

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Aproximación a la Recta Meteórica Local para el municipio de Málaga Santander: un estudio de la composición química e isotópica del agua en el municipio

Carlos David Mesa Gómez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogo

Director

Luis Eduardo Moreno Torres

Ing. Civil

Codirectora

María Alejandra Cetina Tarazona

Geóloga. MSc. Ing. Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2020

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Dedicatoria

Primeramente, dedico este trabajo a Dios, y agradezco por haberme dado la constancia para culminar esta etapa de mi vida.

A mis maravillosos padres, Carlos Augusto Mesa Moreno y Martha Cecilia Gómez González, quienes me han dedicado su tiempo, su amor, y me han apoyado en todos los aspectos de mi vida, avanzando conmigo y animándome a dar lo mejor de mí.

A mi hermana María Alejandra, mi amiga de toda la vida, por las alegrías, enojos, peleas, momentos que crearon recuerdos que estarán conmigo siempre.

A mis tías, María Oliva Mesa y Gloria Gómez, a mi abuelo Miguel Gómez, y a toda mi familia de Bucaramanga por todos los momentos valiosos que viví con ellos.

Finalmente, a mis amigos del Geoteam, quienes son mi grupo de risas y llanto, sin ellos mi paso por la UIS no hubiera sido el mismo, a mis amigos de la universidad y a los que aún conservo del colegio, por todas las memorias valiosas que hemos construido.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Agradecimientos

Al director del proyecto, el Ing. Luis Eduardo Moreno Torres, por la dedicación entregada a este trabajo y el acompañamiento inicial en la toma de muestras.

A la codirectora, Geol. MSc. María Alejandra Cetina Tarazona, por el tiempo invertido y por aportar su experiencia en la realización del trabajo.

Los dos me guiaron con paciencia durante todas las etapas de este proyecto de grado y aportaron sus valiosos conocimientos al mismo.

A los docentes de la Escuela de Geología que nos supieron enseñar a mis compañeros y a mí, fueron vitales para la culminación de este proceso educativo.

Al Laboratorio de Isótopos Estables LAMA de la Universidad de Montpellier en Francia, en especial al profesor Jean Denis Taupin, por los servicios prestados para este trabajo.

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Objetivos	17
2. Generalidades.....	18
2.1. Localización.....	18
2.2. Metodología.....	20
3. Marco Teórico	26
4. Marco Geológico.....	38
4.1. Geología Regional	38
4.2. Geología Estructural	41
4.3. Geomorfología.....	42
5. Resultados	45
5.1. Ajuste de la cartografía geológica.....	45
5.1.1. Litología.....	46
5.1.2. Estructuras.....	57
5.2. Caracterización hidroquímica	65
5.2.1. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos.....	66
5.2.2. Análisis de iones mayoritarios	69
5.3. Isótopos estables del agua.....	75

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

5.3.1. Composición isotópica de la precipitación	75
5.3.2. Composición isotópica de los manantiales	80
5.4. Aproximación al modelo hidrogeológico conceptual	84
6. Conclusiones	88
7. Recomendaciones	90
Bibliografía	91

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Lista de Tablas

Tabla 1. Localización de los totalizadores	22
Tabla 2. Localización de los manantiales seleccionados.	23
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos del agua de manantial.	66
Tabla 4. Porcentaje de disminución del caudal de los manantiales en temporada de verano.	67
Tabla 5. Resultados del análisis de iones mayoritarios en los manantiales.	69
Tabla 6. Resultados de la composición isotópica en el totalizador 1.....	76
Tabla 7. Resultados de la composición isotópica en el totalizador 2.....	76
Tabla 8. Resultados de la composición isotópica en el totalizador 3.....	76
Tabla 9. Resultados de la composición isotópica del agua de manantial.	80
Tabla 10. Estimación de la altura de la zona de recarga.	83
Tabla 11. Unidades hidrogeológicas.	84

Lista de Figuras

Figura 1. Localización del proyecto de investigación.	18
Figura 2. Precipitación de lluvia mensual promedio del municipio de Málaga.....	19
Tomado de: https://es.weatherspark.com/y/25290/Clima-promedio-en-M%C3%A1laga-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o	19
Figura 3. Metodología empleada en el trabajo de investigación.	20
Figura 4. Totalizadores usados en el muestreo. A) y B) Armado de los totalizadores. C) y D) Instalación en los sitios elegidos.....	22
Figura 5. Muestreo del agua de manantial. A), B) y C) Detalles del muestreo en los puntos elegidos. D) Medición de parámetros fisicoquímicos en campo.	23
Figura 6. Localización de los totalizadores y manantiales.	24
Figura 7. Ciclo hidrológico.....	27
Figura 8. Secuencia de Chebotarev.....	31
Figura 9. Ejemplos de figuras de Stiff.	32
Figura 10. Diagrama de Piper.	34
Figura 11. Variaciones de deuterio y oxígeno 18 en ríos, lagos, lluvia y nieve.	37
Figura 12. Ubicación de la zona en un contexto geológico regional.	39
Figura 13. Cartografía oficial de la zona de estudio. Málaga, Santander.	40
Figura 14. Mapa geomorfológico de la zona de estudio.....	43
Figura 15. Mapa de las estaciones de campo.....	45

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

- Figura 16. Afloramiento de la Fm. Río Negro. A) Contacto entre la lodolita y la arenisca de grano fino. B) Detalle de la lodolita con nódulos de hierro (círculos azules) y oxidación. C) Bloque de arenisca a lado derecho del afloramiento. Imágenes de la estación CM-1..... 47
- Figura 17. Afloramiento de la Fm. Río Negro. A) Escarpe de arenisca de grano medio a fino. B) Estratificación plano-paralela en el tope y cruzada hacia la base. Imágenes de la estación CM-18. 48
- Figura 18. Afloramiento de la Fm. Río Negro. A) Arenisca de grano medio a grueso con gránulos suprayaciendo a una arenisca de grano medio a fino. B) y C) Detalle de la arenisca de grano medio a grueso con gránulos. Imágenes de la estación CM-24..... 49
- Figura 19. Afloramiento de la Fm Tibú-Mercedes. A) Niveles de caliza wackestone y packstone. B) Detalle de las diaclasas profundas del afloramiento. C) Detalle de la caliza tipo packstone, donde se aprecian las cochas. Imágenes de la estación CM-4..... 51
- Figura 20. Afloramiento de la Fm Tibú-Mercedes. A) Intercalaciones de caliza tipo wackestone y mudstone. B) Nódulos calcáreos en la caliza tipo mudstone (línea roja punteada). C) Detalle de la caliza tipo wackestone con fósiles (círculos naranjas). Imágenes de la estación CM-6..... 52
- Figura 21. Afloramiento de la Fm Tibú-Mercedes. A) Caliza tipo wackestone. B) Detalle de las venas rellenas de calcita. Imágenes de la estación CM-23. 53
- Figura 22. Depósito coluvial ubicado hacia la peña del cabro (parte oeste de la zona de estudio), los bloques se componen de arenisca y caliza. Imagen de la estación CM-3..... 54
- Figura 23. Depósito coluvial ubicado en un sendero que termina en el km 10 de la vía Málaga-Curos. Compuesto por bloques de caliza. Imagen de la estación CM-14..... 55

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

- Figura 24. Depósito coluvial ubicado en el km 8 vía Málaga-Curos. Se observa la implementación de gaviones para impedir el movimiento del cuerpo (flechas naranjas). Imagen de la estación CM-20. 56
- Figura 25. Depósito coluvial ubicado en el aeropuerto. A) Bloques del depósito. B) Detalle de los bloques de caliza. Imagen de la estación CM-32..... 56
- Figura 26. Depósito coluvial ubicado en la vía Málaga-Cúcuta, alrededores del pueblo. Imagen de la estación CM-35. 57
- Figura 27. Falla de afloramiento. A) Se observa el plano de la falla (línea roja) y el material de harina de falla (círculo naranja). B) Detalle del plano de falla. C) Detalle del material tipo harina de falla. Imágenes de la estación CM-2. 58
- Figura 28. Falla de afloramiento. A) Afloramiento de la Fm. Tibú-Mercedes afectado por una falla. B) Plano estriado (círculo rojo). C) Detalle y cinemática de la falla (línea roja) con las direcciones de movimiento de los bloques (flechas rojas). Imágenes de la estación CM-7..... 58
- Figura 29. Falla de afloramiento. A) Corte de la falla a través del afloramiento (línea roja) y ubicación del plano estriado (círculo rojo). B) Detalle del plano estriado (círculo naranja). Imágenes tomadas a 30 m de la estación CM-7..... 59
- Figura 30. Representación del Sinclinal de Málaga, se observa el eje del sinclinal (línea negra), el cambio en la dirección del buzamiento de las capas (líneas amarillas), además de la Falla del Servitá (línea roja). Imagen de la estación CM-23. 61
- Figura 31. Pliegue anticlinal ubicado hacia el oeste de la zona de estudio, se observa el cambio en la dirección de buzamiento de las capas (líneas amarillas). Imagen de la estación CM-26. ... 61
- Figura 32. Mapa Geológico de la zona de estudio..... 62

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Figura 33. Corte geológico de la zona de estudio.	63
Figura 34. Columna estratigráfica generalizada.	64
Figura 35. Gráfica del comportamiento de la conductividad eléctrica y el caudal de los manantiales.	68
Figura 36. Gráfica del comportamiento de los sólidos disueltos totales y el caudal de los manantiales.	69
Figura 37. Diagrama de Stiff para muestras de invierno.	72
Figura 38. Diagrama de Stiff para muestras de verano.	72
Figura 39. Diagrama de Piper para muestras de invierno.	73
Figura 40. Diagrama de Piper para muestras de verano.	74
Figura 41. Gráfica de la conductividad de los manantiales contra la concentración de los iones.	74
Figura 42. Variación temporal de la precipitación y $\delta^{18}\text{O}$ en los tres totalizadores.	77
Figura 43. Recta Meteórica Local (RML) de la zona de estudio y Recta Meteórica Global (GMWL).	79
Figura 44. Relación isotópica de las muestras de agua de manantial (rombos celestes) y la RML.	81
Figura 45. Comparación de la variación temporal de los contenidos isotópicos del agua de precipitación y el agua de manantial.	82
Figura 46. Gráfica de la relación entre el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ y la altura.	83
Figura 47. Bloquediagrama 1 aproximación al modelo hidrogeológico conceptual.	85
Figura 48. Bloquediagrama 2 aproximación al modelo hidrogeológico conceptual.	86

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Figura 49. Peña Lisa (elipse roja), posible zona de recarga para los manantiales (M1, M3 y M4).

..... 87

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Resumen

TÍTULO: APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL PARA EL MUNICIPIO DE MÁLAGA SANTANDER: UN ESTUDIO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA E ISOTÓPICA DEL AGUA EN EL MUNICIPIO¹

AUTOR: CARLOS DAVID MESA GÓMEZ²

PALABRAS CLAVE: RECTA METEÓRICA LOCAL, AGUA SUBTERRÁNEA, ISOTOPIA, QUÍMICA DEL AGUA

DESCRIPCIÓN:

Con el fin de aportar al conocimiento del sistema subterráneo ubicado en el municipio de Málaga, se realizó una investigación geológica e hidrogeológica, que llevó a la construcción de un modelo conceptual preliminar de los flujos de agua por medio del estudio de las composiciones isotópicas del agua lluvia y agua de manantiales y de análisis hidroquímicos.

En la zona de estudio afloran depósitos coluviales y aluviales y rocas de las Formaciones Río Negro y, en su mayoría, Tibú-Mercedes. Los cuales conforman las unidades hidrogeológicas de acuíferos libres y acuitardos (para los depósitos), y un acuífero fracturado confinado localmente (para las Formaciones). Los análisis hidroquímicos arrojaron que las aguas subterráneas son de composición bicarbonatada cálcica, poco evolucionadas y con tiempo de residencia corto en el suelo.

Los resultados de las firmas isotópicas del agua de precipitación permitieron construir la Recta Meteórica Local (RML) y, junto con la composición isotópica del agua subterránea, se estableció la altura de la zona de recarga entre 3592.44 y 3684.11 msnm (para los manantiales M1, M3 y M4), y a 3236.98 msnm (para el manantial M2). Además, se pudo realizar una aproximación al modelo hidrogeológico conceptual para un entendimiento inicial del comportamiento que tienen los flujos subterráneos en su recorrido hasta su afloramiento. Los cuales se desplazan a través de fracturas en las formaciones rocosas, atravesando estructuras subterráneas como fallas y pliegues.

¹Trabajo de grado

²Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología UIS. Director: Ing. Luis Eduardo Moreno Torres, Codirectora: Geol. MSc. María Alejandra Cetina Tarazona.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Abstract

TITLE: APPROACH TO THE LOCAL METEORIC LINE FOR MÁLAGA TOWN
SANTANDER: A STUDY OF THE CHEMICAL AND ISOTOPICAL COMPOSITION OF
WATER IN THE TOWN¹

AUTHOR CARLOS DAVID MESA GÓMEZ²

KEY WORDS: LOCAL METEORIC LINE, GROUNDWATER, ISOTOPY, CHEMISTRY OF
WATER

DESCRIPTION:

In order to contribute to the knowledge of the underground system located in Malaga town, a geological and hydrogeological investigation was carried out, which led to the construction of a preliminary conceptual model of water flows through the study of the isotopic compositions of rain and spring water and hydrochemical analysis.

Colluvial and alluvial deposits and rocks from the Río Negro Formations and, for the most part, Tibu-Mercedes emerge in the study area. Which constitute the hydrogeological units of free aquifers and aquitards (for the deposits), and a locally confined fractured aquifer (for the Formations). The hydrochemical analysis showed that the groundwater has a calcium bicarbonate composition, little evolved and with a short residence time in the soil.

The results of the isotopic signatures of the precipitation water allowed the construction of the Local Meteoric Line (LML) and, together with the isotopic composition of the groundwater, the height of the recharge zone was established between 3592.44 and 3684.11 masl (for springs M1, M3 and M4), and at 3236.98 masl (for the M2 spring). In addition, an approach to the conceptual hydrogeological model could be carried out for an initial understanding of the behavior of underground flows on their way to their outcrop. Which move through fractures in rock formations, passing through underground structures such as faults and folds.

¹Bachelor thesis

²Faculty of Physicochemical Engineering, Geology UIS. Director: Ing. Luis Eduardo Moreno Torres, Codirector: Geol. MSc. María Alejandra Cetina Tarazona.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Introducción

A nivel global se ha presentado un aumento en el aprovechamiento de diferentes fuentes hídricas para abastecer a la creciente población, entre las cuales se destacan las aguas subterráneas. Estas han sido una alternativa para proveer el recurso tan necesitado. En el país se han realizado estudios hidrogeológicos regionales y de carácter local con escalas que varían entre 1:25.000 y 1:100.000. Con estos estudios se ha cubierto cerca del 15% de la superficie del territorio nacional en reconocidos ambientes sedimentarios (IDEAM, 2015).

A medida que avanza el tiempo cada vez hay mayor certeza del potencial hidrogeológico del país, con la división del territorio nacional en provincias hidrogeológicas y los sistemas acuíferos asociados a éstas; para los cuales se han establecido diferentes niveles de conocimiento, el cual ha ido avanzando gracias a la realización de diversos programas de investigación como el Estudio Nacional del Agua (por ejemplo IDEAM 2019), programas de trabajo conjunto con las Corporaciones Autónomas Regionales (CVC, Carsucre, Corpoguajira, Carder, entre otras) entidades estatales como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), etc, y universidades.

La gran mayoría de estos proyectos se han desarrollado en zonas prioritarias para explotación del recurso hídrico, como lo son los departamentos de Antioquia, La Guajira, Nariño, Cauca, Valle del Cauca, Boyacá, entre otros. Lo cual ha producido un gran avance en el conocimiento de los sistemas acuíferos presentes en esas zonas, pero dejando otras con un conocimiento muy básico o inexistente. En el municipio de Málaga no se han llevado a cabo estudios por parte de entidades públicas, sin embargo, se han desarrollado trabajos de grado que presentan evidencias de la existencia de un sistema.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Un estudio inicial utilizando la herramienta geoelectrica realizó un primer acercamiento al potencial hidrogeológico del municipio. El modelo geológico-geoelectrico permitió realizar la identificación de capas con vocación acuífera, diferenciando como la unidad con mayor potencial hidrogeológico al segmento calcáreo de la formación Tibú-Mercedes (Salamanca, 2017). Trabajos posteriores han permitido profundizar en la identificación del sistema hidrogeológico presente en el municipio, donde a partir de las características del subsuelo, bajo el casco urbano y su periferia, se determina la presencia de un acuífero confinado, aislado de la atmósfera (localmente) por una capa impermeable constituida por arcilla y limo, localizados en el eje del sinclinal de Málaga, bajo la zona urbana (Rincón-Jaimes, *et al.*, 2019).

Por otro lado, encima del sello del acuífero confinado localmente se considera la presencia de un acuífero libre constituido por depósitos aluviales y coluviales (Rincón, 2019). Los depósitos cuaternarios de tipo aluvial están compuestos por materiales finos, arenosos y lodosos, generalmente húmedos a saturados y distribuidos bajo el casco urbano del municipio de Málaga, en el sector central de la zona de trabajo, asociados a los dos principales drenajes de la región, las quebradas La magnolia y Chorrerón o Malagueña (Rincón, 2019). Por su parte los depósitos cuaternarios de tipo coluvial se encuentran integrados por materiales arcillosos, localizados sobre los extremos del área de estudio: costado norte, margen occidental y borde oriental (Rincón, 2019).

Se puede plantear entonces el aprovechar este recurso para abastecer a la población del municipio. Sin embargo, antes de considerar esto, se debe conocer cómo funciona el sistema acuífero y sus interacciones con el medio.

El objetivo del presente trabajo es aportar al entendimiento y conocimiento del sistema subterráneo a partir de la composición isotópica de las aguas lluvias y subterráneas que permita

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

estimar la zona de recarga, mediante la construcción de la recta meteórica local. Además de conocer la composición química del agua y los procesos geoquímicos que se presentan.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Obtener una aproximación a la recta meteórica local mediante la implementación de una red de monitoreo de isótopos estables (Deuterio y ^{18}O) de las aguas de precipitación y subterráneas, para el municipio de Málaga (Santander).

1.2. Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar la red de monitoreo para el muestreo de aguas de precipitación en la zona de estudio.
- Revisar y detallar la cartografía geológica del área de estudio a partir de interpretación de imágenes satelitales, información secundaria y observaciones en campo a escala **1:50000**.
- Proponer una aproximación al modelo hidrogeológico conceptual a partir de la geología, geomorfología e hidrografía de la zona de estudio.
- Caracterizar la composición de los isótopos estables (Deuterio y Oxígeno-18) de las aguas de precipitación durante un lapso de ocho meses, obteniendo una aproximación a la zona de recarga del sistema acuífero confinado.
- Caracterizar el agua subterránea de los cuatro manantiales más representativos a partir de la composición química e isotópica.
- Aportar al conocimiento de la evolución geoquímica de las aguas subterráneas del municipio mediante el desarrollo e interpretación de gráficos hidro-geológicos.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

2. Generalidades

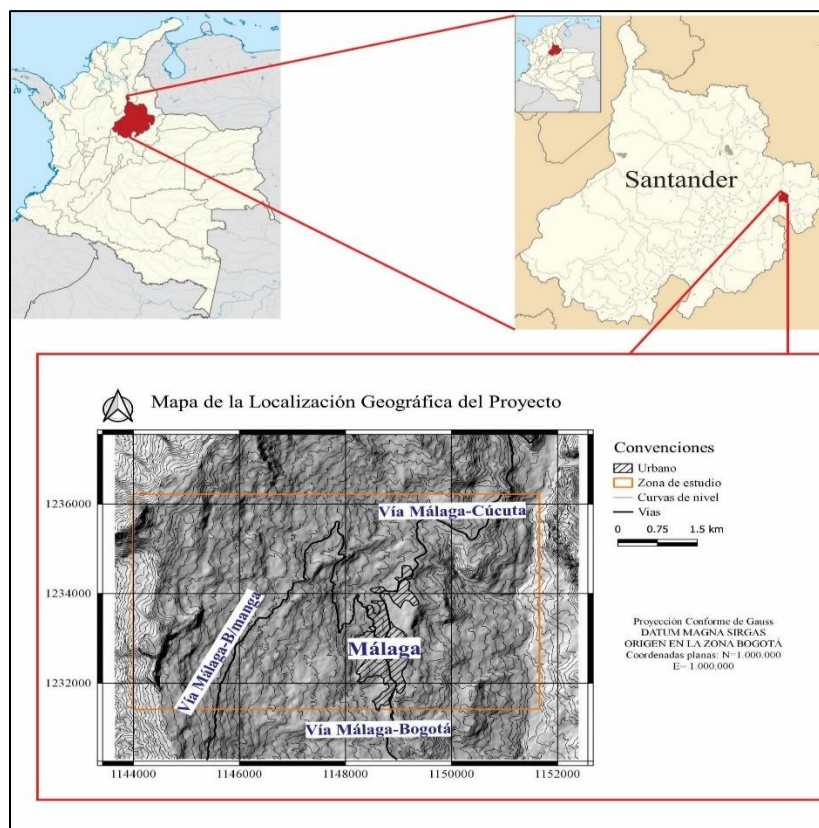
A continuación, se presentan las generalidades del proyecto de investigación, incluye la localización y metodología empleada.

2.1. Localización

La zona de estudio se encuentra ubicada en jurisdicción del municipio de Málaga, ubicado en el departamento de Santander (ver **Figura 1**), comprende un área de 25.86 Km². El municipio es la capital de la provincia García Rovira y se encuentra ubicado al sur oriente del departamento, a 120 Km de la ciudad de Bucaramanga.

Figura 1.

Localización del proyecto de investigación.

