

**Estudio geoquímico de las aguas superficiales y subterráneas en el Golfo de Morrosquillo,
Colombia**

Jennifer Alexandra Oviedo Prada

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Mario García González, Geólogo PhD

Codirector

Tania Palmera Henao, Geóloga PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios, por el privilegio de la vida y por las innumerables bendiciones que he recibido. A mis padres y familiares, quienes han sido un pilar constante en este camino, su apoyo incondicional ha sido esencial. A mis queridos amigos Mabel, Mafe y Santiago, gracias por ser un sólido soporte, por su escucha atenta y por su comprensión sincera. Finalmente, a mis profesores, Katherine León y Andrés Cáceres, por su excelencia docente y humana, por su guía y su fe en mí. Cada uno de ustedes ha sido fundamental en este proceso.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por ser una fuente integral de conocimiento y un pilar en mi desarrollo personal y profesional, así como por su apoyo al proporcionar parte de los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación – Minciencias, por fomentar espacios para el desarrollo científico. Este trabajo de investigación fue financiado con recursos del contrato UIS-Minciencias 046-2023 titulado: “Evolución geoquímica de las aguas termales de Paipa e Iza, Boyacá y evaluación de su potencial en sales de Litio y Sodio, Fase 1: Época seca”. Código 110293194611.

Al Laboratorio de Geoquímica del Petróleo de la Universidad Industrial de Santander sede Guatiguará, por la prestación de sus instalaciones y el equipo necesario para realizar la medición de los parámetros fisicoquímicos de las muestras.

Al Laboratorio de Servicios Químicos, Minero-Metalúrgicos y Ambientales de la Universidad Industrial de Santander sede Guatiguará, por su apoyo en la realización de los análisis en iones mayoritarios.

Al profesor Mario García González, director del proyecto, por depositar su confianza en mí para llevar a cabo la investigación, por los conocimientos brindados y sus recomendaciones.

A la profesora Tania Palmera Henao, por su guía y constante acompañamiento en las diferentes fases de la realización de este trabajo.

Al personal de la Escuela de Geología y a todos los profesores de la Universidad Industrial de Santander que fueron parte de mi proceso académico, por su excelente disposición en el cumplimiento de sus funciones y colaboración para con el estudiantado.

Tabla de contenido

	Pag.
Introducción	14
1. Justificación y/o planteamiento del problema.....	15
2. Objetivos	16
2.1. Objetivo general.....	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. Marco Teórico.....	17
3.1 Ciclo del agua	17
3.2 Modelos hidrogeológicos conceptuales	18
3.3 Caracterización química del agua	19
3.3.1 Alcalinidad y pH en aguas naturales.....	19
3.3.2 Análisis de iones mayoritarios y clasificación de aguas	19
3.3.3 Análisis de isotopos estables: tiempo de residencia y línea meteórica local	22
4. Marco Geológico y Estudios Anteriores.....	27
4.1 Localización	27
4.2 Geomorfología	29
4.2.1 Costas bajas.....	29
4.2.2 Costas elevadas	30
4.3 Geología estructural	30
4.3.1 Región estable.....	30
4.3.2 Región inestable.....	30
4.4 Estratigrafía.....	32
4.4.1 Formación Cansona (Ksc).....	32
4.4.2 Formación San Cayetano (Pgsc).....	33

4.4.3 Formación Maco (Pgm)	33
4.4.4 Formación Toluviejo (Pgtv).....	33
4.4.5 Formación San Jacinto (Pgsj)	33
4.4.6 Formación Ciénaga de Oro (Pgc)	34
4.4.7 Formación Chengue (Pgch)	35
4.4.8 Formación Carmen (PgNgc)	35
4.4.9 Brecha de Cispatá (Ngbc)	35
4.4.10 Formación Floresanto (Ngmf)	35
4.4.11 Unidad Moñitos (Ngmn).....	36
4.4.12 Formación San Onofre (Ngso).....	36
4.4.13 Unidad Broqueles (Ngpb)	36
4.4.14 Formación Mucacal (Ngmu).....	36
4.4.15 Depósitos de llanura aluvial (Qlal)	38
4.4.16 Depósitos de llanura de inundación (Qli)	38
4.4.17 Depósitos de llanura marino aluvial (Qma).....	38
4.4.18 Depósitos de manglar (Qmm).....	38
4.4.19 Depósitos de playas (Qmp).....	38
4.4.20 Depósitos marinos aterrazados (Qtm).....	39
4.5 Recursos hídricos subterráneos.....	39
4.5.1 Llanura costera.....	40
4.5.2 Zona montañosa.....	40
4.5.3 Zona de colinas	40
4.5.4 Sabanas	40
5. Antecedentes	40

6. Metodología	45
6.1 Fase 1. Revisión bibliográfica.....	45
6.2 Fase 2. Trabajo de campo	46
6.3 Fase 3. Análisis de muestras	47
6.4. Fase 4. Procesamiento e interpretación de resultados.....	50
7. Resultados y Discusión	52
7.1. Datos de campo y análisis de las propiedades fisicoquímicas de las muestras recolectada ..	52
7.2 Análisis de iones mayoritarios y evolución geoquímica del sistema hidrogeológico	58
7.2.1 Composición química	58
7.2.2 Clasificación del agua y evolución geoquímica del sistema.....	60
7.2.3 Interacción agua-roca.....	63
7.3. Análisis de isotopos estables y construcción de la Línea Meteórica Local	66
7.4. Planteamiento de un modelo hidrogeológico conceptual para la región litoral del Golfo de Morrosquillo	69
8. Comparación de las características geoquímicas entre las aguas superficiales y subterráneas del Golfo de Morrosquillo con las aguas hidrotermales de Paipa	76
8.1 Composición química y mineralización.....	77
8.2 Relación isotópica y procedencia.....	81
9. Conclusiones	83
10. Recomendaciones	85
Referencias Bibliográficas	87
Apéndices.....	93

Lista de Tablas

Tabla 1. Muestras de agua recolectadas en la fase de campo	57
Tabla 2. Resultado análisis químico para iones mayoritarios en las muestras de agua	59
Tabla 3. Índices de saturación en carbonato de calcio en las muestras de agua analizadas	63
Tabla 4. Concentraciones en mEq/L de las especies iónicas predominantes	64
Tabla 5. Resultados análisis de isotopos estables en las muestras de agua seleccionadas	66

Lista de Figuras

Figura 1. Ciclo del agua	17
Figura 2. Ejemplo para el diagrama de Piper (1944)	20
Figura 3. Ejemplo para el diagrama de Stiff (1951)	21
Figura 4. Representación esquemática de la formación de carbono inorgánico disuelto en el agua subterránea a partir de carbonato del suelo y CO ₂ del suelo	23
Figura 5. Variaciones naturales del contenido de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en el ciclo hidrológico.....	26
Figura 6. Variaciones naturales del contenido de $\delta^2\text{H}$ en diferentes tipos de agua	27
Figura 7. Golfo de Morrosquillo. Mapa de localización de la zona de estudio	28
Figura 8. Marco tectónico regional	31
Figura 9. Geología del Golfo de Morrosquillo	34
Figura 10. Columna estratigráfica de la zona de estudio	37
Figura 11. Formato utilizado para la toma de datos durante el trabajo de campo	47
Figura 12. Medición de pH y conductividad de las muestras en el laboratorio.....	48
Figura 13. Selección de las muestras para análisis de iones e isotopos estables	49
Figura 14. Indicaciones para los valores de ISL según Langelier (1936).....	51
Figura 15. Mapa de localización del área de estudio, zona norte del Golfo de Morrosquillo	53
Figura 16. Mapa de localización del área de estudio, zona central del Golfo de Morrosquillo ...	54
Figura 17. Mapa de localización del área de estudio, zona sur del Golfo de Morrosquillo	55
Figura 18. Diagrama de Piper (1944) para las muestras analizadas	60
Figura 19. Diagrama de Stiff (1951) para las muestras de agua analizadas	61
Figura 20. Secuencia de Chevotareb (1955) para determinar la evolución química del agua.....	62

Figura 21. Gráficos de dispersión para definir predominio iónico y tipo de intercambio iónico en las aguas subterráneas	65
Figura 22. Línea meteórica local para el Golfo de Morrosquillo	67
Figura 23. Grafica de dispersión para definir la proveniencia de las aguas subterráneas	68
Figura 24. Perfiles geológicos elaborados para ilustrar el modelo hidrogeológico	70
Figura 25. Perfil A-A' Archipiélago de San Bernardo – Playas El Francés.....	71
Figura 26. Perfil B-B' Playa Guacamayas – Municipio de Ovejas	72
Figura 27. Perfil C-C' Río Sinú localidad de Trementino – Archipiélago de San Bernardo	74
Figura 28. Gráficas comparativas de las concentraciones iónicas entre las aguas del Golfo de Morrosquillo y las aguas termales de Paipa.....	78
Figura 29. Gráficas comparativas de la predominancia iónica e índice de intercambio de bases, entre las aguas del Golfo de Morrosquillo y las aguas termales de Paipa	80
Figura 30. Gráfica comparativa de la relación $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ entre las aguas del Golfo de Morrosquillo y las aguas termales de Paipa.....	81
Figura 31. Gráfica comparativa del contenido de $\delta^{18}\text{O}$ y cloruros entre las aguas del Golfo de Morrosquillo y las aguas termales de Paipa.....	82

Lista de Apéndices

Apéndice A.	Muestreo Isla Mangles	93
Apéndice B.	Muestreo La Punta de San Bernardo, SE	93
Apéndice C.	Muestreo La Punta de San Bernardo, NW	94
Apéndice D.	Muestreo Caño Guacamayas	94
Apéndice E.	Muestreo pozo Cabaña Alicia	95
Apéndice F.	Muestreo Playa Guacamayas	95
Apéndice G.	El Ancla del Galeón	96
Apéndice H.	Río Sinú, localidad de Trementino.....	96
Apéndice I.	Muestreo playas de San Bernardo del Viento	97
Apéndice J.	Muestreo litoral de San Bernardo del Viento.....	97
Apéndice K.	Muestreo Caño La Balsa	98
Apéndice L.	Análisis iónico comparativo.....	98
Apéndice M.	Análisis iónico, especies predominantes en cada muestra	99
Apéndice N.	Características fisicoquímicas de las aguas hidrotermales de Paipa en temporada de lluvias.....	100
Apéndice O.	Características fisicoquímicas de las aguas hidrotermales de Paipa en temporada seca.....	100
Apéndice P.	Concentración de cationes y aniones en las aguas hidrotermales de Paipa en temporada de lluvias	101
Apéndice Q.	Concentración de cationes y aniones en las aguas hidrotermales de Paipa en temporada seca.....	101

Glosario

Acuífero: Un acuífero es un estrato geológico compuesto de roca o sedimento permeable que puede almacenar y transmitir agua subterránea. La superficie superior del acuífero se conoce como nivel freático, y su recarga se produce a través de la infiltración de agua de precipitaciones u otras fuentes (Servicio Geológico de Estados Unidos – USGS, 2019).

Conductividad eléctrica: La conductividad eléctrica mide la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica. Cuanto mayor sea la concentración de sustancias químicas cargadas disueltas en el agua, es decir, cuanto mayor sea la salinidad del agua, mayor será la corriente eléctrica que se puede conducir (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos – EPA, 2024).

Espectrofotometría: La espectrofotometría es una técnica analítica que permite determinar la concentración de un compuesto en solución, a través de un instrumento que emite un haz de luz sobre algún compuesto, midiendo la absorbancia y/o transmitancia de este (Díaz et al., 2000, *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*)

Isótopos estables: Los átomos pertenecientes a un mismo elemento químico pueden presentar diferentes cantidades de neutrones en su núcleo; dichas variedades se denominan “isótopos”. Todos los isótopos de un mismo elemento tienen prácticamente las mismas propiedades químicas. Sin embargo, difieren en cuanto a sus propiedades físicas, en particular la masa atómica. Los isótopos estables son formas no radiactivas. Aunque no emiten radiación, gracias a sus propiedades únicas pueden utilizarse en una gran variedad de aplicaciones, como la gestión del agua y del suelo, los estudios medioambientales, las evaluaciones de la nutrición y la ciencia forense (Agencia Internacional de Energía Atómica – IAEA, 2022).

Resumen

Título: Estudio geoquímico de las aguas superficiales y subterráneas en el Golfo de Morrosquillo, Colombia*

Autor: Jennifer Alexandra Oviedo Prada**

Palabras Clave: pH, Conductividad, Evolución Geoquímica, Aguas Subterráneas, Modelo Hidrogeológico

Descripción: Las aguas salobres de los manglares y de los acuíferos subterráneos del Golfo de Morrosquillo constituyen una valiosa reserva de agua para la población, especialmente ante la escasez de recursos hídricos de esta zona costera. El presente estudio incluyó el muestreo y análisis geoquímico de aguas superficiales y subterráneas en esta región. Se recolectaron cuatro tipos de aguas incluyendo: aguas marinas, de manglar, subterráneas y dulces. Las aguas marinas fueron recolectadas en las zonas norte, central y sur del Golfo de Morrosquillo; las aguas de manglar se recolectaron en el norte y centro; las aguas subterráneas fueron muestreadas en la zona central; y las aguas dulces en la zona sur, correspondiente al delta del Río Sinú. En total, se obtuvieron trece muestras, a las cuales se les realizaron mediciones de pH, conductividad y temperatura. Los análisis químicos de las aguas incluyeron análisis iónicos y análisis de isotopos estables. Los resultados revelaron que las aguas son ricas en sodio, calcio, cloruros, magnesio y sulfatos, clasificándose las aguas marinas y de manglar como cloruradas sódicas y las dulces como sulfatadas cálcicas. Las aguas subterráneas presentaron una variabilidad desde bicarbonatadas sódicas hasta cloruradas cálcicas, reflejando una evolución química del acuífero influenciada por el intercambio iónico y, en menor medida, por la intrusión salina en áreas más cercanas a la línea de costa. Por otro lado, las bajas concentraciones de sales y el empobrecimiento en $\delta^{18}\text{O}$ de las aguas subterráneas sugieren una fuente de recarga proveniente de la mezcla de aguas meteóricas que se infiltran en el pie de monte de la Serranía de San Jacinto fluyendo hacia el oeste por paleocanales hasta la barra de playa y el manglar del Golfo de Morrosquillo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Mario García González. Geólogo PhD. Codirector: Tania Palmera Henao. Geóloga PhD.

Abstract

Title: Geochemical study of surface and groundwater in the Gulf of Morrosquillo, Colombia*

Author(s): Jennifer Alexandra Oviedo Prada**

Key Words: pH, Electrical Conductivity, Geochemical evolution, Groundwater, Hydrogeological

Model

Description: The brackish waters of the mangroves and underground aquifers of the Gulf of Morrosquillo constitute a valuable water reserve for the population, especially in light of the scarcity of water resources in this coastal area. This study included the sampling and geochemical analysis of surface and groundwater in the region. Four types of water were collected, including marine, mangrove, groundwater, and fresh water. Marine waters were collected from the northern, central, and southern areas of the Gulf of Morrosquillo; mangrove waters were collected from the north and center; groundwater samples were taken from the central zone; and fresh water was collected in the southern area, corresponding to the delta of the Sinú River. In total, thirteen samples were obtained, to which pH, conductivity and temperature measurements were performed. Chemical analyses of the waters included ionic analysis and stable isotope analysis. The results revealed that the waters are rich in sodium, calcium, chlorides, magnesium and sulphates, with marine and mangrove waters classified as sodium-chlorinated and fresh waters as calcium-sulphated. The groundwater varied from sodium-bicarbonate to calcium-chlorinated, reflecting a chemical evolution of the aquifer influenced by ionic exchange and, to a lesser extent, by saline intrusion in areas closer to the coastline. On the other hand, the low concentrations of salts and the impoverishment of $\delta^{18}\text{O}$ in the groundwater suggest a source of recharge coming from the mixture of meteoric waters that infiltrate the foothills of the Serranía de San Jacinto and flow westward through paleochannels toward the beach bar and the mangrove swamp of the Gulf of Morrosquillo.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemistry. School of Geology. Director: Mario García González. Geologist Ph.D. Co-director. Tania Palmera Henao. Geologist Ph.D.

Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida, la agricultura y el desarrollo económico. En todo el mundo, alrededor de 2.500 millones de personas dependen únicamente de los recursos de agua subterránea para satisfacer sus necesidades básicas (The Groundwater Project, 2024). Estas aguas son especialmente cruciales en regiones con escasez de agua, actuando como reservas en tiempos de sequía. Su relevancia es mayor en áreas costeras, donde la presión sobre los recursos hídricos aumenta debido al crecimiento poblacional y a la contaminación de fuentes superficiales (Custodio, 2010).

El Golfo de Morrosquillo, en la costa caribeña de Colombia, es una región que enfrenta desafíos significativos relacionados con la escasez de agua. Según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2018), las comunidades locales dependen en gran medida de las aguas subterráneas, que son vulnerables a la sobreexplotación y a la intrusión salina por su proximidad al océano. Esta situación pone en riesgo la sostenibilidad del recurso, afectando no solo el acceso a agua potable, sino también la agricultura y la salud pública (Gómez, 2024).

En este contexto, la hidrogeología juega un papel esencial al proporcionar herramientas para comprender la distribución, movimiento y calidad de las aguas subterráneas. Además, permite identificar fuentes de contaminación, determinar la edad del agua y evaluar procesos de recarga (Böhlke, 2002). Por ello, es importante llevar a cabo un estudio exhaustivo del sistema hidrogeológico del Golfo de Morrosquillo. Comprender la dinámica de las aguas subterráneas en esta región facilitará la implementación de estrategias de gestión efectivas, asegurando el acceso sostenible a este recurso vital y protegiendo su calidad ante impactos ambientales y antrópicos. Esta investigación es fundamental no solo para el bienestar local, sino también para la resiliencia ante el cambio climático y la gestión de recursos hídricos a largo plazo.

1. Justificación y/o planteamiento del problema

El Golfo de Morrosquillo se encuentra sobre el mar Caribe en la costa norte de Colombia y es una zona importante para la pesca, el turismo y la biodiversidad marina (Villarraga *et al.*, 2017). Sin embargo, la escasez de agua es un problema que ha afectado a esta región de Colombia durante varias décadas e impide un óptimo desarrollo turístico y agropecuario (Jaramillo, 2023). Esta escasez de agua potable se debe a factores como la disminución de las precipitaciones, el aumento de la demanda de agua y la contaminación antrópica de la misma (Montesino *et al.*, 2014). En la actualidad, la principal fuente de agua en este territorio proviene de acuíferos subterráneos que se encuentran a profundidades entre los 60 a 120 metros (Díaz, 1998), algunos de los cuales, por su cercanía a la playa, podrían estar afectados por la intrusión del agua salada (Martínez *et al.*, 2014) alterando su potabilidad.

Este estudio tiene como objetivo realizar un análisis geoquímico de las aguas marinas superficiales, subterráneas y de manglar, a fin de desarrollar un modelo hidrogeológico que explique la recarga de los acuíferos y su interacción con las aguas circundantes. Dicho análisis permitirá evaluar la calidad del recurso hídrico disponible y determinar cómo factores como la intrusión salina pueden comprometer su potabilidad. La creación del modelo hidrogeológico ayudará a comprender los procesos de recarga de los acuíferos y la interacción del agua con el entorno. Este estudio no solo facilitará la identificación de fuentes confiables de agua potable, sino que también permitirá una gestión más eficiente de los recursos hídricos, contribuyendo al desarrollo sostenible del área. A largo plazo, el impacto de este trabajo podría mejorar tanto la disponibilidad como el manejo del agua, proteger los ecosistemas locales y fomentar el crecimiento económico a través del turismo y la agricultura sustentable.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Estudiar la geoquímica de las aguas naturales del litoral del Golfo de Morrosquillo incluyendo agua marina, agua del manglar y aguas subterráneas

2.2. Objetivos específicos

Analizar la composición geoquímica de las aguas a partir de los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, contenido de iones principales e isotopos estables

Explicar la interacción entre las aguas superficiales marinas y de manglar con los acuíferos subterráneos localizados en la barra de playa del Golfo de Morrosquillo

Proponer un modelo hidrogeológico de los acuíferos de aguas salobres potables a lo largo de las playas El Francés y Guacamayas

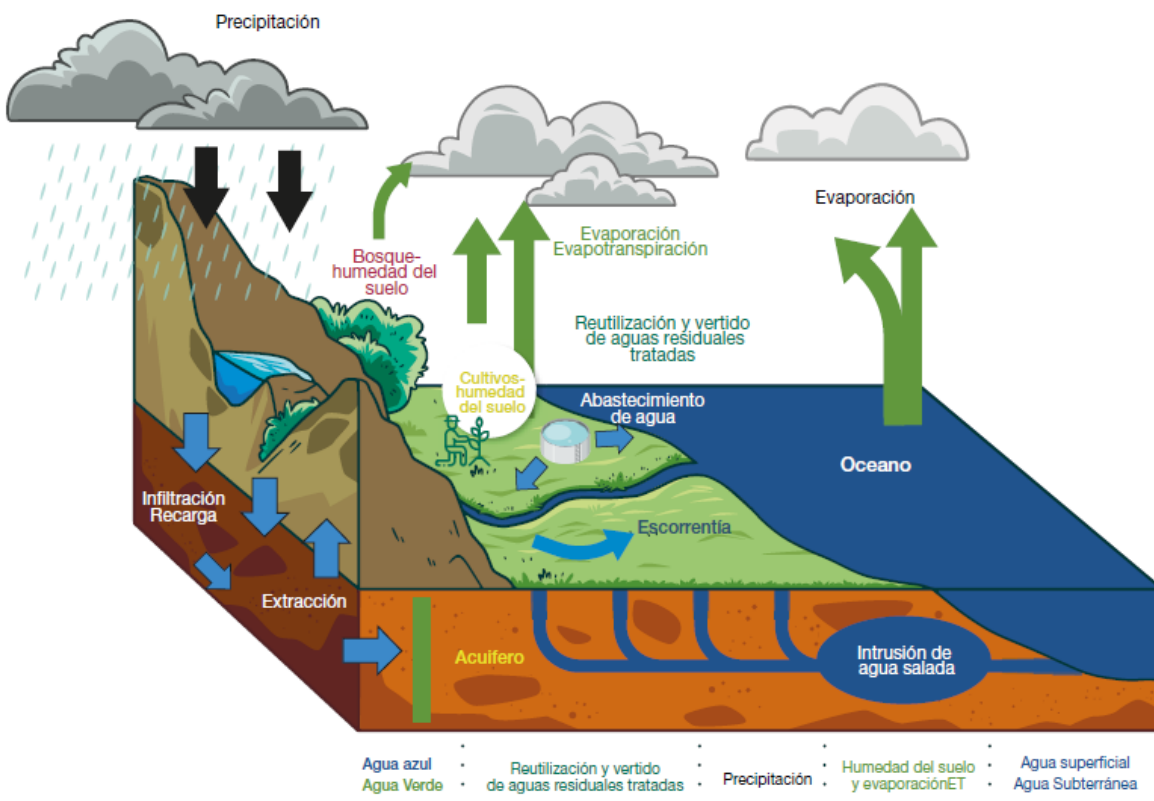
3. Marco Teórico

3.1 Ciclo del agua

El ciclo del agua está representado en una sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la tierra y en su retorno a la primera. Estas fases incluyen: evaporación del agua del suelo, del mar y de las aguas continentales; condensación en forma de nubes; precipitación, interceptación, infiltración, percolación, escorrentía, acumulación en el suelo o en cuerpos de agua y reevaporación (OMM-Unesco, 2012).

Figura 1.

Ciclo del agua



Nota. Tomado de *Estudio Nacional del Agua 2022* (p. 60), por Vargas N et al., IDEAM, 2022.

La comprensión y cuantificación de los volúmenes de agua, entradas, salidas y las variaciones en el almacenamiento en este ciclo se realiza aplicando el principio de conservación de masa a través del denominado balance hídrico. El balance hídrico define los cambios en el almacenamiento de agua dentro del sistema en el tiempo, en función de las entradas y salidas de agua (Vargas et al., 2022). Estas estimaciones se realizan a través de modelos hidrológicos que pueden ser clasificados bajo distintos criterios, como la conceptualización, la escala temporal, la agregación y la complejidad, entre otros.

3.2 Modelos hidrogeológicos conceptuales

El conocimiento de las aguas se consolida e integra en un modelo hidrogeológico conceptual (MHC). Vargas et al. (2022) define el modelo hidrogeológico conceptual como una representación en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de los sistemas hidrogeológicos. Este modelo está conformado por un modelo geológico, que describe la geometría de los sistemas acuíferos y sus características litológicas y estructurales; un modelo hidrológico, que determina la dinámica de flujo, los mecanismos y la cuantificación de recarga, inventario de puntos de agua, balance hídrico, conexiones hidráulicas de aguas superficiales y subterráneas; un modelo hidráulico, que permite reconocer las propiedades de permeabilidad o conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento de unidades acuíferas; un modelo hidroquímico, que permite reconocer la distribución espaciotemporal de las propiedades fisicoquímicas y concentraciones de las especies químicas disueltas en el agua bajo condiciones naturales, y su afectación por actividades antrópicas; y, finalmente, un modelo isotópico, que brinda información sobre fuentes, edades, tiempos de viaje y trayectos de flujo del agua subterránea.

3.3 Caracterización química del agua

3.3.1 Alcalinidad y pH en aguas naturales

Según Drever (1998), el pH se refiere a la medida de la acidez o alcalinidad de una solución, determinada por la concentración de iones de hidrógeno (H^+) presentes en ella. Un pH bajo indica acidez, mientras que un pH alto indica alcalinidad. En aguas naturales, el pH varía ampliamente dependiendo de factores como la geología, la vegetación circundante, la actividad humana y la presencia de organismos acuáticos. Por lo general, las aguas superficiales tienden a ser ligeramente alcalinas, con un pH que oscila entre 6.5 y 8.5 (Delgado, 2023). Esta alcalinidad depende de la presencia de bicarbonatos, carbonatos y otros minerales básicos disueltos en el agua. Sin embargo, algunos cuerpos de agua pueden mostrar fluctuaciones en el pH debido a la influencia de la contaminación antropogénica sobre el medio ambiente tales como la lluvia ácida, la descarga de aguas residuales, la actividad agrícola o industrial, entre otros.

