidrogeológico, que contemplen caracterizaciones de sus fracturas, el relleno que contienen y su continuidad, entre otras características necesarias.

Otra recomendación se enfoca en el levantamiento de información geofísica mediante el uso de otros métodos de prospección, con la finalidad de lograr obtener información precisa y confiable de áreas inexploradas, así como aumentar la resolución horizontal – vertical del área de estudio.

9. Referencias bibliográficas

- Aarhus GeoSoftware. (2025). *Aarhus SPIA – TEM software overview*. Retrieved October 26, 2025, from <https://www.aarhusgeosoftware.dk/aarhus-spia-tem>.
- Ángel, C., Esquivel, J., & Sarmiento, G. (1985). *Geología del departamento de Bolívar al norte del Canal de Dique*. Bogotá D.C.: INGEOMINAS. Informe 1947, 143 p.
- Aster, R., Borchers, B., & Thurber, C. (2013). *PARAMETER ESTIMATION AND INVERSE PROBLEM*. Langford Lane, Kidlington, Oxford, UK: Elsevier.
- Bear, J., & Cheng, A. (1999). *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers - Concepts, Methods and Practices*. Kluwer Academic Publishers.
- Bocanegra, E. (2005). *La explotación de acuíferos costeros como base de su gestión*. Texto inédito.
- Bürgl, H. (1957). *Resumen de la Estratigrafía de Colombia*. Bogotá: INGEOMINAS, Informe 1248.
- Cai, H., Long, Z., Lin, J., Lin, P., & Hu, X. (2021). *3D multinary inversion of controlled-source electromagnetic data based on the finite element method with unstructured mesh*. *Geophysics*, 86. No. 1, E77 - E 92.
- Casas, A. (2000). *Prospección geofísica aplicada a la hidrogeología: metodología y técnicas emergentes*. . *Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología*, 33-41.
- Castillo, L. (2012). *Estudio de factibilidad hidrogeológica en la porción sur-oriente de la ciudad de San Juan del Río, Qro., con la aplicación de métodos electromagnéticos*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Camacho, R., Kassem, T., & Valdiri, J. (1968). *Informe geológico preliminar del Cuadrángulo D-8*. Bogotá D.C. : INGEOMINAS.

- Cooper, H.H., 1964. *Sea water in coastal aquifers* (No. 1613). US Government Printing Office.
- de Porta, J., & Solé de Porta, N. (1960). El cuaternario marino de la isla de Tierra Bomba (Bolívar). *Universidad Nacional, Instituto de Ciencias Naturales. Servicio Geológico Nacional.*
- de Porta, J.; *et al.* 1974. *Léxico Estratigráfico Internacional. Volumen V, Fascículo 4B Colombia, Terciario y Cuaternario, Centre National de la Recherche Scientifique. París.*
- Furrier, M., & Cuervo, G. (2016). GEOMORFOLOGÍA Y CARTOGRAFÍA DEL SECTOR CENTRAL DE CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA. *Revista Geográfica de América Central. N° 57, 199-222.*
- GuidelineGeo. (26 de 05 de 2024). *GUIDELINE GEO* . Obtenido de <https://www.guidelinegeo.com/transient-electromagnetics-tem/>
- Hydroingenieria S.A.S. (2020). *Consultoría para determinar la disponibilidad, cantidad, calidad del agua subterránea que conlleve al diseño de programas de manejo y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico e hidrología de la isla Tierra Bomba jurisdicción de CARDIQUE.* Cartagena de Indias.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua.* Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2013). *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia.* Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua* . Bogotá, Colombia.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

- IDEAM. (2022). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- IGME. (1987). *Mapa de normas de exploración de acuíferos*. España: Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado de <http://info.igme.es/SidPDF/018000/764/Mapa%20de%20normas%20de%20explotaci%C3%B3n%20de%20acu%C3%ADferos>.
- INVEMAR. (2003). *Programa holandés de asistencia para estudios de cambio climático: Colombia*. Santa Marta, Colombia. : Ministerio de Medio Ambiente, INVEMAR, .
- Jiao, J., & Post, V. (2019). *Cosatal Hydrogeology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration - Third Edition*. Blackwell Science Ltd.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2013). *An introduction to geophysical exploration*. John Wiley & Sons. Third edition.
- Keller, G.V. and Frischknecht, F.C. (1966) *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press, Oxford.
- Keller, G. V. (1997). Principles of time-domain electromagnetic (TDEM) sounding. *The Leading Edge*, 16(4), 355-357. <https://doi.org/10.1190/1.1437632>
- Kirsh, R. (2006). *Groundwater Geophysics. A tool for hydrogeology*. Berlin, Germany: Springer - Verlag. .
- L.R., Z. (2015). *Detección de zonas de riesgo en la ciudad de Guatemala*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UNAM.