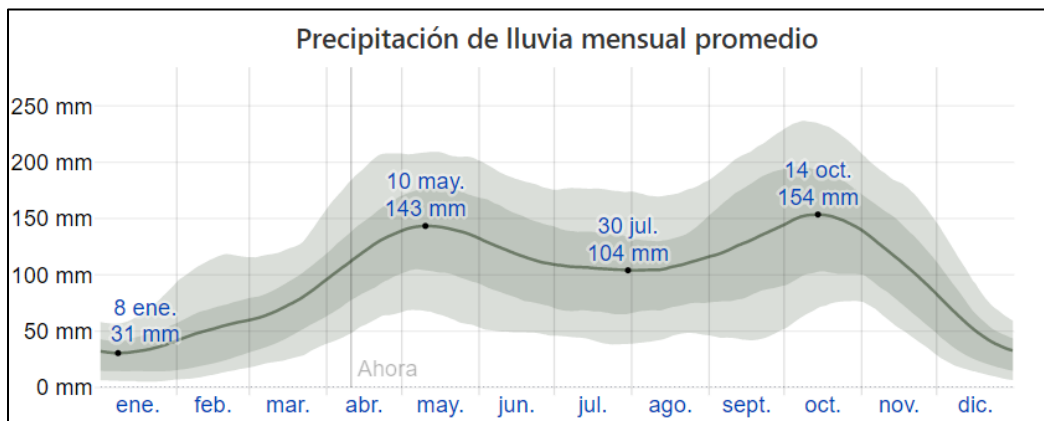


APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Cuenta con una altitud media de 2235 msnm y una temperatura de 19 °C, se caracteriza por presentar dos épocas de lluvia, teniendo sus picos en los meses de mayo y octubre, además de dos temporadas secas, con mínimos de precipitación en enero y julio (ver **Figura 2**), la línea sólida representa la precipitación promedio.

Figura 2.

Precipitación de lluvia mensual promedio del municipio de Málaga



Tomado de: <https://es.weatherspark.com/y/25290/Clima-promedio-en-M%C3%A1laga-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>.

El municipio de Málaga cuenta con una red hídrica perteneciente a la Subcuenca del Río Servitá, el cual fluye en dirección norte-sur y recibe los aportes de varias quebradas que fluyen en dirección Sureste. La mediana pluviosidad del municipio permite que todos los drenajes que conforman la red hídrica tengan flujos constantes e intermitentes (Alcaldía Municipal de Málaga, 2020).

La zona rural del municipio cuenta con una variación altitudinal, que va desde los 1600 a los 3200 msnm, caracterizada por un relieve de cordillera, con zonas de pendientes elevadas, divisorias de aguas colinas y escarpes.

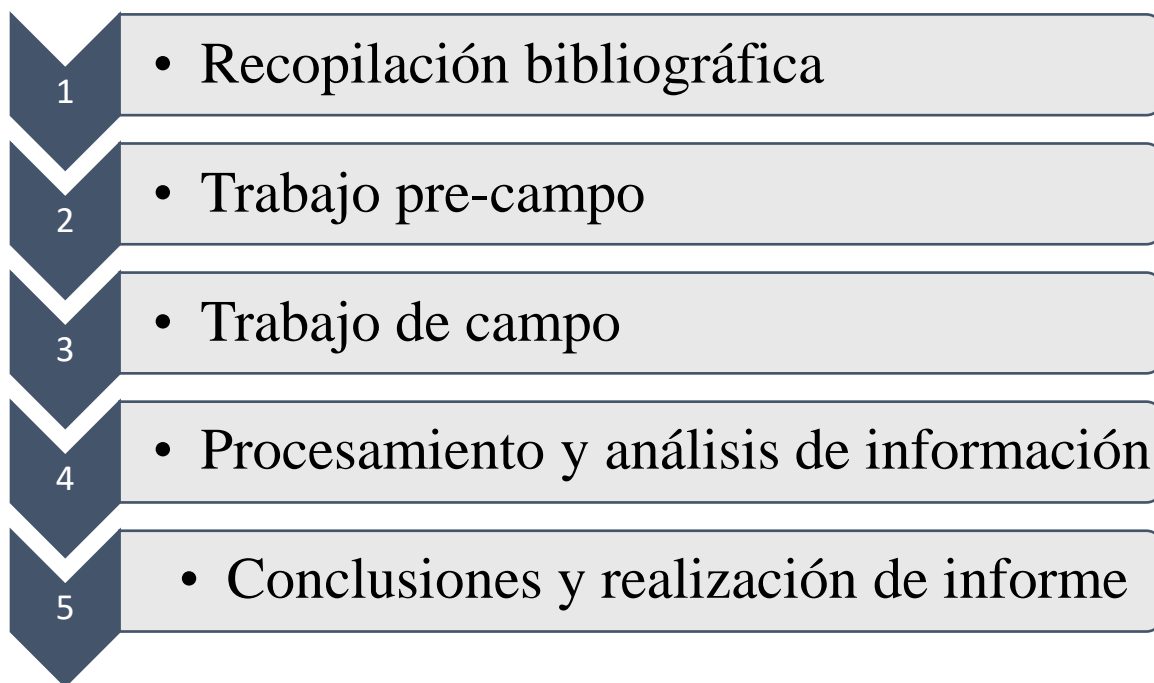
APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

2.2. Metodología

Se definen los pasos seguidos para la realización del trabajo de investigación y la consecución de los objetivos planteados (ver **Figura 3**), los cuales se dividen en 5 etapas: 1. Recopilación bibliográfica, 2. Trabajo pre-campo, 3. Trabajo de campo, 4. Procesamiento y análisis de información, 5. Conclusiones y realización de informe.

Figura 3.

Metodología empleada en el trabajo de investigación.



Recopilación bibliográfica

Esta etapa consistió en la consulta bibliográfica de información científica en diversas fuentes, sobre trabajos anteriores que se realizaron en la zona de estudio, en las áreas de geología, hidrogeología, geofísica y geomorfología.

En el contexto geológico se cuenta con la cartografía geológica de los trabajos de Vargas, *et al.*, (1981) y Cardozo, *et al.*, (2016). A nivel de hidrogeología y geofísica los trabajos de grado de

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Salamanca (2017) y Rincón (2019) proporcionan evidencias de la existencia de sistemas acuíferos en la zona, comprobadas mediante métodos geofísicos. Finalmente, trabajos de geomorfología como el realizado por el Servicio Geológico Colombiano y la Universidad Industrial de Santander (2014), suministran información de las diferentes geoformas presentadas en la zona.

Trabajo pre-campo

Durante esta etapa se realizó la digitalización de la información geológica presente en la plancha 136-Málaga del INGEOMINAS, compuesta por las litologías, contactos, estructuras y fallas presentes en la zona de estudio. Además de la interpretación del modelo digital de elevación (DEM), generado a partir de una imagen de radar del año 2011, tomada por el satélite ALOS mediante el sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar).

Esta imagen fue descargada desde la página Alaska Satellite Facility (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>) y cuenta con una resolución espacial de 12.5 [m]. A partir del DEM se elaboró el mapa de sombras de la zona de estudio que permitió observar el relieve presente en cada una de las litologías presentes y sus rasgos estructurales.

Trabajo de campo

Se divide en las siguientes fases:

Fase inicial

Se realizó un reconocimiento de la zona de estudio, sus principales vías y caminos de herradura para tener acceso a puntos de interés. Se seleccionaron los lugares de ubicación de los tres totalizadores para el muestreo del agua de precipitación (ver **Tabla 1** y **Figura 4**) y de los cuatro manantiales más representativos para toma de muestras (ver **Tabla 2** y **Figura 5**).

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Tabla 1.

Localización de los totalizadores

Totalizador	Coordenadas		Altura
	Norte	Este	
1	1233102.56	1151300.01	1655
2	1233090.68	1148820.98	2201
3	1233492.55	1144901.71	3170

Figura 4.

Totalizadores usados en el muestreo. A) y B) Armado de los totalizadores. C) y D) Instalación en los sitios elegidos.



Para la selección de los manantiales se tomó como base un inventario realizado por Cárdenas y Herrera (2018) en su trabajo de grado, además de información de residentes de la zona rural del municipio. Estos manantiales fueron seleccionados por su caudal.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

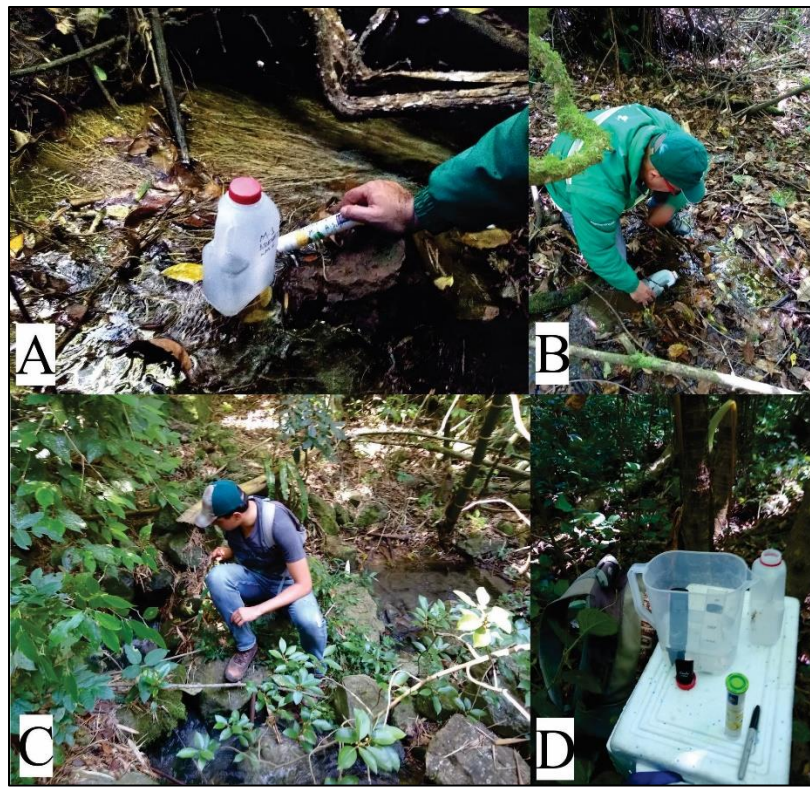
Tabla 2.

Localización de los manantiales seleccionados.

Código de manantial	Coordenadas		Altura	Código de muestras tomadas
	Norte	Este		
1	1235692.09	1147093.15	2682	M1-I, M1-V
2	1232080.46	1147128.44	2498	M2-I, M2-V
3	1234085.64	1147765.68	2410	M3-I, M3-V
4	1234836.06	1149902.34	2018	M4-I, M4-V

Figura 5.

Muestreo del agua de manantial. A), B) y C) Detalles del muestreo en los puntos elegidos. D) Medición de parámetros fisicoquímicos en campo.



Fase de cartografía geológica

Se realizó una campaña de campo destinada a la revisión y ajuste de la cartografía geológica existente, esta campaña tuvo una duración de 15 días.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Fase de campañas de muestreo

Se realizaron diferentes salidas de campo para el muestreo correspondiente a aguas de precipitación y subterráneas, a las cuales se les efectuaron posteriores análisis isotópicos e hidroquímicos. Los análisis isotópicos tuvieron lugar en el Laboratorio de Isótopos Estables LAMA de la Universidad de Montpellier en Francia usando un espectrómetro de masas radio isotopos ISOPRIME. En cuanto a los análisis hidroquímicos, fueron efectuados por el Laboratorio Químico de Consultas Industriales (LQCI) de la Universidad Industrial de Santander, por medio de métodos titrimétrico, turbidimétrico, espectrofotométrico y absorción atómica.

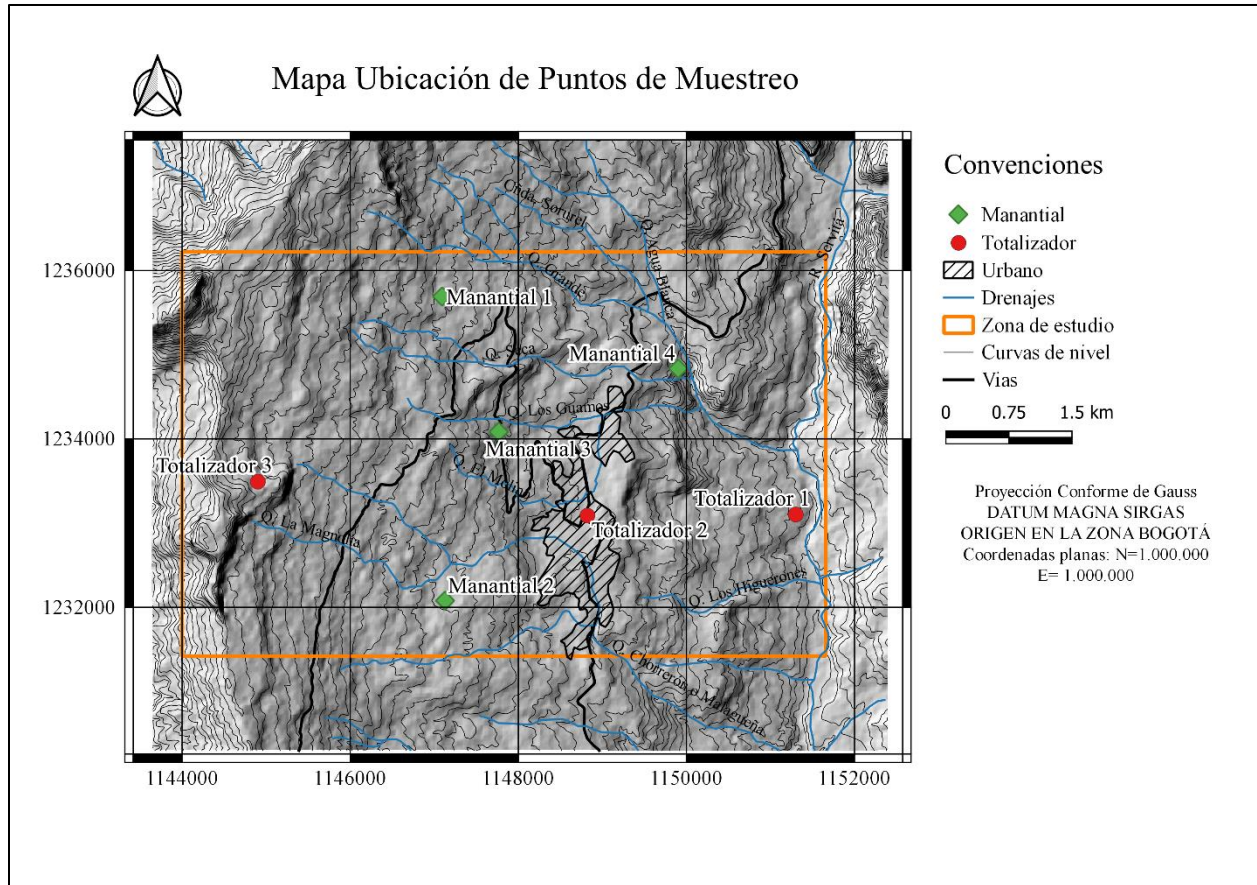
- Muestreo de agua de precipitación

Para la recolección de las muestras se instalaron en el mes de julio de 2019 tres totalizadores (recolectores) en diferentes puntos a lo largo de la zona de estudio (ver **Tabla 1** y **Figura 6**), el primero cerca al río Servitá en la vereda El Barzal, el segundo en el casco urbano del municipio y el tercero en la parte alta de la zona conocida como la Peña del Cabro. De estos recolectores se tomaron muestras compuestas (muestras del agua lluvia que cayó durante el mes), desde agosto del 2019 a marzo del 2020. Estas muestras fueron destinadas para análisis isotópicos con el fin de obtener una aproximación de la recta meteórica local. Para la toma de muestras se siguió el protocolo de muestreo que garantiza la validez de la muestra y está descrito en el trabajo de grado de Camacho y Guzmán (2005).

Figura 6.

Localización de los totalizadores y manantiales.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



- Muestreo de agua subterránea

Se realizaron dos campañas de recolección de estas muestras, una a final de la temporada de invierno y otra a final de la temporada de verano, en los meses de diciembre del 2019 y marzo del 2020, para realizar análisis hidroquímicos e isotópicos. Este muestreo siguió un protocolo para garantizar la correcta obtención de la muestra y su validez, siguiendo la norma NTC-ISO 5667-11 (1996). Adicionalmente, se realizaron mediciones de parámetros fisicoquímicos en campo (temperatura, CE, pH, STD) y el caudal de los manantiales. Los parámetros fisicoquímicos se midieron usando un medidor multiparámetro de temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (STD) marca HANNA. El caudal de los manantiales se midió por medio de aforos volumétricos.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Procesamiento y análisis de información

En esta etapa se efectuaron los procesamientos en diferentes softwares, enfocados en cada tarea. Para elaborar el modelo geológico se utilizó la cartografía preexistente, además de la interpretación de la imagen de radar ALOS PALSAR y las fotografías aéreas tomadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), las cuales se utilizaron también para la interpretación geomorfológica. La información cartográfica fue integrada en el sistema de información geográfica Q-GIS 3.6. La información isotópica fue procesada en Excel y los datos de análisis hidroquímicos en el programa Diagrammes.

Conclusiones y realización del informe

Corresponde a la interpretación de la información obtenida y produciendo como resultados la cartografía geológica ajustada, la aproximación a la recta meteórica local y a la altura de la zona de recarga del sistema acuífero y gráficos hidrogeológicos interpretados que permiten entender la evolución geoquímica del agua subterránea. Estos resultados permitieron generar conclusiones apropiadas y alcanzar los objetivos del presente trabajo de investigación, totalizándolo en el respectivo informe.

3. Marco Teórico

Es necesario conocer conceptos básicos relacionados con la hidrogeología y los isótopos estables, los cuales son expuestos a continuación.

La hidrogeología es la rama de la geología aplicada, dentro de la geodinámica externa, que estudia las aguas subterráneas en lo relacionado con su origen, su circulación, sus condicionamientos geológicos, su interacción con los suelos, rocas y humedales (freatogénicos);

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas) y su captación (Mijailov, 1985).

El ciclo hidrológico de la Tierra (ver **Figura 7**) es el mecanismo global que hace posible la transferencia de agua desde los océanos a la superficie y desde la superficie, o subsuperficie al subsuelo y a la atmósfera que envuelve nuestro planeta (IDEAM, 2015). Conforman este ciclo las variables de precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación y transpiración. Las cuales se pueden ver afectadas por actividades humanas tales como asentamientos, industrias u operaciones agrícolas.

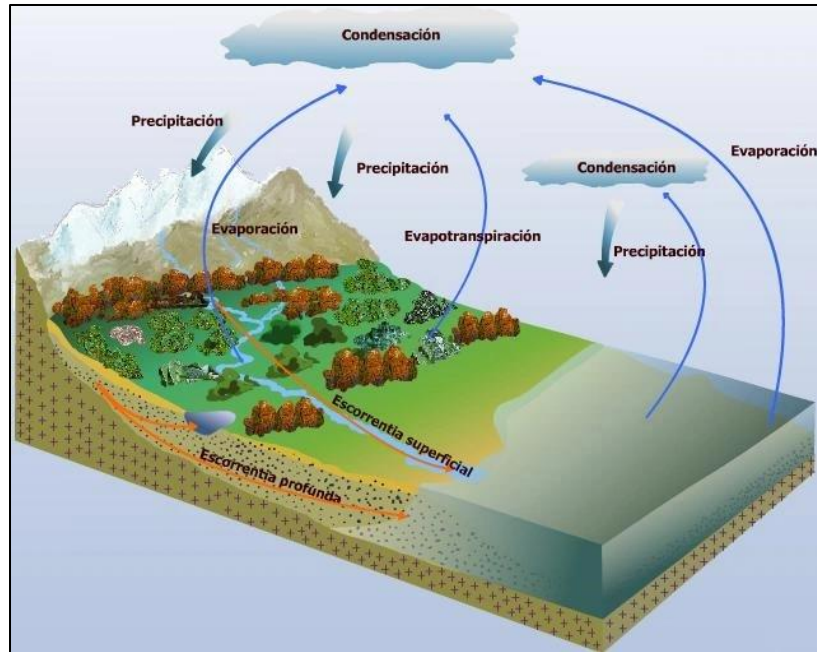
El agua de lluvia es la fuente de la mayoría del agua subterránea, su composición está determinada por la fuente del vapor de agua y los iones que ha adquirido (o perdido) en su viaje a través de la atmósfera (Appelo & Postma, 2005).

El agua subterránea tiene su origen en la lluvia, parte de la cual se infiltra directamente a través del suelo, o desde ríos y lagos, por grietas y poros de las unidades roca-sedimento, hasta alcanzar un nivel impermeable que no la deja descender más para luego continuar un tránsito lateral (IDEAM, 2015).

Figura 7.

Ciclo hidrológico.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



Tomado de: <https://geologicalmanblog.wordpress.com/2015/10/11/ciencia-ciclo-agua/>.

Es denominada agua subterránea a toda la acumulación de agua que se mueve y se almacena a través de la zona saturada del subsuelo, sin incluirse aquellos depósitos transitorios de agua acumulados por altas infiltraciones; la presencia de estas aguas está relacionada altamente con la litología y propiedades de la roca caja o almacenadora donde el agua es almacenada en sus poros, fisuras, fracturas y diaclasas de esta litología donde, por diferencia de presión hidrostática, permanece en constante movimiento (Vélez-Otálvaro, 1999).

Las unidades que almacenan esta agua y la pueden ceder son denominados acuíferos. Se define como un acuífero el cual contiene agua en cantidades apreciables y que, además, permite la circulación de esta (Vélez-Otálvaro, 1999). Es aquel estrato o formación geológica que, permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicas apreciables para subvenir a sus necesidades (IDEAM, 2015).

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Los parámetros que controlan el almacenamiento y movimiento de las aguas subterráneas son la permeabilidad y porosidad. Por lo cual unas unidades litológicas serán más efectivas al momento de almacenar y transmitir agua que otras.