3.3.2 Análisis de iones mayoritarios y clasificación de aguas

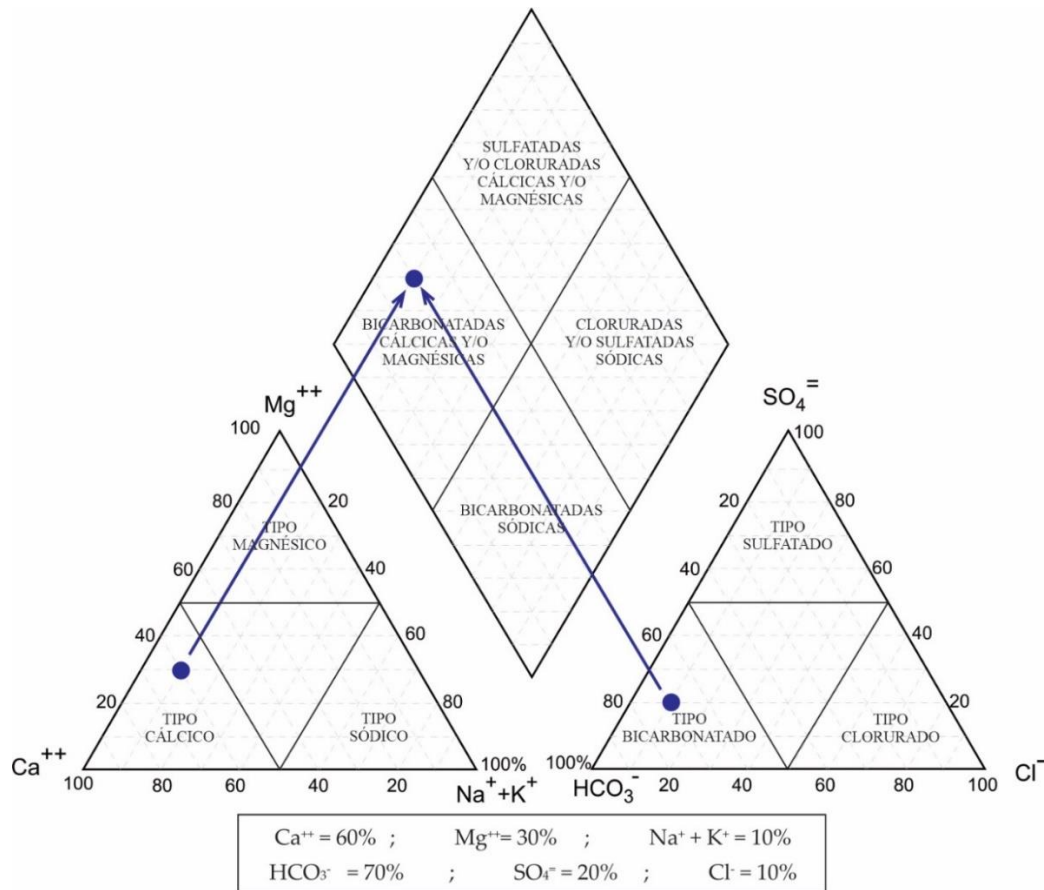
Sánchez (2017), expresa que el conocimiento de una cuenca o de un sistema acuífero requiere entender el sistema regional de flujo, áreas de recarga y descarga, etc. La composición química de las aguas subterráneas puede aportar una información muy valiosa sobre el comportamiento hidrogeológico regional.

Diagrama de Piper. El diagrama de Piper es una herramienta gráfica que sirve para clasificar las aguas subterráneas en función de sus principales componentes iónicos, como bicarbonatos, sulfatos, cloruros, sodio, calcio, magnesio, etc. Esto permite visualizar la distribución y relaciones entre los diferentes tipos de agua, lo que puede ser útil para entender la

calidad del agua, identificar la procedencia de esta, y evaluar la evolución geoquímica de los acuíferos.

Figura 2.

Ejemplo para el diagrama de Piper (1944)



Nota. Tomado de *Hidrología Superficial y Subterránea*, por Sánchez San Román, J., 2017, Universidad de Salamanca.

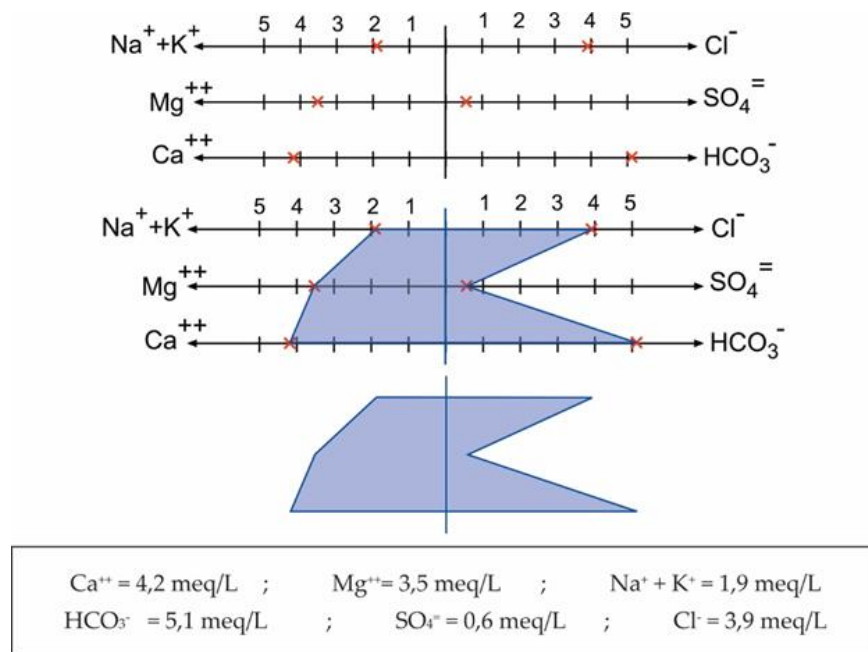
El diagrama está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes son Ca²⁺ + Mg²⁺ y Na⁺ + K⁺ y los vértices del triángulo de aniones son SO₄⁻², Cl⁻ y HCO₃⁻. Los datos de los diagramas triangulares se proyectan en un rombo central de manera muy simple. Los datos de partida

deben ser meq/L de cada ion y se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes (Sánchez, 2017). A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión (como se muestra en la figura 2).

Diagrama de Stiff. El diagrama de Stiff es otra herramienta que facilita la identificación de patrones geoquímicos, como la presencia de aguas bicarbonatadas, sulfatadas, cloruradas, entre otras. Este diagrama permite visualizar claramente diferentes tipos de agua y de forma simultánea, evaluar el grado de mineralización del agua analizada.

Figura 3.

Ejemplo para el diagrama de Stiff (1951)



Nota. Tomado de *Hidrología Superficial y Subterránea*, por Sánchez San Román, J., 2017, Universidad de Salamanca.

Esta gráfica está compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los

aniones al derecho. Siempre el Na^+ se confronta con el Cl^- , el Ca^{+2} con el HCO_3^- y el Mg^{+2} con el SO_4^{-2} . Todos los ejes horizontales están a la misma escala lineal y las concentraciones están dadas en mEq/L. La distancia entre los ejes horizontales es arbitraria y la escala elegida (1, 2, 3... o bien 5, 10,15) dependerá de la salinidad de las aguas estudiadas (Sánchez, 2017).

3.3.3 Análisis de isotopos estables: tiempo de residencia y línea meteórica local

Los isótopos estables, como el deuterio ($\delta^2\text{H}$), el oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}$) y el carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}$), son utilizados como indicadores del origen del agua debido a sus diferentes fracciones isotópicas en función de diversas variables geoquímicas y geográficas (Vélez & Rhenals, 2008).

En el caso del $\delta^2\text{H}$ y el $\delta^{18}\text{O}$, se utilizan principalmente para estudiar el origen y el ciclo del agua en el medio ambiente. Estos isótopos varían en función de la temperatura y la altitud, lo que permite distinguir entre aguas de diferentes orígenes, como las aguas de lluvia, las aguas superficiales y las aguas subterráneas. La relación entre el $\delta^2\text{H}$ y el $\delta^{18}\text{O}$ en el agua puede proporcionar información sobre la fuente del agua y los procesos de evaporación y condensación que ha experimentado (Peralta *et al*, 2015).

Variaciones naturales del ^{13}C en el agua de mar, aguas subterráneas y aguas de ríos.

El CO_2 atmosférico parece estar casi en equilibrio isotópico con el bicarbonato oceánico disuelto. Los valores de $^{13}\delta(\text{HCO}_3^-)$ en el océano son aproximadamente de +1 a +1,5‰, de acuerdo con el fraccionamiento de equilibrio a temperaturas entre 15 y 20 °C (Mook, 2000). Según el fraccionamiento deberíamos esperar que la calcita que precipita lentamente en equilibrio con el bicarbonato oceánico tenga valores $^{13}\delta$ de +2,0 a +2,5‰. Mook y Vogel (1968) observaron este equilibrio isotópico entre conchas de agua marina y salobre y bicarbonato disuelto en el agua.

El CO_2 del suelo es importante para establecer el contenido de carbono inorgánico disuelto del agua subterránea. Después de la disolución de este CO_2 , el agua de lluvia que se infiltra es capaz de disolver la piedra caliza del suelo.

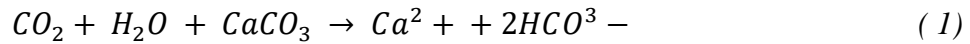
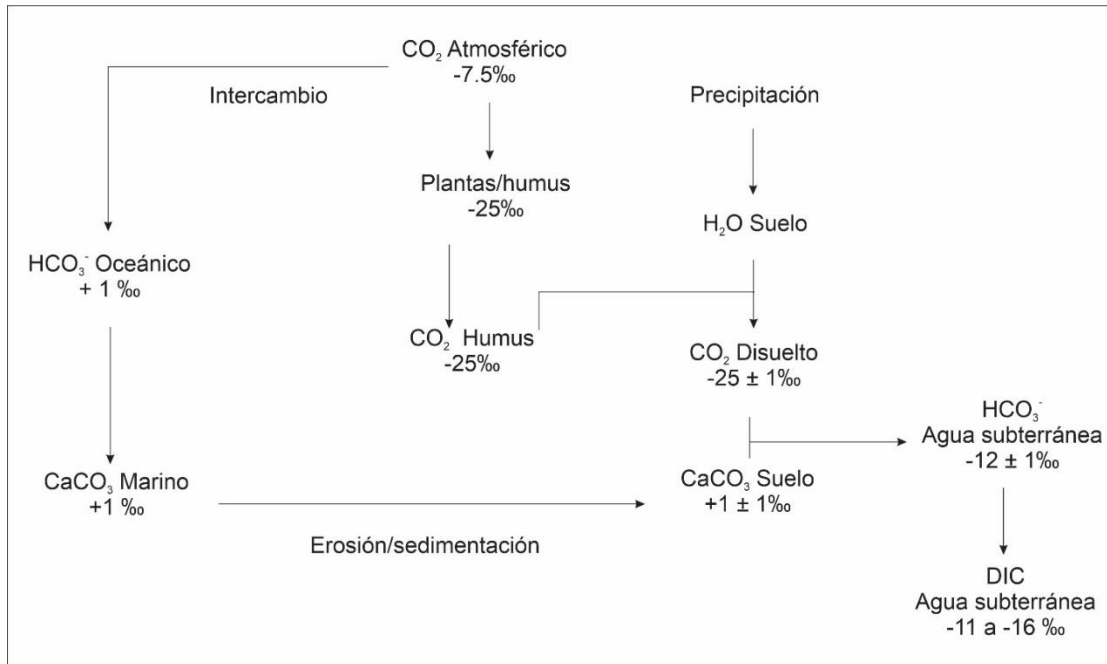


Figura 4.

Representación esquemática de la formación de carbono inorgánico disuelto en el agua subterránea a partir de carbonato del suelo y CO_2 del suelo.



Nota. Tomado de *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle, Principles and Applications*, vol. 1 (p. 101), por Mook, W., 2000.

Debido a que la piedra caliza generalmente es de origen marino ($^{13}\delta \approx +1\%$), este proceso da como resultado una cantidad de bicarbonato disuelto de alrededor del -11 al -12‰ en climas templados. En el suelo, el HCO_3^- primero se intercambia con el exceso frecuentemente presente

de CO₂ gaseoso. En consecuencia, se observan valores de $^{13}\delta(\text{HCO}_3^-)$ significativamente fuera del rango de -11 a -12‰ en el agua del suelo, así como en aguas dulces superficiales.

De acuerdo con Mook (2000), en aguas superficiales como lagos, el enriquecimiento de carbono inorgánico disuelto puede ser causado por intercambio isotópico con CO₂ atmosférico, lo que finalmente resulta en valores idénticos a los valores oceánicos.

Además de HCO₃⁻, las aguas naturales contienen concentraciones variables de CO₂ con el efecto de que el valor $^{13}\delta$ de DIC (contenido total de carbono inorgánico disuelto) es menor que el de la fracción de bicarbonato sola en las aguas subterráneas (Vogel & Ehhalt 1963, citado en Mook 2000), y en las aguas de arroyos y ríos derivadas de aguas subterráneas los valores de $^{13}\delta\text{DIC}$ generalmente están en el rango de -12 a -15‰ (Figura 4).

Variaciones naturales del ^{18}O en agua de mar, agua de lluvia y aguas superficiales.

Los océanos forman la mayor reserva de agua del mundo. El contenido de $\delta^{18}\text{O}$ en la capa superficial es bastante uniforme y varía entre +0,5 y -0,5‰ (Epstein y Mayeda, 1953). Solo en las regiones tropicales y polares se observan desviaciones mayores. En las regiones tropicales, los valores más positivos se deben a una fuerte evaporación: $^{18}\delta$ de agua en el Mediterráneo equivale a +2‰. En las regiones polares, los valores más negativos se deben al deshielo del agua procedente de nieve y hielo isotópicamente ligeros. Si el agua del océano se evaporara en condiciones de equilibrio, el vapor resultante se agotaría en $\delta^{18}\text{O}$, dependiendo de la temperatura. Sin embargo, el vapor oceánico parece tener un valor $^{18}\delta$ promedio de -12 a -13‰, lo que se debe en parte al fraccionamiento cinético. La humedad relativa del aire y la temperatura de evaporación influyen en la cantidad de fraccionamiento en desequilibrio que se produce.

La conversión del vapor de agua en precipitación está influenciada por numerosos factores climáticos y locales, lo que ocasiona grandes variaciones en el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ en la

precipitación a nivel mundial. En términos generales, el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ tiende a disminuir a medida que la lluvia se aleja de las áreas ecuatoriales, que son las principales fuentes de vapor de agua. En regiones como el Ártico y la Antártida, el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ en el hielo puede ser extremadamente bajo, llegando incluso a alcanzar un -50‰ (Mook, 2000).

La evaporación, especialmente en las regiones tropicales y semiáridas, provoca un enriquecimiento del $\delta^{18}\text{O}$ en las aguas superficiales. Esto da como resultado, por ejemplo, que en ríos sea de +3 a +4‰ y en ciertos lagos hasta +20‰.

Variaciones naturales del ^2H y su relación con el ^{18}O . Las variaciones de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en la precipitación, el hielo, la mayoría de las aguas subterráneas y las aguas superficiales no evaporadas parecen estar estrechamente relacionadas.

En 1961, Harmon Craig encontró una relación lineal entre el $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ para las aguas superficiales a escala global y la denominó “Línea de Agua Meteórica Global de Craig”, representada por la siguiente ecuación:

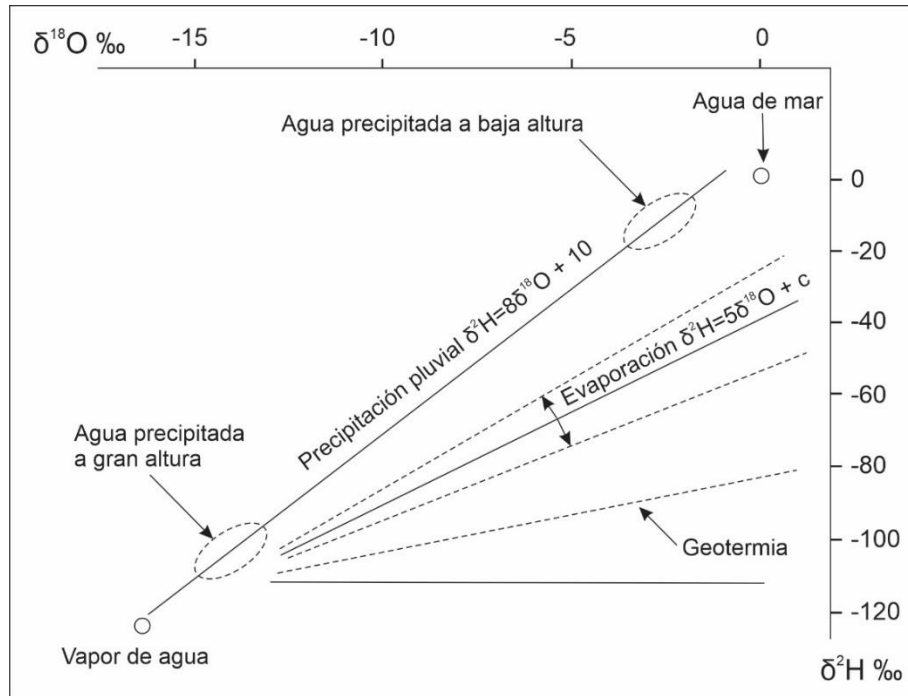
$$\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10\% \text{ SMOW} \quad (2)$$

Posteriormente, Rodríguez (2004) construyó una línea meteórica isotópica para Colombia a partir de diversos registros isotópicos provenientes de distintas partes del país, encontrando la siguiente ecuación:

$$\delta^2H = 8\delta^{18}O + 9,6\% \quad (3)$$

Figura 5.

Variaciones naturales del contenido de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en el ciclo hidrológico



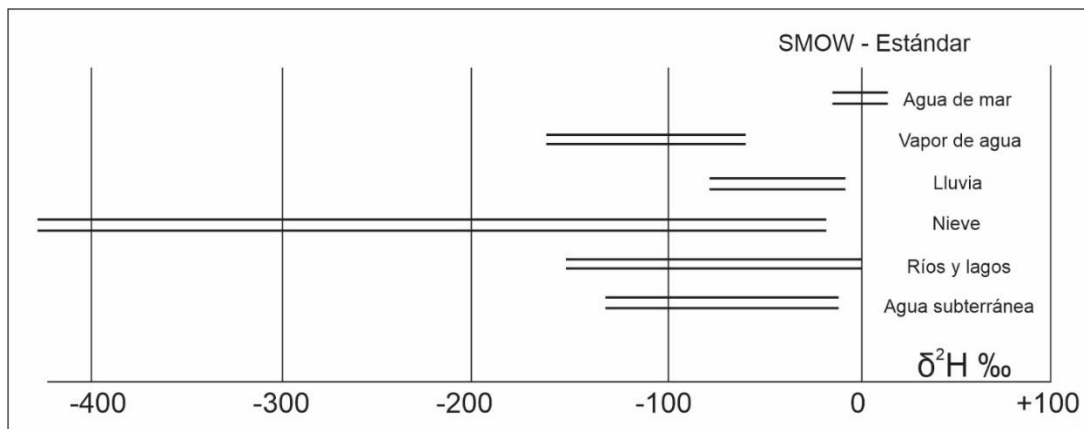
Nota. Tomado de *Las técnicas isotópicas, una herramienta eficaz para el diagnóstico y evaluación de las aguas subterráneas*, por González Hita, L & Sánchez Díaz, L., 1992, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

González & Sánchez (1992) señalan que la composición isotópica del agua del mar es uniforme, pero puede variar en áreas específicas debido a la acumulación de aguas continentales o la evaporación, dado que fenómenos como la evaporación y la condensación dan lugar al fraccionamiento isotópico. Las precipitaciones tienen una composición media anual característica, sin embargo, puede cambiar durante la infiltración debido a la evaporación parcial, lo que hace que el agua se vuelva más pesada. Este proceso puede ocurrir por acumulación en la superficie o en la zona no saturada del suelo, y el grado de enriquecimiento isotópico depende de la cantidad de agua evaporada.

Las aguas subterráneas tienen una composición isotópica constante debido a la regularidad de los períodos de recarga. En el caso de aguas termales, hay un intercambio isotópico entre el oxígeno del agua y el de las rocas, lo que puede hacer que la composición isotópica del agua se aproxime a cero (esto se observa en el diagrama de la Figura 6 donde los puntos se desplazan paralelamente al eje del $\delta^2\text{H}$).

Figura 6.

Variaciones naturales del contenido de $\delta^2\text{H}$ en diferentes tipos de agua



Nota. Tomado de *Las técnicas isotópicas, una herramienta eficaz para el diagnóstico y evaluación de las aguas subterráneas*, por González Hita, L & Sánchez Díaz, L., 1992, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

4. Marco Geológico y Estudios Anteriores

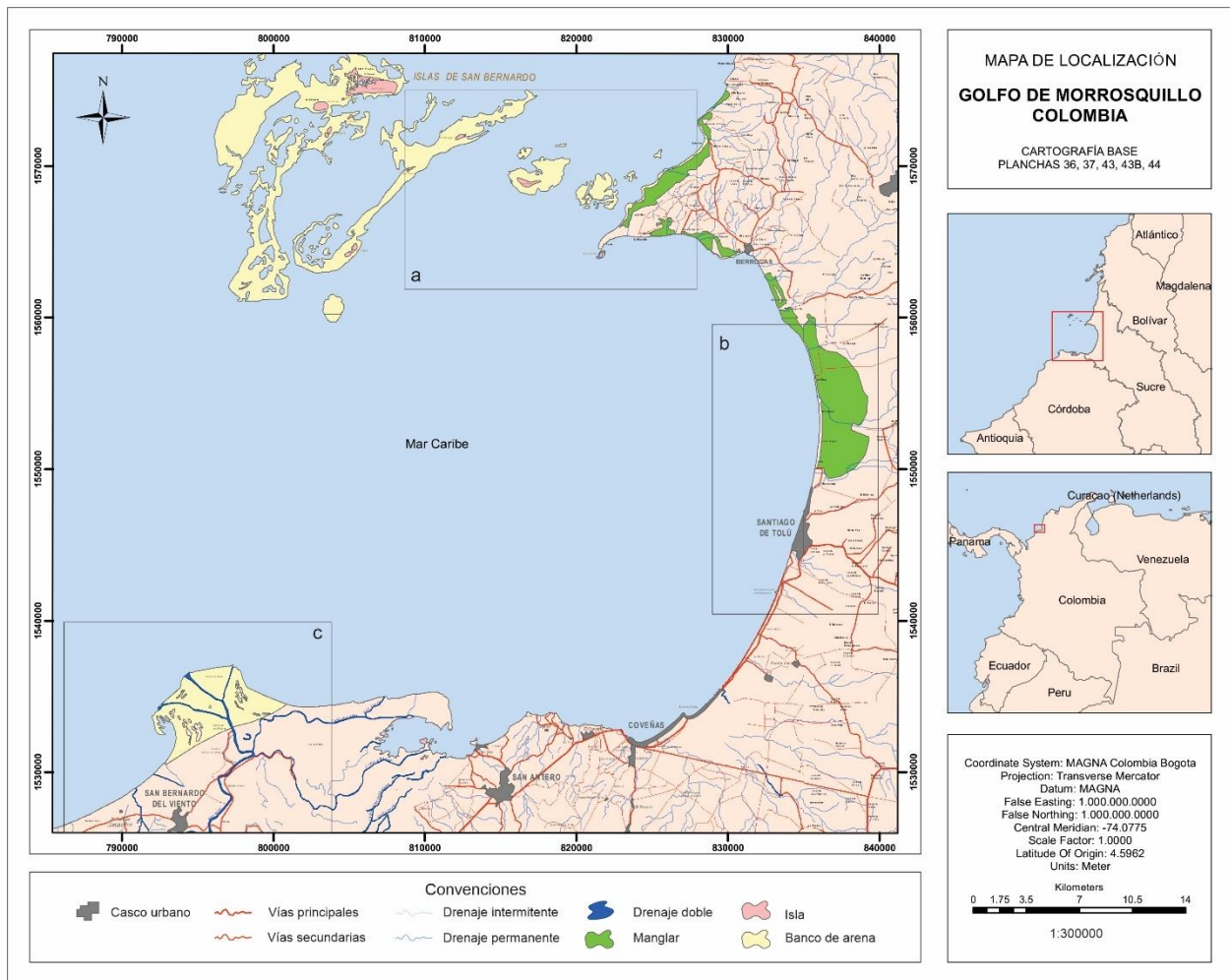
4.1 Localización

El Golfo de Morrosquillo se encuentra ubicado en el sector meridional de la costa Caribe colombiana, entre los departamentos de Córdoba y Sucre. Presenta una amplitud aproximada de 40 km y una profundidad media de 35 m. Morfológicamente está constituido hacia la zona central por una extensa llanura costera que limita al norte y al sur con dos cuerpos de terrazas coralinas

(Flórez *et al.*, 2000). En la zona suroeste se encuentra la desembocadura del río Sinú, el cual, como se observa en la Figura 7(c), es la fuente hídrica terrestre más representativa en el área de investigación.

Figura 7.

Golfo de Morrosquillo. Mapa de localización de la zona de estudio



Nota. Localización de la zona de estudio. a. Islas y Punta de San Bernardo, b. Santiago de Tolú, c. San Bernardo del Viento y desembocadura del Río Sinú. Modificado de SGC. 2024

De acuerdo con la cartografía del Servicio Geológico Colombiano [SGC], la zona de estudio se distribuye en tres planchas geológicas. En la Plancha 36-37 María La Baja (Guzmán *et al.*, 1998) se localiza la parte más septentrional del Golfo, abarcando áreas como la Punta de San Bernardo, el corregimiento de Berrugas y el municipio de San Onofre. La Plancha 43 - 43BIS (Barrera R, 1999), que comprende las regiones de San Antero y San Bernardo del Viento, representa el área más meridional. Finalmente, la porción central del Golfo, que engloba gran parte del territorio de Santiago de Tolú, se halla representada en la Plancha 44 Sincelejo (Clavijo *et al.*, 1998). Parte de la información contenida en los próximos apartados fue extraída de estas planchas y sus respectivas memorias explicativas.

4.2 Geomorfología

La geomorfología encontrada a lo largo del litoral del Golfo de Morrosquillo consiste principalmente en playas con intervención antrópica, áreas de playas en su estado natural, ecosistemas de manglares, ciénagas, cordones litorales, lagunas costeras, playones antiguos y desembocaduras de drenajes visibles (Anaya, 2021). Según Molina *et al.* (1994), la geomorfología de la zona está constituida principalmente por geoformas costeras de origen marino, fluvial y fluvio-marino. Estos autores clasifican las geoformas en dos categorías generales: costas bajas y costas elevadas.

4.2.1 Costas bajas

Conformadas por playas que, en algunos casos, limitan con pantanos de manglar y llanura costera, mientras que en otros están conectadas con bocas de ríos y ciénagas. También se observan espigas formadas por mangles que bordean las ciénagas, como es el caso de la Bahía de Cispatá, al sur del Golfo. Además, aparecen barras hacia el interior y a lo largo del Golfo, a veces interrumpidas por

la formación de lagunas interiores. Igualmente se incluye en esta categoría la planicie aluvial, conformada por depósitos fluviales, como ocurre en el delta del Río Sinú. Por último, se tiene la llanura costera de área extensa y plana que limitan con la línea de costa y la zona montañosa y la llanura de mangle, ubicada principalmente adyacente a los estuarios.