- López Geta, J., & Gómez - Gómez , J. (2007). *La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos españoles*. España: Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2007, vol.VOL 15, núm. 3, p. 266-73.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. New York, United States: Cambridge University Press.
- Miensopust, M. P., Queralt, P., Jones, A. G., & the 3D MT modellers. (2013). Magnetotelluric 3-D inversion—A review of two successful workshops on forward and inversion code testing and comparison. *Geophysical Journal International*, 193(3), 1216-1238. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt066>.
- Nenna, V., Herckenrath, D., Knight, R., Odlum, N., & McPhee, D. (2013). Application and evaluation of electromagnetic methods for imaging saltwater intrusion in coastal aquifers: Seaside Groundwater Basin, California. *GEOPHYSICS*, 78(2), B77-B88. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0004.1>
- OMM. (2012). *Glosario Hidrológico Internacional* . WMO.
- Park, Y., Lee, J., & Kim, J. (2012). National scale evaluation of groundwater chemistry in Korea coastal aquifers: evidences of seawater intrusion. *Environ Earth Sci* 66, 707–718 .
- Petrus, S. J. (2005). *Theoretical Development And Implementation Of Algorithms For The Inversion Of Frequency Domain Airborne Electromagnetic Data Into A Layered Earth*. University of Pretoria: Faculty of Natural and Agricultural Sciences, School of Physical Sciences, Department of Geology.
- Reyes, G., Guzmán, G., Barbosa, G., & Zapata, G. (2001). Geología de las planchas 23 Cartagena y 29 - 30 Arjona. Escala 1:100.000. *INGEOMINAS*, 69.

- Royo y Gómez, J. (1947). *Plano de la Isla de Tierra Bomba - Cartagena*. Cartagena: Servicio Geológico Nacional.
- Royo y Gomez, J. (1950). *Geología de la Isla de Tierra Bomba, Cartagena y estudios de abastecimientos de Caño de Loro mediante aguas subterráneas*. Bogotá D.C.: INGEOMINAS. CEGOC, 8. .
- Sandoval Sandoval, C. E. (2019). *Lineamientos para realizar actividades de exploración Hidrogeofísica*. Ciudad de México: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Schamper, C., Pedersen, E., Auken, A. V., Christiansen, B., Vittecoq, J., Deparis, T., . . . Wetzelhuetter. (2013). *Airborne Transient EM Methods and their applications for coastal groundwater investigations*. Netherlands.: Springer, Dordrecht.
- Seminsky, I. K., Kozhevnikov, N. O., Buddo, I. V., Murzina, E. V., & Agafonov, Yu. A. (2018, abril 9). *Evaluation of the Different Approaches to the TEM Data Inversion Applicability*. Saint Petersburg 2018, Saint Petersburg, Russia. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800227>
- Sorensen, K., Vest Christiansen, A., & Auken, E. (2003). The Transient Electromagnetic Method. *Burval*, 65-75.
- USGS. (2003). *Groundwater in fresh water-salt water environments of the atlantic*. United States. : United States Geological Survey.
- Vann, S., Puttiwongrak, A., Suteerasak, T., & Koedsin, W. (2020). Delineation of Seawater Intrusion Using Geo-Electrical Survey in a Coastal Aquifer of Kamala Beach, Phuket, Thailand. *Water*, 12(2), 506. <https://doi.org/10.3390/w12020506>.

Vélez Otálvaro, M. V. (2011). *Hidráulica de aguas subterráneas*. Medellín, Colombia.: Universidad Nacional de Colombia.

Widodo. (2023). *A new technique inversion Time-Domain electromagnetic data*. Indonesia. : Applied Geophysics and Exploration group, Faculty of mining and Petroleum Engineering.

Xu, Z., Hu, B. X., & Ye, M. (2018). Numerical modeling and sensitivity analysis of seawater intrusion in a dual-permeability coastal karst aquifer with conduit networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 221-239. <https://doi.org/10.5194/hess-22-221-2018>.