Según Vélez-Otálvaro (1999) los acuíferos pueden ser fácilmente encontrados en estas cuatro formaciones geológicas:

- Depósitos de gravas y arenas no consolidados, intercalados con estratos de limos o arcillas, con pocas unidades de carbonatos.
- Formaciones consolidadas y semi confinadas de conglomerados y areniscas, que tienen permeabilidad y porosidad primarias y secundarias.
- Formaciones carbonatadas que tienen fisuras y fracturas, que pueden ensancharse por disolución.
- Rocas ígneas y metamórficas con fisuras y fracturas, que permiten el almacenamiento y circulación del agua.

Además de la porosidad y permeabilidad, algunas estructuras como plegamientos, fallas y discontinuidades tienen influencia en la acumulación y movimiento del agua subterránea. Las fallas pequeñas afectan muy poco el movimiento del agua subterránea a menos que se encuentren interconectadas o que conecten con un medio de mayor permeabilidad en la dirección de flujo.

Además de los acuíferos existen otras unidades hidrogeológicas con características particulares como los acuicludos (arcillas), acuitardos y acuífugos (rocas ígneas o metamórficas sanas). Un acuicludo se define como aquella formación geológica que, conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación, no la transmite y por tanto su explotación no es posible; el acuitardo hace referencia a la existencia de numerosas formaciones geológicas que conteniendo cantidades

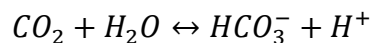
APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

apreciables de agua, su transmisión es muy lenta; por último, los acuifugos son aquellas formaciones geológicas que no poseen la capacidad de almacenar ni transmitir agua (Custodio & Llamas, 2001).

A lo largo de su recorrido desde que se infiltra hasta que vuelve a salir a superficie, el agua experimenta reacciones químicas con los componentes de la roca que la almacena. La habilidad del agua subterránea para disolver los minerales de las rocas y redistribuir grandes cantidades de masa disuelta tiene importantes aplicaciones en la génesis química, economía de la mineralización y trabajo geológico en general (Domenico, 1987).

El agua lluvia posee algunas sustancias adquiridas en la atmósfera las cuales posterior a su infiltración sufre una serie de reacciones químicas, intercambio iónico y procesos redox, que van evolucionando a medida que se mueve por el cuerpo acuífero.

Esta etapa de infiltración es muy importante para la composición química del agua, debido a que, con frecuencia, la adquiere en los primeros metros de recorrido, aunque después se mueva varios kilómetros en el subsuelo. Esto se debe principalmente a que el agua en el suelo tiene un carácter ácido, por la reacción del CO_2 (alojado en los poros del suelo) con el agua (Appelo & Postma, 2005):



Desde que el agua ingresa al sistema acuífero hasta que sale a través de un río, captación o manantial, pueden transcurrir días, años o hasta miles de años, y el recorrido puede variar de unos metros a varios kilómetros. A causa de esto, la evolución química del agua dependerá de los minerales con los que entre en contacto y la duración que tenga.

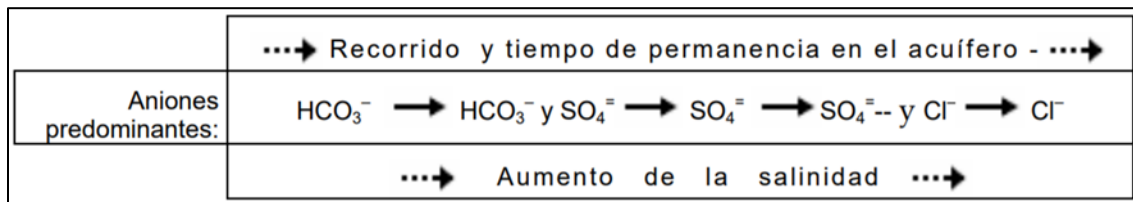
APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Lo anterior se da debido al hecho de que hay unos minerales que presentan mayor solubilidad que otros, por ejemplo, los carbonatos son menos solubles que los sulfatos, que, a su vez, son menos solubles que los cloruros. No obstante, la solubilidad no solo depende del tipo de mineral, sino también de las condiciones de pH y temperatura del agua.

A pesar de que las reacciones y procesos químicos que se desarrollan son muy variados, se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son, generalmente, bicarbonatadas. Luego predomina el sulfato, y las aguas más salinas son cloruradas. Esta evolución se denomina secuencia de Chebotarev (ver **Figura 8**).

Figura 8.

Secuencia de Chebotarev.



Tomado de Sánchez (2012).

Es por ello por lo que, en un proceso de precipitación, primero se observaran los carbonatos, por tener menor solubilidad que los sulfatos, que son los segundos en precipitar, mientras que los últimos en precipitar son los cloruros, por su elevada solubilidad (Sánchez, 2012).

La existencia de una especie carbonatada ya sea carbonato (CO_3^{2-}) o bicarbonato (HCO_3^-), dependerá del pH que tenga el agua. Si el pH está entre 6.3 y 10.3, habrá bicarbonato, si es mayor a 10.3 habrá carbonato en el agua subterránea.

Un análisis químico estándar de aguas subterráneas comprenderá como mínimo valores de temperatura, CE, pH, los cuatro cationes principales (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ y K^+) y los cuatro aniones

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

principales (SO_4^{-2} , HCO_3^- o CO_3^{-2} , NO_3^- y Cl^-), en otras palabras, once variables (Appelo & Postma, 2005).

En función de la composición de las aguas de formación surgen diferentes clasificaciones que permiten caracterizarlas basándose en la sumatoria de las concentraciones de los cationes y aniones mayoritarios. Entre estas se pueden mencionar los métodos desarrollados por Piper (1944) y Stiff (1951).

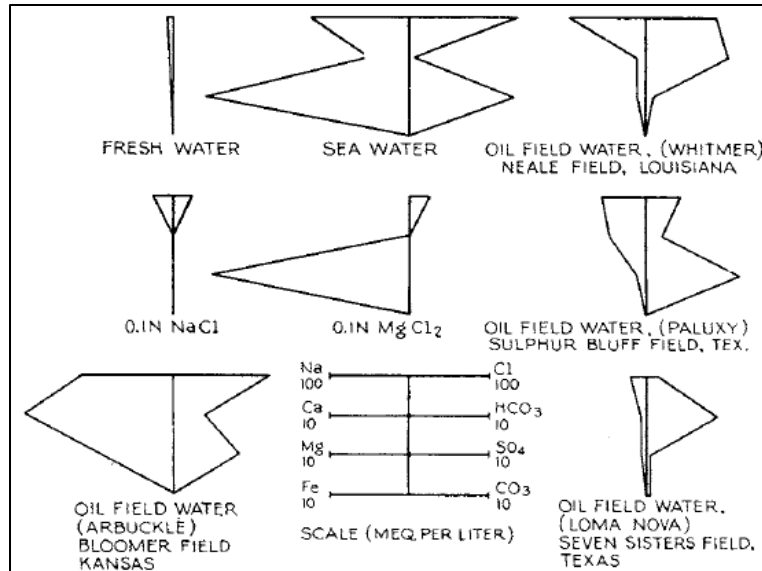
La clasificación de Stiff (1951) está desarrollada mediante la elaboración de gráficas, que son generadas partiendo de las concentraciones de los cationes y aniones mayoritarios tomando segmentos proporcionales a cada ion sobre semirectas paralelas, al unir cada extremo, se construyen polígonos característicos para determinadas figuras de Stiff (ver **Figura 9**), éstas se expresan en miliequivalentes y permiten diferenciar entre aguas de origen meteórico, marino o mezcla de ambas.

Las líneas horizontales, extendiéndose a la derecha y a la izquierda desde una línea vertical en cero, forman el gráfico. Los iones positivos son graficados a la izquierda, mientras que los iones negativos son graficados a la izquierda (Stiff, 1951).

Figura 9.

Ejemplos de figuras de Stiff.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



Tomado de Stiff (1951).

Por su parte, el sistema de clasificación de Piper (1944) proporciona una interpretación gráfica, que permite identificar los tipos de agua presentes en el acuífero, así como también procesos de mezclas entre diferentes cuerpos de agua (ver **Figura 10**).

En el campo triangular en la parte inferior izquierda, los valores de porcentaje de reacción de los tres grupos catiónicos se representan como un único punto de acuerdo con las coordenadas trilineales convencionales. Los grupos de aniones se grafican igualmente en el campo triangular en la esquina inferior derecha (Piper, 1944).

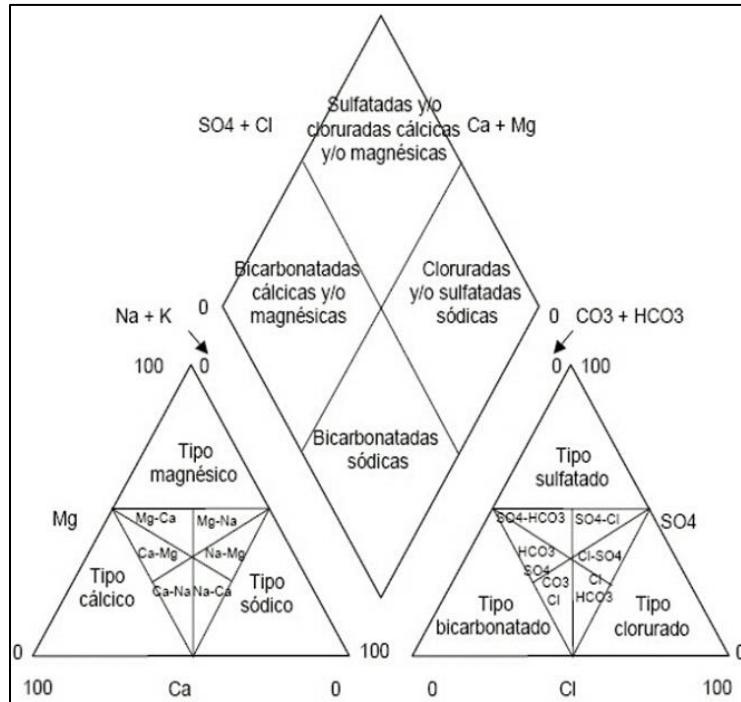
Los datos de los diagramas triangulares se proyectan en un rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. El diagrama central a menudo forma la base de la terminología para describir la composición química del agua subterránea (Appelo & Postma, 2005).

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

El gráfico representa el carácter químico esencial de un agua según la concentración relativa de sus constituyentes, pero no según las concentraciones absolutas. Debido a que las concentraciones absolutas suelen ser decisivas en muchos problemas de interpretación (Piper, 1944).

Figura 10.

Diagrama de Piper.



Además de tener una composición química característica, las aguas subterráneas poseen también una firma isotópica particular, dada por las aguas de precipitación, la cual provee información de sobre diversos procesos ocurridos en la atmósfera o en el subsuelo. Los isótopos ambientales, junto con la geoquímica e hidrogeología física contribuyen significativamente al estudio de los sistemas hídricos siendo la composición de los isótopos estables del agua de gran importancia ya que, al modificarse por procesos meteóricos, las aguas de recarga tendrán una firma isotópica característica (Clark & Fritz, 1997).

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

La molécula de interés en este tipo de análisis es la del agua, cuya fórmula química es H_2O . Los átomos que la componen pueden presentar un distinto número de neutrones, dando lugar a moléculas compuestas por diferentes tipos de isótopos.

La representación de un elemento químico X es A_ZX , donde Z es el número atómico y A el número de masa. El hidrógeno posee tres isótopos, 1_1H , llamado Protio, 2_1H , llamado Deuterio (D) y 3_1H , llamado Tritio (T) (Gómez-Isidro, 2014). Los dos primeros isótopos son estables, pero el Tritio es radiactivo, de los isótopos estables el Deuterio es considerado el isótopo pesado del hidrógeno. El oxígeno también posee tres isótopos, pero todos ellos son estables, se trata del ${}^{16}_8O$, ${}^{17}_8O$, ${}^{18}_8O$.

Existen isótopos estables, que no cambian su concentración con el paso del tiempo, y radioactivos, los cuales sí cambian su concentración. Cada uno de estos isótopos posee aplicaciones características. Según Mook (2002) se pueden distinguir tres tipos de diferentes aplicaciones:

- Se pueden utilizar isótopos estables y radioactivos como trazadores, para detectar un cuerpo de agua o una cierta cantidad de agua; un buen ejemplo es el fenómeno de separación de los isótopos pesados (el 2H estable, deuterio, o el ${}^{18}O$ estable) respecto de los isótopos más abundantes (1H y ${}^{16}O$, respectivamente) que se obtiene del agua de lluvia durante las tormentas intensas. Esto permite seguir el agua de lluvia a través de la escorrentía superficial.
- A menudo, durante el tránsito de compuestos, como el agua y el dióxido de carbono, de una fase a otra, el cociente de concentraciones de los isótopos varía. Este fenómeno recibe el nombre de fraccionamiento isotópico. Recíprocamente, la observación de diferencias en

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

los cocientes de concentración, especialmente en el caso de los isótopos estables, informa sobre ciertos procesos geoquímico e hidrológicos que acontecen.

- La desintegración radioactiva ofrece la posibilidad de determinar las edades, siempre que se cumplan ciertas condiciones.

Uno de los procesos más importantes que sufren los isótopos es el de fraccionamiento.

Esto puede ocurrir como un cambio en la composición isotópica mediante la transición de un componente de un estado a otro (agua líquida a vapor de agua) o mediante su transformación en otro compuesto (dióxido de carbono en carbono orgánico) (Mook, 2002). Este proceso es particularmente importante, ya que en el ciclo hidrológico el agua se transforma cambiando de estado, en sus diferentes fases y se distribuye en sus diversos componentes.

Los dos factores principales que controlan el carácter isotópico de la precipitación en un lugar determinado son la temperatura de condensación de la precipitación y el grado de lluvia fuera de la masa de aire (la proporción de vapor de agua que ya se ha condensado en precipitación comparada con la cantidad inicial de vapor de agua en la masa de aire) (Kendall & Doctor, 2003).

Además de esto, es conocido que los contenidos de los isótopos pesados del oxígeno e hidrogeno decrecen a medida que se incrementa la altitud. Esto es atribuido a la progresiva condensación del vapor atmosférico y la precipitación de la fase condensada, que tiene lugar cuando las masas de aire suben por las laderas de las altas montañas y se enfrían como consecuencia de la expansión adiabática (Gonfiantini *et al.*, 2001)

A medida que la temperatura de las nubes disminuye y la condensación se mantiene, la lluvia adquiere una composición isotópica controlada por el fraccionamiento que ocurre en el equilibrio. Craig (1961) analizó, mediante un espectrómetro de masas, unas 400 muestras de agua de ríos,

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

lagos y precipitaciones para establecer la naturaleza exacta de la relación isotópica en aguas meteóricas.

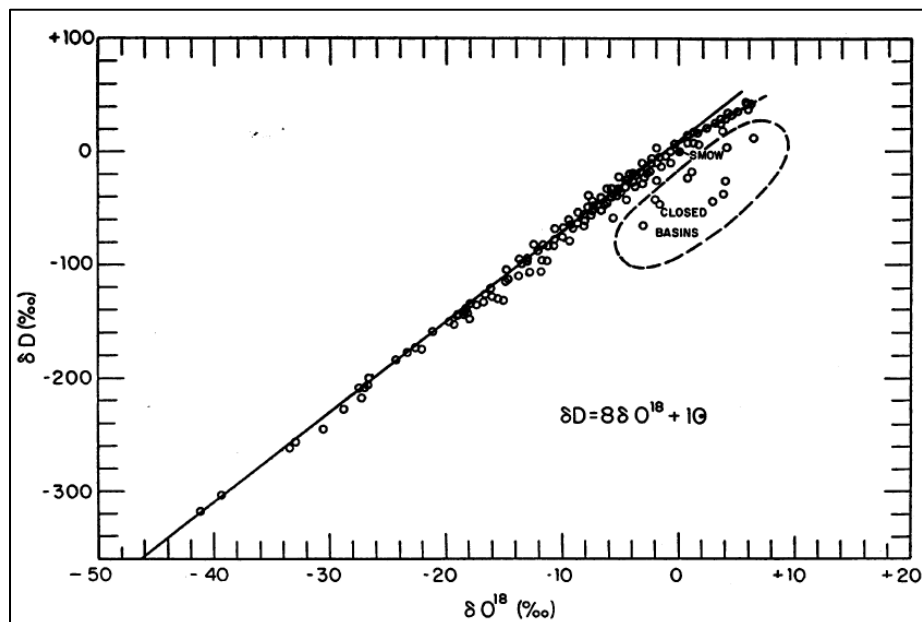
La concentración isotópica de Deuterio y Oxígeno 18 de las muestras fue graficada (**Figura 11**), utilizando una notación δ :

$$\delta = \left[\left(\frac{R}{R'} \right) - 1 \right] * 1000$$

Donde R es una relación isotópica y R' es la relación isotópica en el "agua oceánica media estándar" (SMOW) definida en relación con el estándar isotópico de agua de la Oficina Nacional de Normas (ahora el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología).

Figura 11.

Variaciones de deuterio y oxígeno 18 en ríos, lagos, lluvia y nieve.



Tomado de Craig (1961).

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

La recta que se observa en la **Figura 11** corresponde a la ecuación: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$. Se considera que se ajusta adecuadamente a los datos, a excepción de las aguas de cuencas cerradas en las que la evaporación es un factor dominante que rige la relación isotópica (Craig, 1961).

A esta recta se le conoce como **Recta Meteórica Mundial**, sin embargo, existen variaciones locales de latitud, altitud, temperatura, cantidad de precipitación y estaciones, que hacen que cada lugar presente modificaciones a esta recta por el comportamiento particular de los isótopos en esa zona determinada, para entender este comportamiento se construye la **Recta Meteórica Local**.

El trazado del agua subterránea mediante isótopos ambientales ofrece información única y suplementaria sobre el origen y movimiento del agua subterránea y sus constituyentes disueltos; además permite realizar una evaluación cuantitativa de la mezcla, y de otros procesos físicos tales como evaporación y el intercambio isotópico de los sistemas geotérmicos (Mook, 2002).

Dado que los valores $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de precipitación que contribuyen a la recarga del acuífero dependen en gran medida de la temperatura y la humedad del medio ambiente, estos valores δ generalmente se conservan en el subsuelo; los valores δ de las aguas subterráneas profundas reflejan las condiciones climáticas pasadas bajo las cuales la recarga tuvo lugar (Kendall & Doctor, 2003).

4. Marco Geológico

Seguidamente se expone el conocimiento que se tiene acerca de la zona de estudio centrándose en las áreas de geología e hidrogeología.

4.1. Geología Regional

La zona de estudio se encuentra ubicada en el Macizo de Santander, en la Cordillera Oriental de los Andes colombianos. A nivel de departamento se encuentra en el Bloque Cucutilla (**Figura 12**),

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

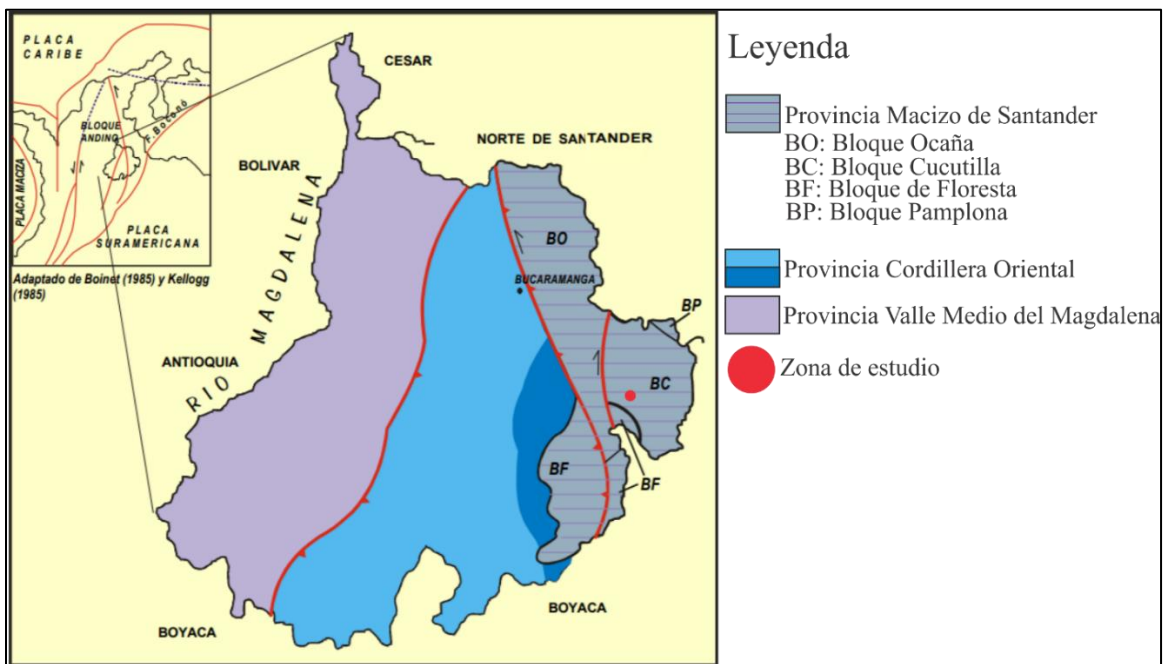
este bloque se caracteriza por un sistema de fallamiento en bloques pequeños, separados por fallas inversas con inclinación principalmente hacia el occidente y por anticlinales y sinclinales estrechos truncados por el fallamiento en dirección SE-NW (Royero & Clavijo, 2001).

La historia geológica de esta zona presenta una alta complejidad. Durante el jurásico, la parte oriental de Colombia se vio afectada por eventos extensionales que dieron lugar a la formación de grabens (Toussaint & Restrepo, 1994).

Durante este período extensivo se dio la depositación Jurásica y Cretácica de diferentes unidades, las cuales se caracterizan por presentar litologías calcáreas durante el Cretácico, depositadas en un ambiente marino somero, estas unidades calcáreas son las más abundantes en los alrededores del municipio de Málaga, además de los depósitos aluviales del cuaternario.

Figura 12.