4.2.2 Costas elevadas

Conformada por terrazas marinas de superficie plana o ligeramente inclinada hacia el mar, labradas en calizas arrecifales y material detrítico, aparecen en la zona norte de Berrugas y al oeste de Coveñas. Por otra parte, colinas y montañas, las cuales, presentan dirección estructural predominante hacia el noreste, con alturas entre 30 y 140 m, limitando con las zonas de manglar y las terrazas marinas.

4.3 Geología estructural

Duque (1973-1978, citado en Díaz, 1988), divide la geología estructural en dos regiones:

4.3.1 Región estable

También llamada de plataforma, suavemente ondulada. Se encuentra al oriente de la Serranía de San Jacinto y no presenta rasgos tectónicos relevantes en superficie.

4.3.2 Región inestable

Se encuentra muy plegada sobre la corteza oceánica y está conformada por el Anticlinorio de San Antonio, el Sinclinorio de San Onofre y el Anticlinorio de San Jacinto.

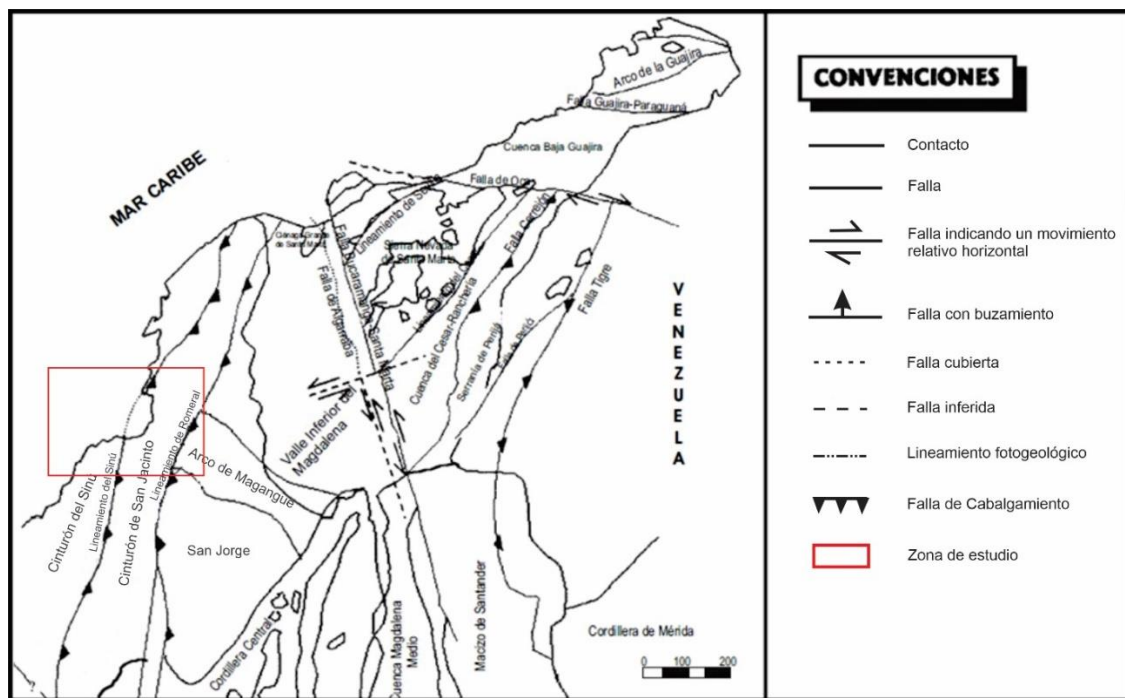
El Anticlinorio de San Antonio se encuentra al occidente de la zona litoral del Golfo de Morrosquillo, e incluye el flanco oriental del Anticlinal de San Antero, el Sinclinal del Aserradero y otras estructuras menores. Por su parte, el Sinclinorio de San Onofre está delimitado al oriente por el Anticlinorio de San Jacinto, mientras que su límite occidental está determinado por el

Anticlinorio de San Antonio. Topográficamente se presenta como una zona plana siendo su parte más baja la situada en el Golfo de Morrosquillo y comprende el Sinclinal de Toluviejo y estructuras anexas.

El Anticlinorio de San Jacinto se destaca como el rasgo estructural más importante del área de estudio y constituye la zona montañosa. Abarca numerosas estructuras como el Anticlinal de Toluviejo, los anticlinales de Sahagún, Corozal, Cerro de Pita y Loma del Viento.

Figura 8.

Marco tectónico regional



Nota. Tomada de *Geología de las planchas 44 Sincelejo y 52 Sahagún* (p. 54), por Clavijo Torres, J. y Barrera Olmos, R., 2001, INGEOMINAS, Memoria explicativa.

Complementado con la información proporcionada por las planchas del Servicio Geológico Colombiano (SGC), se tiene en la plancha 36-37 María La Baja, una geología estructural

caracterizada por la presencia de anticlinales y sinclinales apretados, que son generalmente interceptados por fallas de corrimiento. Esta complejidad estructural tiende a aumentar hacia el centro de la Serranía de San Jacinto y disminuir hacia los lados, siguiendo un patrón con orientación predominantemente Norte-Sur a NN20E.

Hacia el área meridional del Golfo, Plancha 43-43Bis San Antero - San Bernardo del Viento, se han identificado lineamientos longitudinales al occidente de Coveñas, con dirección NNE, y otro al suroccidente del área, que se extiende hacia el noroeste en la dirección del río Sinú.

La extensión que cubre la plancha 44 Sincelejo también abarca la provincia tectónica del Cinturón de San Jacinto, donde se evidencia una dinámica compresiva notable mediante pliegues y fallas inversas. Hacia el suroriente, esta región se encuentra delimitada por el lineamiento de Romeral, que marca el límite con la Cuenca de San Jorge (Figura 8).

4.4 Estratigrafía

Las principales unidades litoestratigráficas en la región de estudio (Geología de las Planchas 36-37, 43-43bis y 44 del SGC) que tienen influencia en los procesos hidrogeológicos se ilustran en la Figura 9 y se describen a continuación:

4.4.1 Formación Cansona (Ksc)

Interestratificación de chert, calizas micríticas de color gris, lodolitas negras calcáreas; laminadas y con concreciones de calizas en afloramientos discontinuos, lodolitas gris verdosas intercaladas con areniscas arcósicas en capas de hasta 50 cm y finalmente conglomerado. Haffer (1960) le asigna una edad del Cretácico Superior.

4.4.2 Formación San Cayetano (Pgsc)

Definida originalmente en la Serranía de San Jacinto (Chenevart, 1963). Compuesta por dos litologías correspondientes a unas arenitas líticas y a unas lilitas silíceas, cuya relación y expresión cartográfica no se han definido con precisión. Proveniente de un ambiente marino abisal. Edad del Paleoceno Inferior – Eoceno medio (Duque-Caro, 1967).

4.4.3 Formación Maco (Pgm)

Está constituida completamente por conglomerados de guijarros y guijos que forman un sinclinal estrecho y alargado. Se sugiere un ambiente de formación marino de alta energía y una edad de Eoceno Medio.

4.4.4 Formación Tolviejo (Pgtv)

La localidad tipo se encuentra en los alrededores de Tolviejo. Esta unidad no aflora de manera continua en el área, por lo que su descripción se dificulta un poco, pero se podría resumir en Calizas terrígenas con macroforaminíferos y algas con intercalaciones de margas y lodolitas. Ambiente de depósito marino somero y edad del Eoceno Medio (Clavijo & Barrera, 2001).

4.4.5 Formación San Jacinto (Pgsj)

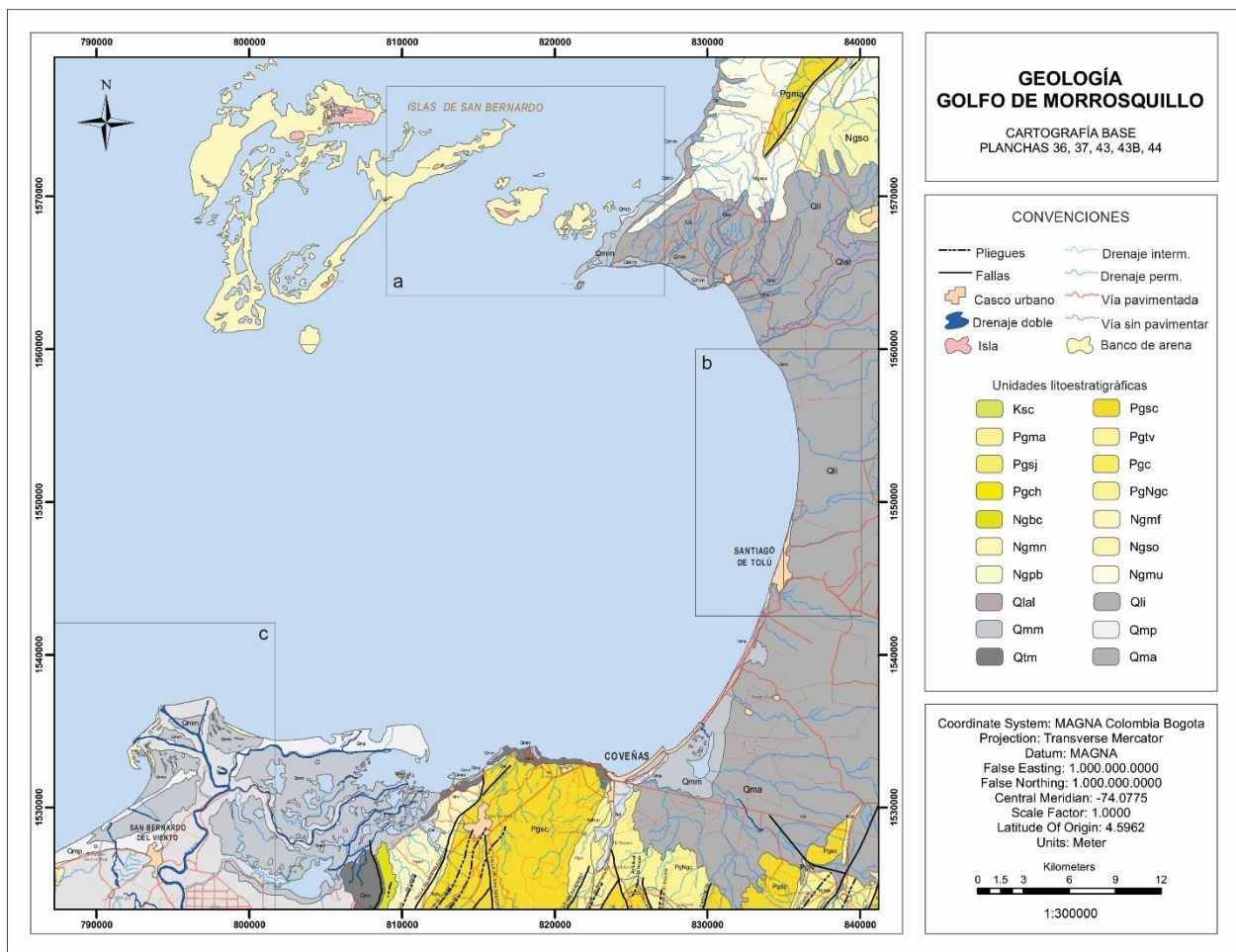
Constituida por una alternancia de areniscas conglomeráticas glauconíticas, con arcillolitas calcáreas, fosilíferas grises; hacia la base predomina un conglomerado lítico presente en casi todas las localidades (Duque Caro et al., 1983). Ambiente de depósito marino somero. Clavijo & Barrera (2001) le asignan una edad Eoceno Superior – Oligoceno Inferior (Figura 10).

4.4.6 Formación Ciénaga de Oro (Pgc)

Consta de areniscas alternadas con limolitas que presentan altos niveles de bioturbación, en capas planas paralelas. Se le asigna una edad Oligoceno – Mioceno Inferior. Ambiente de formación transgresivo deltaico.

Figura 9.

Geología del Golfo de Morrosquillo



Nota. Unidades litoestratigráficas del Golfo de Morrosquillo. a. Zona Norte, b. Zona Central, c. Zona Meridional. Modificado de los nativos de las planchas 36-37, 4343bis y 44 del Servicio Geológico Colombiano SGC, 2024.

4.4.7 Formación Chengue (Pgch)

Compuesta por lodolitas estratificadas intercaladas en capas de hasta 20 cm de colores gris, amarillo verdoso y grises rojizos, en capas plano paralelas continuas. Su composición textural indicaría un ambiente de depósito de baja energía.

4.4.8 Formación Carmen (PgNgc)

Es una unidad arcillosa que ocupa zonas topográficamente más bajas que las formaciones anteriormente descritas. Consta principalmente de lodolitas plásticas pardo-amarillentas con abundante microfauna y shales calcáreos pardo amarillentos y grises. Su ambiente de depósito se considera marino-continental. Se le asigna una edad del Mioceno Inferior.

4.4.9 Brecha de Cispatá (Ngbc)

Brecha tectónica compuesta de clastos angulares, de liditas, chert, conglomerados, asociados a arenitas amarillas rojizas por oxidación, muy alteradas, y arcillolitas muy cizalladas. Se estima que esta unidad puede alcanzar un espesor cercano a los 200 - 300 m. Se estima una edad post eocena media.

4.4.10 Formación Floresanto (Ngmf)

Hacia la parte inferior, la unidad consta de arenitas de grano medio, granodecrecientes, ligeramente calcáreas de tonos rojizos y colores pardos. La parte superior está compuesta por capas delgadas a muy gruesas de lutitas intercaladas con limolitas calcáreas y arenitas líticas. Ambiente de depósito marino. Diferentes autores sugieren edades desde el Mioceno Inferior al Mioceno Superior.

4.4.11 Unidad Moñitos (Ngmn)

En el área de la Plancha 43 - 43Bis, los mejores afloramientos se hallan en el caserío de Pajonal, al suroccidente de San Bernardo del Viento. La unidad consta de arenitas pardo-amarillentas, conglomeráticas con guijos de cuarzo lechoso, chert negro, cuarcitas y fragmentos de origen volcánico, y algunos niveles de arcillolitas. Además, presenta concreciones de arenitas pardo-oscursas con cemento calcáreo algunas con niveles de conglomerados. GEOTEC (1997) postula una edad del Mioceno Medio al Mioceno Superior.

4.4.12 Formación San Onofre (Ngso)

Lodolitas plásticas color pardo amarillento con abundante microfauna (foraminíferos planctónicos) intercalaciones de shales calcáreos color pardo amarillento y gris.

4.4.13 Unidad Broqueles (Ngpb)

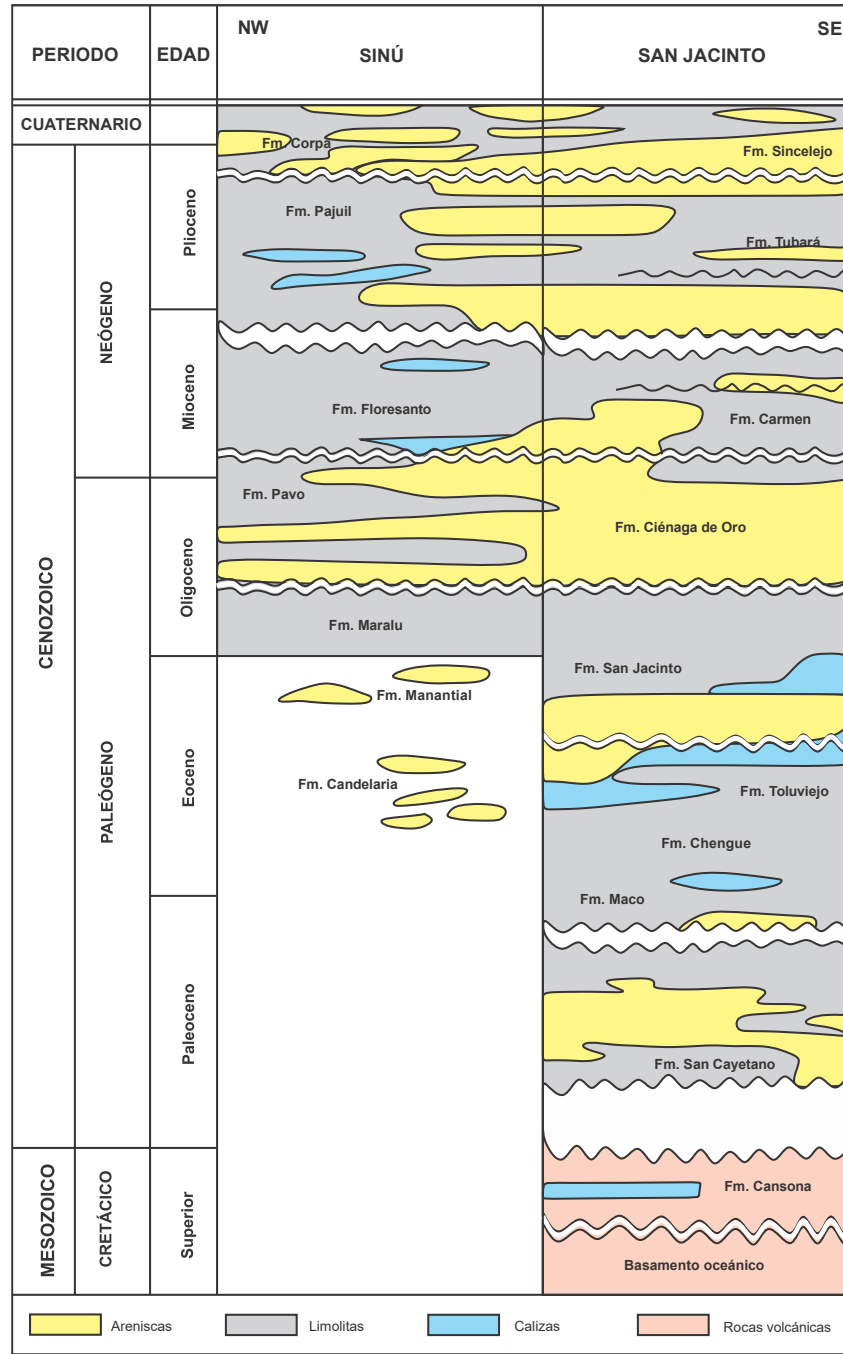
Limolitas y arcillolitas gris oliva, areniscas grano fino a conglomeráticas, bancos de calizas bioclásticas (corales, gasterópodos y bivalvos) asociados con arcillolitas con microfauna. GEOTEC (1997) postula un ambiente marino somero y aireado y le asigna una edad del Plioceno Inferior-Superior.

4.4.14 Formación Mucacal (Ngmu)

Areniscas cuarzosas de color gris amarillo de grano fino a medio, interestratificadas con lentes de areniscas conglomeráticas con clastos de arcillolitas grises hacia la base, areniscas de grano grueso conglomeráticas con granos subangulares de cuarzo, líticos y feldespatos en una matriz arcillosa.

Figura 10.

Columna estratigráfica de la zona de estudio



Nota. Modificado de Determinación de la geometría del Acuífero de Morrosquillo y geología detallada del Acuífero de Tolviejo, Sucre, por Bacca, J., Hernández, O. & Vásquez, L., 2010

4.4.15 Depósitos de llanura aluvial (Qlal)

Constituyen acumulaciones de sedimentos y fragmentos de roca que conforman los actuales cauces, aluviones y llanuras de inundación del río Sinú, los tributarios de este y demás drenajes del área.

4.4.16 Depósitos de llanura de inundación (Qli)

Son depósitos fluviales y lacustres con influencia marina; constituidos por arenas, limos y arcillas. Las arenas predominan en cercanías de la línea de costa, mientras que limos y arcillas caracterizan la planicie interior (Clavijo & Barrera, 2001).

4.4.17 Depósitos de llanura marino aluvial (Qma)

Estos depósitos constituyen la llanura costera del golfo de Morrosquillo. Conforman una zona de extensas planicies ligeramente onduladas, producto en parte de la acumulación de sedimentos transportados por los arroyos interdigitados con depósitos marinos.

4.4.18 Depósitos de manglar (Qmm)

Los depósitos de sustrato de manglar se presentan en los alrededores de la desembocadura del río Sinú, y bordean gran parte de las ciénagas presentes en la bahía de Cispatá y también en la parte oriental del área, en la ciénaga de La Caimanera. Están constituidos esencialmente por lodos y arenas con abundante materia orgánica.

4.4.19 Depósitos de playas (Qmp)

Corresponden a franjas litorales de amplitud variable entre menos de 10 metros hasta 50 metros. Están compuestos por sedimentos tamaño arena, cuya composición es variable (algunas están compuestas por minerales esencialmente terrígenos (líticos, cuarzo, feldspatos y chert) que confieren un tono oscuro a las playas, como las presentes en San Bernardo del Viento. Otras están

constituidas por sedimentos bioclásticos, de tono claro, como las presentes en Playa Blanca y algunos sectores entre Tolú y Coveñas) (Barrera, 1999).

4.4.20 Depósitos marinos aterrazados (Qtm)

En el área de la Plancha 43 - 43Bis, Barrera (1999) indica remanentes de antiguas terrazas marinas. Estos depósitos tienen un espesor variable de hasta un metro y constan de arenas limosas con restos de corales. Los depósitos de mayor desarrollo se hallan al occidente de la cuchilla de Cispatá, en la zona litoral entre Coveñas y punta Bello y al occidente del área entre punta Rada y punta Manzanillo.

4.5 Recursos hídricos subterráneos

La zona sur del Golfo de Morrosquillo, en el área de la Plancha 43-43Bis San Antero-San Bernardo del Viento, presenta un régimen hidrológico diverso. En la parte central, abundan las aguas superficiales del río Sinú, las cuales, causan problemas de inundación periódicos. Por otro lado, en el este y oeste, las aguas superficiales son escasas y el potencial hidrogeológico es bajo debido a la baja porosidad y permeabilidad de las formaciones. Las calizas pueden permitir la infiltración de aguas lluvias que emergen como manantiales, aunque son limitados en el área. Esta situación resalta la importancia de los recursos hídricos subterráneos.

El mayor potencial hidrogeológico de la región sur de la zona de estudio lo ofrecen los sedimentos cuaternarios, especialmente en la llanura costera del golfo de Morrosquillo, donde se localizan acuíferos no consolidados de moderada permeabilidad, explotables mediante pozos y aljibes con profundidades menores a 100 metros (Barrera, 1999).

En la parte más central del golfo y hacia el oriente de este sector, Clavijo & Barrera (2001) clasifican las diferentes zonas de acuerdo con sus características hidrogeológicas así:

4.5.1 Llanura costera

Esta zona es una extensa planicie ligeramente ondulada al occidente de los Montes de María. Está compuesta por un relleno aluvial y litoral del Cuaternario, con acuíferos no consolidados de moderada permeabilidad. En los alrededores de Tolú y Puerto Viejo se han perforado pozos que abastecen poblaciones cercanas.

4.5.2 Zona montañosa

Corresponde a los Montes de María, con relieves abruptos y formaciones de areniscas, lodolitas y calizas. Las rocas pueden ser semipermeables y almacenar agua en zonas fracturadas. Las calizas de la Formación Toluviejo manifiestan algunas fuentes de agua potable en forma de manantiales.

4.5.3 Zona de colinas

Estribaciones orientales de los Montes de María, con relieve menos abrupto. Aquí se encuentra el acuífero de Morroa, que abastece poblaciones importantes como Sincelejo, Corozal y Sahagún. Las aguas son de buena calidad, predominando el tipo carbonatada cálcica o sódica.

4.5.4 Sabanas

Zona caracterizada por pequeñas y numerosas lomas, con litología predominantemente arcillosa. La Formación Betulia presenta acuíferos lateralmente discontinuos asociados a capas arenosas lenticulares, pero con niveles estáticos bajos.

5. Antecedentes

En el Golfo de Morrosquillo se han realizado diversas investigaciones que involucran estudios en la composición y/o calidad del agua. Dentro de los más relevantes y que han sido de utilidad como referencia en el desarrollo de este trabajo se encuentran:

- Molina *et al.*, (1994) detalla los resultados del estudio meteorológico, oceanográfico y sedimentológico realizado en el golfo de Morrosquillo durante la época seca de febrero de 1993. Se examinaron la circulación de las aguas, la distribución de campos halinos y térmicos, el movimiento de sedimentos, y la turbidez. Se utilizó una combinación de muestras de campo, análisis de imágenes de satélite SPOT y comparación de líneas costeras en diferentes años para analizar cambios morfológicos. Se observaron dos principales direcciones de corrientes influenciadas por la difracción y refracción del oleaje frente a Punta San Bernardo, al norte del Golfo, y la flecha de Mestizos al sur. Se identificaron cambios significativos en la línea costera, destacando el desarrollo del delta del río Sinú desde 1938 y la erosión en la flecha de Mestizos y las playas entre Coveñas y Tolú.

- Díaz, A (1998) aborda un estudio hidrogeológico en el flanco nororiental de la serranía de San Jacinto y en la zona litoral del Golfo de Morrosquillo. Se enfoca en la evaluación de los recursos hídricos subterráneos y su relación con la geomorfología y la hidrología de la zona. Se analiza la geología de la región, incluyendo la composición litológica y la estructura geológica, para comprender la distribución y características de los acuíferos. Además, se examina la hidrología superficial y subterránea, considerando factores como la recarga de acuíferos, la infiltración, y la interacción entre aguas subterráneas y superficiales.

- Barreto *et al.*, (1999), en su trabajo “Diagnóstico Ambiental del Golfo de Morrosquillo (Punta Rada – Tolú)” realiza un estudio de la dinámica marina, costera y terrestre teniendo en cuenta las características fisicoquímicas de las aguas y las actividades potencialmente contaminantes.

- Castaño, M (2001) señala que la contaminación del agua en la región del Golfo de Morrosquillo proviene principalmente de descargas directas de aguas residuales sin tratamiento, causadas por la industrialización, la agricultura y el desarrollo urbano. En su estudio se llevaron a cabo análisis fisicoquímicos del agua superficial durante los meses de marzo a octubre del 2000. Se encontró que los afluentes, especialmente el Río Sinú, presenta las mayores concentraciones de nutrientes, con un aumento durante la época de invierno debido a las descargas de aguas residuales. A pesar de este incremento, los resultados muestran que las aguas del Golfo se encuentran dentro de los rangos normales para aguas marinas tropicales.

- Ojeda *et al.*, (2007) presenta los resultados de la adquisición de 50 perfiles batimétricos con transectos de alta resolución en el Golfo de Morrosquillo. Estos datos permitieron mapear la morfología y arquitectura estratigráfica del subfondo de la plataforma continental interna. Se observó que la morfología de la plataforma es predominantemente erosional y cóncava hacia arriba, con algunas anomalías positivas de relieve que podrían corresponder a volcanes de lodo o escarpes asociados a fallas.

- Quintana & Cañón (2010), como parte del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, evaluaron la calidad sanitaria del agua en el Golfo de Morrosquillo y el agua de lastre de buques internacionales durante 2009. Se monitorearon los niveles de coliformes totales en diferentes meses y profundidades en 10 estaciones del Golfo, así como en el agua de lastre de 15 tanques de buques. Se encontró que el agua de lastre de algunos buques contribuye a la contaminación fecal en el Golfo, con el 20% de los tanques superando los límites permitidos. Se señaló que además de los buques, hay otras fuentes de contaminación en el Golfo, como las descargas de agua

residual doméstica desde la Sociedad Portuaria y Tolú, así como los aportes de arroyos continentales como Alegría y Cascajo.

- Quintana & Santa (2013) se centran en investigar la calidad del agua en las zonas marino-costeras del Caribe colombiano durante la temporada seca. El estudio se basa en el análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para evaluar el estado de las aguas en esta región en un momento específico del año. Los autores examinan cómo factores como la temperatura, salinidad, pH, concentración de oxígeno disuelto y la presencia de microorganismos afectan la calidad del agua en estas áreas.

- Carrillo *et al.*, (2013) se centran en el análisis de las reacciones químicas que ocurren en la interfaz entre el agua dulce y el agua salina en el acuífero costero del Golfo de Morrosquillo. La investigación intenta explicar cómo estos procesos afectan la calidad del agua y el equilibrio hidroquímico en el acuífero, particularmente en áreas donde el agua dulce se encuentra con el agua salina intrusiva. El estudio utiliza técnicas analíticas para identificar las reacciones predominantes y sus implicaciones para la gestión del recurso hídrico, destacando la necesidad de estrategias para mitigar los impactos de la intrusión salina y proteger la calidad del agua en la zona litoral.

- Martínez *et al.*, (2014) en el artículo ‘Evaluación y modelación hidrogeoquímica del Acuífero Costero de Morrosquillo (Sucre, Colombia)’, presentan un análisis detallado de la química del agua y la dinámica hidrogeológica del acuífero costero de esta región. Los autores utilizan un enfoque integrado que combina datos hidroquímicos y modelado numérico para evaluar la calidad del agua, identificar fuentes de contaminación y comprender los procesos que afectan el equilibrio químico del acuífero. El estudio destaca la influencia de factores como la intrusión salina y la actividad humana sobre la

composición del agua subterránea, y proporciona recomendaciones para la gestión sostenible de este recurso vital en la región costera.

- Montesino *et al.*, (2014) en sus estudios concluyen que las aguas del Golfo de Morrosquillo están contaminadas por vertimientos de materia residual, hidrocarburos y sólidos suspendidos, mientras que las aguas subterráneas sufren salinización, dureza y contaminación bacteriana. Además, observaron que, aunque las concentraciones de hidrocarburos en el mar son inferiores a los límites de contaminación, se observan aumentos puntuales en ciertas áreas debido a actividades industriales y marítimas.

- Ospina & Quintana (2015), en su estudio *Variación espacio-temporal de la calidad del agua del Golfo de Morrosquillo durante el año 2013*, al considerar tanto variables fisicoquímicas como microbiológicas y utilizar un índice de calidad del agua, determinaron que las condiciones del agua se clasifican como medias a buenas, dependiendo de la temporada y la proximidad a las ciudades costeras como Tolu y Coveñas. Esto sugiere cambios en la calidad del agua debido a problemas de saneamiento público o alteraciones en los aportes continentales del río Sinú, lo que influye en la dinámica de los nutrientes y las características del agua.

- Hernández, L (2021) aborda el estudio de la contaminación agropecuaria. El enfoque principal del estudio es utilizar herramientas de simulación espacial para evaluar y comprender la distribución y la intensidad de la contaminación agropecuaria en la microcuenca Arroyo Grande, en el municipio de Corozal, Sucre, y su interacción con el acuífero de Morrosquillo. Esto implica la identificación de diversas fuentes de contaminación relacionadas con actividades agrícolas y ganaderas, como el uso de fertilizantes, pesticidas, y la gestión de desechos animales. Mediante el uso de modelos y

técnicas de análisis espacial, el estudio analiza cómo los diferentes factores geográficos y de uso de la tierra influyen en la dispersión y la concentración de contaminantes.

- Vargas et al., (2022) en el *Estudio Nacional de Aguas (ENA)*, muestra a que zona hidrográfica corresponde la región del Golfo de Morrosquillo y menciona parámetros como índice de alteración potencial de la calidad del agua y condiciones hidrológicas extremas de año seco, donde se presenta un índice muy alto para ambos parámetros.

- IDEAM (2022), en su documento sobre *Aguas Subterráneas* proporciona datos básicos y características hidrogeológicas de los sistemas acuíferos del Río Sinú y del Golfo de Morrosquillo.

- Gómez, A (2024) evalúa la seguridad hídrica del acuífero de Morrosquillo frente al cambio climático para 2040. Utilizando un análisis prospectivo, concluye que la ineficiencia institucional y una gestión insuficiente del recurso hídrico amenazan el abastecimiento de agua en la región. El cambio climático, junto con la sobreexplotación y la intrusión marina, complicará aún más la disponibilidad de agua en el futuro.

6. Metodología

Esta investigación se desarrolló en cuatro fases generales descritas a continuación.

6.1 Fase 1. Revisión bibliográfica

En esta fase se llevó a cabo la búsqueda y revisión de libros, artículos, trabajos de investigación realizados en el área de estudio, entre otros documentos de interés, abarcando diferentes temáticas como: geología regional, geomorfología, hidrogeología y geoquímica. Esta información proporcionó la línea base de conocimiento para la construcción del marco teórico; así como las herramientas intelectuales necesarias en la ejecución de las demás fases del proyecto.

6.2 Fase 2. Trabajo de campo

Durante esta etapa, se llevó a cabo un estudio preliminar del área con el propósito de identificar los sitios más adecuados para el muestreo, teniendo en cuenta el tipo de agua a analizar y el tiempo disponible para la recolección. Se priorizó que las muestras fueran representativas de las zonas seleccionadas, como aguas marinas, manglares y aguas subterráneas, buscando abarcar la mayor extensión posible del área de estudio.

El muestreo se realizó en botellas de vidrio ámbar de 500 ml con tapas de seguridad debidamente etiquetadas. Este material fue esterilizado con anterioridad. Posteriormente, las muestras fueron preservadas en una cava de refrigeración de 20 litros, esencial para mantener la integridad de las muestras y evitar alteraciones.

La recolección se llevó a cabo durante la temporada de lluvias, los días 24, 25 y 26 de octubre del año 2023. El 24 de octubre se muestreó la zona norte del área de estudio, específicamente en las Islas y la Punta de San Bernardo (Figura 15), recolectando tres muestras. El 25 de octubre se cubrió la región central, incluyendo las Playas El Francés, Playa Guacamayas y el área cercana al municipio de Tolu (Figura 16), con un total de seis muestras. Finalmente, el 26 de octubre se completó el muestreo en la zona sur (Figura 17), donde se obtuvieron cuatro muestras adicionales.

Paralelamente a la recolección, se registraron datos in situ, como la ubicación geográfica de cada muestra, además de mediciones de pH, conductividad y temperatura, utilizando el dispositivo portátil Multi 340i, a través de electrodos especializados que posee el equipo. Para su funcionamiento, se calibraron los electrodos con soluciones estándar antes de sumergirlos en la muestra. Además fueron higienizados durante cada medición para asegurar la calidad de los

resultados. Los datos se consignaron en el formato mostrado en la Figura 11 y se presentan en la Tabla 1.

Adicionalmente, se realizaron observaciones de campo en cada localidad visitada, acompañadas de un registro fotográfico (Apéndices A-K) para complementar el estudio con información visual y contextual relevante.

Figura 11.

Formato utilizado para la toma de datos durante el trabajo de campo

Muestra	Localización	Longitud	Latitud	Temperatura	pH	Conductividad

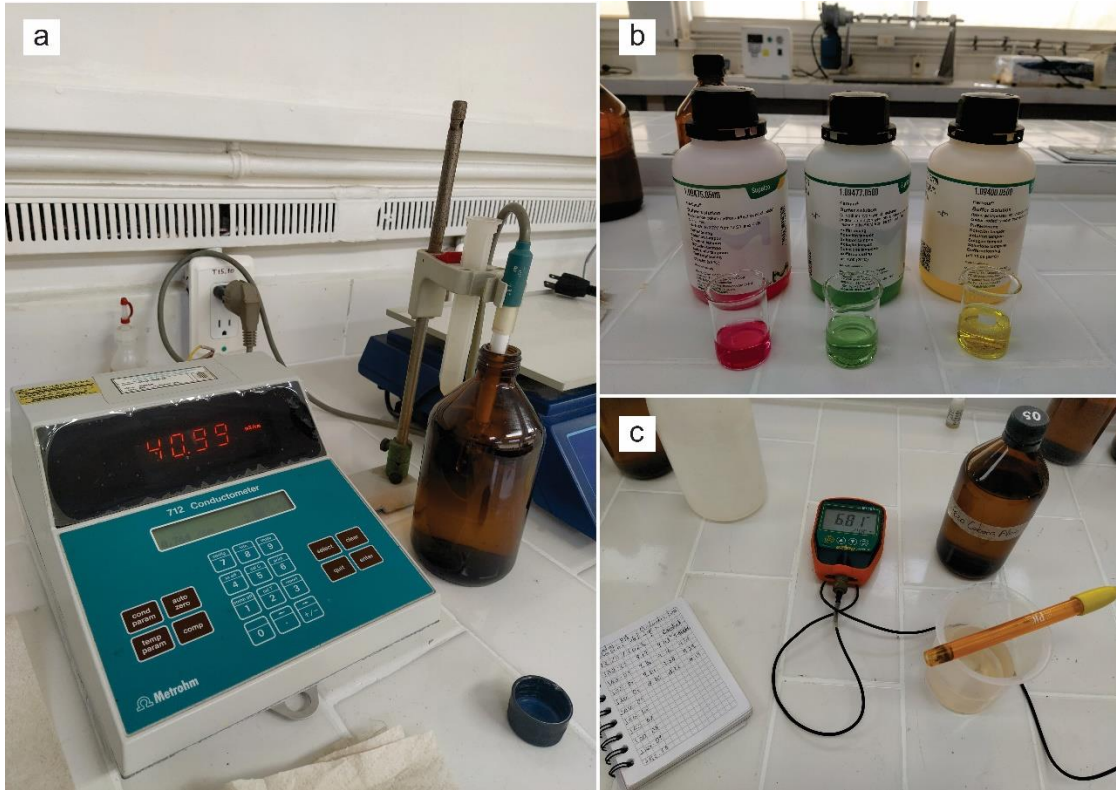
6.3 Fase 3. Análisis de muestras

Para la tercera fase del proyecto, se desarrollaron tres actividades de laboratorio diferenciadas para el análisis fisicoquímico de las muestras recolectadas.

En primer lugar, se llevaron a cabo nuevas mediciones de pH y conductividad eléctrica en todas las muestras, cuyos resultados fueron promediados con los obtenidos previamente en campo. Estos datos se presentan de manera consolidada en la Tabla 1. Las mediciones fueron realizadas por la autora del proyecto, utilizando un medidor de pH, ORP y temperatura para monitoreo continuo EZDO MP-103 (Figura 12c) y un conductímetro 712 Metrohm (Figura 12a), además de algunas soluciones estándar para la calibración de estos equipos (Figura 12b). Estas actividades se ejecutaron en el Laboratorio de Geoquímica del Petróleo, ubicado en el Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 12.

Medición de pH y conductividad de las muestras en el laboratorio



Nota. Fotografías tomadas por la autora del proyecto en las instalaciones del *Parque Tecnológico de Guatiguará*, 2023.

En segundo lugar, se procedió al análisis de iones mayoritarios. Para esto, se seleccionaron seis muestras representativas (Figura 13), teniendo en cuenta su origen (aguas marinas, de manglar y subterráneas) y localización. Este análisis fue llevado a cabo por el Laboratorio de Servicios Químicos, Minero-Metalúrgicos y Ambientales de la Universidad Industrial de Santander, sede Guatiguará. Los parámetros iónicos evaluados incluyeron sodio, hierro, potasio, magnesio, calcio, estroncio, aluminio, silicio, níquel, vanadio, manganeso, cloruros, nitritos, nitratos, fósforo, sulfatos, sulfuros, carbonatos y bicarbonatos. Para la determinación de los iones Na^+ , Fe^{3+} , K^+ ,

Mg^{2+} , Ni^{2+} y Mn^{2+} se utilizó la técnica de espectrofotometría de absorción atómica (SM 3111 B), mientras que los iones Ca^{2+} , Sr^{2+} , Al^{3+} , SiO_4^{4-} y V^{2+} fueron analizados mediante espectrofotometría de absorción atómica (SM 3111 D). Los iones Cl^- , S^{2-} , CO_3^{2-} y HCO_3^- se determinaron mediante volumetría (SM), y los parámetros NO_2^- , NO_3^- y fósforo total se cuantificaron por espectrofotometría molecular UV-Visible (SM). Adicionalmente, el ion SO_4^{2-} fue analizado mediante turbidimetría (SM). Los resultados obtenidos se encuentran consignados en la Tabla 2.

Figura 13.

Selección de las muestras para análisis de iones e isotopos estables



Nota. Las muestras seleccionadas fueron JAO-01, JAO-04, JAO-5, JAO-7, JAO-09 Y JAO-10 y se ubican a la derecha de la imagen. Fotografía tomada por la autora del proyecto, 2023.

Posteriormente, se realizó un análisis de isótopos estables en cinco de las muestras previamente seleccionadas. Este análisis fue efectuado en Miami, Estados Unidos, por el laboratorio certificado internacionalmente Beta Analytic, empleando técnicas como la

espectrometría de masas de relación isotópica (IRMS) y la espectroscopía de anillo de cavidad (CRDS), utilizando el equipo Gasbench II & Thermo Fisher Delta V Advantage IRMS/Picarro L2140-I. Los resultados para $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ se presentan en la Tabla 5.

6.4. Fase 4. Procesamiento e interpretación de resultados

En la etapa final del proyecto, se llevó a cabo el procesamiento e interpretación de los datos recolectados durante la fase 3. Este proceso abarcó diversas actividades como realización de cálculos, tablas, gráficas y perfiles topográficos.

Inicialmente, se procedió con la clasificación de las muestras de agua mediante el uso de diagramas de Piper (1944) y Stiff (1951), elaborados con el software Diagrammes, y complementados por gráficos de dispersión. Esta clasificación permitió a su vez determinar la evolución geoquímica de las aguas dentro del sistema hidrogeológico.

Además, se realizó el cálculo de índices de saturación en carbonato de calcio utilizando la información obtenida previamente. Estos valores se determinaron mediante la calculadora en línea de Lenntech Water Treatment Solutions que toma como referencia el Índice de Saturación de Langelier (1936) y su respectiva mejora realizada por Carrier (1965). El índice de saturación de Langelier representa la estimación de la habilidad de una solución para disolver o precipitar depósitos de carbonato de calcio. Estos cálculos parten de la siguiente ecuación:

$$ISL = pH - pHs \quad (4)$$

Donde, ISL representa el Índice de Saturación de Langelier, pH es el valor medido del agua y pHs es el pH de saturación.

Los parámetros utilizados para este cálculo fueron pH, temperatura, conductividad y las concentraciones de Ca^{2+} y HCO_3^- . Las indicaciones para los valores de ISL calculados se presentan en la figura 14.

Figura 14.

Indicaciones para los valores de ISL según Langelier (1936)

ISL (Langelier)	Indicación
ISL<0	Agua no saturada con respecto a carbonato de calcio (CaCO_3). El agua no saturada posee la tendencia a disolver más carbonato cálcico.
ISL=0	Agua considerada neutral. No existe formación de incrustaciones ni eliminación de las mismas.
ISL>0	Agua supersaturada con respecto a carbonato cálcico (CaCO_3). Posible precipitación de calcita y formación de incrustaciones.

Nota. Tomado de Lenntech Water Treatment Solutions, 2024.

<https://www.lenntech.es/calculadoras/langelier/langelier.htm>

Estos resultados fueron de utilidad para comparar las aguas subterráneas con las aguas superficiales dulces y oceánicas, en términos de dureza y predominancia de especies iónicas, lo que permite obtener una idea de la interacción de las aguas con la roca del subsuelo.

Adicionalmente, se construyó la línea meteórica local utilizando datos de precipitación de los últimos 10 años en la región de Tolú Viejo, proporcionados por la Agencia Internacional de Energía Atómica – IAEA (por sus siglas en inglés *International Atomic Energy Agency*) desde su programa WISER (*Water Isotope System for Data Analysis, Visualization and Electronic Retrieval*) mediante la plataforma NUCLEUS. A partir de esta línea, la línea meteórica global (Craig, 1961) y los resultados del análisis isotópico, se identificó la procedencia de las aguas que sirven de recarga en el sistema acuífero subterráneo.

Como resultado de estas actividades, se logró desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual simplificado, mediante la elaboración de tres perfiles geológicos en las áreas de mayor relevancia, que explica la interacción entre las aguas superficiales (marinas y de manglar) y las aguas pertenecientes a los acuíferos ubicados a lo largo del litoral del Golfo de Morrosquillo.

7. Resultados y Discusión

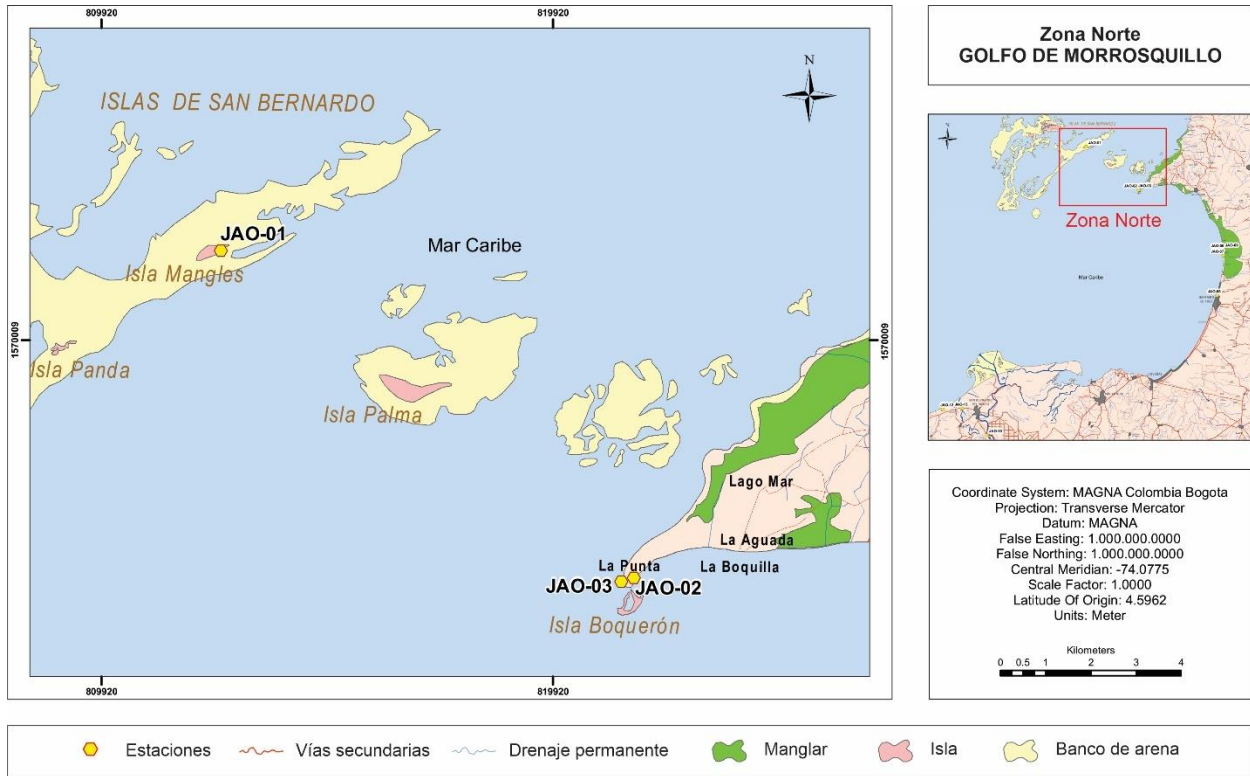
7.1. Datos de campo y análisis de las propiedades fisicoquímicas de las muestras recolectadas

Como primer producto en el desarrollo del trabajo, se elaboró un mapa de ubicación para las diferentes estaciones o puntos de muestreo. Dada la extensión de la zona de estudio, el número de localidades muestreadas y su respectiva ubicación geográfica, este mapa se dividió en tres zonas para facilitar su apreciación.

La **Zona Norte** o zona “a” (Figura 15) cubre el área septentrional de la región de estudio, desde las Islas del Archipiélago de San Bernardo hasta el corregimiento de Berrugas, en el departamento de Sucre. En esta zona se tomaron tres muestras: la muestra JAO-01, perteneciente a las aguas marinas que rodean Isla Mangles; la muestra JAO-02, recolectada en la zona sureste de La Punta de San Bernardo, correspondiente a un agua de manglar; y la muestra JAO-03, tomada del agua de mar en el lado noroeste de La Punta de San Bernardo, en un área sin vegetación y con mayor oleaje.

Figura 15.

Mapa de localización del área de estudio, zona norte del Golfo de Morrosquillo



Nota. Modificado de los nativos de las planchas 36-37, 43-43bis y 44, Servicio Geológico Colombiano SGC, 2024.

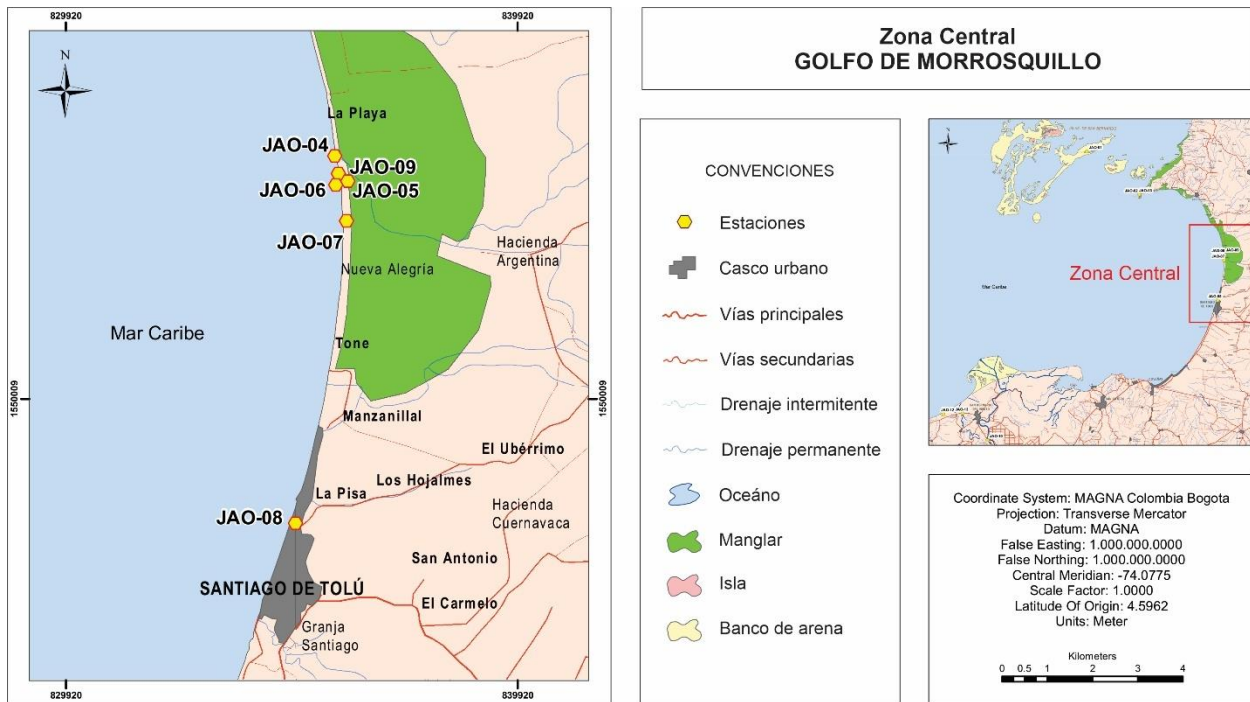
La **Zona Central** o zona “b” (Figura 16) abarca la región media del Golfo de Morrosquillo, incluyendo el área marina, playas y manglares, desde Arroyo Viejo hasta Puerto Compás, al sur del municipio de Tolú. En esta área se recolectaron seis muestras de agua. La muestra JAO-04 fue tomada en la desembocadura del Caño Guacamayas, cuyas aguas atraviesan el manglar y presentan una alta concentración de taninos, lo que les otorga un color rojizo y un olor distintivo. Aproximadamente 320 m más adelante, siguiendo la línea costera hacia el sur, se recolectó la muestra JAO-09 en el pozo de la finca Los Icacos. La muestra JAO-05 se extrajo del pozo de la Cabaña Alicia, frente a las Playas Guacamayas, siendo uno de los pozos menos profundos del área,

con aproximadamente 20 m. En esta misma ubicación se tomó la muestra JAO-06 de las aguas del mar, la cual presentó la mayor turbidez entre las aguas superficiales marinas, probablemente debido a la contaminación antropogénica y al fuerte oleaje generado por la erosión costera.

Adicionalmente, se registraron las muestras JAO-07, extraída del pozo del hotel Costa Linda frente a las playas El Francés y la muestra JAO-08 perteneciente al pozo del conjunto residencial El Ancla del Galeón, con una profundidad aproximada de 34 m según el personal encargado.

Figura 16.

Mapa de localización del área de estudio, zona central del Golfo de Morrosquillo



Nota. Modificado de los nativos de las planchas 36-37, 43-43bis y 44, Servicio Geológico Colombiano SGC, 2024.

Finalmente, la **Zona Meridional** o zona “c” (Figura 17), situada al suroeste del área de estudio, abarca desde la Ciénaga Osnonal hasta Pueblo Coco, incluyendo el delta del Río Sinú y

gran parte del municipio de San Bernardo del Viento. En esta zona se recolectaron las últimas cuatro muestras.

Figura 17.

Mapa de localización del área de estudio, zona sur del Golfo de Morrosquillo



Nota. Modificado de los nativos de las planchas 36-37, 43-43bis y 44, Servicio Geológico Colombiano SGC, 2024.