Ubicación de la zona en un contexto geológico regional.



Tomado y modificado de Royero & Clavijo (2001).

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

En la cartografía geológica oficial (Vargas, *et al.*, 1981) se observa que en la mayoría de la zona se presentan rocas cretácicas, además de depósitos cuaternarios. Las unidades cretácicas están compuestas por la Formación Río Negro, representadas por un conjunto muy variable de lutitas oscuras, areniscas y conglomerados, y la Formación Tibú-Mercedes, compuesta de litologías arenosas, calizas fosilíferas, calizas arenosas, lutitas oscuras micáceas y carbonosas.

La Formación Río Negro en el área de Málaga-Molagavita-Miranda está representada por un conjunto muy variable de lutitas oscuras, areniscas cuarcíticas y conglomerados (Vargas, *et al.*, 1981). Al este del Río Servitá la Formación Río Negro parece no existir, al menos como un nivel cartografiable (Vargas, *et al.*, 1981).

Las formaciones Tibú y Mercedes fueron designadas por el río Tibú y el Valle Mercedes, del área de la concesión Barco en el Cuadrángulo F-13 (Notestein, Hubman, & Bowler, 1944). Allí el Tibú se caracteriza por presentar hacia la base areniscas guijosas de grano grueso, encima de estas hay caliza fosilífera densa y gris con unas pocas capas de shale, mientras que el Mercedes consiste en intercalación de caliza, shale y arenisca (Ward, *et al.*, 1973).

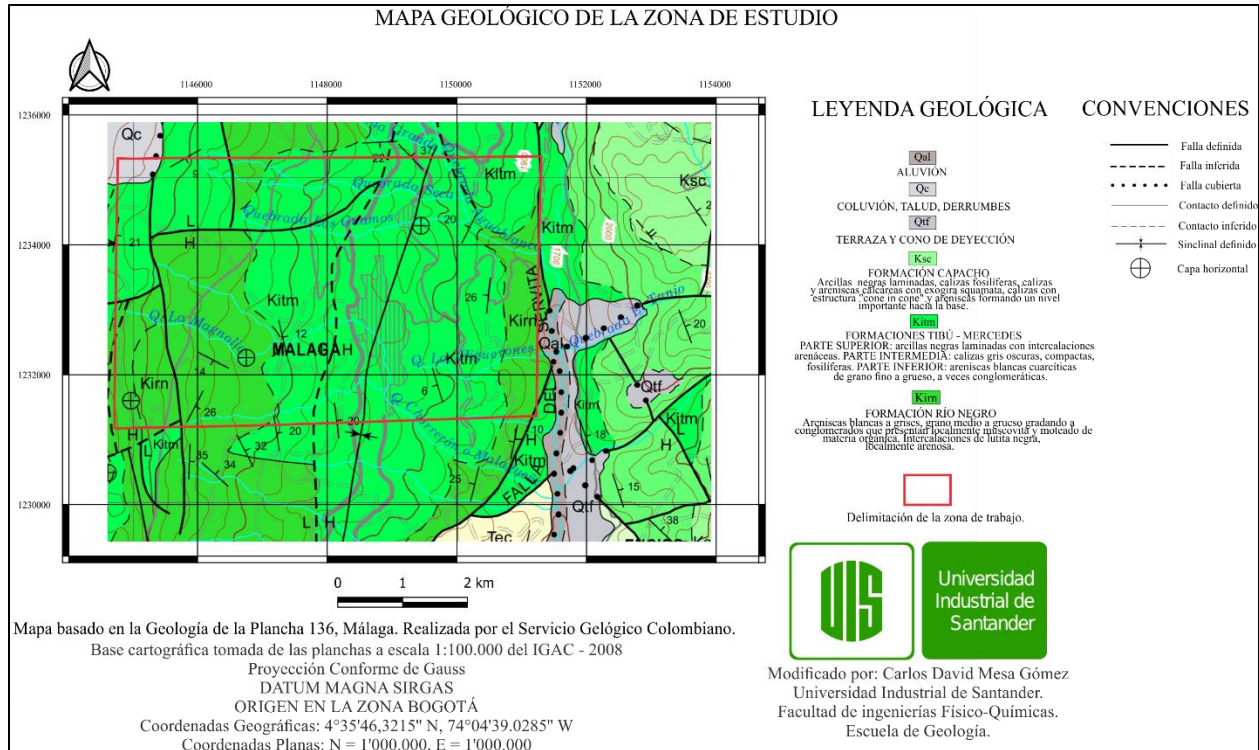
Los depósitos cuaternarios se componen de coluviones, taludes y derrumbes, compuestos por fragmentos angulares de roca, y depósitos aluviales, ubicados en los valles de ríos actuales y quebradas mayores (Vargas, *et al.*, 1981). Las unidades descritas anteriormente se aprecian en la

Figura 13.

Figura 13.

Cartografía oficial de la zona de estudio. Málaga, Santander.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



Tomado de la Plancha 136 del Servicio Geológico Colombiano (anteriormente INGEOMINAS 1984).

Durante el Oligoceno ocurre un evento de inversión tectónica, en el que el régimen extensivo pasa a ser compresivo. No se sabe con exactitud el momento inicial de la exhumación de la Cordillera Oriental, aunque los resultados del seguimiento de fisión sugieren que fue activa a principios del Mioceno, pero pudo darse desde el Oligoceno (Mora, *et al.*, 2010)

Esta compleja evolución geológica afectó a las formaciones que iban siendo depositadas en la zona, generando múltiples estructuras de falla, lineamientos, sinclinales y anticlinales. Muchas de estas estructuras son inferidas, debido al grado de erosión en la zona que hace difícil su identificación exacta.

4.2. Geología Estructural

En la zona donde se encuentra el Municipio de Málaga corresponde a un sinclinal, se extiende de manera casi oblicua con dirección de norte a sur; al oeste limita rocas de la Formación Floresta

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

con rocas metamórficas pre-devónicas y el Batolito de Santa Bárbara y al este por la Falla de Servitá (Ward, *et al.*, 1973)

Vargas, *et al.*, (1981) dice que la Falla de Servitá se extiende de norte a sur, en la parte norte de la falla es bastante rectilínea y tiene un gran salto litológico al este con rocas del Paleógeno y al oeste con rocas del Jurásico.

El área se encuentra en general bastante fracturada predominando fallas inversas de alto ángulo con dirección N-S mientras las fracturas transversales son de tipo normal (tomado de Vargas, *et al.*, 1981).

Adicionalmente el área del municipio de Málaga cuenta con 8 fallas locales de las cuales solo 3 están identificadas y tienen nombre por parte del servicio geológico colombiano (SGC), el resto cuentan con el nombre de la zona donde se encuentra (EOT Málaga, 2003).

4.3. Geomorfología

Se obtuvo información del trabajo realizado en convenio con la Universidad Industrial de Santander (UIS) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el año 2014, en el cual se realizó el mapa geomorfológico de la plancha 136-Málaga para aplicarlo a movimientos en masa escala 1:100000.

La plancha 136, que comprende parte de los departamentos de Santander y Boyacá, se encuentra ubicada en la geomorfoestructura denominada Sistema Orogénico Andino, el cual corresponde a un cinturón plegado y fallado, en donde se agrupan características tectónicas regionales (UIS; SGC, 2014).

En general, en la zona de interés predominan las geoformas de origen morfoestructural, que se originan por la expresión morfológica y la acción de las diferentes fallas encontradas entre las que

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

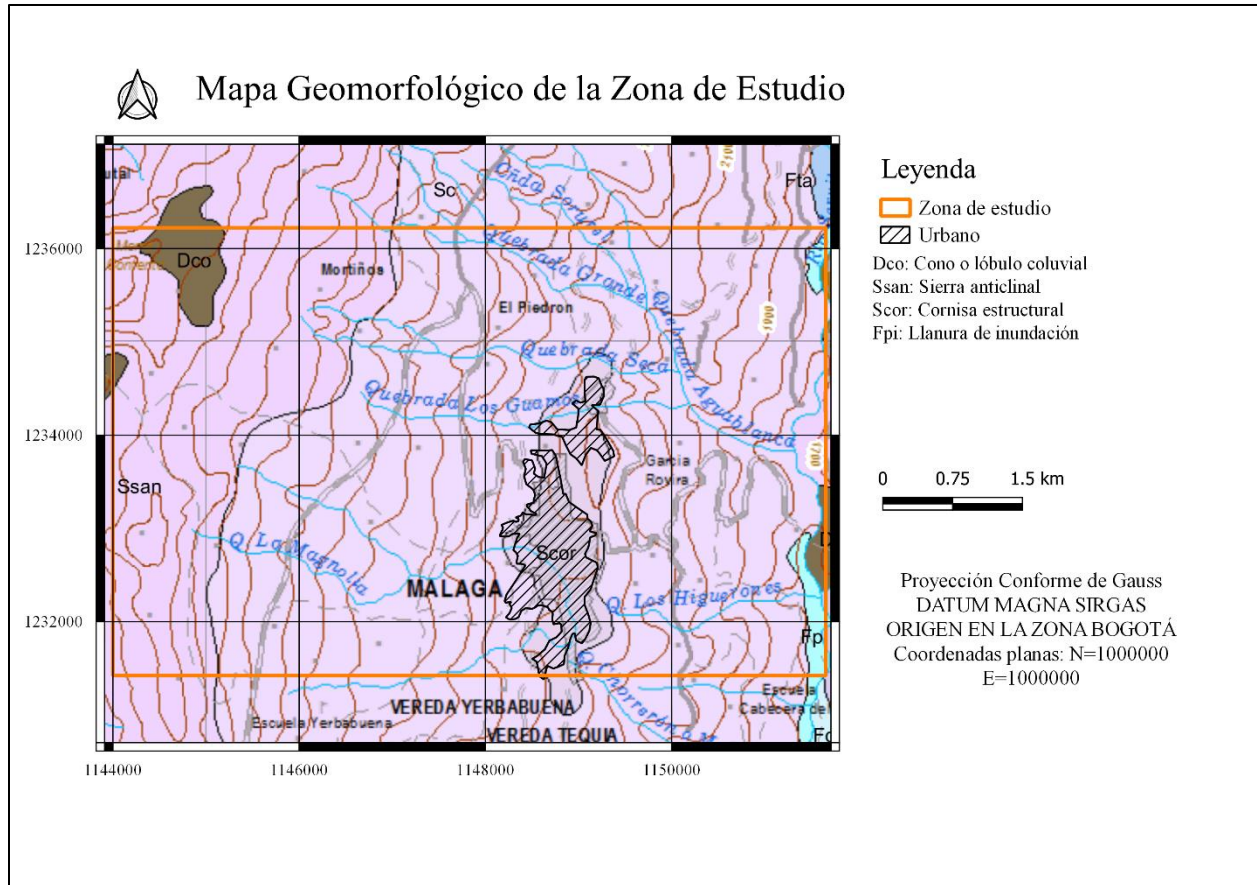
destacan el Sistema de Fallas de Bucaramanga y la Falla de Servitá. En segundo lugar, se encuentran las geoformas que se originan gracias a procesos denudativos, en donde la ubicación geográfica de la zona y sus características climáticas, e incluso la intervención humana juegan un papel importante (UIS; SGC, 2014).

La zona de estudio se encuentra ubicada en una geoforma de carácter denudacional y dos de carácter estructural, producto de la escala del trabajo (**Figura 14**). Teniendo en cuenta las características del relieve observado en campo se evidencian procesos de erosión y denudación, haciendo que los afloramientos rocosos sean escasos.

Figura 14.

Mapa geomorfológico de la zona de estudio.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



Tomado del Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en masa Plancha 136 Málaga, realizado por la UIS y el SGC (2014).

En la **Figura 14** se observa que las geomorfos que entran en la zona de estudio corresponden a Dco, Ssan y Scor. La correspondiente a Dco se trata de un ambiente denudacional y corresponde a un cono o lóbulo coluvial y de soliflucción, originada por procesos de transporte y depositación de materiales sobre las laderas (UIS; SGC, 2014).

La correspondiente a Ssan se trata de un ambiente estructural y corresponde a una sierra anticlinal, mientras que Scor corresponde a una cornisa estructural, se trata de una saliente estructural de forma tabular que se presenta en forma de “repisas” en laderas compuestas por

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

estratos cuyo buzamiento va en sentido contrario a la dirección de la pendiente (UIS; SGC, 2014). La correspondiente a Fli trata de un plano o llanura de inundación.

En la zona del casco urbano se encuentran áreas agradacionales, representadas por los depósitos coluviales y aluviales acumulados en la zona.

5. Resultados

A continuación, se exponen los resultados obtenidos a partir del procesamiento y análisis de la información referente a la geología, composición hidroquímica e isotópica.

5.1. Ajuste de la cartografía geológica

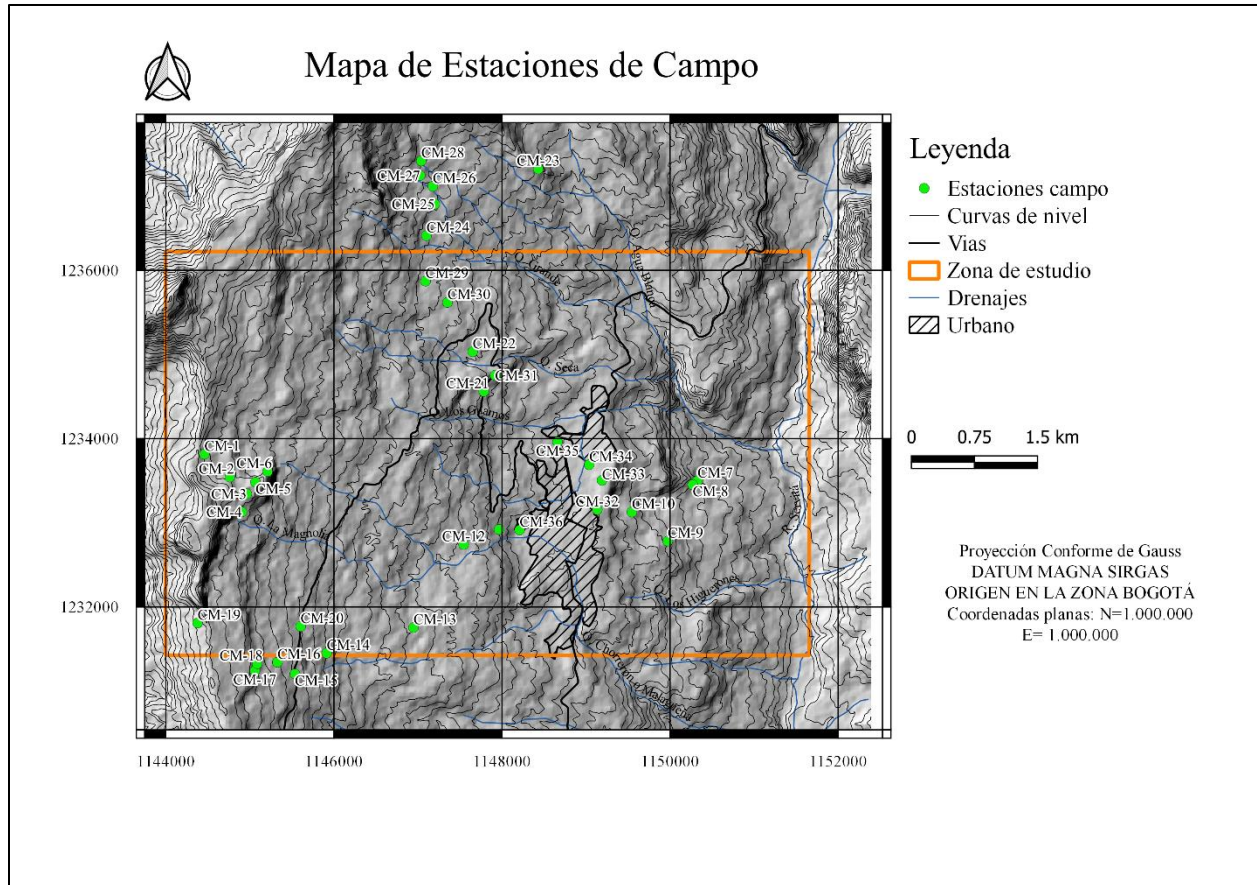
Como se mencionó anteriormente en la metodología, se realizó una campaña de campo con el fin de realizar ajuste a la cartografía geológica preexistente en la zona. Esta campaña tuvo una duración de 15 días y consistió en la descripción de la litología presente en los afloramientos, identificación de estructuras y toma de datos estructurales en la medida en que fue posible. Debido a que la zona presenta escasos afloramientos y alto desarrollo de suelo y cobertura vegetal.

En la **Figura 15** se pueden apreciar las estaciones realizadas durante la campaña. Se identificaron las siguientes litologías presentes en un total de 36 estaciones de campo.

Figura 15.

Mapa de las estaciones de campo.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



5.1.1. Litología

Formación Río Negro (Kirn)

La formación Río Negro está compuesta por areniscas cuarcíticas de grano fino a medio alternando con lodolitas negras y lodolitas micáceas con delgadas intercalaciones de areniscas de grano fino en la base de la formación, además de areniscas de grano medio a grueso y conglomerados cuarcíticos con cemento calcáreo y ferruginoso, con algunas intercalaciones de lodolitas en el tope de la secuencia (Fabre, 1981).

En la plancha 136-II (ubicada hacia la parte oriental de la zona de estudio), aflora solo el segmento superior de la Formación Río Negro, constituido por capas delgadas, levemente plegadas de lodolitas laminada, con presencia de micas de color gris oscuro, intercaladas a la base del

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

afloramiento con capas de areniscas de grano fino a medio, moderadamente calibradas, con cemento silíceo, clasificándose composicionalmente como cuarzoarenita con presencia de micas y óxidos de hierro, de color gris medio (Cardozo *et al.*, 2016).

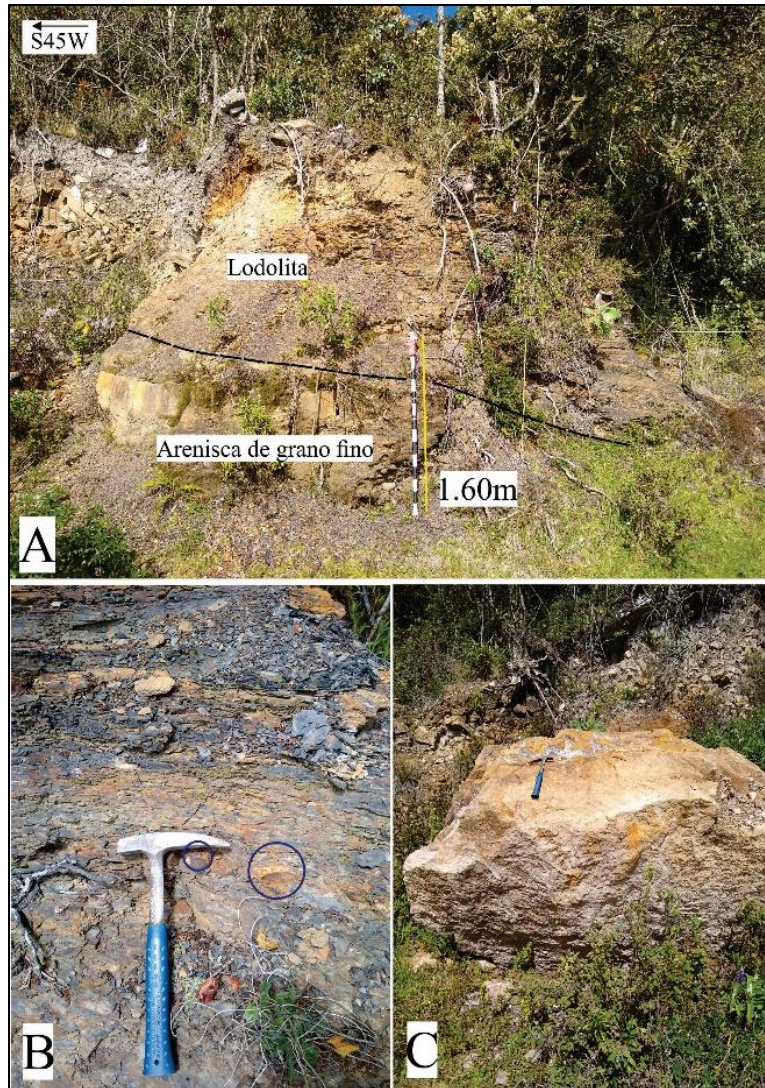
Según Fabre (1981), la formación data del Valanginiano-Hauteriviano, hace 139 a 132 millones de años.

En campo fueron identificados afloramientos de esta formación, compuestos por niveles de arenisca de grano fino con matriz lodosa no calcárea y niveles lodosos con contenido de micas y con oxidación presente (ver **Figura 16**).

Figura 16.