La muestra JAO-10 proviene de las aguas del Río Sinú en el corregimiento de Trementino de San Bernardo del Viento, mientras que las muestras JAO-11 y JAO-12 fueron tomadas en las playas del municipio: la primera en el agua superficial marina y la segunda en aguas estancadas, posiblemente producto de la mezcla entre agua de mar y aguas pluviales. Finalmente, la muestra JAO-13 se recolectó en el Caño La Balsa, donde se observó una notable contaminación antropogénica, lo que probablemente alteró la composición química del agua.

La Tabla 1 recopila los datos obtenidos durante el muestreo en la fase 2 del proyecto, incluyendo el código asignado a cada muestra, una breve descripción de su ubicación geográfica, las coordenadas de latitud y longitud utilizadas para la construcción de los mapas, y las propiedades de temperatura, pH y conductividad. Estos últimos valores se promediaron con las mediciones realizadas en laboratorio para obtener mayor precisión en su interpretación.

Como se observa en la Tabla 1, los valores correspondientes a pH y conductividad se encuentran dentro de los rangos esperados para cada muestra de acuerdo a su clasificación inicial como aguas superficiales marinas, aguas de manglar, aguas subterráneas y agua dulce. Los valores de pH oscilan entre 6,75 y 8,28, siendo más elevados en las aguas marinas y más bajos en las aguas dulces.

Los valores de conductividad, la cual se relaciona directamente con la salinidad del agua y los sólidos totales disueltos en ella, se comportan de manera semejante a las medidas de pH donde las mediciones más altas pertenecen a las aguas superficiales marinas y los valores más bajos a las aguas superficiales dulces. Estos valores varían entre los 41300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los 126,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

De acuerdo con la Resolución 2115 de 2007 por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano del Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el valor máximo aceptable para la conductividad puede ser hasta 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Observando los valores de conductividad obtenidos para las aguas subterráneas que abastecen la región, los cuales varían entre los 1635 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los 3406 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se puede inferir que ninguno de estos pozos sería apto para el consumo debido a una alta salinidad en las aguas.

Tabla 1.*Muestras de agua recolectadas en la fase de campo*

Muestra	Localización	Longitud	Latitud	Temperatura (°C)	pH	Conductividad (μ S/cm)
JAO-01	Isla Mangles	18413791	1079457	24,5	8,14	40990
JAO-02	La Punta, San Bernardo SE	18422869	1072099	27,8	7,95	41060
JAO-03	La Punta, San Bernardo NW	18422813	1072113	27,9	8,28	41030
JAO-04	Desembocadura Caño Guacamayas	18437216	1062303	24,5	7,68	2127
JAO-05	Pozo Cabaña Alicia	18437403	1061896	24,9	8,02	1635
JAO-06	Playa Guacamayas	18437263	1061872	27,9	8,1	39440
JAO-07	Pozo Costa Linda	18437351	1060906	25,1	7,8	1996
JAO-08	Pozo El Ancla del Galeón, Tolú	18436277	1054077	27,8	7,12	3403
JAO-09	Pozo Los Icos	18437268	1061984	25,1	7,92	1670
JAO-10	Río Sinú, localidad de Trementino	18396918	1030093	25,1	7,63	126,5
JAO-11	Playas de San Bernardo del Viento	18389311	1034734	27,8	8,12	41300
JAO-12	Playas de San Bernardo del Viento	18389362	1034525	27,9	6,88	5618
JAO-13	San Bernardo del Viento – Moñitos, Caño La Balsa	18392681	1034641	27,8	6,75	436,5

7.2 Análisis de iones mayoritarios y evolución geoquímica del sistema hidrogeológico

7.2.1 Composición química

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos en el análisis de la composición química de las muestras de agua. Estas concentraciones se encuentran expresadas en mg/L y se pueden observar a modo de gráfica en los apéndices L y M.

Dentro de las especies dominantes se encuentra el sodio [Na^+], el magnesio [Mg^{2+}], el calcio [Ca^{2+}], el cloro [Cl^-], y los sulfatos [SO_4^{2-}]. El sodio presenta su mayor concentración en la muestra JAO-01 correspondiente al agua de mar de Isla Mangles con 6747 mg/L, mientras que se encuentra en menor concentración en la muestra JAO-10 del Río Sinú con un valor de 74, 44 mg/L. El magnesio expresa el mismo comportamiento con valores entre los 1403 y los 14 mg/L. El calcio, como los dos anteriores, presenta su mayor concentración en la muestra JAO-01; sin embargo, su concentración más baja se encuentra en la muestra JAO-09 del pozo Los Icacos con 80, 6 mg/L. Los cloruros presentan la concentración más alta de todas las especies iónicas con 23406 mg/L en la muestra de Isla Mangles, no obstante, su concentración en las aguas del Río Sinú es de tan solo 9,362 mg/L. Los sulfatos siguen una tendencia similar con valores en Isla Mangles de 2409 mg/L y 77,2 mg/L en el Río Sinú.

En un rango intermedio se presentan el potasio [K^+], el bicarbonato [HCO_3^-], el estroncio [Sr^{2+}] el silicio [SiO_4^-] y el carbonato [CO_3^{2-}]. El potasio y el estroncio manifiestan un compartimiento semejante a las especies descritas anteriormente con sus mayores concentraciones en el agua de Isla Mangles y sus valores más bajos en aguas del Río Sinú. Por otro lado, el bicarbonato y el silicio se hallan en mayor concentración en las aguas subterráneas con valores hasta de 566 mg/L y 15, 5 mg/L respectivamente. El carbonato tiene un pico de concentración de 20 mg/L en la primera muestra, sin embargo, desciende a 4 mg/L en las restantes.

Tabla 2.*Resultado análisis químico para iones mayoritarios en las muestras de agua*

Muestra	JAO-01	JAO-04	JAO-05	JAO-07	JAO-09	JAO-10
Descripción	Agua de mar	Agua de manglar	Agua salobre	Agua salobre	Agua salobre	Agua dulce (de río)
Na⁺	6747,000	823,800	664,100	376,600	323,900	74,440
Fe³⁺	1,459	1,220	1,481	0,514	0,383	2,176
K⁺	391,600	35,720	16,770	9,390	8,569	3,298
Mg²⁺	1403,000	156,300	94,850	48,220	28,470	14,000
Ca²⁺	1234,000	538,000	385,000	527,500	80,600	100,200
Sr²⁺	60,100	26,800	37,170	15,930	2,882	6,047
Al³⁺	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	2,805
SiO₄⁻	1,900	9,300	14,900	15,500	14,400	9,650
Análisis iónico (mg/L)						
Ni²⁺	0,325	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
V²⁺	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Mn²⁺	0,350	0,310	0,490	0,450	0,190	<0,20
Cl⁻	23406,000	458,300	167,500	290,700	192,200	9,362
NO₂⁻	0,026	0,034	0,012	<0,01	<0,01	0,254
NO₃⁻	1,866	<1,0	1,238	<1,0	1,220	<1,0
P Total	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
SO₄²⁻	2409,000	36,680	76,230	122,900	90,760	77,200
S²⁻	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
CO₃²⁻	20,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
HCO₃⁻	110,000	96,000	566,000	506,000	546,000	35,000

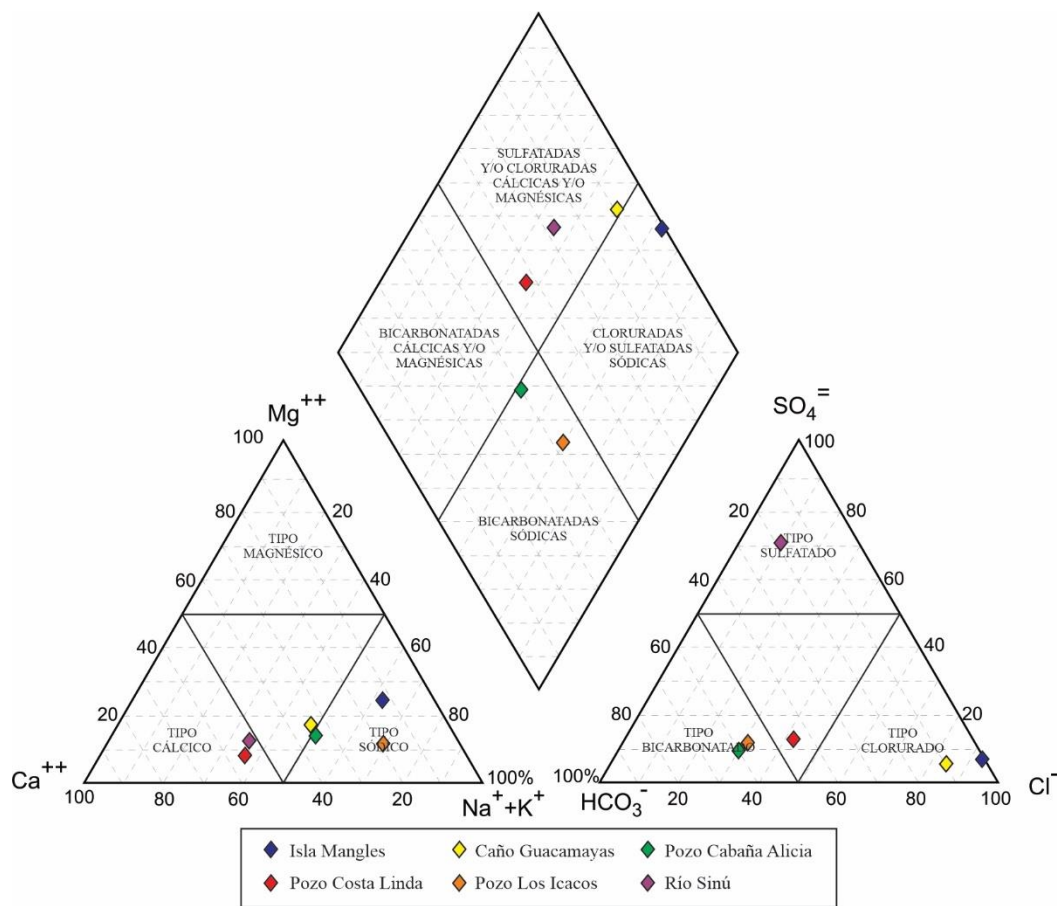
Especies como el hierro [Fe³⁺], el aluminio [Al³⁺], el níquel [Ni²⁺], el vanadio [V²⁺], el manganeso [Mn²⁺], los nitritos [NO₂⁻] y nitratos [NO₃⁻], el fósforo total y los sulfuros [S²⁻] se hallan en concentraciones inferiores a los 2 mg/L por lo que se consideran prácticamente irrelevantes en el estudio.

7.2.2 Clasificación del agua y evolución geoquímica del sistema

La clasificación de las aguas analizadas, se basa en los diagramas de Piper (1944) y Stiff (1951) elaborados con los datos de la tabla 2 mediante el software Diagrammes.

Figura 18.

Diagrama de Piper (1944) para las muestras analizadas



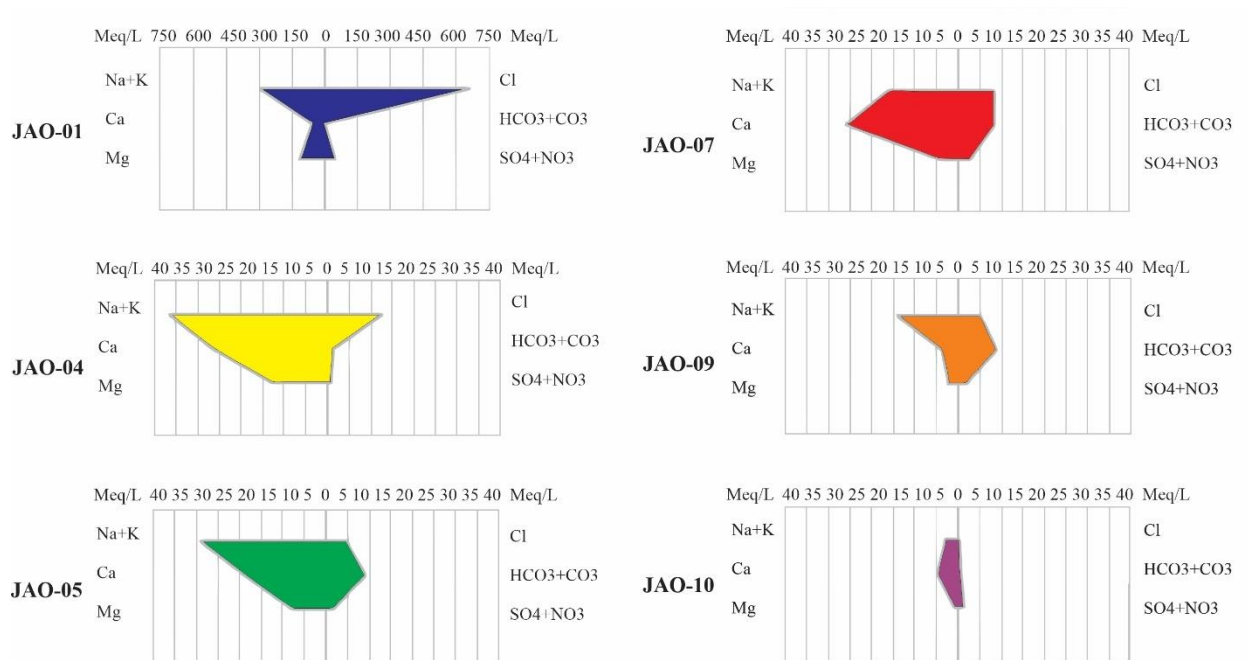
Nota. Diagrama de Piper obtenido mediante el software Diagrammes y modificado por la autora, 2024.

Los resultados para el diagrama de Piper se muestran en la Figura 18, donde las aguas de las muestras JAO-04, JAO-07 y JAO-10 pertenecientes a Caño Guacamayas, Pozo Costa Linda y

Río Sinú, respectivamente, corresponden a aguas sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas. Las muestras JAO-05 y JAO-09 de los pozos Cabaña Alicia y la finca Los Icacos se clasifican como aguas bicarbonatadas sódicas. Mientras que las aguas marinas que rodean Isla Mangles de la muestra JAO-01 se clasifican como aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas.

Figura 19.

Diagrama de Stiff (1951) para las muestras de agua analizadas



Nota. Diagrama de Stiff obtenido mediante el software Diagrammes y modificado por la autora, 2024.

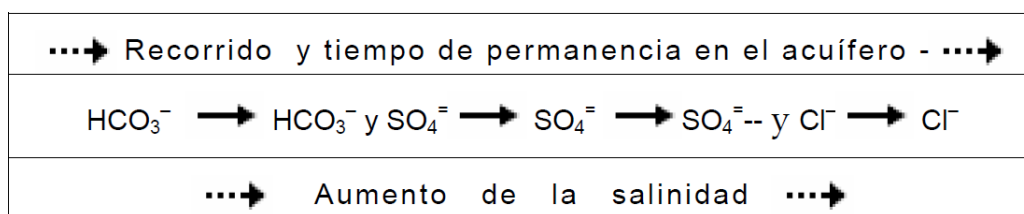
El diagrama de Stiff (Figura 19) valida estos resultados, presentando de forma simplificada la composición del agua en cuanto a las diferentes especies iónicas y su tendencia hacia los respectivos aniones y cationes dominantes. De acuerdo con este diagrama se tiene un agua clorurada sódica en las muestras JAO-01 y JAO-04, con concentraciones de cloro y sodio/potasio muy superiores en el agua de Isla Mangles con respecto al agua de Caño Guacamayas. Las

muestras JAO-05 y JAO-09 corresponden a aguas bicarbonatadas sódicas, con una mayor concentración de sodio en las aguas del pozo Cabaña Alicia. La muestra JAO-07 del pozo Costa Linda pertenecen a un agua clorurada cálcica, con un contenido relevante en bicarbonatos. Por último, la muestra JAO-10 del Río Sinú presenta un carácter sulfatado cálcico, además de poseer las concentraciones de sólidos totales disueltos más bajas de todas las muestras analizadas en este apartado.

En términos de evolución geoquímica de las aguas dentro del sistema hidrogeológico, se parte de la clasificación obtenida previamente y se toma como referencia la Secuencia de Chevotareb (1955) ilustrada en la Figura 20. Esta secuencia, basada en la solubilidad y la abundancia de las especies iónicas, propone un recorrido iniciando con las aguas subterráneas bicarbonatadas, las cuales tendrían menor tiempo de permanencia en el subsuelo. A continuación, se encontrarían las aguas sulfatas y por último las aguas cloruradas, más salinas y evolucionadas.

Figura 20.

Secuencia de Chevotareb (1955) para determinar la evolución química del agua



Nota. Tomado de *Hidrología Superficial y Subterránea*, por Sánchez San Román, J., 2017, Dpto de Geología. Universidad de Salamanca. España.

Por lo anterior, las aguas subterráneas pertenecientes a los pozos Cabaña Alicia y Los Icacos, clasificadas como aguas bicarbonatadas sódicas, corresponderían a aguas relativamente jóvenes, localizadas en un sistema acuífero superior o superficial, con un flujo activo local de

recorridos cortos y un tiempo de permanencia reducido. Por otra parte, las aguas del pozo Costa Linda, clasificadas como aguas cloruradas cálcicas, tendrían una mayor evolución y por lo tanto una mayor recorrido y permanencia por lo que pertenecerían a un sistema acuífero de régimen intermedio o inferior con un flujo más lento o regional.

7.2.3 Interacción agua-roca

Como complemento al estudio se efectuó el cálculo de los índices de saturación en carbonatos para las diferentes muestras de agua. Los resultados se recopilaron en la Tabla 3.

A partir de las indicaciones presentadas en la Figura 14, de acuerdo con Langelier (1936) las muestras JAO-01, JAO-04, JAO-05, JAO-7 Y JAO-09 corresponden a agua supersaturada en carbonato de calcio [CaCO_3] con tendencia a una posible precipitación de calcita y formación de incrustaciones. Mientras, la muestra JAO-10 tiene un carácter subsaturado con la capacidad de disolver más carbonato de calcio. Destacan los valores ISL obtenidos en las aguas de los pozos Cabaña Alicia y Costa Linda.

Tabla 3.

Índices de saturación en carbonato de calcio en las muestras de agua analizadas

Muestra	Descripción	pH	pHs	ISL CaCO₃
JAO-01	Isla Mangles, Agua de mar	8,14	7,80	0,34
JAO-04	Caño Guacamayas, Agua de manglar	7,68	7,30	0,33
JAO-05	Pozo Cabaña Alicia, Agua salobre	8,02	6,70	1,40
JAO-07	Pozo Costa Linda, Agua salobre	7,80	6,60	1,20
JAO-09	Pozo Los Icacos, Agua salobre	7,92	7,30	0,57
JAO-10	Río Sinú, Agua dulce	7,63	8,00	-0,42

Para comprender mejor los procesos químicos y la mineralización ocurridos en el recorrido de las aguas y su interacción con la roca se realizaron algunos gráficos de dispersión con

concentraciones en mEq/L de las especies dominantes: sodio, potasio, calcio, magnesio y cloruros.

Estas concentraciones se presentan en la Tabla 4 y se ilustran en la Figura 21.

Tabla 4.

Concentraciones en mEq/L de las especies iónicas predominantes

Muestra	Ca	Mg	Na	K	Ca+Mg	Na+K	Cl	Cl - (Na+K)/Cl
JAO-01	61,577	120,378	293,475	10,015	181,954	303,491	659,324	0,540
JAO-04	26,846	13,411	35,833	0,914	40,257	36,747	12,910	-1,846
JAO-05	19,212	8,138	28,886	0,429	27,350	29,315	4,718	-5,213
JAO-07	26,322	4,137	16,381	0,240	30,460	16,621	8,189	-1,030
JAO-09	4,022	2,443	14,089	0,219	6,465	14,308	5,414	-1,643
JAO-10	5,000	1,201	3,238	0,084	6,201	3,322	0,264	-11,598

En la Figura 21 se observa que no existe un predominio iónico único en las muestras de agua, lo cual se debe a la variación de condiciones dentro del sistema hidrogeológico. Por lo tanto, se tiene la muestra JAO-01 de agua de mar con concentraciones muy superiores en comparación a las demás muestras, donde predomina la asociación Na+K e individualmente destacan el sodio y el magnesio en su composición. Por el contrario, la muestra JAO-10 de agua dulce posee las concentraciones más bajas en el sistema, sin embargo, prima la asociación Ca+Mg e individualmente destaca el contenido en calcio y sodio.

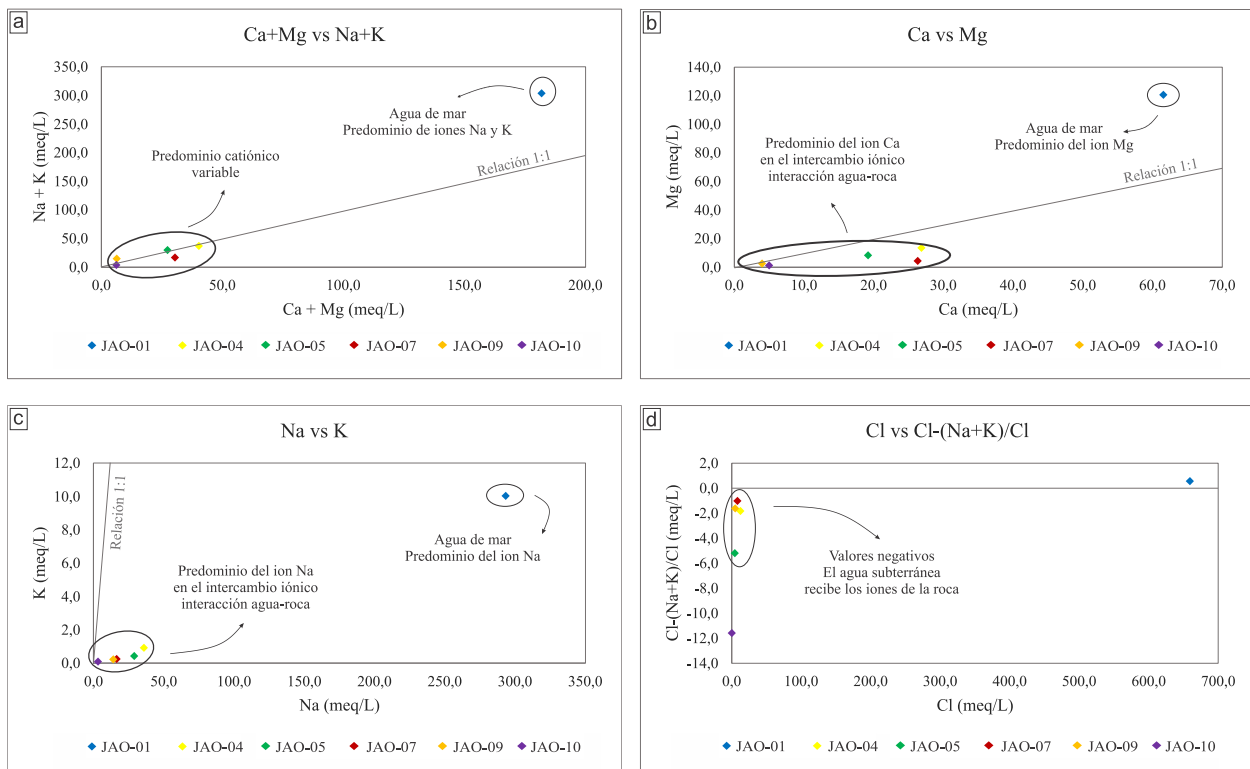
En la muestra JAO-04 de agua de manglar prevalece la asociación Ca+Mg, lo que a su vez puede indicar un predominio de las aguas continentales dulces sobre el aporte marino. Individualmente las concentraciones más altas en estas aguas de manglar pertenecen al calcio y al sodio.

Respecto a las aguas subterráneas se observa que en las muestras JAO-05 Y JAO-09, de los pozos Cabaña Alicia y Los Iacos respectivamente, predomina la asociación Na+K, mientras

en la muestra JAO-07 del pozo Costa linda se destaca la asociación Ca+Mg. Individualmente los componentes de mayor concentración en las tres muestras son el sodio y el calcio.

Figura 21.

Gráficos de dispersión para definir predominio iónico y tipo de intercambio iónico en las aguas subterráneas



Nota. a. Relación Ca+Mg vs Na+K, b. Relación Ca vs Mg, c. Relación Na vs K, d. Índice de intercambio de bases.

Por consiguiente, en los pozos Cabaña Alicia y Los Icacos el sodio es el ión con mayor influencia en el intercambio iónico durante la interacción agua y roca, a diferencia del pozo Costa Linda donde predomina el Calcio. Esto es compatible con la ubicación de los pozos ya que los dos primeros se encuentran relativamente en la misma locación, con una separación entre ellos de aproximadamente 150 m, mientras el pozo Costa Linda se halla a casi un kilómetro más al sur.

Según los resultados registrados en la gráfica para índices de intercambio de bases (Figura 21d) en las aguas subterráneas de los pozos Cabaña Alicia y Los Icacos los valores negativos señalan a la roca como la fuente de sodio y potasio en el agua. Del mismo modo que el agua del pozo Costa Linda recibe el calcio y el magnesio de la interacción con el sistema rocoso.

7.3. Análisis de isótopos estables y construcción de la Línea Meteórica Local

Tabla 5.

Resultados análisis de isótopos estables en las muestras de agua seleccionadas

Muestra	$\delta^{13}\text{C}$ +/- SD	SD	$\delta^{18}\text{O}$ +/- SD	SD	$\delta^2\text{H}$ +/- SD	SD
JAO-01	-1,53	0,11	0,32	0,03	3,72	0,14
JAO-04	-16	0,04	-3,64	0,02	-17,83	0,01
JAO-05	-21,73	0,01	-5,88	0,02	-40,33	0,05
JAO-07	-21,41	0,03	-5,74	0,02	-38,58	0,02
JAO-10	-13,97	0,13	-7,37	0,02	-48,22	0,18

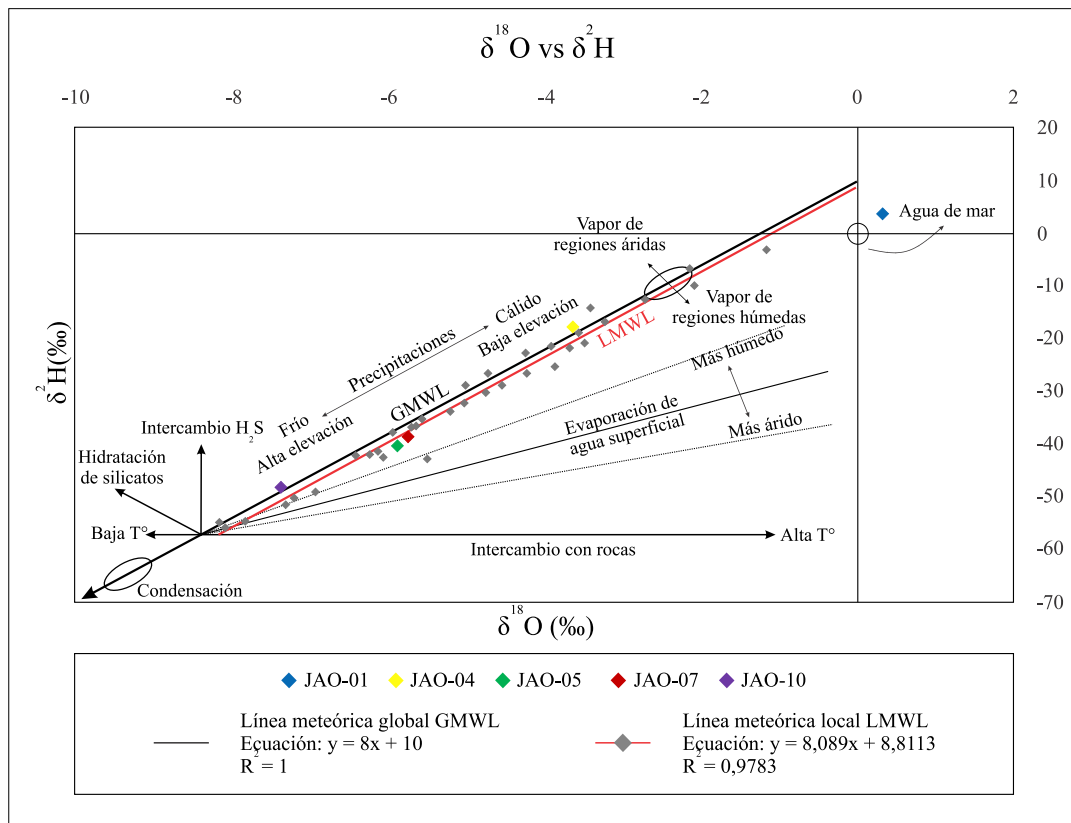
Los resultados del análisis de isótopos estables $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ se recopilan en la Tabla 5. Aunque el $\delta^{13}\text{C}$ tiene un comportamiento específico para cada tipo de agua como se menciona en el apartado 3.3.3 de la página 22, los isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ son los más relevantes para determinar la proveniencia de las aguas en este estudio y por lo tanto se realizará la interpretación a partir de los mismos.

En la Figura 22 se muestran la relación $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ estandarizada propuesta por Craig (1961) como la Línea Meteórica Global, la relación $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ para la región del Golfo de Morrosquillo denominada Línea Meteórica Local y construida a partir de los datos proporcionados por la IAEA y la relación $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ para las muestras analizadas en este estudio.

En la gráfica se evidencia que las muestras poseen una clara tendencia tanto a la Línea Meteorica Local como a la Línea Meteorica Global, coincidiendo con los valores estandarizados para los diferentes tipos de agua en estudios anteriores.

Figura 22.

Línea meteorica local para el Golfo de Morrosquillo



Nota. Relación $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ para definir la fuente de recarga de las aguas subterráneas en el sistema acuífero del Golfo de Morrosquillo, basada en la Ecuación 2 propuesta por Craig (1961).

Para la muestra JAO-01 se obtuvieron valores de $\delta^{18}\text{O}$ de 0,32‰ siendo normales en las aguas marinas superficiales valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -0,5‰ a 0,5‰. Las aguas de la muestra JAO-10 del Río Sinú presentan un contenido en $\delta^{18}\text{O}$ de -7,37‰ por lo que provienen de aguas precipitadas en zonas de mayor elevación y menor temperatura. Mientras que la muestra JAO-04 de agua de

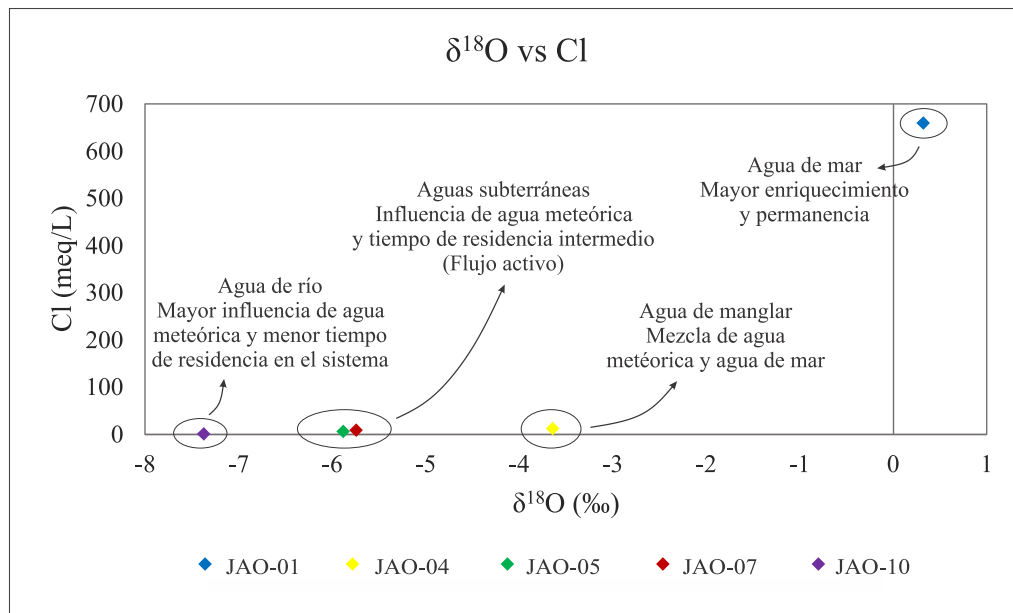
manglar tiene un contenido en $\delta^{18}\text{O}$ de $-3,64\text{‰}$ evidenciando una mezcla con influencia de aguas meteóricas precipitadas localmente y aguas más empobrecidas.

En cuanto a las aguas del sistema subterráneo de los pozos Cabaña Alicia y Costa Linda, presentan contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ muy similares, siendo respectivamente $-5,88\text{‰}$ y $-5,74\text{‰}$. De acuerdo con la gráfica la fuente de recarga de estos acuíferos sería meteórica con origen en las precipitaciones sobre la zona y aguas de escorrentía de regiones un poco más elevadas.

Para corroborar estos resultados se realizó una gráfica de dispersión con la relación entre en contenido de Cl y $\delta^{18}\text{O}$. En esta gráfica (Figura 23) se observa como las aguas subterráneas se encuentran isotópicamente empobrecidas y con concentraciones de Cl muy bajas, por lo que provienen de un flujo de agua relativamente reciente.

Figura 23.

Gráfica de dispersión para definir la proveniencia de las aguas subterráneas



Nota. Relación $\delta^{18}\text{O}$ vs Cl para definir la proveniencia de las aguas subterráneas de acuerdo al enriquecimiento o empobrecimiento en estos componentes.

7.4. Planteamiento de un modelo hidrogeológico conceptual para la región litoral del Golfo de Morrosquillo

El modelo hidrogeológico conceptual se obtuvo mediante el procesamiento de la información recabada en la realización de este estudio y algunos datos aportados por investigaciones anteriores, junto con la topografía suministrada por la Carta Batimétrica General de los Océanos – GEBCO (por sus siglas en inglés *General Bathymetric Chart of the Oceans*) de la Organización Internacional de Higrografía – IHO (por sus siglas en inglés *International Hydrographic Organization*) en colaboración con la UNESCO, indispensable para la realización de los perfiles geológicos que ilustran el modelo.

En la figura 24 se presenta la ubicación de los tres cortes elaborados para la construcción del modelo hidrogeológico. La ubicación de los cortes se planteó teniendo en cuenta las áreas de mayor interés en el estudio, es decir, aquellas localidades donde fueron tomadas las muestras.

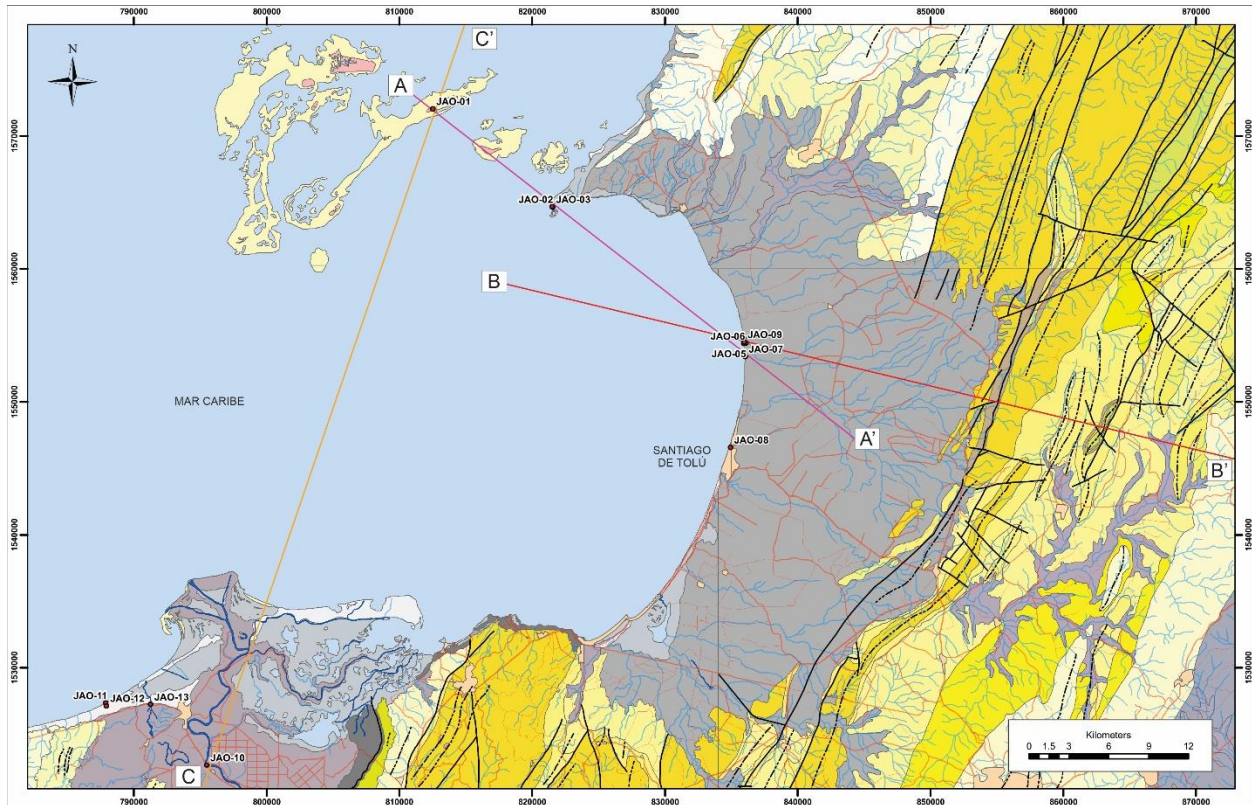
El sistema acuífero del Golfo de Morrosquillo correspondería a una unidad geológica ubicada en la parte central del golfo, constituida por depósitos cuaternarios de origen fluvial, aluvial marino y en menor medida lacustre, provenientes de ríos y drenajes, del mar y las ciénagas que hacen parte del área de estudio (Qli y Qlal, Figura 9), constituidos a su vez por arenas finas de cuarzo, gravas y cantos rodados con intercalaciones de limos y arcillas. Los sedimentos de mayor granulometría predominan en las cercanías a la línea de costa mientras los limos y las arcillas tienden a ubicarse en la zona más este del golfo. Estos sedimentos recubren parcialmente las formaciones terciarias de Maco (Pgm) y San Cayetano (Pgsc), que constituyen el basamento.

Hacia el oriente en dirección a las Montes de María, estos depósitos están bordeados por la formación de calizas Toluviejo (Pgt) y la formación Carmen (Pgc) como se observa en la Figura 26. Estructuralmente, en estudios de otros autores se ha hallado evidencia de actividad tectónica

que ha provocado diversos plegamientos y fallamientos en las rocas de la región. En la Figura 26 se destacan la Falla de Palenquillo y el Anticlinal y la Falla de Chalán.

Figura 24.

Perfiles geológicos elaborados para ilustrar el modelo hidrogeológico



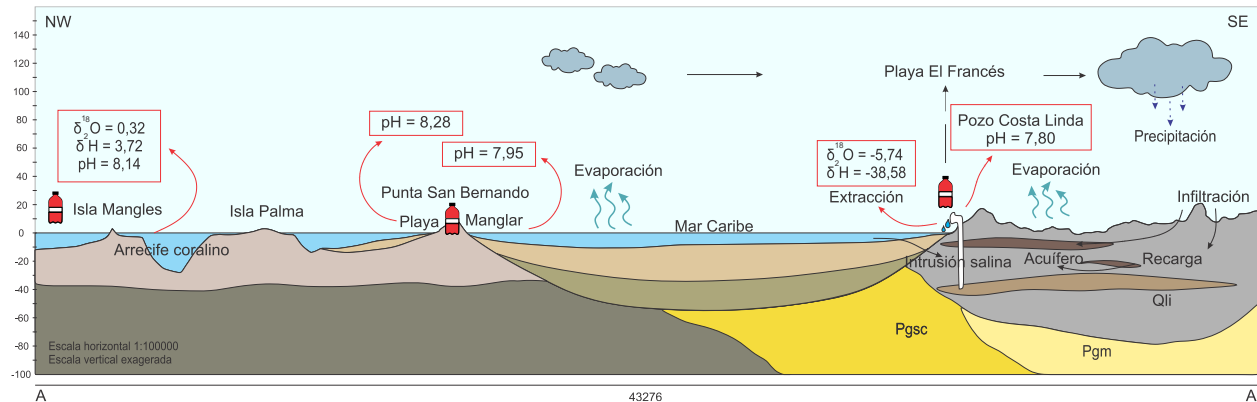
Nota. Modificado de los nativos de las *planchas 36-37, 43-43bis y 44*, del Servicio Geológico Colombiano SGC, 2024.

El tamaño del acuífero parece ser similar al de los depósitos sedimentarios recientes con un aproximado de 650-750 km², dado que se pueden encontrar pozos de extracción en casi toda el área. Según Martínez et al (2013) su espesor varía entre 20 y 100 metros, comportándose en general como un acuífero libre, con distribución de lentes arcillosas que le atribuyen características de un

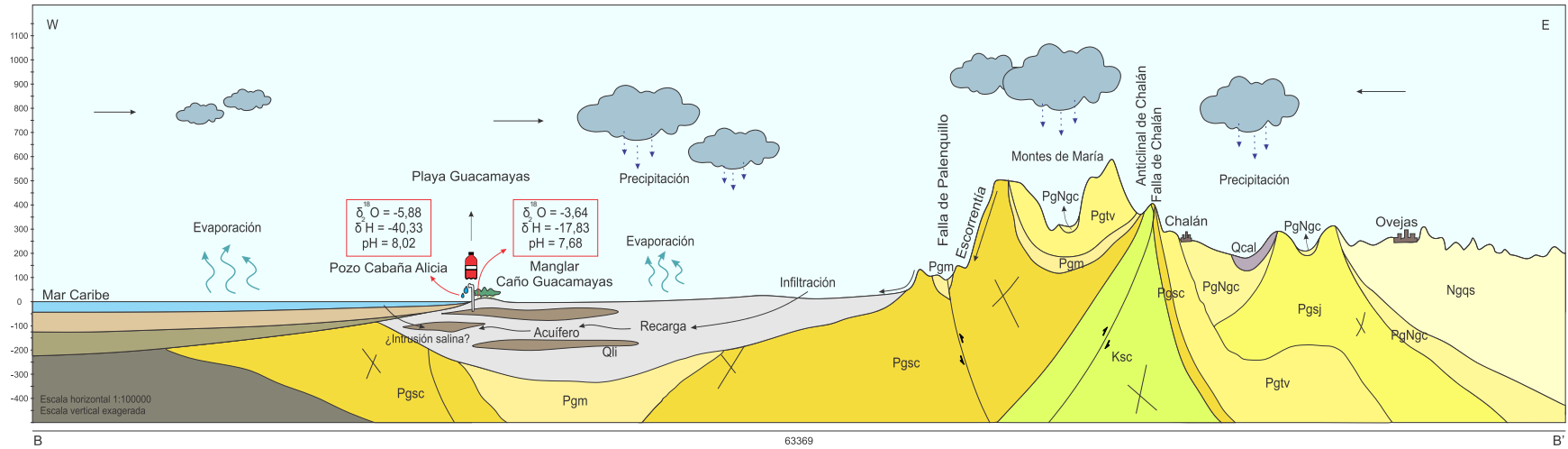
acuífero multicapa, especialmente en la zona cercana a la costa. Esto se evidencia en la variabilidad hallada respecto a la evolución química de las aguas del acuífero en diferentes puntos.

Figura 25.

Perfil A-A' Archipiélago de San Bernardo – Playas El Francés



Nota. En la figura 25 se muestran las fases del ciclo hidrológico más influyentes en el proceso de evolución geoquímica de las aguas subterráneas del acuífero del Golfo de Morrosquillo. Para el caso específico del *perfil A-A'* que se ha trazado desde el Archipiélago de San Bernardo, pasando por la Punta de San Bernardo, Las playas El Francés y finalizando en los depósitos cuaternarios de la llanura de inundación al este de Santiago de Tolú, el agua marina que rodea las islas inicia un proceso de evaporación. Este vapor se desplaza hacia la costa formando nubes que precipitan sobre los sedimentos que conforman el acuífero, llevando a cabo los procesos de infiltración y recarga. Las aguas pertenecientes a cada estadio de este ciclo poseen características fisicoquímicas únicas que permiten la identificación de cada proceso. A la derecha de la imagen se ilustra de forma simplificada la constitución del acuífero multicapa y la ubicación del pozo Costa Linda, cuyas aguas pertenecerían a un flujo moderado regional de mayor permanencia y por lo tanto más evolucionado, además se encontrarían más susceptibles a la intrusión del agua marina.

Figura 26.*Perfil B-B' Playa Guacamayas – Municipio de Ovejas*

Nota. En la figura 26 se muestran las fases del ciclo hidrológico más influyentes en el proceso de evolución química de las aguas subterráneas del acuífero del Golfo de Morrosquillo. Para el caso específico del *perfil B-B'* que se ha trazado desde la zona nerítica del centro del golfo, pasando por la playa Guacamayas, los Montes de María y finalizando al este del municipio de Ovejas, el agua superficial marina y el agua del suelo atraviesan un proceso de evaporación. Este vapor empobrecido en $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ se desplaza hacia la costa y zonas más elevadas y de menos temperatura, formando nubes que precipitan tanto sobre los sedimentos que conforman el acuífero, como en las colinas y montañas del este de la región, llevando a cabo los procesos de escorrentía e infiltración, donde las aguas ahora subterráneas y enriquecidas en sales y otros minerales recargan el acuífero. A la izquierda de la imagen se ilustra de forma

simplificada la constitución del acuífero multicapa en esta zona y la ubicación del pozo Cabaña Alicia, cuyas aguas pertenecerían a un flujo activo más local y superficial, de recorrido y permanencia reducida y por lo tanto menos evolucionado. A la derecha se observa las zonas montañosas más próximas al Golfo y las principales unidades geológicas aflorantes en el área.

De acuerdo con los datos de batimetría obtenidos de la GEBCO y los espesores mencionados anteriormente, hacia los extremos norte y central del golfo, los niveles de agua subterránea se encuentran por debajo del nivel del mar, como se muestra en las Figuras 25 y 26, lo que favorecería la intrusión del agua salada en el acuífero.

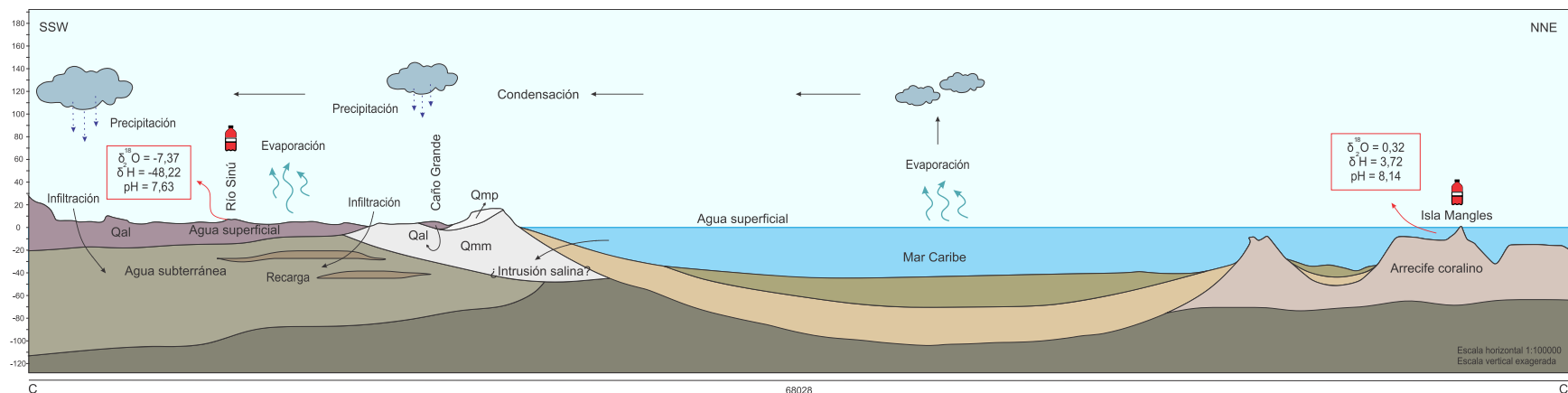
En términos hidrogeoquímicos, las especies iónicas que priman en la composición de las aguas subterráneas son el sodio, el cloruro, el calcio, el bicarbonato y en menor proporción el magnesio y los sulfatos. Sin embargo, la predominancia de estas especies iónicas podría variar estacionalmente, ya que los datos para este estudio fueron tomados en época de lluvias lo que daría lugar a un aumento en la disolución de minerales como la calcita, el yeso y la halita y así disminuirían las concentraciones determinadas en las muestras recolectadas.

Según la distribución espacial de los datos (Figura 16) y el contenido de cloruros (Tabla 1), en el norte del acuífero, donde se encuentran los pozos Los Icacos y Cabaña Alicia, se observa una menor mineralización del agua. A medida que se avanza hacia el sur y se acerca a la línea de costa, donde se ubican los pozos Costa Linda y El Ancla del Galeón, aumenta la concentración de sales.

De las bajas concentraciones de sales y el empobrecimiento en el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ presentadas, se deduce una mezcla con aguas dulces de los canales que fluyen de este a oeste y una fuente de recarga local directa producida por las precipitaciones sobre la zona.

Figura 27.

Perfil C-C' Río Sinú localidad de Trementino – Archipiélago de San Bernardo



Nota. En la figura 27 se muestran las fases del ciclo hidrológico más influyentes en el proceso de evolución química de las aguas superficiales en la zona más meridional del Golfo de Morrosquillo. El *perfil C-C'* se ha trazado desde la localidad de Trementino en el municipio de San Bernardo del Viento, pasando por el Río Sinú, el corregimiento de Caño Grande (al oeste de la Ciénaga Osnonal), atravesando el golfo, para finalizar en el Archipiélago de San Bernardo. El agua marina que rodea las islas, en especial Isla Mangles que se observa a la derecha de la imagen con sus respectivos datos de pH, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, inicia un proceso de evaporación. Este vapor que se ha empobrecido en $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ se desplaza hacia la costa y zonas topográficamente más elevadas formando nubes que posteriormente precipitan sobre los sedimentos que conforman el Delta del Río Sinú y localidades más elevadas como el Parque Natural Paramillo, donde nace el Río Sinú. Estas precipitaciones llevan a cabo procesos de escorrentía e infiltración, enriqueciendo las aguas tanto

subterráneas como superficiales en sales y otros minerales. Las aguas que conforman el Río Sinú al contener aguas precipitadas en mayores alturas con menor temperatura se encuentran aún más empobrecidas en isótopos estables. A la izquierda de la imagen se ilustra de forma simplificada parte de los sedimentos que conforman el Delta del Río Sinú y áreas vecinas. Si bien no se realizó un muestreo en estos puntos, otras investigaciones aportan evidencia de la presencia de acuíferos subterráneos en estos sedimentos, los cuales probablemente son recargados por la mezcla entre la precipitación local y los distintos drenajes que desembocan en la zona.

Según la clasificación realizada a partir de los diagramas de Piper y Stiff el acuífero contiene dos grupos de aguas subterráneas. La muestra JAO-05 presenta menor evolución química con una facies bicarbonatada sódica y una ligera tendencia al bicarbonato mixto, con conductividad eléctrica de 1,635 ms/cm. La muestra JAO-09 se caracteriza por ser bicarbonatada sódica, con un valor de conductividad eléctrica de 1,670 ms/cm. Aguas subterráneas con mayor grado de evolución química, facies clorurada cálcica y conductividad eléctrica de 1,996 ms/cm conforman la muestra JAO-07. Aunque la composición química de la muestra JAO-08 no fue analizada, sus niveles de conductividad eléctrica (3,403 ms/cm) pueden indicar una alta concentración de cloruros y por tanto una composición similar a la muestra JAO-07 un poco más evolucionada. Esta tendencia permite suponer que la contaminación por intrusión de agua de mar se da en las zonas más al sur y hacia la costa del golfo.

Los altos valores de sodio y calcio en relación con los cloruros mostrados en la Figura 21, además de las concentraciones de sulfatos y carbonatos en las muestras, son una evidencia de que el proceso de mineralización de las aguas viene dado principalmente por la disolución de minerales como calcita, que abunda en los sedimentos calcáreos aportados por el océano, el yeso

y la halita que son minerales característicos de ambientes costeros y feldespatos como la albita contenida en los sedimentos aportados por las formaciones sedimentarias adyacentes. Sin embargo, el intercambio iónico también podría presentarse en la interacción de las aguas de forma menos pronunciada. En general, como ya se ha mencionado, aunque hay una posible evidencia de la intrusión del agua marina en el acuífero no es un proceso predominante, y solo se estaría presentando en los pozos Costa Linda y El Ancla del Galeón (muestras JAO-07 y JAO-08 respectivamente).

8. Comparación de las características geoquímicas entre las aguas superficiales y subterráneas del Golfo de Morrosquillo con las aguas hidrotermales de Paipa

El municipio de Paipa se localiza en la parte axial de la Cordillera Oriental de Colombia a una altitud de 2525 msnm, en una región cuyo basamento lo componen rocas metamórficas y sedimentarias del Paleozoico, así como intrusivas y extrusivas del Jurásico que afloran en el Macizo de Floresta, hacia el NE de Paipa (Velandia, 2003). Las zonas aledañas a Paipa se caracterizan por la presencia de fuentes termales y vestigios de actividad volcánica (Rojas, 2016). Este apartado tiene como objetivo realizar una comparación de las características hidrogeoquímicas de las aguas superficiales y subterráneas del Golfo de Morrosquillo y las aguas hidrotermales de Paipa, con el fin de identificar las diferencias más notables en su composición química y origen, dado que ambas pertenecen a sistemas hidrogeológicos con marcadas divergencias.