Afloramiento de la Fm. Río Negro. A) Contacto entre la lodolita y la arenisca de grano fino. B) Detalle de la lodolita con nódulos de hierro (círculos azules) y oxidación. C) Bloque de arenisca a lado derecho del afloramiento. Imágenes de la estación CM-1.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

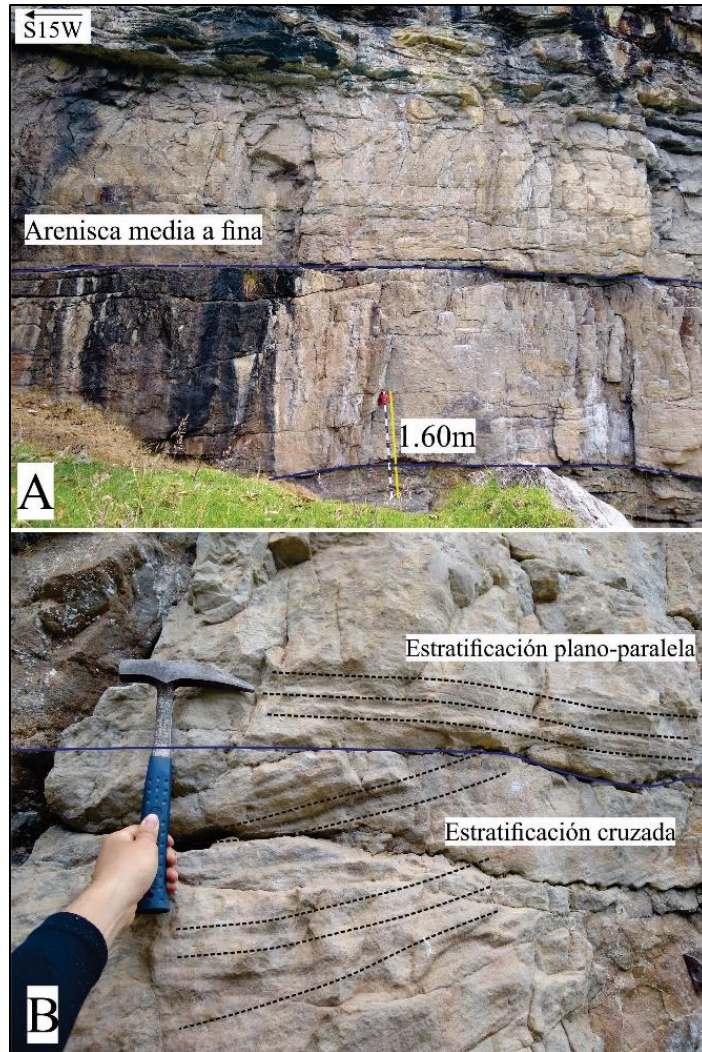


Otros afloramientos estaban compuestos por arenisca de grano medio a fino con estratificación plano-paralela hacia el tope y cruzada hacia la base (ver **Figura 17**).

Figura 17.

Afloramiento de la Fm. Río Negro. A) Escarpe de arenisca de grano medio a fino. B) Estratificación plano-paralela en el tope y cruzada hacia la base. Imágenes de la estación CM-18.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



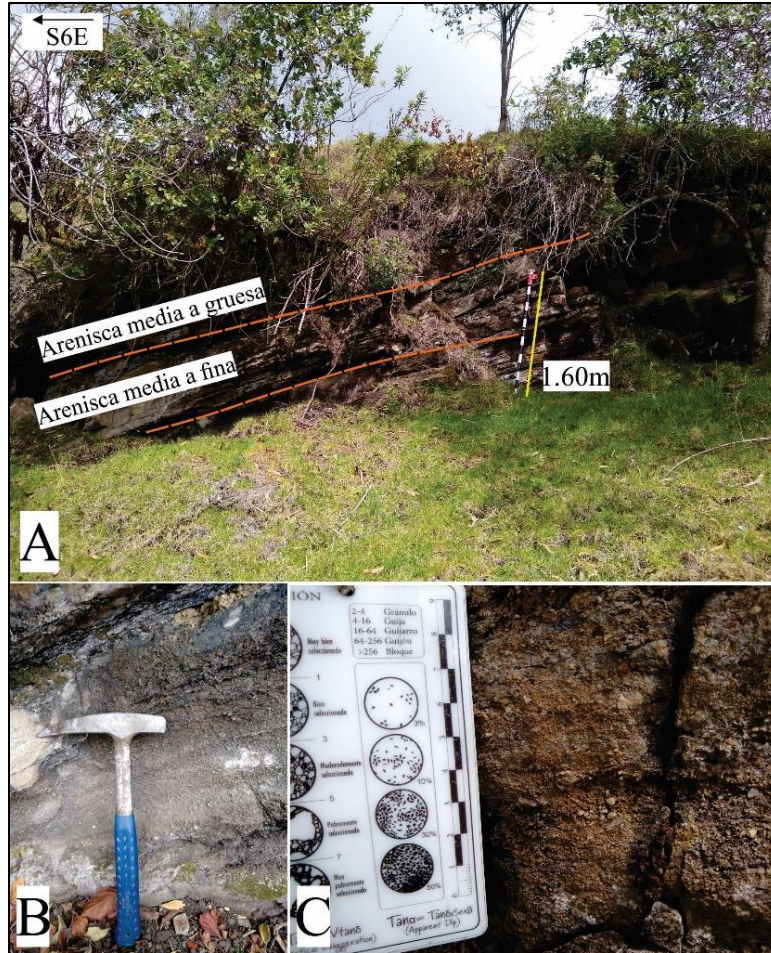
Además de areniscas de grano medio a grueso con presencia de gránulos de 4 [mm] de diámetro intercaladas con areniscas de grano medio a fino, las dos presentan cemento calcáreo (ver **Figura 18**).

Se destaca el grado de meteorización que exhiben los afloramientos, así como el desarrollo de vegetación sobre ellos, muchos otros pudieron haber desaparecido debido a la erosión.

Figura 18.

Afloramiento de la Fm. Río Negro. A) Arenisca de grano medio a grueso con gránulos suprayaciendo a una arenisca de grano medio a fino. B) y C) Detalle de la arenisca de grano medio a grueso con gránulos. Imágenes de la estación CM-24.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



Formación Tibú-Mercedes (Kitm)

Anteriormente esta formación no era conocida como tal, fueron consideradas originalmente por Notestein *et al.* (1944) como miembros de la Formación Uribante. Hasta que Ward *et al.* (1973) eleva al rango de Grupo la Formación Uribante y al de Formaciones a los miembros Tibú, Mercedes y Aguardiente; cartografía en la parte Oriental del cuadrángulo H-13 los afloramientos de las Formaciones Tibú y Mercedes bajo el nombre de Tibú-Mercedes.

El Tibú consta de areniscas guijosas de grano grueso en la base, caliza fosilífera densa y gris con unas capas de lutita y areniscas de grano fino en la mitad inferior. La Formación Mercedes

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

consiste en intercalaciones de caliza, lutitas oscuras a negras, micáceas y carbonosas y areniscas grises de grano fino a medio, localmente muy calcáreas (Vargas *et al.*, 1981).

En el área de la Plancha 136-II (ubicada hacia la parte oriental de la zona de estudio), la Formación Tibú-Mercedes presenta dos segmentos: un segmento inferior calcáreo, que consta de calizas que varían de tipo mudstone a packstone, intercaladas con niveles de calizas fosilíferas, areniscas calcáreas y arcillolitas; y un segmento superior arenoso, que consta de areniscas de grano fino a muy fino, de color gris medio a oscuro, intercalada con arcillolitas y limolitas de color gris oscuro a negro, con presencia de mica y óxidos de hierro y niveles calcáreos (Cardozo *et al.*, 2016).

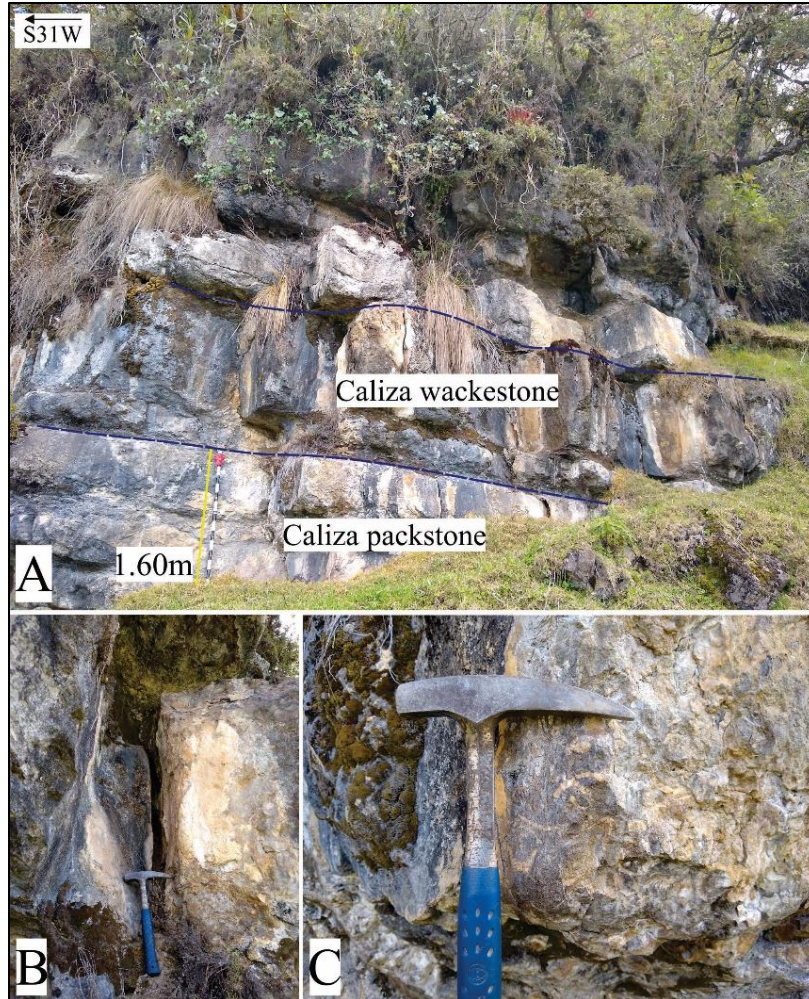
Según Fabre (1981), corresponde a una edad del Aptiano superior a Albiano inferior, hace 125-113 millones de años.

En campo fueron identificados afloramientos de esta formación, en su mayoría muy diaclasados, con presencia de conchas grandes de bivalvos desarticulados, bajo la lupa se observa un poco de cemento esparítico, la matriz de la roca efervesce en contacto con el ácido (ácido clorhídrico), se identifica como una caliza tipo packstone. Además, se observan niveles con contenido de conchas más pequeñas identificado como caliza tipo wackestone (ver **Figura 19**).

Figura 19.

Afloramiento de la Fm Tibú-Mercedes. A) Niveles de caliza wackestone y packstone. B) Detalle de las diaclasas profundas del afloramiento. C) Detalle de la caliza tipo packstone, donde se aprecian las conchas. Imágenes de la estación CM-4.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

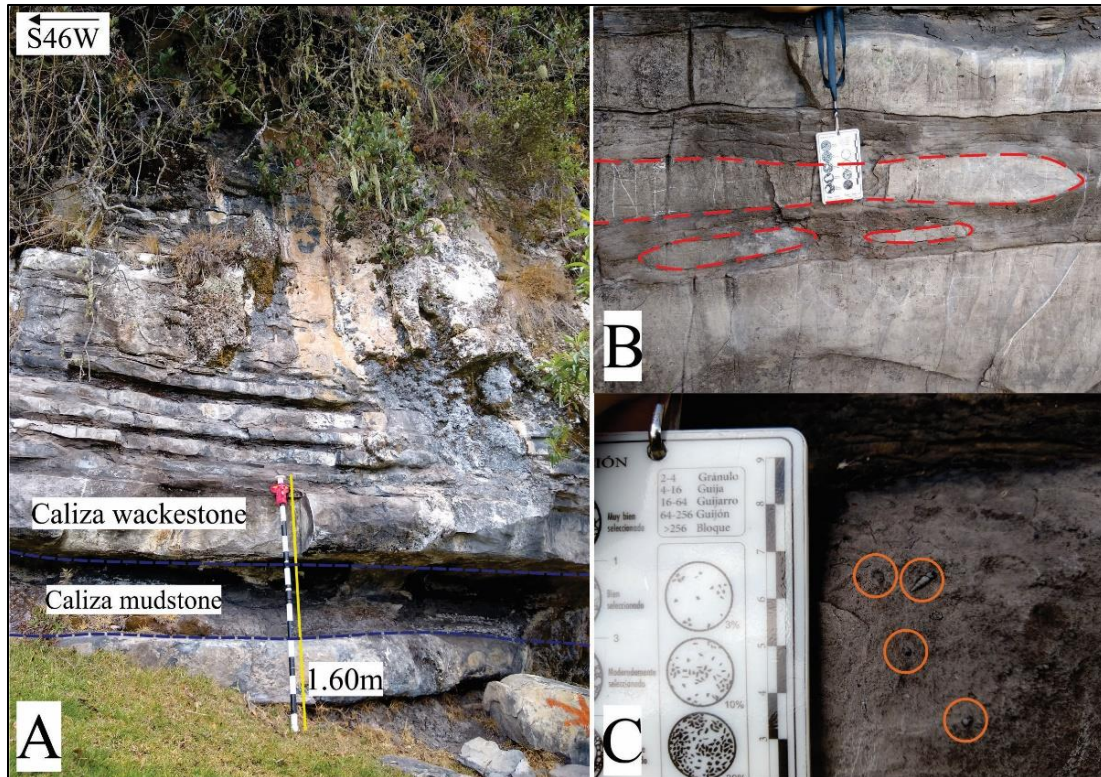


Se observan también afloramientos de roca de tonalidad gris clara, sin contenido de cemento esparítico, conteniendo pequeños fósiles de bivalvos y foraminíferos en una matriz tamaño lodo calcárea, identificada como caliza tipo wackestone. Intercalada con niveles más oscuros de roca con ausencia de fósiles, sin cemento esparítico, la cual reacciona a la exposición al ácido, identificada como caliza tipo mudstone (ver **Figura 20**).

Figura 20.

Afloramiento de la Fm Tibú-Mercedes. A) Intercalaciones de caliza tipo wackestone y mudstone. B) Nódulos calcáreos en la caliza tipo mudstone (línea roja punteada). C) Detalle de la caliza tipo wackestone con fósiles (círculos naranjas). Imágenes de la estación CM-6.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



Además, algunos afloramientos presentan venas rellenas de calcita, la roca presenta poco contenido de conchas y fósiles, además de una matriz tamaño lodo, calcárea, identificada como caliza tipo wackestone (ver **Figura 21**).

Figura 21.

Afloramiento de la Fm Tibú-Mercedes. A) Caliza tipo wackestone. B) Detalle de las venas rellenas de calcita. Imágenes de la estación CM-23.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



Depósitos coluviales, de talud y derrumbes (Qc)

Los depósitos coluviales corresponden a materiales depositados por la gravedad sobre las laderas, provenientes de movimientos en masa antiguos y/o recientes; dentro de este tipo de depósitos se incluyen los Talus y Derrubios (Cardozo *et al.*, 2016).

Como su nombre lo indica consisten en depósitos aluviales conteniendo fragmentos angulares de roca e incluyen depósitos de talud, derrubios y material de avalancha (Vargas *et al.*, 1981). Este tipo de depósitos es muy abundante en toda la zona de estudio, incluso en el casco urbano.

Se identificaron depósitos con bloques angulares compuestos por areniscas de grano fino a medio-grueso y calizas tipo packstone (ver **Figura 22**).

Figura 22.

Depósito coluvial ubicado hacia la peña del cabro (parte oeste de la zona de estudio), los bloques se componen de arenisca y caliza. Imagen de la estación CM-3.

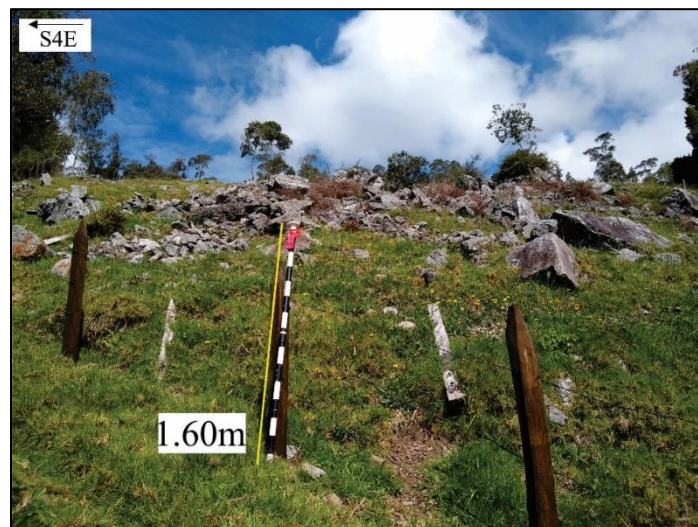
APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



Además de depósitos compuestos solo por bloques de litología calcárea como el mostrado en la **Figura 23**.

Figura 23.

Depósito coluvial ubicado en un sendero que termina en el km 10 de la vía Málaga-Curos. Compuesto por bloques de caliza. Imagen de la estación CM-14.



APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Algunos de estos depósitos presentan movimientos que hacen necesario establecer obras civiles para controlar estos cuerpos, sobre todo en los alrededores de la vía principal Málaga-Curos (ver **Figura 24**).

Figura 24.

Depósito coluvial ubicado en el km 8 vía Málaga-Curos. Se observa la implementación de gaviones para impedir el movimiento del cuerpo (flechas naranjas). Imagen de la estación CM-20.



Estos depósitos se encuentran también en el casco urbano, evidenciando grandes bloques angulares dentro de una matriz más fina (ver **Figura 25 y 26**)

Figura 25.

Depósito coluvial ubicado en el aeropuerto. A) Bloques del depósito. B) Detalle de los bloques de caliza. Imagen de la estación CM-32.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

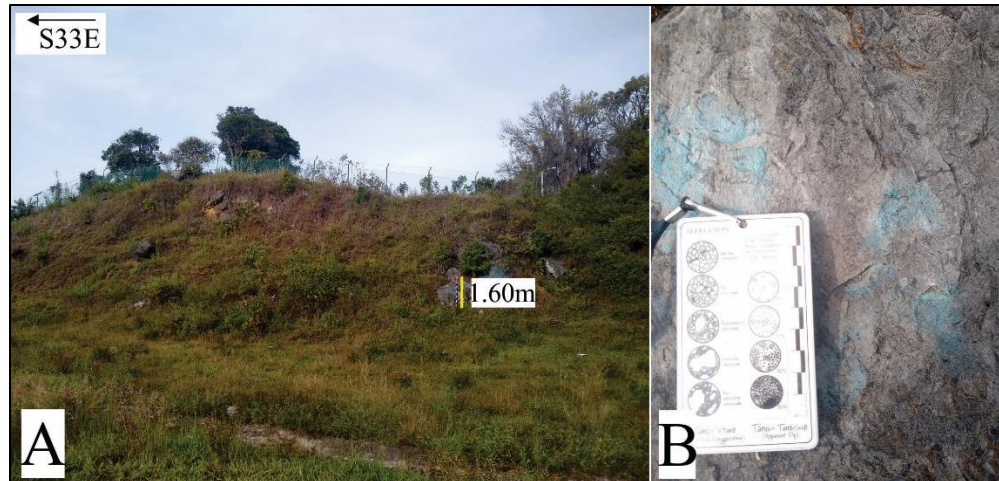
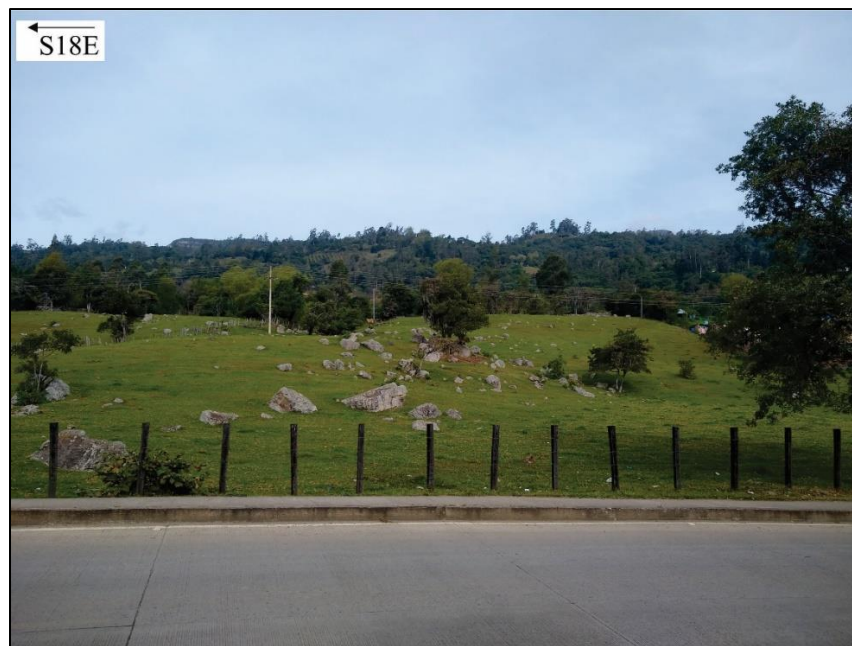


Figura 26.

Depósito coluvial ubicado en la vía Málaga-Cúcuta, alrededores del pueblo. Imagen de la estación CM-35.



5.1.2. Estructuras

En algunos afloramientos de la zona de estudio se pudieron identificar estructuras como fallas y pliegues, las cuales son testimonio de la historia evolutiva de la región y los procesos que tuvieron lugar allí.

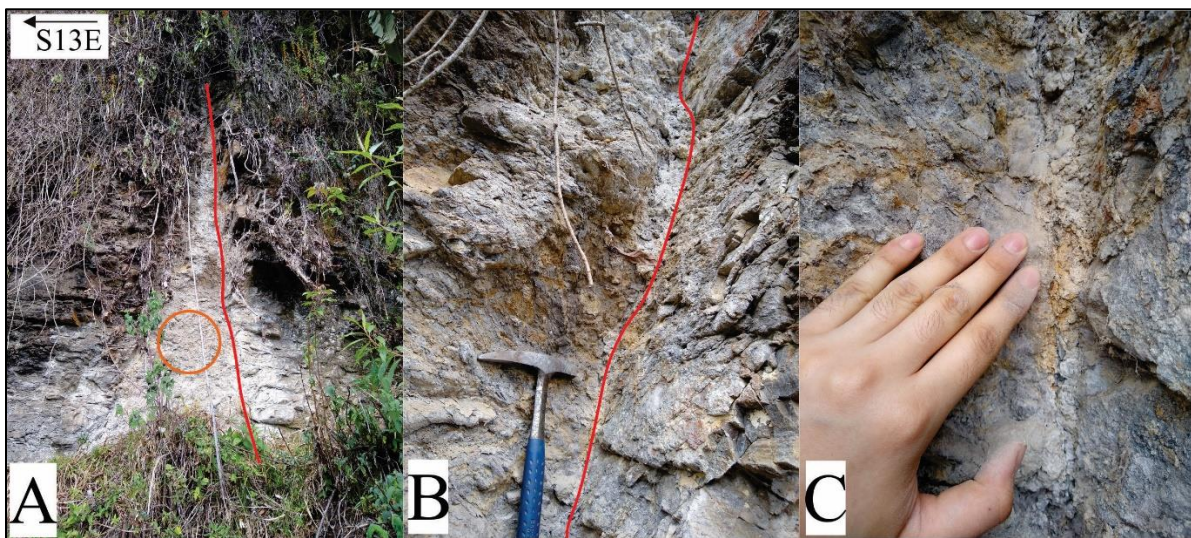
APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Fallas

Se encontraron fallas a nivel de afloramiento, en la **Figura 27** se observa una falla que ha causado una zona de desgaste en el afloramiento, la cual se encuentra meteorizada y compuesta por harina de falla. No fue posible tomar el dato estructural exacto ni establecer la cinemática.