Los datos que sustentan este análisis fueron registrados por Laura Contreras y Sindy Vera (2023) en su investigación titulada *Evolución geoquímica de las aguas termales de Paipa e Iza*,

Boyacá y evaluación de su potencial económico en sales de Litio y Sodio, y están consignados en los Apéndices N-Q.

8.1 Composición química y mineralización

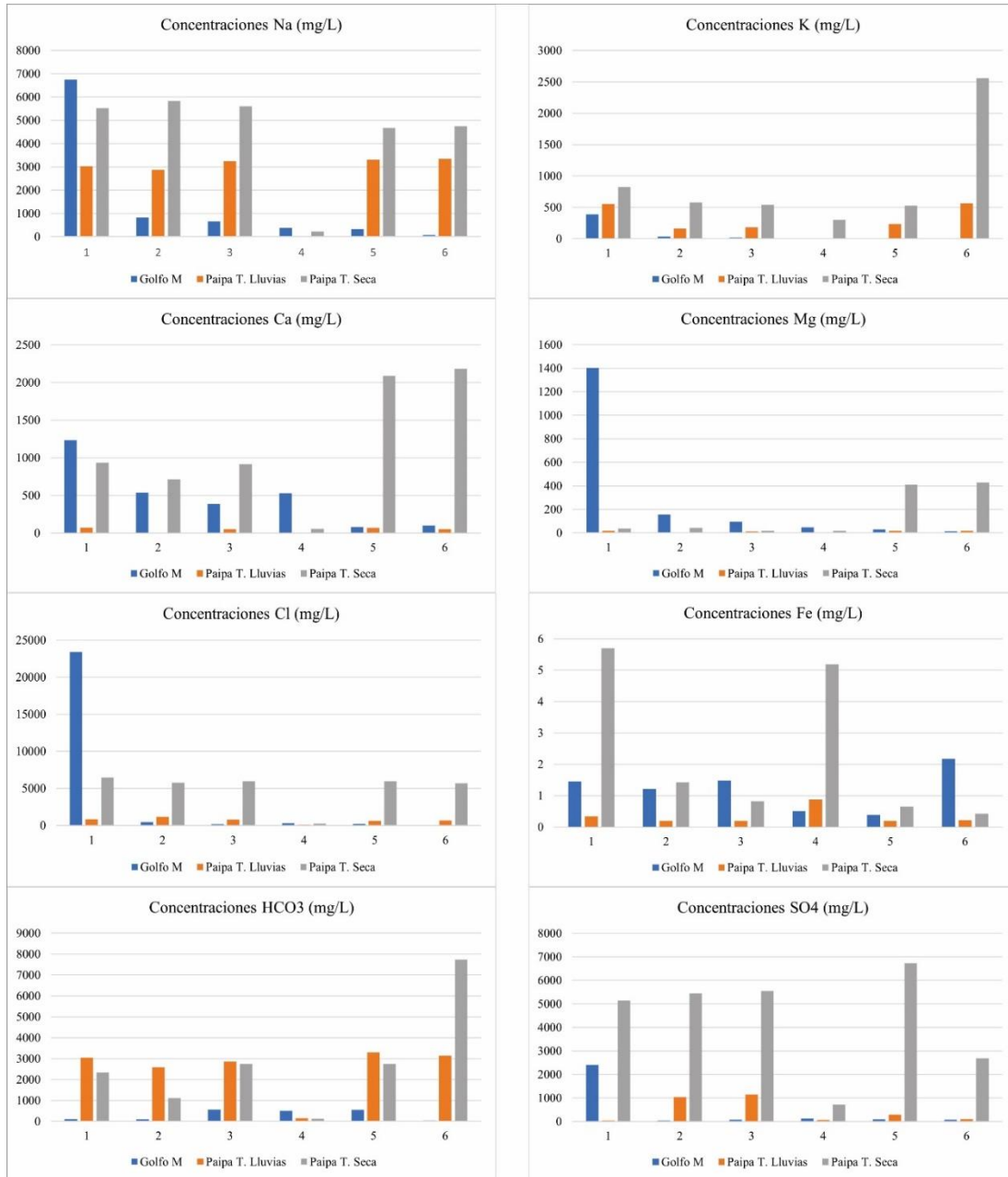
La Figura 28 presenta las concentraciones de iones mayoritarios en las aguas del Golfo de Morrosquillo y las aguas hidrotermales de Paipa analizadas tanto en temporada de lluvias como en época seca. Entre las especies dominantes se encuentran el sodio [Na^+], el potasio [K^+], el calcio [Ca^{2+}], los cloruros [Cl^-], los bicarbonatos [HCO_3^-] y los sulfatos [SO_4^{2-}]. Inicialmente se observa una clara diferencia en las concentraciones iónicas entre las aguas hidrotermales de Paipa durante la temporada de lluvias y la temporada seca, siendo superiores estas últimas, lo que sugiere una influencia significativa de las precipitaciones en la composición química de las aguas.

El sodio presenta las concentraciones más elevadas en las aguas termales, alcanzado hasta 5832,5 mg/L en temporada seca y 3341,45 mg/L en la de lluvias, valores comparables con los de las aguas marinas del Golfo. El potasio muestra concentraciones de hasta 2560,5 mg/L en las aguas de temporada seca de Paipa y un máximo de 564,6 mg/L en temporada de lluvias, superando todos los registros obtenidos para las aguas del Golfo de Morrosquillo. En cuanto al calcio, se alcanza una concentración máxima de 2183,4 mg/L en las aguas termales durante la temporada seca, superando nuevamente los valores de las aguas del Golfo. No obstante, en la temporada lluviosa, las concentraciones de calcio son mucho menores, alcanzando un máximo de solo 72,41 mg/L.

En relación con los cloruros, aunque las concentraciones en las aguas termales de Paipa durante la temporada seca no son tan altas en comparación con el agua marina, sí son significativamente mayores que en las aguas superficiales dulces y subterráneas del Golfo, superando los 6000 mg/L en ciertas áreas.

Figura 28.

Gráficas comparativas de las concentraciones iónicas entre las aguas del Golfo de Morrosquillo y las aguas termales de Paipa



Nota. En la gráfica se presenta la comparación de las concentraciones de sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros, hierro, bicarbonatos y sulfatos entre las aguas superficiales y subterráneas del Golfo de Morrosquillo y las aguas termales de Paipa en temporada de lluvias y temporada seca.

Los bicarbonatos, por su parte, alcanzan concentraciones máximas de 7740,9 mg/L en la temporada seca y 3293,06 mg/L en la temporada de lluvias, superando ampliamente a las aguas del Golfo. Un comportamiento similar se observa en los sulfatos, con concentraciones de hasta 6732,5 mg/L en las aguas termales durante la temporada seca, comparado con los 2409 mg/L registrados en las aguas marinas del Golfo. En temporada de lluvias las concentraciones de sulfatos son relativamente bajas.

En un rango intermedio, se encuentran el magnesio [Mg^{2+}] y el hierro [Fe^{3+}]. El magnesio en las aguas termales es significativamente inferior a las concentraciones registradas en las aguas de mar, con un máximo de 428,55 mg/L en la temporada seca y prácticamente irrelevante durante la temporada de lluvias con apenas 17,29 mg/L. El hierro, aunque en concentraciones generalmente bajas, muestra un ligero incremento en las aguas termales durante la temporada seca llegando a 5,697 mg/L.

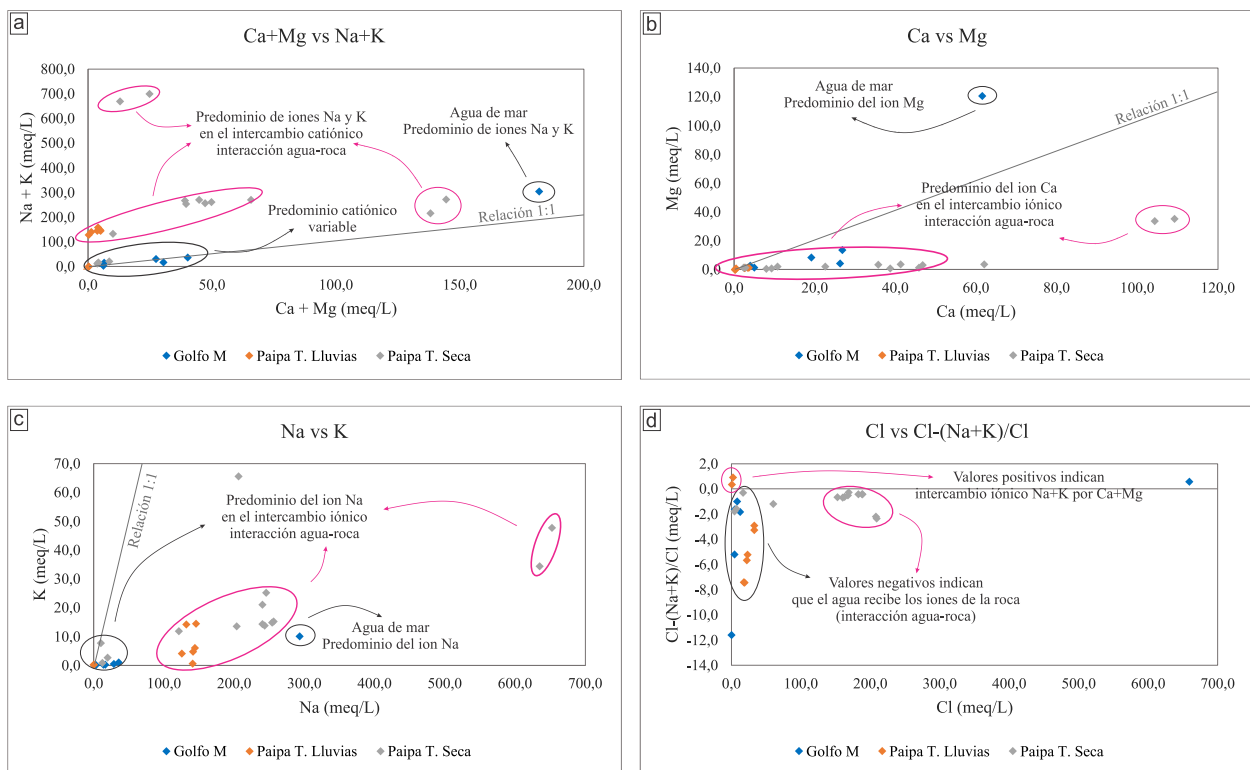
En resumen, las aguas hidrotermales de Paipa, tanto en época seca como en temporada de lluviosa, presentan una mineralización mayor que las aguas superficiales y subterráneas del Golfo de Morrosquillo. Existen excepciones, como el contenido en sodio, cloruros y magnesio, el cual es mayor en las aguas marinas del Golfo. Las aguas hidrotermales de Paipa se destacan por las concentraciones elevadas de bicarbonatos y sulfatos, lo que les otorga una clasificación sulfatada sódica en la mayoría de sus manifestaciones, con tendencia a ser más ácidas que alcalinas.

Es relevante señalar la influencia de las precipitaciones en la composición química de las aguas. A partir de las observaciones realizadas previamente, se deduce que durante la temporada seca las aguas se concentran más en especies minerales debido a la escasez de fluido, mientras que en época de lluvias el incremento en la cantidad de solvente diluye las aguas, reduciendo su concentración mineral.

La Figura 29 muestra que, a diferencia de las aguas del Golfo de Morrosquillo, cuya composición base varía por las condiciones del sistema hidrogeológico, las aguas hidrotermales de Paipa presentan un predominio claro en su composición, destacando la asociación sodio y potasio (Na+K) tanto en la temporada seca como en la lluviosa. En términos generales, en las aguas hidrotermales prevalecen los contenidos de sodio y calcio sobre las concentraciones de potasio y magnesio (Figura 29b y 29c).

Figura 29.

Gráficas comparativas de la predominancia iónica e índice de intercambio de bases, entre las aguas del Golfo de Morrosquillo y las aguas termales de Paipa



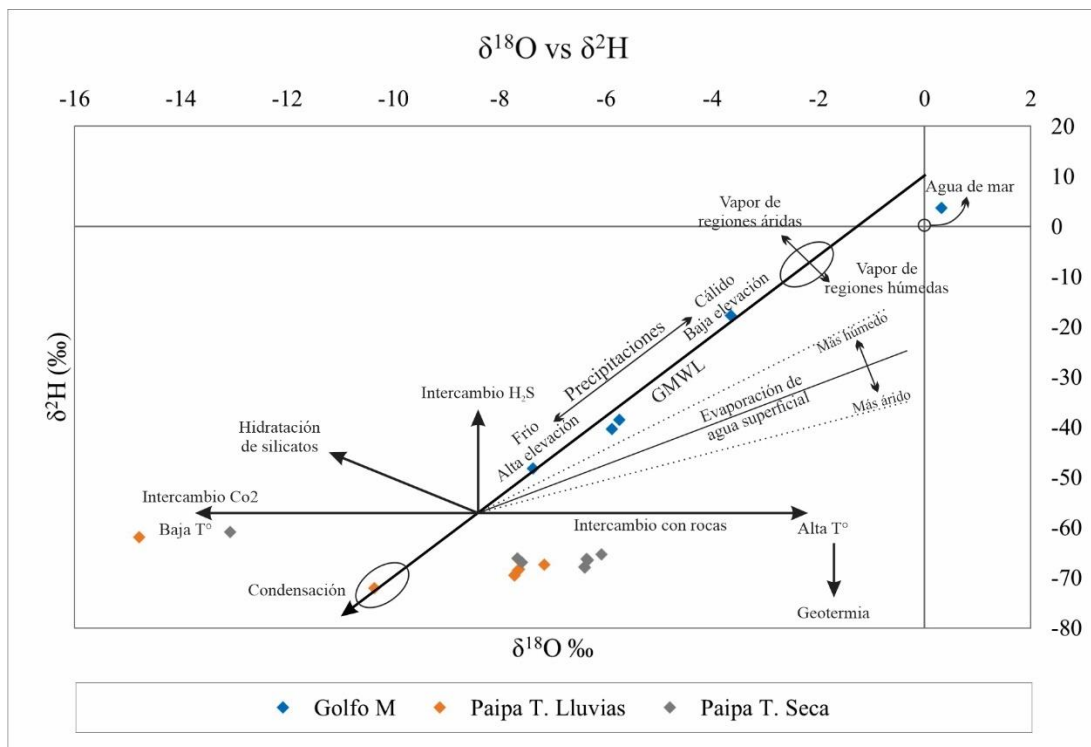
Nota. a. Relación Ca+Mg vs Na+K, b. Relación Ca vs Mg, c. Relación Na vs K, d. Índice de intercambio de bases.

De acuerdo con los resultados representados en la gráfica de índices de intercambio de bases (Figura 29d), los valores negativos indican que en las aguas hidrotermales de Paipa priman los procesos de disolución mineral, lo que sugiere que los componentes presentes en estas aguas provienen directamente de la interacción con las rocas. No obstante, en algunas localidades muestreadas durante la temporada de lluvias, los valores positivos señalan que el intercambio iónico es el principal proceso de mineralización. Estos procesos de disolución estarían relacionados a las altas temperaturas que presenta el fluido.

8.2 Relación isotópica y procedencia

Figura 30.

Gráfica comparativa de la relación $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ entre las aguas del Golfo de Morrosquillo y las aguas termales de Paipa

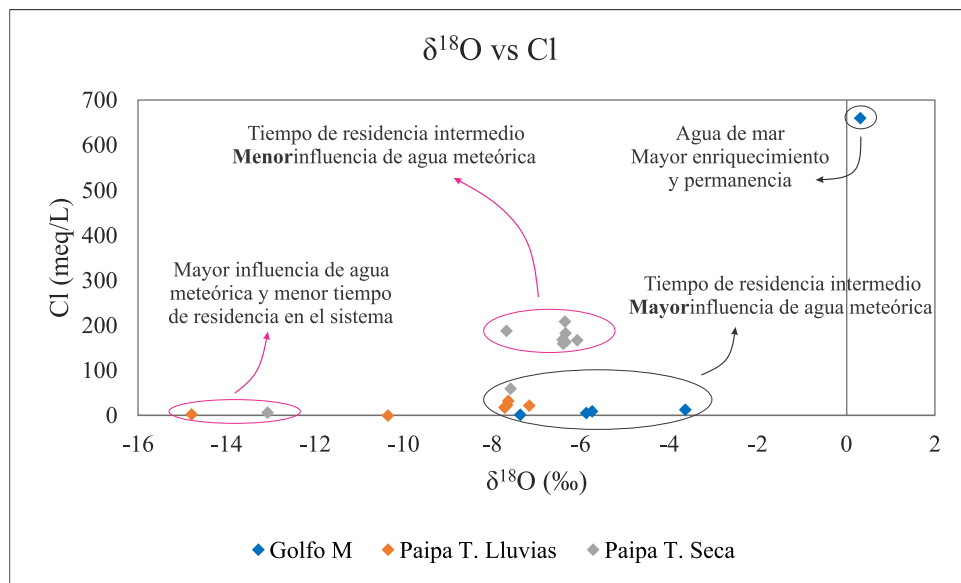


Nota. Relación $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ para comparar la procedencia de las aguas del Golfo de Morrosquillo con las aguas termales de Paipa, basada en la Ecuación 2 propuesta por Craig (1961).

La Figura 30 presenta la relación $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$, propuesta por Craig (1961) como la Línea Meteorica Global – GMWL (por sus siglas en inglés *Global Meteoric Water Line*) junto con los valores obtenidos para las aguas subterráneas y superficiales del Golfo de Morrosquillo y las aguas hidrotermales de Paipa, tanto en temporada seca como en temporada de lluvias.

Figura 31.

Gráfica comparativa del contenido de $\delta^{18}\text{O}$ y cloruros entre las aguas del Golfo de Morrosquillo y las aguas termales de Paipa



Nota. Relación $\delta^{18}\text{O}$ vs Cl^- para comparar la proveniencia de las aguas en términos de enriquecimiento o empobrecimiento en estos componentes.

Las aguas termales en temporada de lluvias presentan valores de $\delta^{18}\text{O}$ que oscilan entre -7,16 y -14,79‰, donde el valor más empobrecido pertenece a su vez a unas aguas con baja mineralización. Las aguas termales de temporada seca registran mediciones $\delta^{18}\text{O}$ entre -6,08 y -13,07‰, repitiéndose la situación anterior. Por su parte, los contenidos de $\delta^2\text{H}$ oscilan entre -61,89 y -72,02‰ en las aguas termales de temporada lluviosa y varían de -60,86 a -67,97‰ en época seca.

Se observa una notable diferencia en el contenido isotópico. Mientras que las aguas del Golfo tienden a alinearse con la Línea Meteorica Global, las aguas termales de Paipa se desvían de dicha tendencia. Al analizar los valores de la gráfica (Figura 30) la mayoría de las aguas termales se ubican a la derecha de la Línea meteórica evidenciando un enriquecimiento en $\delta^{18}\text{O}$ comparadas con las aguas del Golfo que tienen un mayor contenido de aguas meteóricas. Este enriquecimiento sugiere mayores aportes de agua magmática, la cual ha tenido una mayor temperatura en el sistema hidrogeológico. Por otra parte, la diferencia en el contenido de $\delta^2\text{H}$ se debe principalmente a la diferencia de altura entre las áreas de estudio.

La fuente de recarga de las aguas termales se ve reflejada de mejor manera en la relación Cl^- y $\delta^{18}\text{O}$ de la Figura 31, donde las aguas termales de Paipa en época lluviosa se encuentran empobrecidas tanto $\delta^{18}\text{O}$ como Cl^- , exhibiendo un comportamiento semejante a las aguas subterráneas y superficiales dulces del Golfo, lo que evidencia la notable influencia de las aguas meteóricas en el sistema. Por el contrario, las aguas termales de época seca, aunque igualmente empobrecidas en $\delta^{18}\text{O}$ presentan mayor enriquecimiento en cloruros señalando que son aguas más evolucionadas, producto de un tiempo de residencia en el sistema más prolongado, menor influencia de aguas meteóricas, un mayor aporte de aguas magmáticas y procesos de evaporación.

9. Conclusiones

La composición química de las aguas subterráneas y superficiales del Golfo de Morrosquillo revela la presencia dominante de iones como sodio, magnesio, calcio, cloro y sulfatos, con las concentraciones más elevadas en las aguas marinas de Isla Mangles y las más bajas en el Río Sinú. En términos generales, las aguas se clasifican en tres tipos principales: cloruradas sódicas, sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas. Las aguas subterráneas de los

pozos Cabaña Alicia y Los Icacos fueron clasificadas como bicarbonatadas sódicas, consideradas jóvenes y con un flujo activo, mientras que las aguas de Costa Linda, cloruradas cálcicas, mostraron mayor evolución y permanencia en el sistema, lo que refleja flujos locales y regionales diferenciados.

En términos hidrogeoquímicos, se destaca una mineralización de las aguas con altas concentraciones de sodio en pozos Cabaña Alicia y Los Icacos, mientras que el pozo Costa Linda muestra una dominancia de calcio, producto de la interacción entre el fluido y la roca a lo largo del recorrido del agua. De esta manera, la evolución química del acuífero de Morrosquillo se debe principalmente a procesos como la disolución de minerales como calcita y halita, y en menor medida, a la disolución de yeso y el intercambio iónico. Los índices de saturación de Langelier sugieren una sobresaturación en carbonato de calcio, indicando la posibilidad de precipitación de calcita en las aguas subterráneas.

La conductividad eléctrica, especialmente elevada en los pozos Costa Linda y El Ancla del Galeón, indica la intrusión de aguas marinas, un fenómeno que podría estar relacionado con la alta explotación del agua subterránea en estas áreas dedicadas al turismo. La distribución espacial de los datos muestra una menor mineralización hacia el norte y el este; mientras que las concentraciones más altas de sales se encuentran cerca de la costa y en zonas del sur.

El análisis de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) mostró que las aguas superficiales y subterráneas muestreadas en el Golfo de Morrosquillo se ajustan a la tendencia de la Línea Meteorica Local, lo que sugiere un origen meteórico para las aguas de recarga. Las aguas superficiales marinas presentan valores de $\delta^{18}\text{O}$ cercanos a cero; mientras que las aguas del Río Sinú, más empobrecidas en este isótopo, provienen de zonas de mayor altitud o aguas meteóricas relativamente más recientes en el sistema. Las aguas del manglar reflejan una mezcla de diferentes

fuentes, y las aguas subterráneas, con bajos valores de $\delta^{18}\text{O}$ y concentraciones de cloruros, indican un flujo de agua reciente y químicamente poco evolucionada.

El acuífero del Golfo de Morrosquillo está compuesto por depósitos cuaternarios de origen fluvial, aluvial y marino, con sedimentos gruesos cerca de la costa y finos hacia el este. Estos depósitos, que cubren formaciones terciarias, están estructurados por fallas tectónicas y plegamientos con tendencia noreste. El acuífero multicapa, con un espesor variable de entre 20 y 120 metros y una amplitud aproximada de 650 km², presenta una distribución heterogénea de los sedimentos que influye en la variabilidad química de las aguas. En las zonas norte y central del golfo, los niveles de agua subterránea están por debajo del nivel del mar, lo que favorece la intrusión salina, siendo más notoria en los pozos cercanos a la costa.

10. Recomendaciones

Dado que la precipitación desempeña un papel crucial en el sistema hidrogeológico del acuífero, es fundamental implementar un monitoreo continuo para evaluar con precisión las proporciones de recarga tanto local como distante que contribuyen al abastecimiento del acuífero. Este seguimiento permitirá identificar variaciones estacionales y comprender mejor cómo la lluvia influye en los niveles y la calidad del agua subterránea.

Puesto que los datos recolectados en esta investigación derivan de épocas lluviosas, se subraya la necesidad de realizar nuevas expediciones de muestreo hidrogeoquímico en diferentes épocas del año. Estas investigaciones ayudarían a determinar si existen variaciones significativas en la composición y comportamiento del agua subterránea en períodos de sequía o transición. Además, permitirán verificar con mayor precisión las fuentes de recarga y el tiempo de residencia

de las aguas dentro del sistema, proporcionando una visión más completa de los procesos de mezcla que ocurren en diferentes zonas del acuífero.

Ampliar la recolección de datos también facilitará una mejor comprensión de las interacciones entre las aguas subterráneas y superficiales, así como de los efectos de factores como el uso intensivo del agua o la intrusión marina. De este modo, un enfoque integral contribuirá a una gestión más eficiente y sostenible del acuífero, asegurando su capacidad para abastecer las necesidades locales a largo plazo.

Referencias Bibliográficas

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos–EPA. (2024). *Electrical Conductivity and Resistivity*. <https://www.epa.gov/environmental-geophysics/electrical-conductivity-and-resistivity>
- Agencia Internacional de Energía Atómica–IAEA. (2022). *Isótopos estables*. <https://www.iaea.org/es/temas/isotopos-estables>
- Anaya Causado, D. (2021). *Geomorfología, ascenso del nivel del mar y evolución de la línea de costa: Análisis en el Golfo de Morrosquillo*. Universidad del Norte. Trabajo de investigación.
- Bacca, J., Hernández, O. & Vásquez, L. (2010). *Determinación de la geometría del Acuífero de Morrosquillo y geología detallada del Acuífero de Toluviejo, Sucre*. Universidad Nacional de Colombia
- Barrera Olmos, R. (1999). *Geología de la Plancha 43 - 43bis San Antero - San Bernardo del Viento*. Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear INGEOMINAS. Memoria explicativa
- Bohlke, J. K. (2002). *Groundwater recharge and agricultural contamination: A critical review of the literature*. Hydrological Processes, 1817-1841.
- Carrillo, J., Velazco, C. & Herrera, H. (2013). *Determinación de reacciones químicas en interfaz de un acuífero costero. Caso: Golfo de Morrosquillo. Sucre, Colombia*. Universidad

Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora”. Núcleo Guanare,
Estado Portuguesa

Clavijo Torres, J. y Barrera Olmos, R. (2001). *Geología de las planchas 44 Sincelejo y 52 Sahagún*.
Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear
INGEOMINAS. Memoria explicativa

Custodio, E. (2010). *Coastal aquifers of Europe: an overview*. Technical University of Catalonia.
Hydrogeology Journal. DOI:10.1007/s10040-009-0496-1

Delgado, S. (12 de mayo de 2023). *Ph del agua: 10 cosas que debes saber*. PRISMAB.
<https://prismab.com/blog/ph-del-agua-10-cosas-que-debes-saber/>

Díaz Granados, A. (1988). *Resumen del estudio hidrogeológico del flanco nororiental de la
serranía de San Jacinto y de la zona litoral del golfo de Morrosquillo*. Boletín Geológico,
29(1), 3–44. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol29.1.1988.231>

Díaz, N., Ruiz, J., Reyes, E., Cejudo, A., Novo, J., Peinado, J., Meléndez-Valdés, F., y Fiñana, I.
(2000). *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de
biomoléculas*. Departamento de Bioquímica y Biología Molecular. Universidad de
Córdoba. España.

Drever, J. I. (1988). *The Geochemistry of Natural Waters, Second Edition*. (Vol. 437). Englewood
Cliffs: Prentice hall. University of Wyoming.

Dueñas, H. y Duque, H. (1981). *Geología del Cuadrángulo F-8*. Instituto Nacional de
Investigaciones Geológico-Mineras INGEOMINAS. Boletín Geológico, vol 24

- Epstein, S. & Mayeda, T. (1953). *Variation of O18 Content of Waters from Natural Sources*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4, 213-224. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(53\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(53)90051-9)
- Flórez, A., Robertson, K., Gracia, J. & Martínez, N. (2000). *Morfodinámica, Población y Amenazas Naturales en el Litoral Caribe Colombiano*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM & Universidad Nacional de Colombia
- GEOTEC. (1997). *Cartografía geológica de la Región del Sinú*. Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear INGEOMINAS. Bogotá.
- Gómez Montes, A. (2024). *Seguridad hídrica en el abastecimiento a partir del acuífero de Morrosquillo: gestión del agua bajo un escenario de cambio climático a 2040*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- González Hita, L & Sánchez Díaz, L. (1992). *Las técnicas isotópicas, una herramienta eficaz para el diagnóstico y evaluación de las aguas subterráneas*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IDEAM. (2022). *Aguas Subterráneas, Estudio Nacional del Agua*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
- IGAC. (2018). *Estudio hidrogeológico del Golfo de Morrosquillo*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2022). *Aguas Subterráneas*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Anexo 7.

- Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear INGEOMINAS. (1996). *Geología de la Plancha 36-37 María La Baja*. Memoria explicativa.
- Jaramillo Arroyave, S. (2023). *Morrosquillo: historia del agua, la vida y el crudo derramado*. CENSAT Agua Viva. Biblioteca Energía y Justicia Climática. Bogotá. ISBN: 978-958-53479-5-3
- Martínez, D., Betancur, T., y Herrera, H. (2014). *Hydrogeochemical assessment and modeling of Morrosquillo Coastal Aquifer (Sucre-Colombia)*. Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín
- Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (22 de junio de 2007). *Resolución número 2115*. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-2115-2007>
- Molina Márquez A., Molina Márquez C., Giraldo Ospina L., Parra Llanos C., y Chevillot P. (1994). *Dinámica marina y sus efectos sobre la geomorfología del Golfo de Morrosquillo*. Boletín Científico CIOH.
- Montesino Torres, O. E., Gutiérrez Ribón, G., y Monroy Pineda, M. C. (2018). *Avances de la contaminación ambiental en las aguas del Golfo de Morrosquillo*. Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA, 6(2), 389–401. <https://doi.org/10.24188/recia.v6.n2.2014.446>.
- Mook, W. (2000). *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle, Principles and Applications*. Technical Documents in Hidrology. No 39, Vol 1. Unesco. Paris.

- Peralta, J., Gil, R., Dapeña, C., Valdez, L., Olivera, J., y Morejón, Y. (2015). *Hidrología isotópica, herramienta nuclear para la gestión sostenible del recurso hídrico*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, VOL. XXXVI, No. 1, Ene-Abr 2015, p. 57-72
- Rodríguez, C. (2004). *Línea meteórica isotópica de Colombia*. Meteorología Colombiana. ISSN01246984. Bogotá.
- Rojas, D. (2016). *Contribución al estudio del volcán de Paipa y su sistema termal mediante prospecciones de resistividad*. Facultad de Ciencias. Universidad de los Andes. Bogotá
- Sánchez San Román, J. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea*. Dpto de Geología. Universidad de Salamanca. España.
- Servicio Geológico de Estados Unidos. (16 de octubre de 2019). *Aquifers and Groundwater*. USGS. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-scienceschool/science/aquifers-and-groundwater>
- The Groundwater Project. (2024). *The Importance of Groundwater*. Recuperado el 25 de septiembre de 2024 de <https://gw-project.org/the-importance-of-groundwater/>
- Vargas, N., García, M., Bernal, F., Rosero, M., Vega, C., Gonzáles, J., Figueroa, C., Ceballos, J., Gómez, E., Salamanca, S., Toro, L., Arévalo, D., Onofre, C., Tetay, C., Gonzáles, J., Cárdenas, O., Marín, J., Osorio, J., Ville, J... Benavides, B. (2022). *Estudio Nacional de Aguas*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. ISBN: 978-958-5489-12-7

- Velandia, F. (2003). *Informe técnico: Cartografía geológica y estructural sector sur del municipio de Paipa*. Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS. Bogotá.
DOI:10.13140/RG.2.1.4741.2720
- Vélez O, M. & Rhenals G, R. (2008). *Determinación de la recarga con isótopos ambientales en los acuíferos de Santa Fé de Antioquia*. Universidad Nacional de Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra - Número 24, noviembre de 2008. Medellín. ISSN 0120 - 3630
- Villarraga, E., Anaya, E., Flórez, J., y Cámero, C. (2017). *El Corredor Turístico Golfo de Morrosquillo y la Sabana*. Asociación de Empresarios Turísticos del Golfo de Morrosquillo. Tolú

Apéndices

Apéndice A. Muestreo Isla Mangles



Apéndice B. Muestreo La Punta de San Bernardo, SE



Apéndice C. Muestreo La Punta de San Bernardo, NW



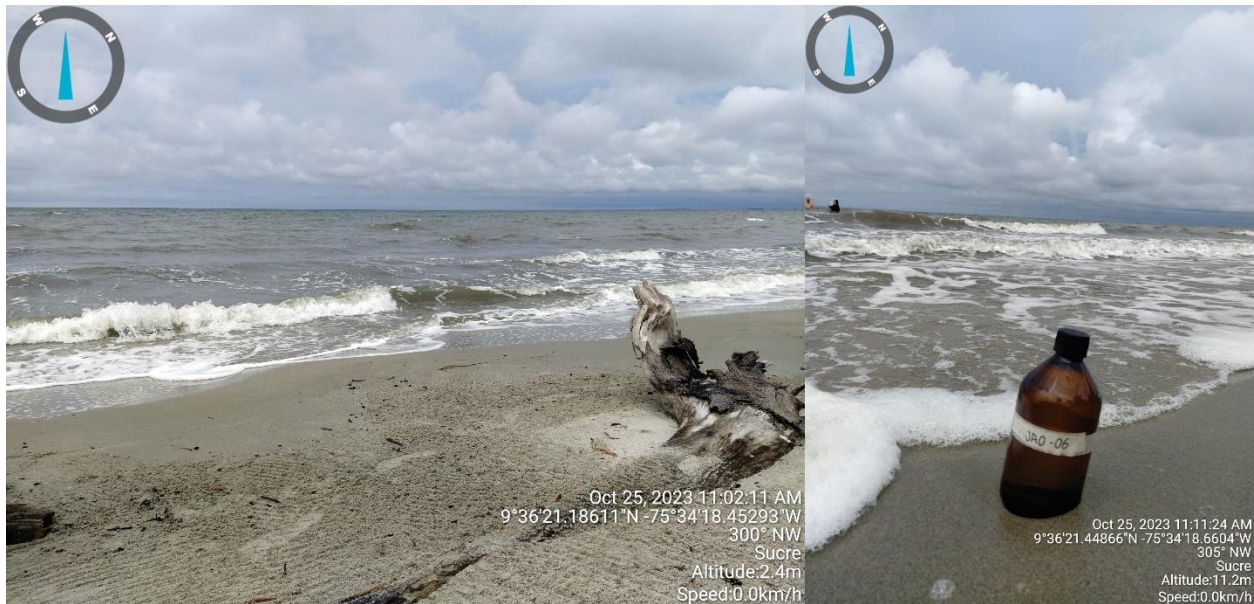
Apéndice D. Muestreo Caño Guacamayas



Apéndice E. Muestreo pozo Cabaña Alicia



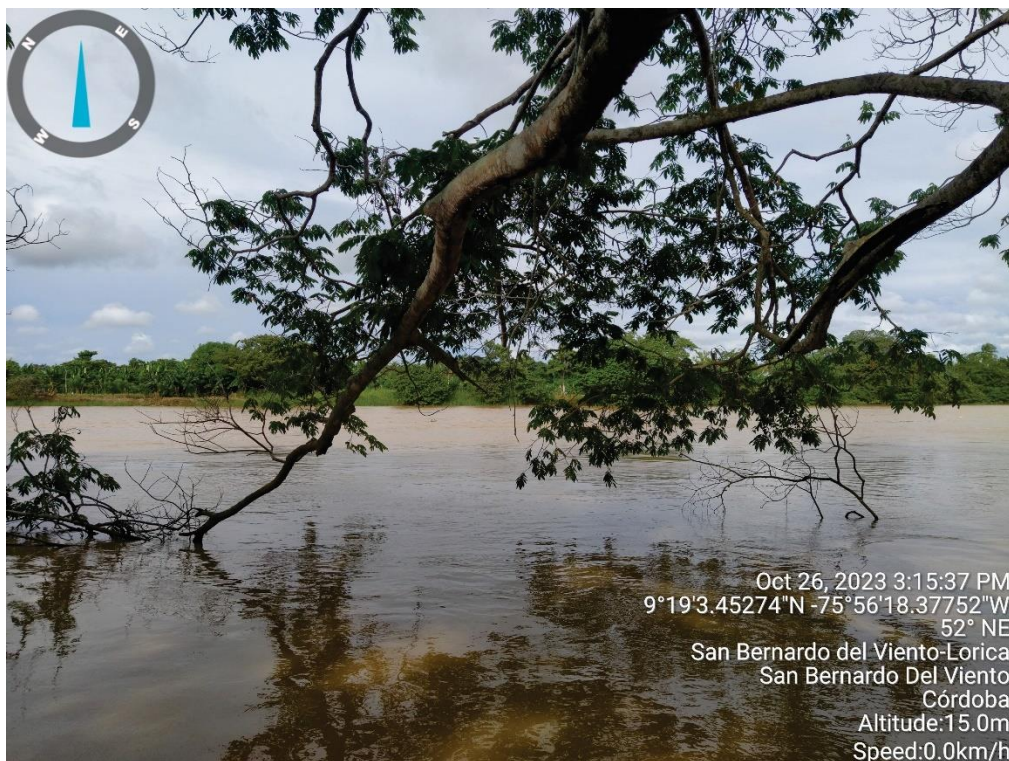
Apéndice F. Muestreo Playa Guacamayas



Apéndice G. El Ancla del Galeón



Apéndice H. Río Sinú, localidad de Trementino



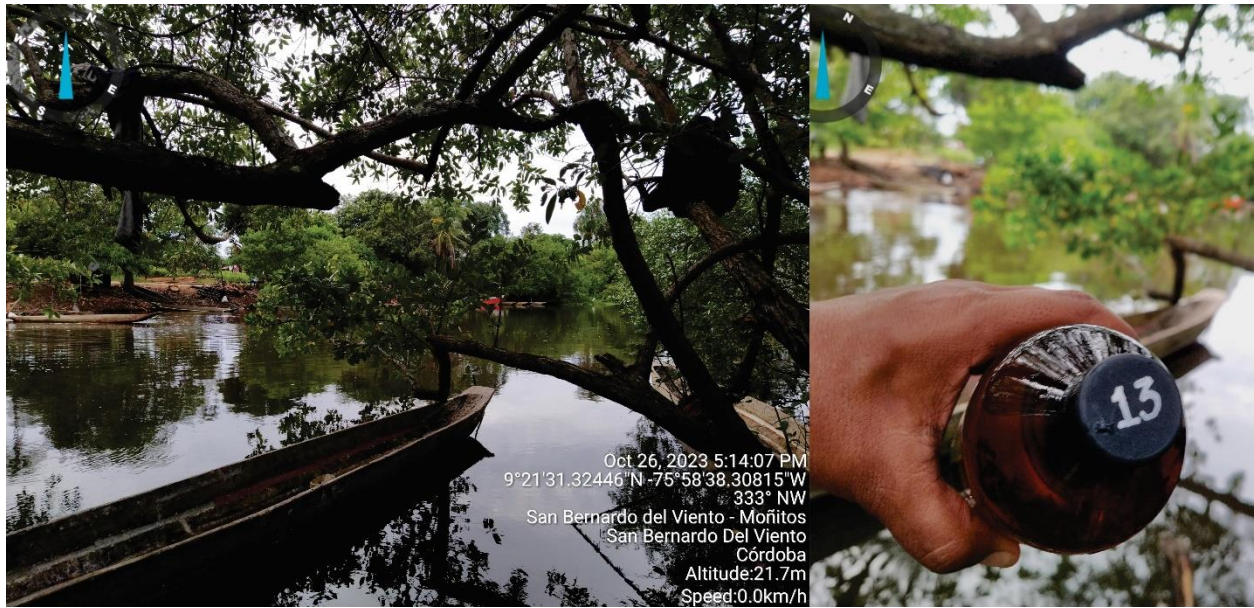
Apéndice I. Muestreo playas de San Bernardo del Viento



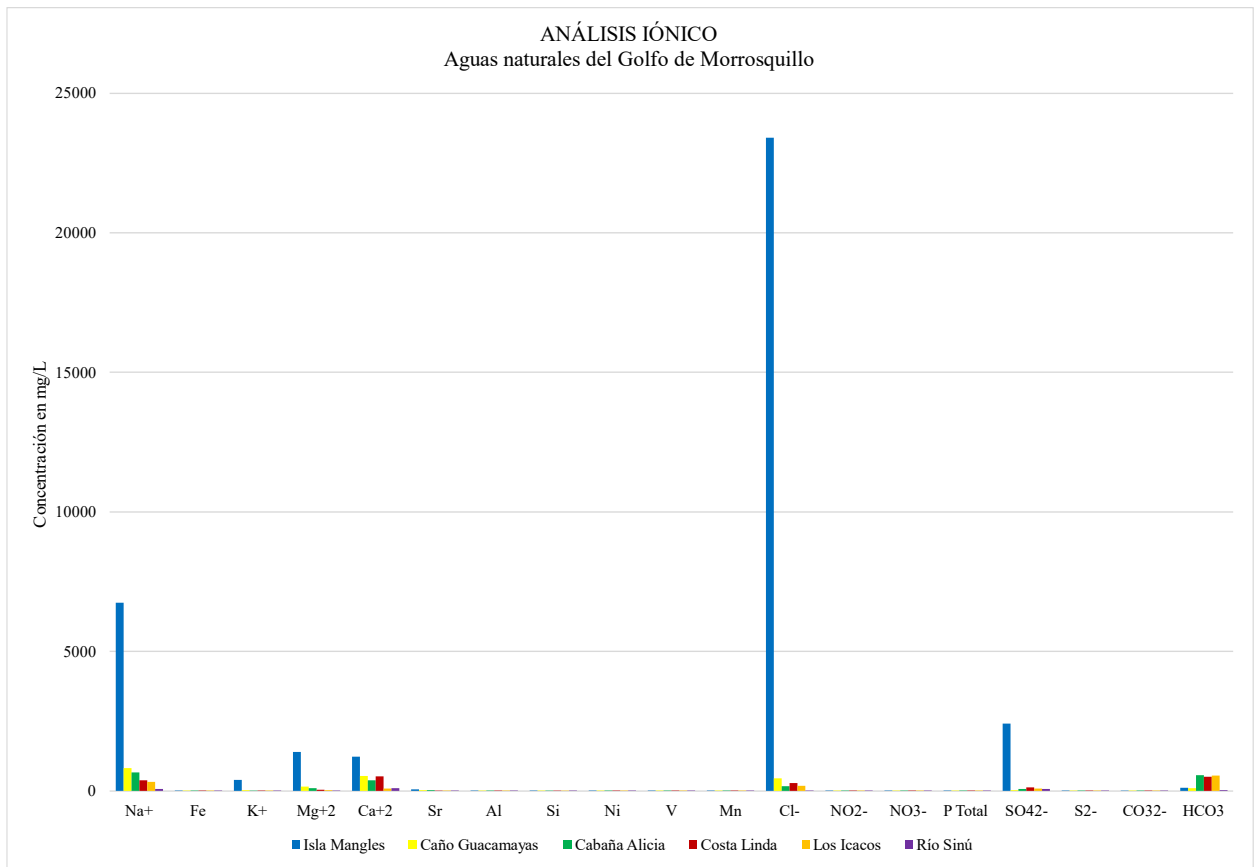
Apéndice J. Muestreo litoral de San Bernardo del Viento



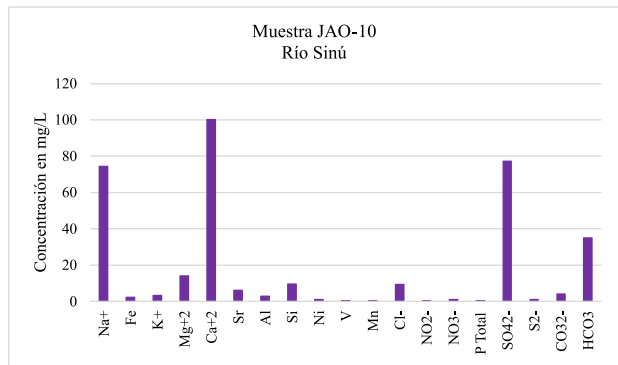
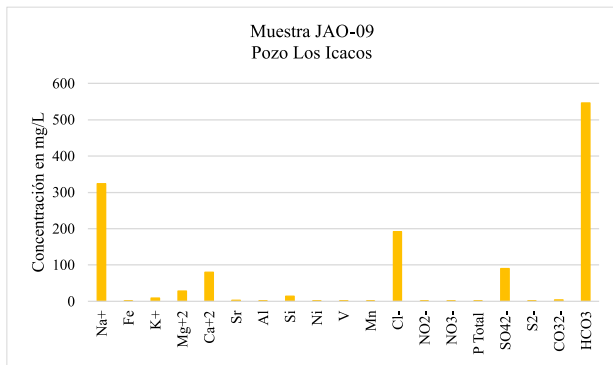
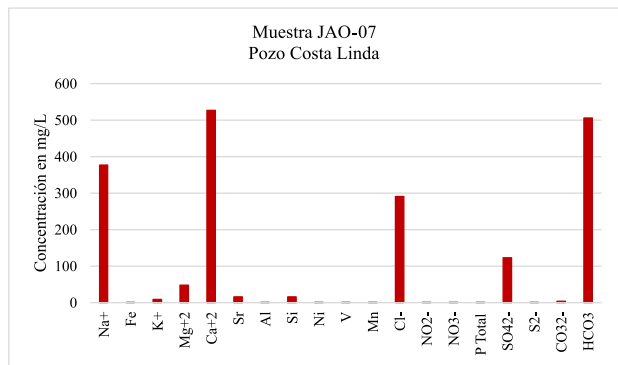
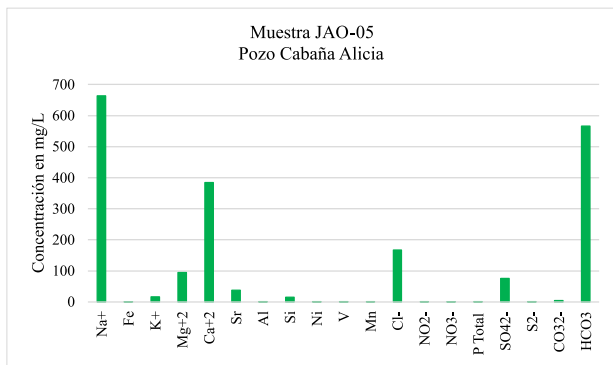
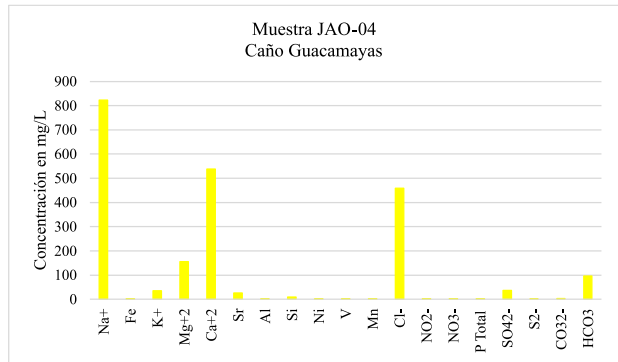
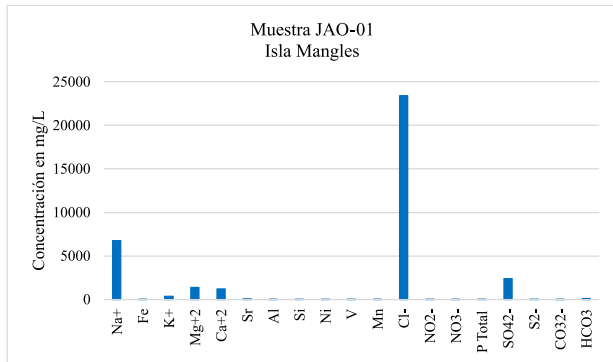
Apéndice K. Muestreo Caño La Balsa



Apéndice L. Análisis iónico comparativo



Apéndice M. Análisis iónico, especies predominantes en cada muestra



Apéndice N. Características fisicoquímicas de las aguas hidrotermales de Paipa en temporada de lluvias

No.	Manantial	Latitud	Longitud	Altura (msnm)	T (°C)	pH	Conductividad (µS/cm)	Solidos totales disueltos (STD)
SL1-01	Pozo principal Salpa	1129662	1108420	2464	20,3	6,5	45400	40890
SL1-02	Pozo Salpa 2	1129328	1108248	2514	23,8	9,78	36400	40890
SL1-03	Pozo Azul	1128472	1107236	2522	47,2	6,97	42900	38480
SL1-05	El Hervidero	1123285	1106800	2527	19,3	4,17	190	61
SL1-06	Piscina Olitas	1121580	1106971	2591	24,4	6,12	170	105
SL1-07	Pozo Hotel Lanceros	1128381	1107124	2480	56,9	6,98	41600	36340
SL1-08	Pozo Hotel Lanceros 2	1128384	1107136	2499	59,5	7,18	40700	36342

Apéndice O. Características fisicoquímicas de las aguas hidrotermales de Paipa en temporada seca

No.	Manantial	Latitud	Longitud	Altura (msnm)	T (°C)	pH	Conductividad (µS/cm)	Solidos totales disueltos (STD)
SL2-01	Pozo Hotel Lanceros 2	1128384	1107136	2499	57,6	6,97	43040	37514
SL2-02	Pozo Hotel Lanceros	1128381	1107124	2480	49,1	6,69	44420	37514
SL2-03	Ojo del diablo	1107122	1128391	2480	45,6	6,86	43510	39788
SL2-05	Pozo Azul	1128472	1107236	2522	51,2	6,88	43550	39854
SL2-06	Pozo Principal Salpa	1129662	1108420	2464	20,6	6,41	45750	41035
SL2-07	Salpa 2	1129328	1108248	2514	27,1	9,66	56800	41035
SL2-08	Salpa 3	1129475	1107997	2514	28,3	9,74	55630	41035
SL2-10	El Batán-La Playa	1124820	1106538	2553	72,3	7	20580	43291
SL2-11	El Hervidero	1123285	1106800	2527	25,1	3,66	268	63

Apéndice P. Concentración de cationes y aniones en las aguas hidrotermales de Paipa en temporada de lluvias

No.	Manantial	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	Ca ⁺² (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Li ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
SL1-01	Pozo principal Salpa	3028,42	555,28	17,19	72,41	0,34	1,68	1,54	830,36	3049,13	42,07
SL1-02	Pozo Salpa 2	2874,79	160,98	1,42	3,28	0,2	0,2	1,09	1170,05	2585,66	1029,62
SL1-03	Pozo Azul	3245,31	184,01	13,21	52,04	0,2	1,23	1,13	775,71	2853,98	1142,98
SL1-04	Vía Mina de Carbón	3239,22	22,46	9,71	9,84	0,21	1,23	0,86	1168,05	2878,37	1142,98
SL1-05	El Hervidero	0,1	8,06	0,8	2,61	0,88	0,2	0,1	78,36	146,36	58,75
SL1-06	Piscina Olitas	0,1	8,94	0,1	5,43	0,2	0,2	0,1	12,22	146,36	42,44
SL1-07	Pozo Hotel Lanceros	3302,14	234,99	17,29	66,19	0,2	1,26	1,12	630,75	3293,06	296,08
SL1-08	Pozo Hotel Lanceros 2	3341,45	564,62	17,03	50,62	0,22	1,54	1,27	670,28	3146,7	98,43
SL1-09	Balneario público Erika	425690	3560	9048	94323	0,221	0,773	0,1	197670	804970	102360

Apéndice Q. Concentración de cationes y aniones en las aguas hidrotermales de Paipa en temporada seca

No.	Manantial	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	Ca ⁺² (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Li ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
SL2-01	Pozo Hotel Lanceros 2	4740,25	2560,5	428,55	2183,4	0,426	1,696	8,115	5673,9852	7740,9	2684,5
SL2-02	Pozo Hotel Lanceros	4676,25	529,35	410,35	2086,625	0,652	1,281	8,395	5981,124	2745	6732,5
SL2-03	Ojo del diablo	5643,75	984,95	45,25	1239,675	0,598	1,468	8,485	6692,3928	2272,86	6014,5
SL2-04	Lago Sochagota	275	33,8	17,8	46,275	0,942	0,085	0,105	161,68433	68,625	464,5
SL2-05	Pozo Azul	5597,5	539,85	16,9	915,75	0,817	1,813	7,23	5940,711	2292,075	5550,5
SL2-06	Pozo Principal Salpa	5523,75	823,95	38,1	933,975	5,697	1,426	5,025	6466,08	2333,25	5146,5
SL2-07	Salpa 2	5832,5	578,7	41,125	714,175	1,424	0,106	7,355	5779,059	1111,725	5440,5
SL2-08	Salpa 3	5885	596,4	43,75	824,775	0,847	0,024	7,665	6668,145	466,65	5469
SL2-09	Vía Mina de Carbón	5523,75	560,55	10,275	773,2	0,623	0,17	7,16	5415,342	2127,375	5199
SL2-10	El Batán-La Playa	2780	463,9	9,75	184,2	0,195	0,125	3,68	2141,889	1111,725	3610
SL2-11	El Hervidero	229	302,25	17,2	55,325	5,186	0,008	0,017	242,478	123,525	722,5
SL2-12	Sauzalito	443,75	107,25	8,075	158,35	0,104	0,986	0,455	585,9885	425,475	408,5
SL2-13	Pozo Principal Salpa*	15006	1860,00	27,48	450,8	6,544	2,02	23,63	7410	60,5	35114
SL2-14	Pozo Principal Salpa*	14600	1341,00	27,23	214,3	6,513	1,996	23,15	7363	71,0	26060