Figura 27.

Falla de afloramiento. A) Se observa el plano de la falla (línea roja) y el material de harina de falla (círculo naranja). B) Detalle del plano de falla. C) Detalle del material tipo harina de falla. Imágenes de la estación CM-2.

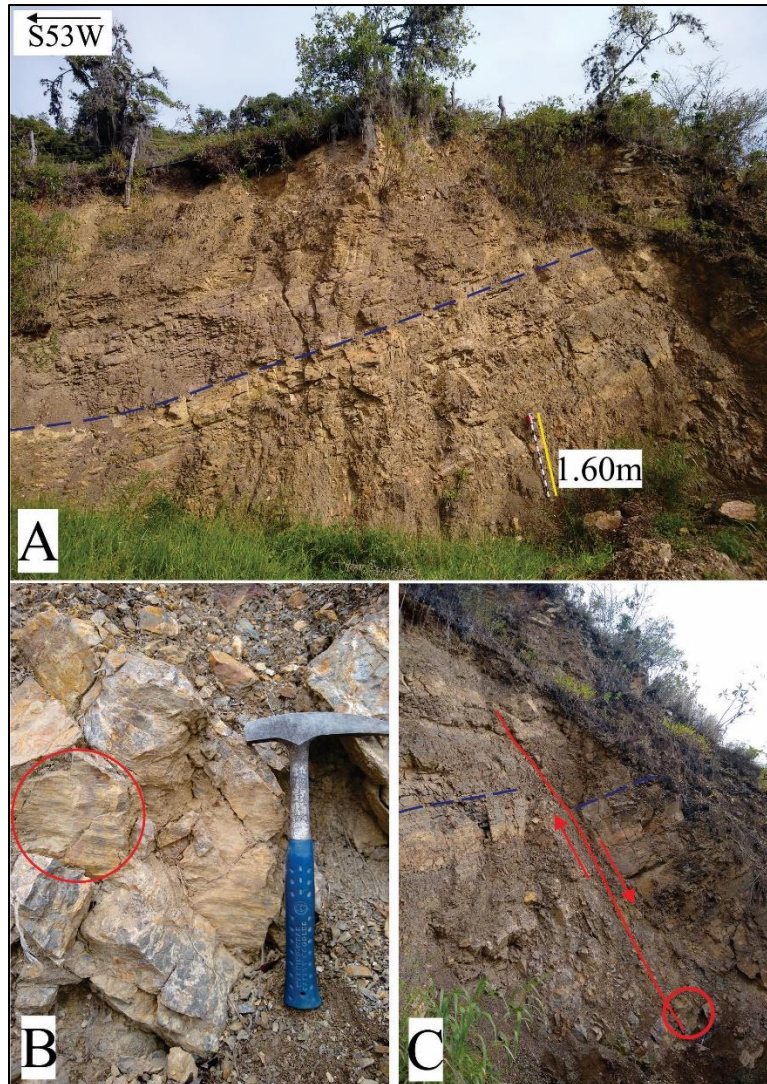


Hacia la parte este de la zona de estudio se localizaron también fallas de afloramiento. Se observa una estructura rectilínea que corta las litologías, el dato estructural del plano de esta falla es 264/73, medido en un plano estriado claramente marcado. Se estableció que es una falla normal debido a que los estratos en el bloque colgante bajan y a su alto ángulo de buzamiento (ver **Figura 28**).

Figura 28.

Falla de afloramiento. A) Afloramiento de la Fm. Tibú-Mercedes afectado por una falla. B) Plano estriado (círculo rojo). C) Detalle y cinemática de la falla (línea roja) con las direcciones de movimiento de los bloques (flechas rojas). Imágenes de la estación CM-7.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

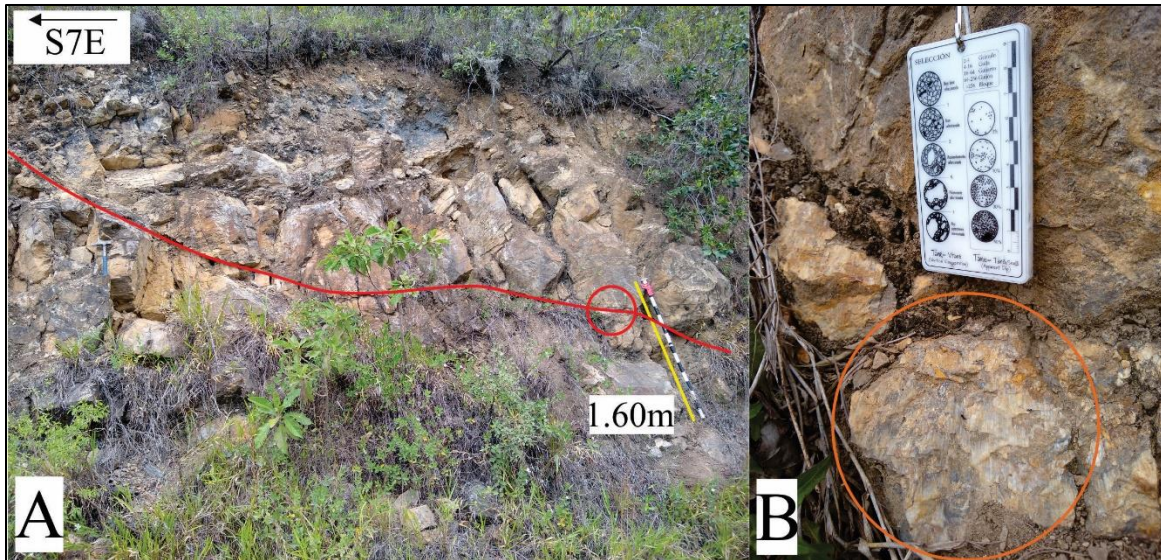


En esa misma ubicación se encontró otra falla con un plano estriado definido, el dato estructural medido fue $3/22$. Se piensa que es una falla inversa debido a que el rumbo del plano es más o menos paralelo al eje del sinclinal y a su bajo ángulo de buzamiento. Sin embargo, esto no pudo ser confirmado por las relaciones de los estratos ya que el afloramiento se encuentra muy meteorizado (ver **Figura 29**).

Figura 29.

Falla de afloramiento. A) Corte de la falla a través del afloramiento (línea roja) y ubicación del plano estriado (círculo rojo). B) Detalle del plano estriado (círculo naranja). Imágenes tomadas a 30 m de la estación CM-7.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



Las fallas de tipo regional no pudieron ser identificadas en campo debido al alto desarrollo de suelo en la zona, estas fueron establecidas utilizando la cartografía preexistente y mediante el análisis del Modelo Digital de Elevación.

Pliegues

El pliegue más importante de la zona de estudio es el Sinclinal de Málaga (o Sinclinal del Servitá), cuyo eje pasa por el casco urbano. En la **Figura 30** se aprecia una representación de esta estructura. El flanco este del sinclinal está cortado transversalmente por la Falla del Servitá al este de San José de Miranda, y se caracteriza por estar invertido en casi toda su extensión, inversión debida a la falla mencionada; mientras que, en el flanco oeste, presenta buzamientos fuertes, entre 40° y 60°, pero aparece cortado por fallas transversales que lo delimitan por el norte, poniendo en contacto el flanco Paleógeno-Neógeno con sedimentos Cretácicos (Vargas *et al.*, 1981, en Barragán y Forero, 2014).

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Figura 30.

Representación del Sinclinal de Málaga, se observa el eje del sinclinal (línea negra), el cambio en la dirección del buzamiento de las capas (líneas amarillas), además de la Falla del Servitá (línea roja). Imagen de la estación CM-23.



Hacia el oeste de la zona de estudio se observan otras estructuras plegadas, esta vez de tipo anticlinal, que aparecen en la cartografía preexistente (ver **Figura 31**). Exhibiendo el régimen compresivo bajo el cual fueron formadas.

Figura 31.

Pliegue anticlinal ubicado hacia el oeste de la zona de estudio, se observa el cambio en la dirección de buzamiento de las capas (líneas amarillas). Imagen de la estación CM-26.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

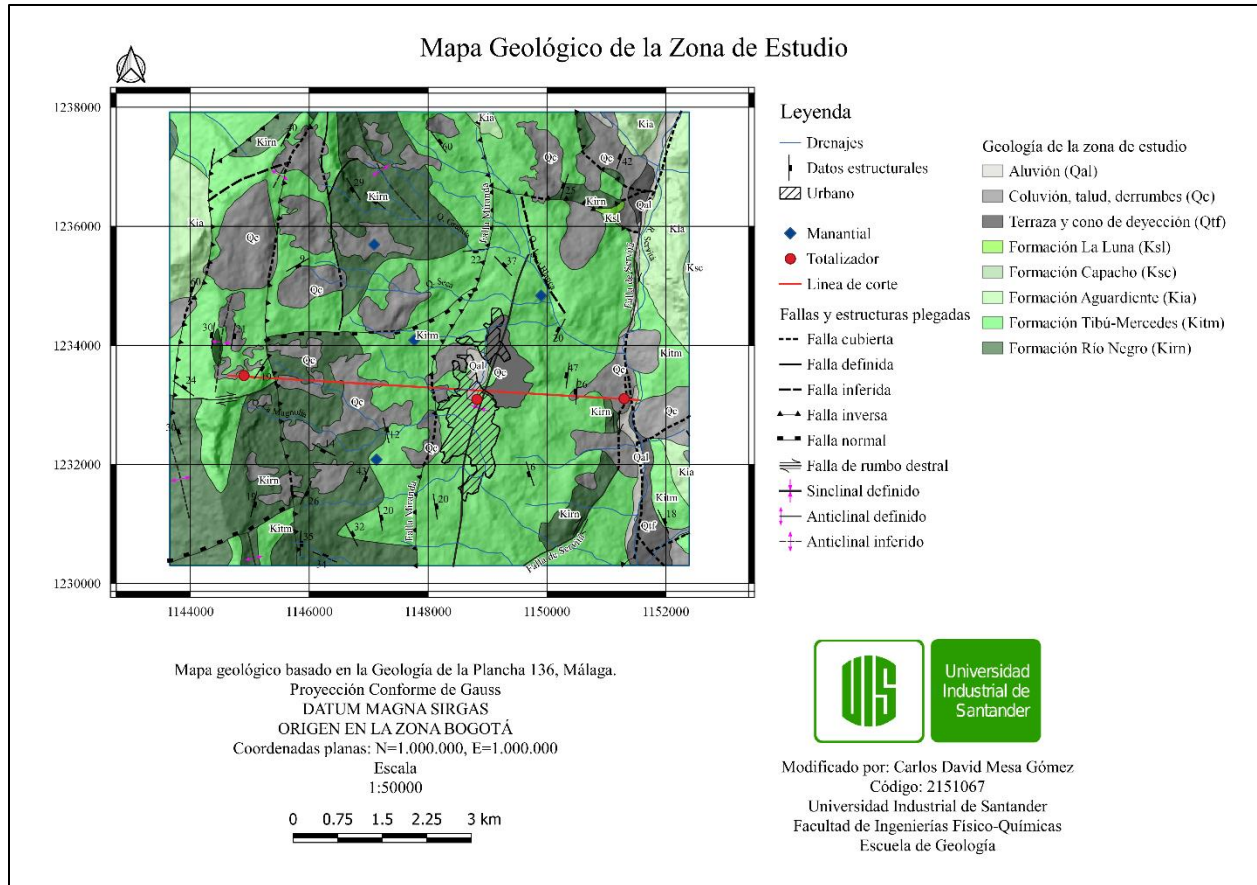


Una vez finalizada la campaña de campo, se procedió a digitalizar los polígonos correspondientes a la geología de la zona de estudio, las fallas y estructuras plegadas que se encuentran en el área, adición de los datos estructurales tomados, además de la modificación de algunos contactos litológicos de la cartografía previa de la Plancha 136 del Servicio Geológico Colombiano. También se agregaron los numerosos depósitos coluviales vistos en campo y la cinemática de algunas fallas. El mapa resultante se aprecia en la **Figura 32**.

Figura 32.

Mapa Geológico de la zona de estudio.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



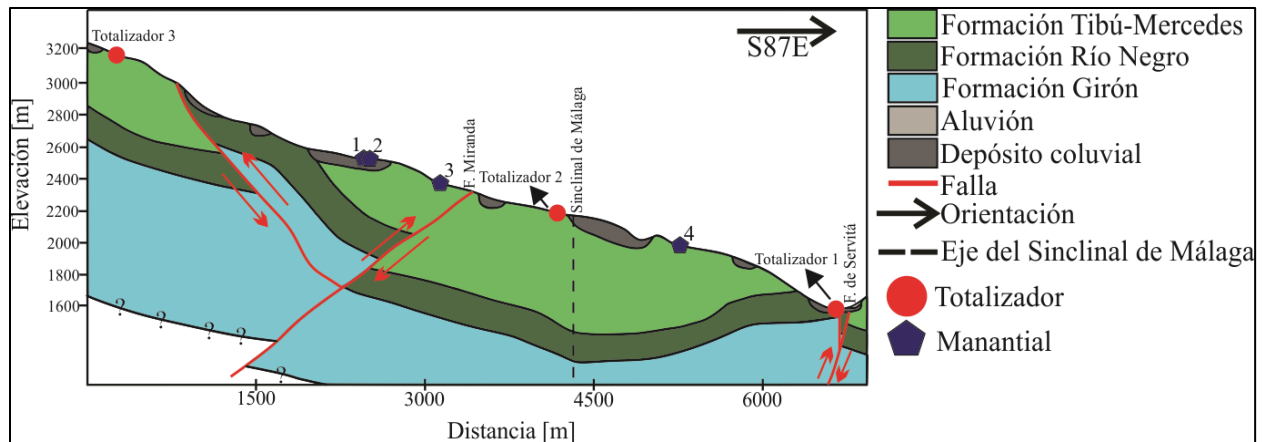
Una vez finalizado el mapa, se realizó un corte geológico (ver **Figura 33**), el cual fue trazado sobre la ubicaci6n de los totalizadores. Este corte fue usado para la aproximaci6n del modelo hidrogeol6gico conceptual. Se aclara que los manantiales 1 y 2 no se ubican sobre un dep6sito coluvial, simplemente aparecen sobre uno debido a que fueron proyectados a la lÍnea de corte.

Las cinemáticas de las fallas fueron tomadas de los trabajos de Salamanca (2017) y Barragán & Forero (2014).

Figura 33.

Corte geol6gico de la zona de estudio.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



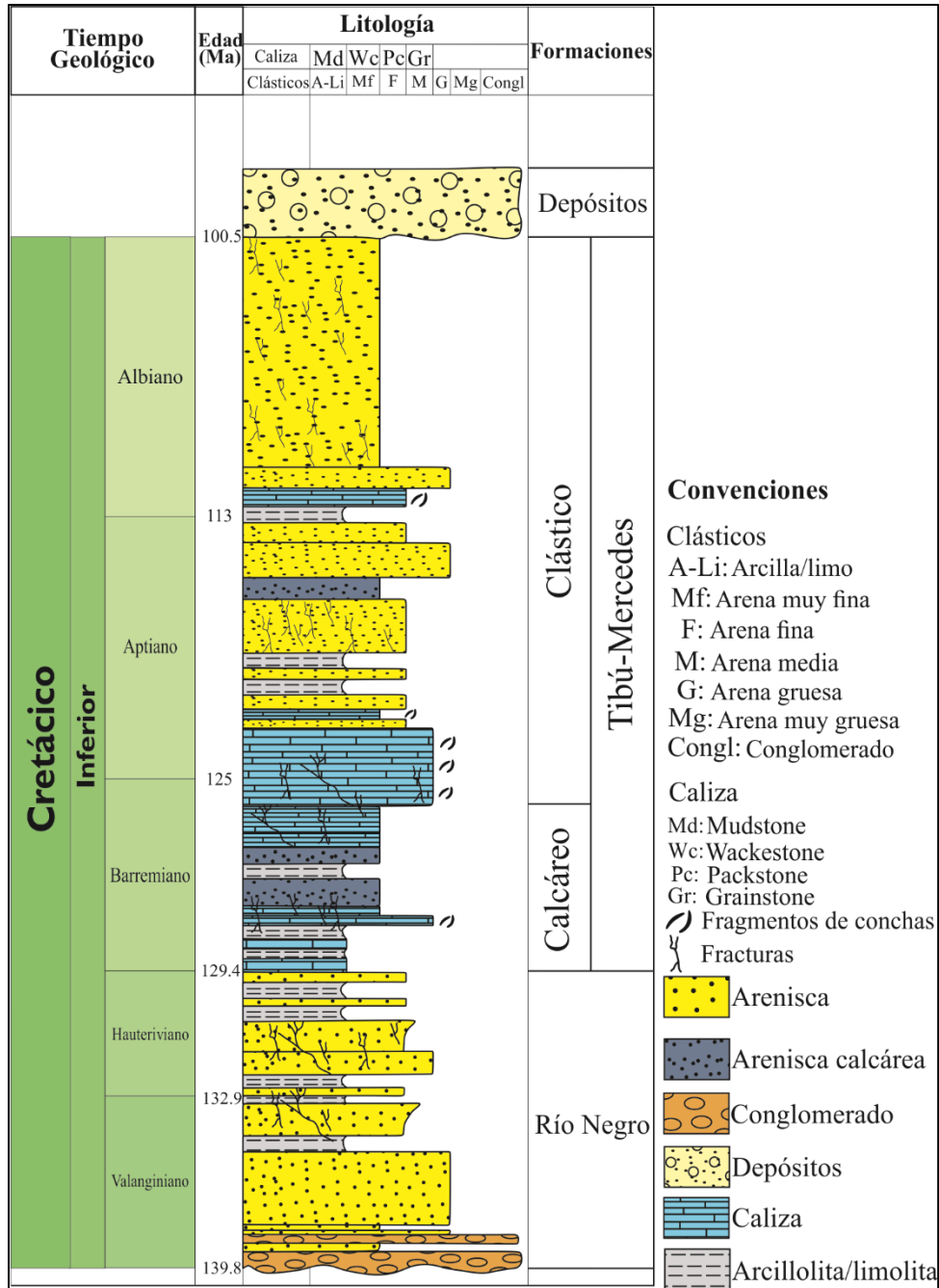
Adicional al corte presentado, se construyó una columna estratigráfica generalizada, basada en información secundaria y observaciones de campo. Los espesores considerados fueron de 135 [m] para la Formación Río Negro, medidos en la quebrada Lisgaura en el trabajo de Vargas *et al.*, (1981), de 350 [m] para la Formación Tibú-Mercedes, medidos en una sección levantada en la carretera Capitanejo-El Espino en el trabajo de Cardozo *et al.*, (2016), y finalmente, el espesor de los depósitos aluviales y coluviales se tomó de 28.1 [m], definidos por Rincón (2019) y Rincón-Jaimes *et al.*, (2019). La columna se presenta en la **Figura 34**.

La columna permite visualizar la disposición de las capas de las formaciones, lo cual fue útil en la aproximación al modelo hidrogeológico conceptual.

Figura 34.

Columna estratigráfica generalizada.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



5.2. Caracterización hidroquímica

Se encuentra constituida por el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos (conductividad eléctrica, temperatura, pH y sólidos disueltos totales) medidos en el agua de manantial, y por la composición de los iones mayoritarios de los manantiales recolectados en dos

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

muestreos, uno a final de la temporada de invierno (diciembre del 2019) y otro a final de la temporada de verano (marzo del 2020).

5.2.1. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos

Estos parámetros fueron tomados directamente en campo, se muestran a continuación el análisis de los valores registrados para el agua de manantial.

Parámetros fisicoquímicos de los manantiales

Los parámetros fisicoquímicos registrados en el agua de los manantiales se muestran en la

Tabla 3.

Tabla 3.

Parámetros fisicoquímicos del agua de manantial.

Manantial	Altura	Fecha	Parámetros fisicoquímicos				
			Temperatura (°C)	pH	Caudal promedio (L/s)	Conductividad Eléctrica (μS/cm)	Sólidos disueltos totales-STD (ppm)
M1-I	2682	1/12/2019	14	6.84	2.861	260	134
M2-I	2498	1/12/2019	18	5.69	1.229	127	61
M3-I	2410	1/12/2019	17.3	7.15	1.908	499	263
M4-I	2018	1/12/2019	17.8	7.1	3.887	432	213
M1-V	2682	8/03/2020	14.4	7.04	1.684	613	166
M2-V	2498	8/03/2020	18.5	5.81	0.861	629	353
M3-V	2410	8/03/2020	17.2	7.18	0.534	585	447
M4-V	2018	8/03/2020	20.7	7.34	0.482	966	414

Se realizó una medición de los caudales suministrados por cada manantial, encontrando que el máximo registrado corresponde al manantial 4 en temporada de invierno (M4-I), con un promedio de 3.88 [L/s]. El mínimo caudal corresponde a ese mismo manantial, pero en temporada de verano, con un promedio de 0.48 [L/s], causando una disminución del caudal del 87.6%. Los porcentajes

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

de disminución de los caudales de los manantiales se observan en la **Tabla 4**, donde se evidencian los fuertes efectos de la temporada de verano en la zona de estudio.

Tabla 4.

Porcentaje de disminución del caudal de los manantiales en temporada de verano.

Manantial invierno	Caudal promedio (L/s)	Manantial verano	Caudal promedio (L/s)	Disminución (%)
M1-I	2.861	M1-V	1.684	41.13
M2-I	1.229	M2-V	0.861	29.96
M3-I	1.908	M3-V	0.534	72.02
M4-I	3.887	M4-V	0.482	87.60

Se registraron temperaturas que varían de los 14 a 20.7 °C, con un promedio de 17.2 °C, este promedio indica que la zona de recarga presenta una temperatura ambiente cercana a este valor. Los valores de pH corresponden a valores normales de aguas naturales (entre 6.5 y 8), a excepción del manantial 2 (M2-I, M2-V) que exhibe valores un poco ácidos con un promedio de 5.75. Esto debido al corto recorrido que realizan los flujos que alimentan a este manantial y su alta interacción con el suelo cubierto de hojas y materia orgánica en descomposición, fuente de CO₂. También se destaca un pequeño aumento en los valores de pH de la temporada de verano en todos los manantiales.

En cuanto a la conductividad eléctrica, se observa un claro aumento en las muestras tomadas durante la temporada de verano (M1-V, M2-V, M3-V y M4-V), con valores entre 585 y 966 [μ S/cm], mientras que las muestras tomadas en la temporada de invierno (M1-I, M2-I, M3-I y M4-I) presentan valores entre 127 y 499 [μ S/cm]. Las conductividades altas de las muestras 2, 3 y 4 se deben a que estos manantiales se encuentran en la Formación Tibú-Mercedes, de litología

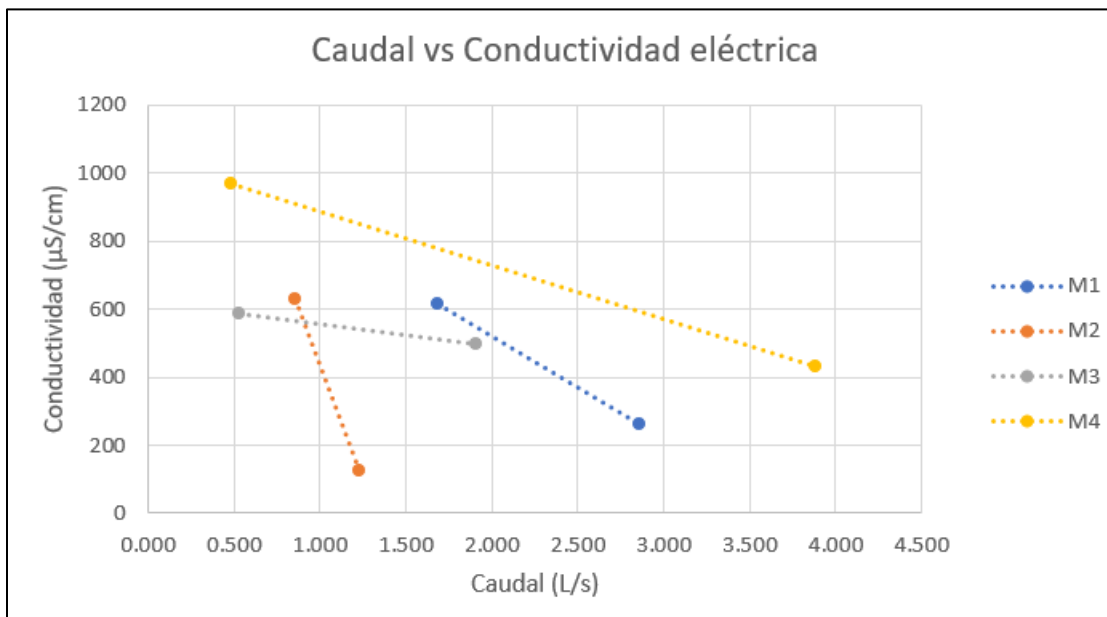
APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

carbonatada, la cual mineraliza con mayor facilidad en el agua. La muestra 1 también presenta valores altos de conductividad, sin embargo, no se encuentra sobre la formación carbonatada, está en la Formación Río Negro, la cual se conforma por una litología más silíceo (areniscas y conglomerados), pero contiene en algunos niveles cemento calcáreo y capas de arenisca carbonatada. Se puede plantear que el manantial 1 se encuentre en una zona con concentración de carbonatos, lo que explica su conductividad eléctrica elevada o que se deba a un tiempo de residencia alto.

La gráfica muestra, de manera general, una relación inversa entre el caudal de los manantiales y el valor de conductividad eléctrica (ver **Figura 35**), cuando el caudal disminuye, aumenta la conductividad.

Figura 35.

Gráfica del comportamiento de la conductividad eléctrica y el caudal de los manantiales.



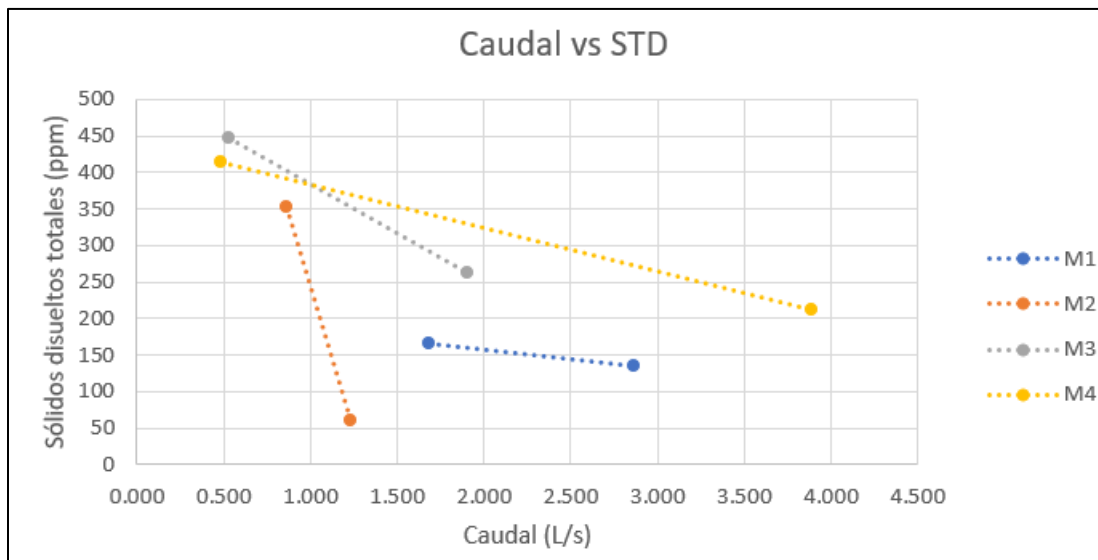
Con respecto a los sólidos disueltos totales (STD) se resalta un aumento del valor de estos en la temporada de verano, los datos oscilan entre 61 y 447 [ppm]. Los valores con mayor contenido

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

de STD corresponden al manantial 3 tanto en la temporada de invierno (M3-I) como de verano (M3-V), con valores de 263 y 447 [ppm]. Como se observa en la **Figura 36**, también existe una relación inversa entre el caudal promedio y el valor de los STD.

Figura 36.

Gráfica del comportamiento de los sólidos disueltos totales y el caudal de los manantiales.



5.2.2. Análisis de iones mayoritarios

Se realizó este análisis para las muestras de los cuatro manantiales tomadas en temporada de invierno y verano. Los resultados de estos análisis se muestran en la **Tabla 5**.

Tabla 5.

Resultados del análisis de iones mayoritarios en los manantiales.

	Ion	Concentración (mg/L)	Concentración (meq/L)	Balance iónico (%)
M1-I	HCO ₃ ⁻	99.06	1.624	10.93
	SO ₄ ⁼	8.41	0.175	
	Cl ⁻	11.34	0.320	
	Na ⁺	0.43	0.019	
	K ⁺	3.15	0.081	
	Ca ⁺⁺	29.32	1.463	

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

		Mg ⁺⁺	1.69	0.139	
		HCO ₃ ⁻	49.53	0.812	
	Aniones	SO ₄ ⁼	4.35	0.091	
		Cl ⁻	29.06	0.820	
M2-I		Na ⁺	0.87	0.038	33.28
	Cationes	K ⁺	15.49	0.396	
		Ca ⁺⁺	7.49	0.374	
		Mg ⁺⁺	0.66	0.054	
		HCO ₃ ⁻	118.87	1.949	
	Aniones	SO ₄ ⁼	4.15	0.086	
		Cl ⁻	16.3	0.460	
M3-I		Na ⁺	1.38	0.060	16.3
	Cationes	K ⁺	0.93	0.024	
		Ca ⁺⁺	61.55	3.072	
		Mg ⁺⁺	3.79	0.312	
		HCO ₃ ⁻	111.45	1.827	
	Aniones	SO ₄ ⁼	4.53	0.094	
		Cl ⁻	19.85	0.560	
M4-I		Na ⁺	1.13	0.049	8.54
	Cationes	K ⁺	0.61	0.016	
		Ca ⁺⁺	52.41	2.615	
		Mg ⁺⁺	3.22	0.265	
		HCO ₃ ⁻	162.5	2.664	
	Aniones	SO ₄ ⁼	18.94	0.394	
		Cl ⁻	12.63	0.356	
M1-V		Na ⁺	8.19	0.356	3.28
	Cationes	K ⁺	1.76	0.045	
		Ca ⁺⁺	58.7	2.929	
		Mg ⁺⁺	3.84	0.316	
		HCO ₃ ⁻	145.8	2.390	
	Aniones	SO ₄ ⁼	15.65	0.326	
		Cl ⁻	9.23	0.260	
M2-V		Na ⁺	6.27	0.273	4.66
	Cationes	K ⁺	1.28	0.033	
		Ca ⁺⁺	40.2	2.006	
		Mg ⁺⁺	4.86	0.400	
		HCO ₃ ⁻	167.91	2.753	
M3-V	Aniones	SO ₄ ⁼	19.27	0.401	0.82
		Cl ⁻	7.01	0.198	
	Cationes	Na ⁺	5.46	0.238	

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

	K+	1.51	0.039	
	Ca++	56.4	2.815	
	Mg++	3.85	0.317	
	HCO ₃ ⁻	226.85	3.719	
Aniones	SO ₄ ⁼	19.48	0.406	
	Cl ⁻	9.82	0.277	
M4-V	Na+	9.46	0.412	0.10
	K+	2.61	0.067	
Cationes	Ca++	65.8	3.284	
	Mg++	7.88	0.648	

El balance iónico de cada muestra se observa en la **Tabla 5**, los valores de las muestras de invierno son considerables, especialmente los de las muestras M2-I y M3-I, con valores de 33.28 y 16.3%, respectivamente. Son errores muy altos que normalmente no deben ser considerados en el análisis, sin embargo, debido a los limitados manantiales muestreados, la muestra M3-I (con error de 16.3%) fue aceptada (teniendo en cuenta que la muestra de verano presenta la misma facies hidroquímica). La muestra M2-I fue descartada por su elevado error, ya que, debido a esto, su facie hidroquímica difería de las demás muestras. Se trata posiblemente de un error del laboratorio.

En cuanto a los valores de las muestras de verano, se encontró que son menores al 5%, considerados de buena calidad. Los resultados de pH de estas muestras se encuentran entre 6.5 a 8 (valores considerados normales para aguas naturales), con excepción del manantial 2, el cual presenta valores más ácidos en los dos muestreos, con un promedio de 5.75.

A partir de los resultados de los iones mayoritarios se elaboraron diagramas de Stiff de invierno (**Figura 37**) y verano (**Figura 38**). Se observa en la **Figura 37** que las muestras poseen facies hidroquímicas de aguas bicarbonatadas cálcicas. En la **Figura 38** aparece la muestra del manantial

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

2 en temporada de verano (M2-V), con una facie hidroquímica concordante con las demás muestras.

Figura 37.

Diagrama de Stiff para muestras de invierno.

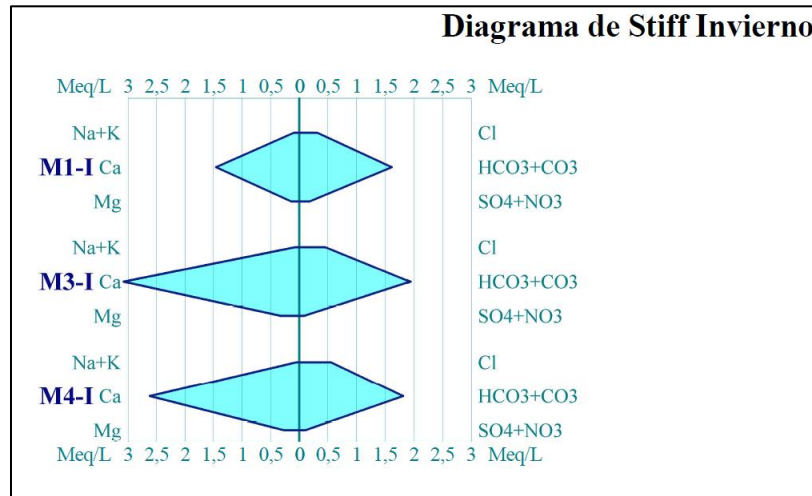
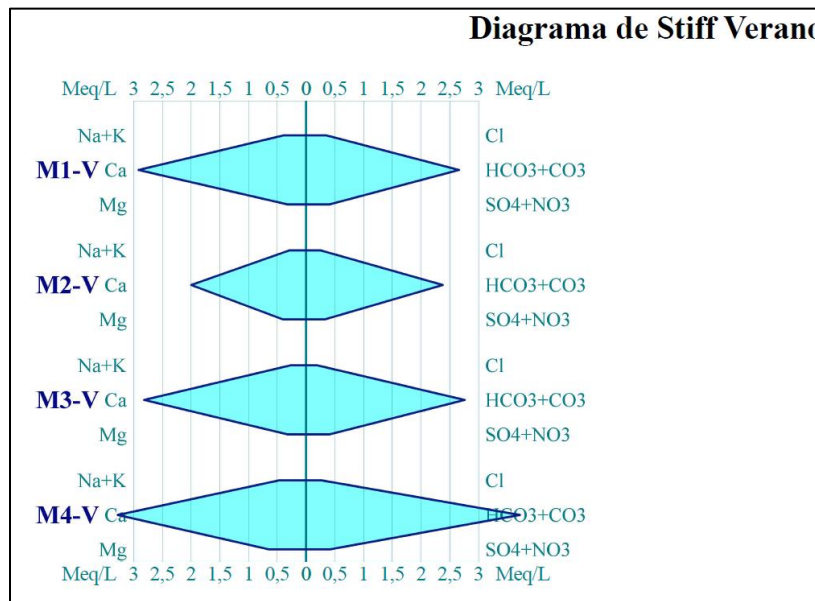


Figura 38.

Diagrama de Stiff para muestras de verano.



APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Figura 40.

Diagrama de Piper para muestras de verano.

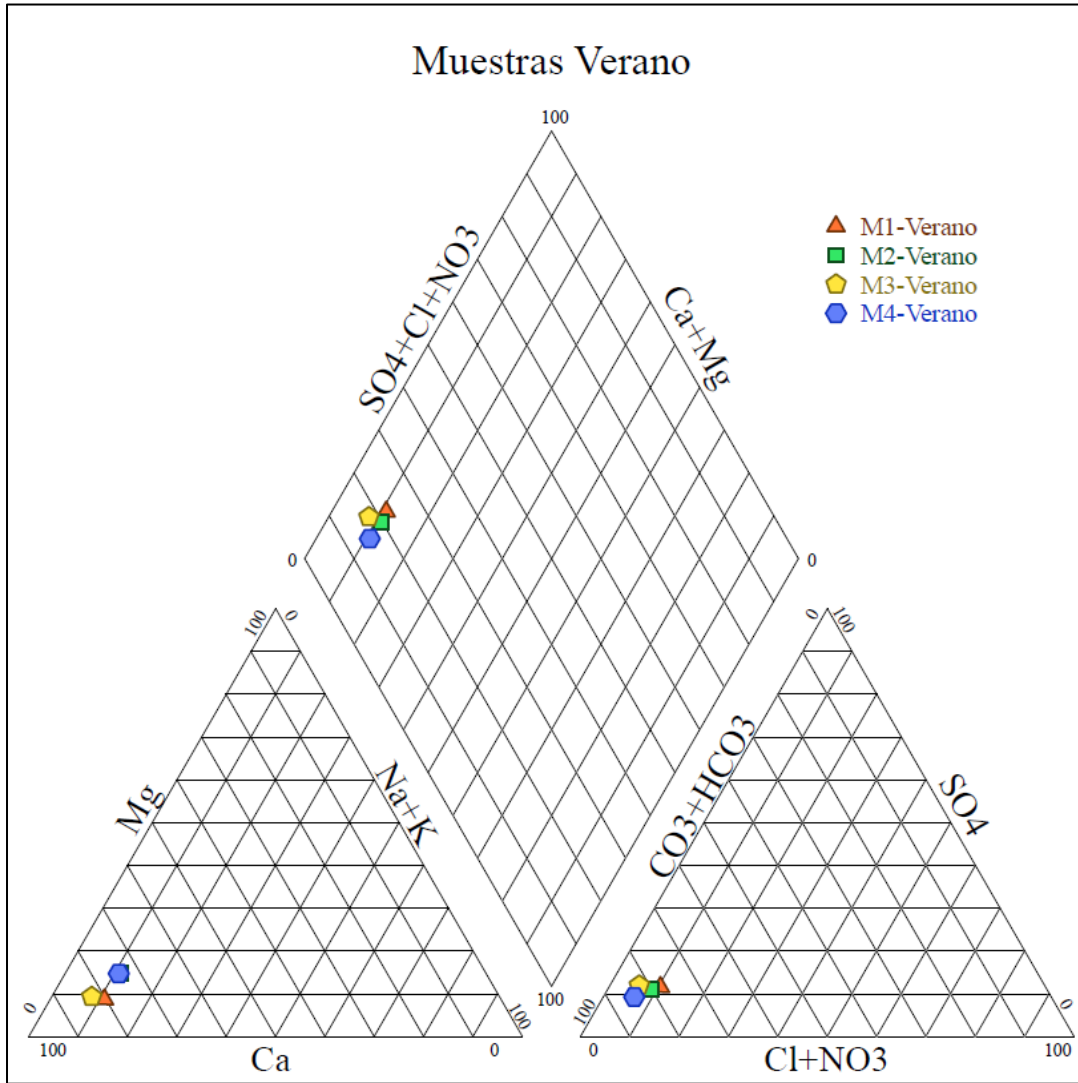
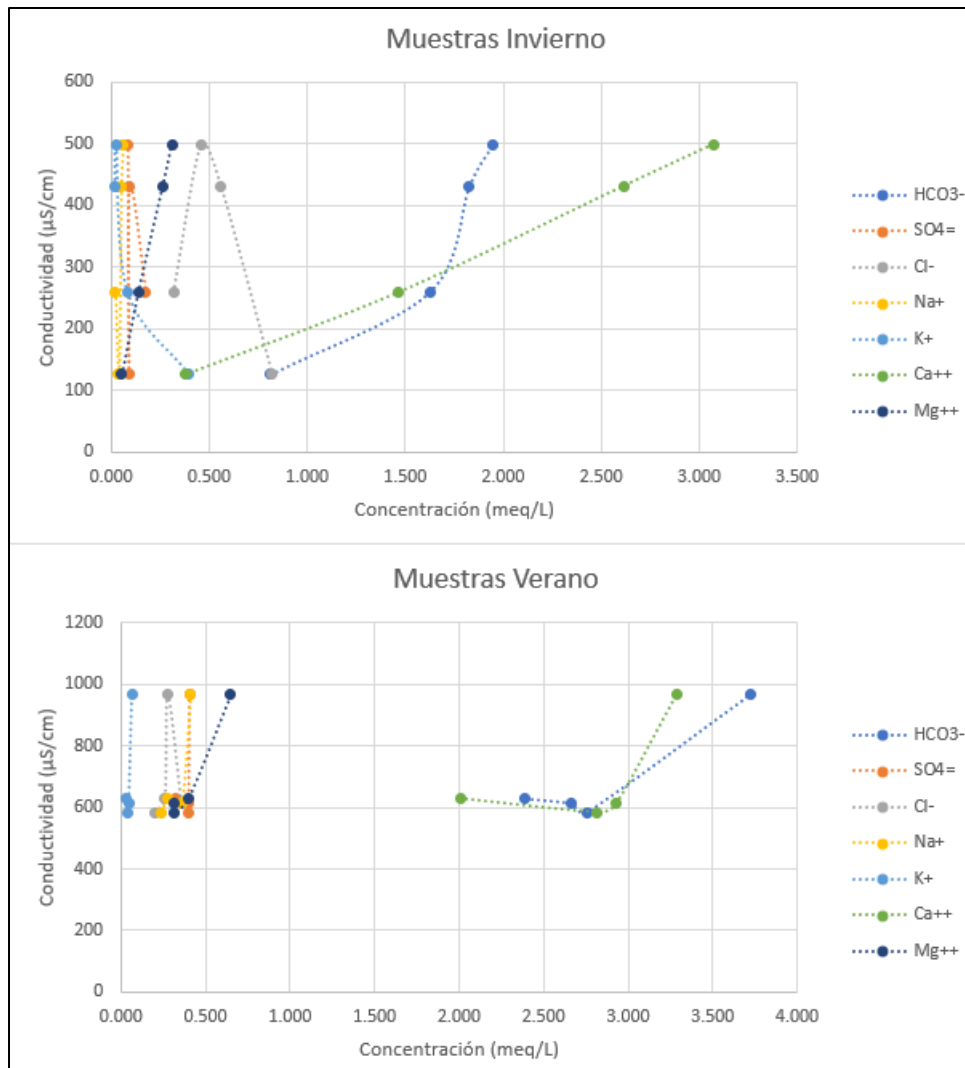


Figura 41.

Gráfica de la conductividad de los manantiales contra la concentración de los iones.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



5.3. Isótopos estables del agua

A continuación, se presentan los resultados de los análisis isotópicos realizados en las muestras de precipitación tomadas mensualmente en los tres totalizadores, en un lapso de ocho meses, y las muestras tomadas en los cuatro manantiales, en temporada de invierno y verano.

5.3.1. Composición isotópica de la precipitación

Estos análisis fueron realizados en muestras compuestas mensuales de agua de lluvia, tomadas durante los meses de agosto del 2019 a marzo del 2020 (lapso de ocho meses), los resultados se muestran en las **Tablas 6, 7 y 8**.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Tabla 6.

Resultados de la composición isotópica en el totalizador 1.

	Altitud (msnm)	Fecha	Mes representativo	Precipitación (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Exceso de deuterio
Totalizador 1	1655	5/08/2019	Julio	11	-5.604	-37.958	6.874
		4/09/2019	Agosto	75	-6.010	-42.291	5.790
		5/10/2019	Septiembre	95	-7.205	-45.859	11.777
		3/11/2019	Octubre	170	-9.692	-64.843	12.694
		30/11/2019	Noviembre	150	-6.412	-36.162	15.136
		30/12/2019	Diciembre	15	-4.202	-22.978	10.635
		1/02/2020	Enero	10	-2.820	-13.257	9.306
		7/03/2020	Febrero	35	-0.591	4.975	9.706
			Promedio pon	-6.984	-32.297		

Tabla 7.

Resultados de la composición isotópica en el totalizador 2.

	Altitud (msnm)	Fecha	Mes representativo	Precipitación (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Exceso de deuterio
Totalizador 2	2201	5/08/2019	Julio	4	-6.712	-46.030	7.667
		4/09/2019	Agosto	63	-7.316	-46.652	11.873
		5/10/2019	Septiembre	100	-8.392	-52.929	14.205
		3/11/2019	Octubre	115	-11.060	-74.618	13.863
		30/11/2019	Noviembre	175	-7.312	-41.892	16.607
		30/12/2019	Diciembre	35	-4.989	-27.451	12.464
		1/02/2020	Enero	25	-4.120	-19.763	13.198
		7/03/2020	Febrero	43	-1.641	-0.206	12.923
			Promedio pon	-7.548	-38.693		

Tabla 8.

Resultados de la composición isotópica en el totalizador 3.

	Altitud (msnm)	Fecha	Mes representativo	Precipitación (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Exceso de deuterio
Totalizador 3	3170	5/08/2019	Julio	47	-8.784	-56.269	13.999
		4/09/2019	Agosto	80	-8.463	-51.738	15.965

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

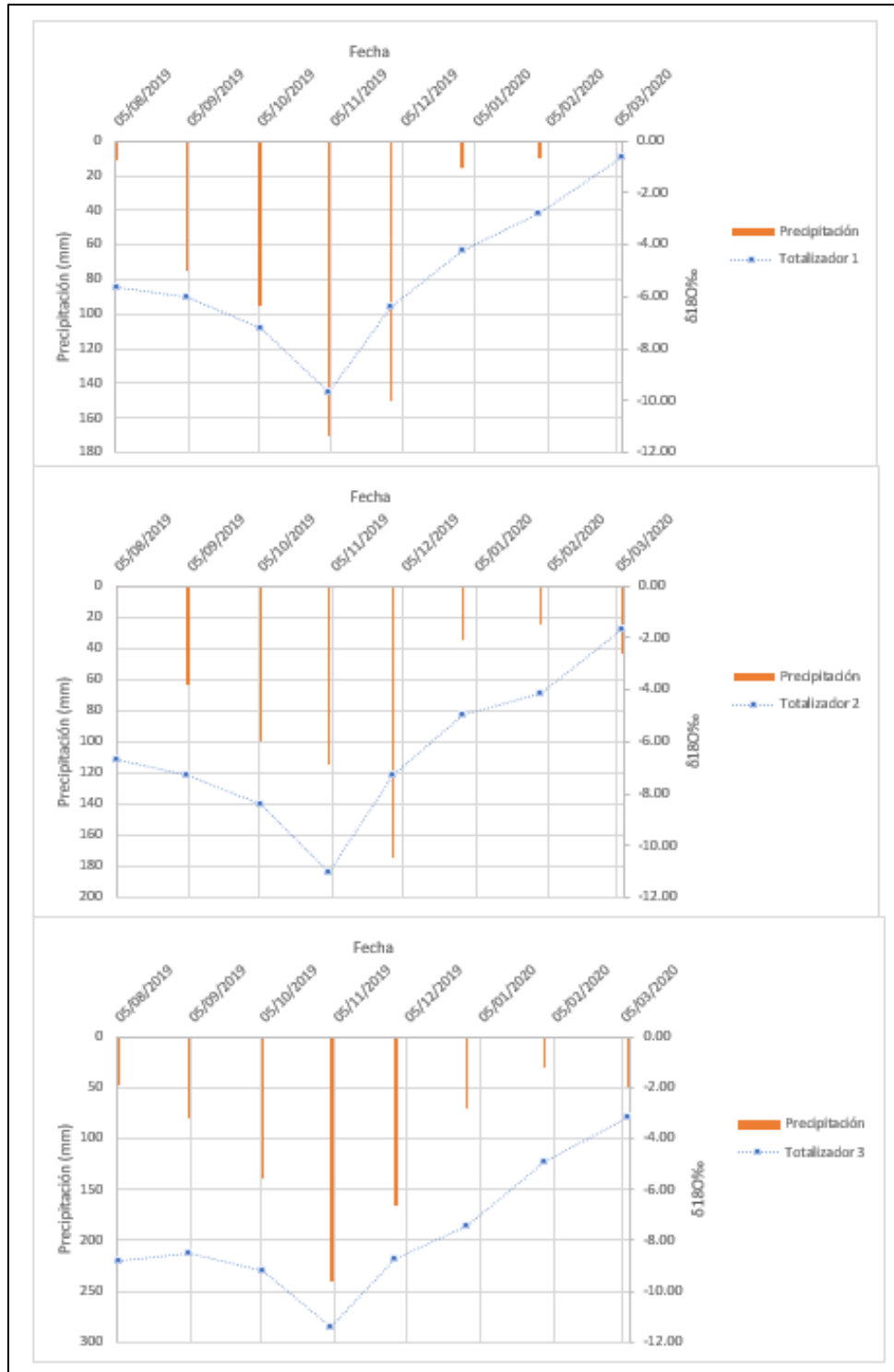
5/10/2019	Septiembre	140	-9.216	-57.357	16.370
3/11/2019	Octubre	240	-11.388	-75.217	15.884
30/11/2019	Noviembre	165	-8.765	-52.216	17.902
30/12/2019	Diciembre	70	-7.404	-41.527	17.704
1/02/2020	Enero	30	-4.908	-25.027	14.235
7/03/2020	Febrero	50	-3.179	-7.865	17.566
Promedio pon			-8.983	-45.902	

Los resultados de $\delta^{18}\text{O}$ fueron comparados con los valores de precipitación con el fin de observar la variación debida al efecto de estacionalidad (ver **Figura 42**). Según Gómez-Isidro (2014) en las regiones ecuatoriales la estacionalidad se encuentra principalmente relacionada con el efecto de la cantidad de lluvia. La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) puede determinar la cantidad de lluvia, y se caracteriza por la presencia de dos épocas lluviosas y dos épocas menos lluviosas marcando una bimodalidad a lo largo del año, estas épocas son las que determinan principalmente la variación anual en los contenidos isotópicos en la región ecuatorial.

Figura 42.

Variación temporal de la precipitación y $\delta^{18}\text{O}$ en los tres totalizadores.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



En la **Figura 42** se observa de manera general que los valores con mayor precipitación son más empobrecidos en su contenido isotópico de $\delta^{18}O$. En la **Tabla 6** se muestra que el totalizador 1

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

reporta una composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ de la precipitación entre -0.591 y -9.692‰ y un promedio ponderado de -6.984‰. El totalizador 2 presenta valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -1.641 y -11.060‰, con un promedio ponderado de -7.548‰ (ver **Tabla 7**). En cuanto al totalizador 3, se encontró que los valores de $\delta^{18}\text{O}$ oscilan entre -3.179 y -11.388‰, con un promedio ponderado de -8.983‰ (ver **Tabla 8**).

Se muestra entonces que el totalizador ubicado a mayor altura es el más empobrecido en su contenido isotópico de ^{18}O .

En cuanto al exceso de deuterio (D) se observa que los valores oscilan entre 5.790 y 15.136‰ para el totalizador 1, entre 7.667 y 16.607‰ para el totalizador 2, y entre 13.999 y 17.902‰ para el totalizador 3. Según Aemisegger *et al* (2014), el vapor reciclado de origen continental puede producir muestras de precipitación con un $D > 10\%$. Sin embargo, a nivel del Macizo de Santander y de la Cordillera Oriental aún no se ha estudiado el origen de las masas de humedad que llegan hasta alturas mayores a 3500 msnm, necesario para entender los procesos de fraccionamiento isotópico que se presentan y que podrían explicar el origen del exceso de deuterio encontrado (Cetina, 2019).

Finalmente, los valores obtenidos de las firmas isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ permitieron calcular para la zona de estudio la Recta Meteórica Local (RML), representada por la ecuación:

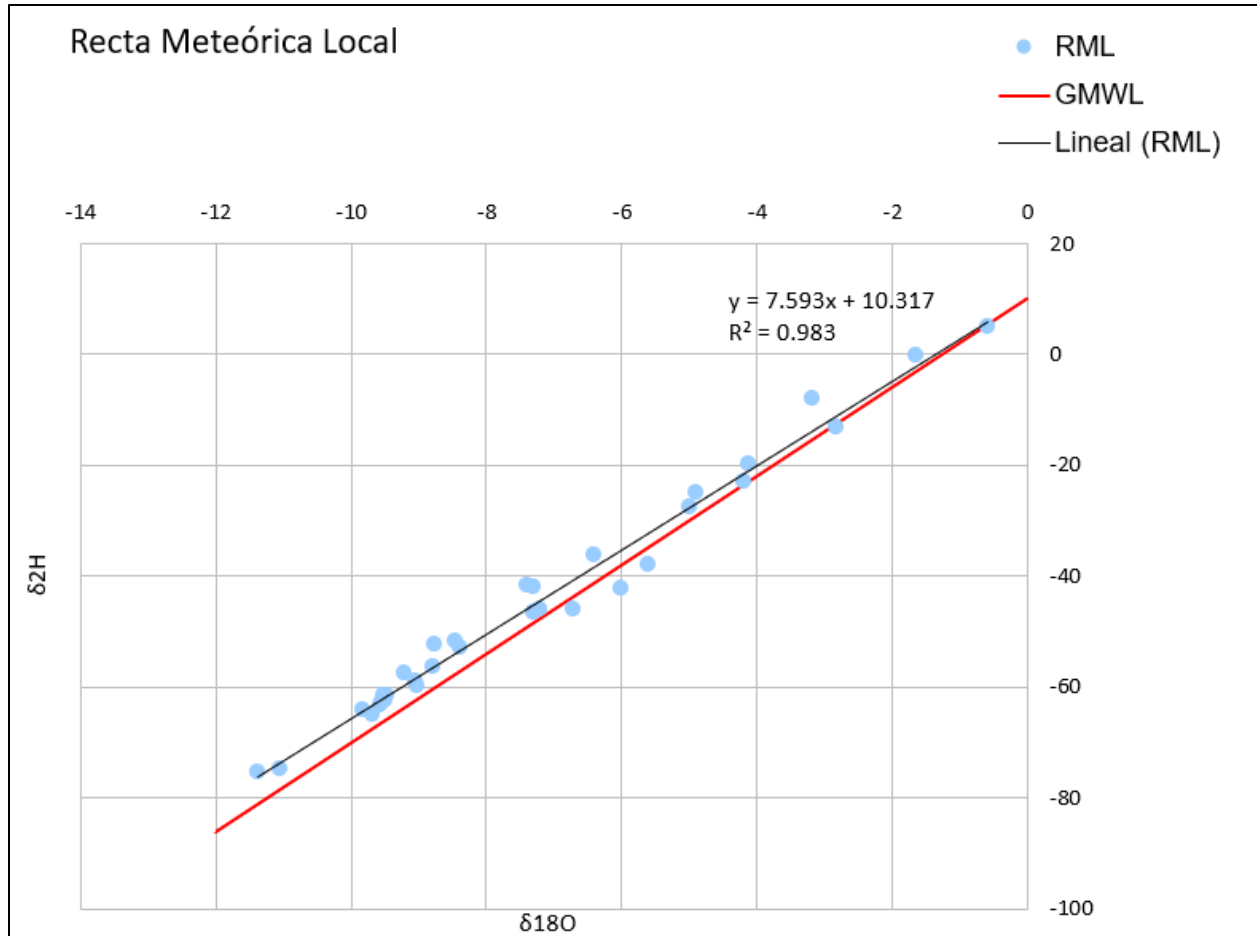
$$\delta^2\text{H}=7.593 \delta^{18}\text{O}+10.317$$

Esta recta es comparada con la Recta Meteórica Global (GMWL por sus siglas en inglés) en la **Figura 43**.

Figura 43.

Recta Meteórica Local (RML) de la zona de estudio y Recta Meteórica Global (GMWL).

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL



5.3.2. Composición isotópica de los manantiales

Los resultados de las composiciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de agua de manantial en las temporadas de invierno y verano se muestran en la **Tabla 9**.

Tabla 9.

Resultados de la composición isotópica del agua de manantial.

Punto	Fecha	Altura (msnm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Exceso de deuterio
Manantial 1-I	1/12/2019	2682	-9.480	-61.399	14.443
Manantial 2-I	1/12/2019	2498	-9.056	-61.523	14.621
Manantial 3-I	1/12/2019	2410	-9.518	-64.092	14.429
Manantial 4-I	1/12/2019	2018	-9.501	-62.679	13.638
Manantial 1-V	8/03/2020	2682	-9.815	-58.961	13.483
Manantial 2-V	8/03/2020	2498	-9.034	-62.350	13.658

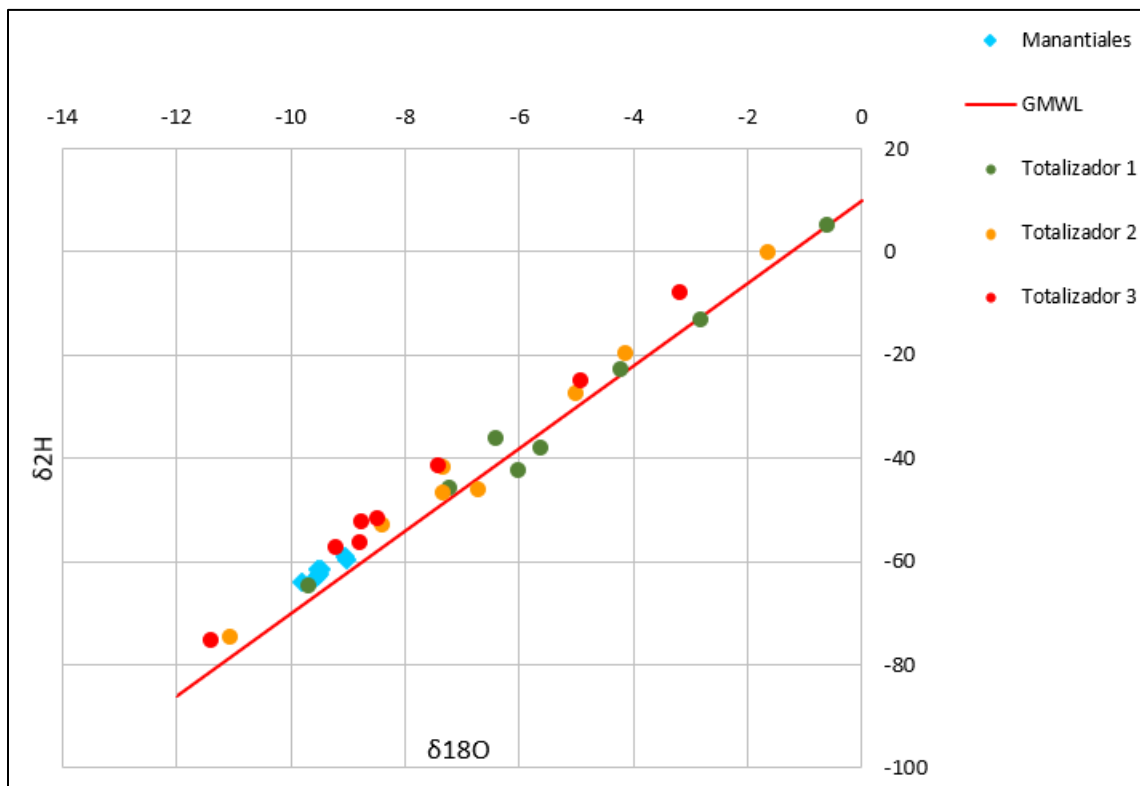
APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Manantial 3-V	8/03/2020	2410	-9.540	-59.691	12.585
Manantial 4-V	8/03/2020	2018	-9.555	-63.119	13.324

Estos datos fueron graficados sobre la Recta Meteórica Local, donde se observa que los datos se ubican sobre la línea, indicando que no sufrieron procesos de evaporación en su proceso de infiltración o en su salida a la superficie y representan un origen meteórico (ver **Figura 44**).

Figura 44.

Relación isotópica de las muestras de agua de manantial (rombos celestes) y la RML.

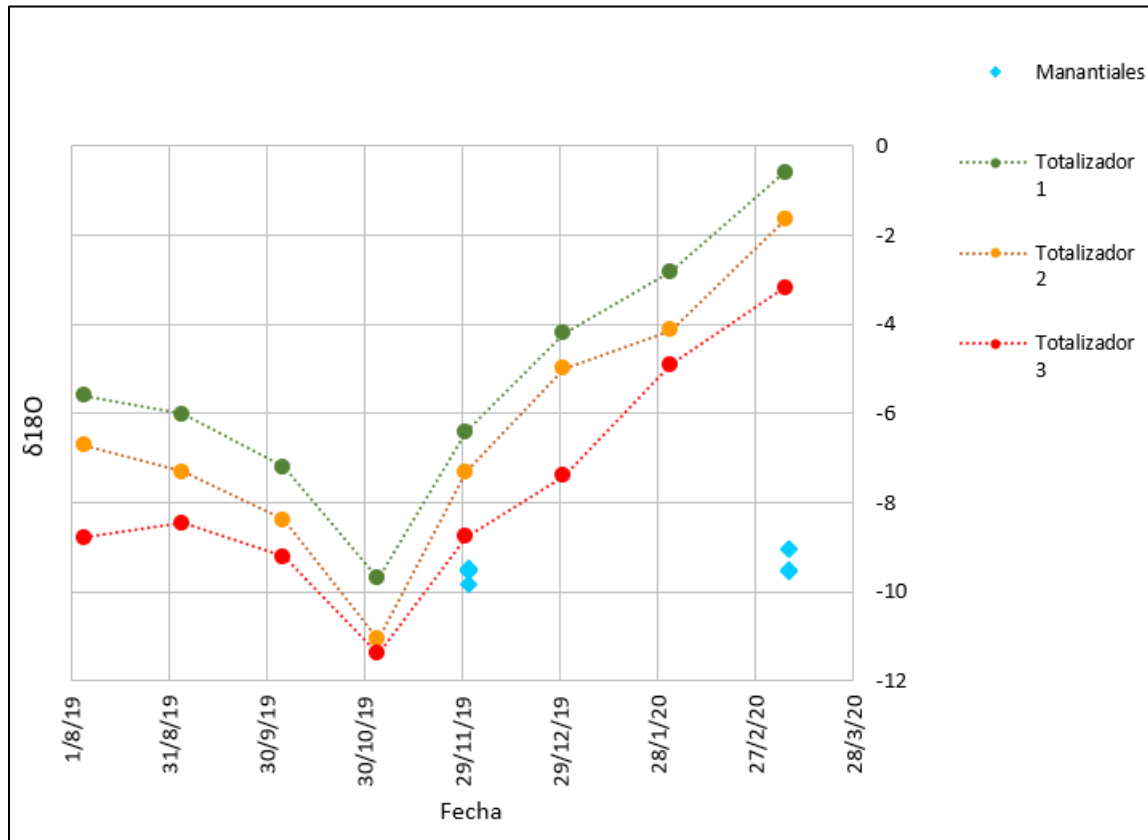


Además, se realizó una comparación entre la variación temporal del contenido de $\delta^{18}O$ del agua de precipitación de los totalizadores y el agua de manantial (ver **Figura 45**), en donde se observó que la variación temporal de la firma isotópica de los manantiales es mínima, comparada con la variación del agua de precipitación, evidenciando que existe una buena mezcla de agua en el reservorio de agua subterránea.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Figura 45.

Comparación de la variación temporal de los contenidos isotópicos del agua de precipitación y el agua de manantial.



Teniendo el contenido isotópico $\delta^{18}\text{O}$ del agua de precipitación y la de manantial, se procedió a realizar una gráfica para relacionar la firma isotópica de las muestras con la altura a la cual se ubicaban (ver **Figura 46**). Para la gráfica de la **Figura 46** se realizó el promedio ponderado de cada totalizador de la composición de $\delta^{18}\text{O}$ de acuerdo con la cantidad de precipitación de cada mes, según la ecuación:

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{\sum \delta^{18}\text{O} \text{ mensual} * \text{precipitación mensual}}{\text{Precipitación total}}$$

Utilizando el valor arrojado de la composición isotópica promedio de los tres totalizadores se generó una recta definida por la ecuación:

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

$$Y = -741.89\delta^{18}O - 3473.1$$

Donde Y es la altura. Esta ecuación fue utilizada para estimar la altura a la cual se infiltró el agua de los manantiales, la cual representa la zona de recarga (ver **Tabla 10**)

Figura 46.

Gráfica de la relación entre el contenido de $\delta^{18}O$ y la altura.

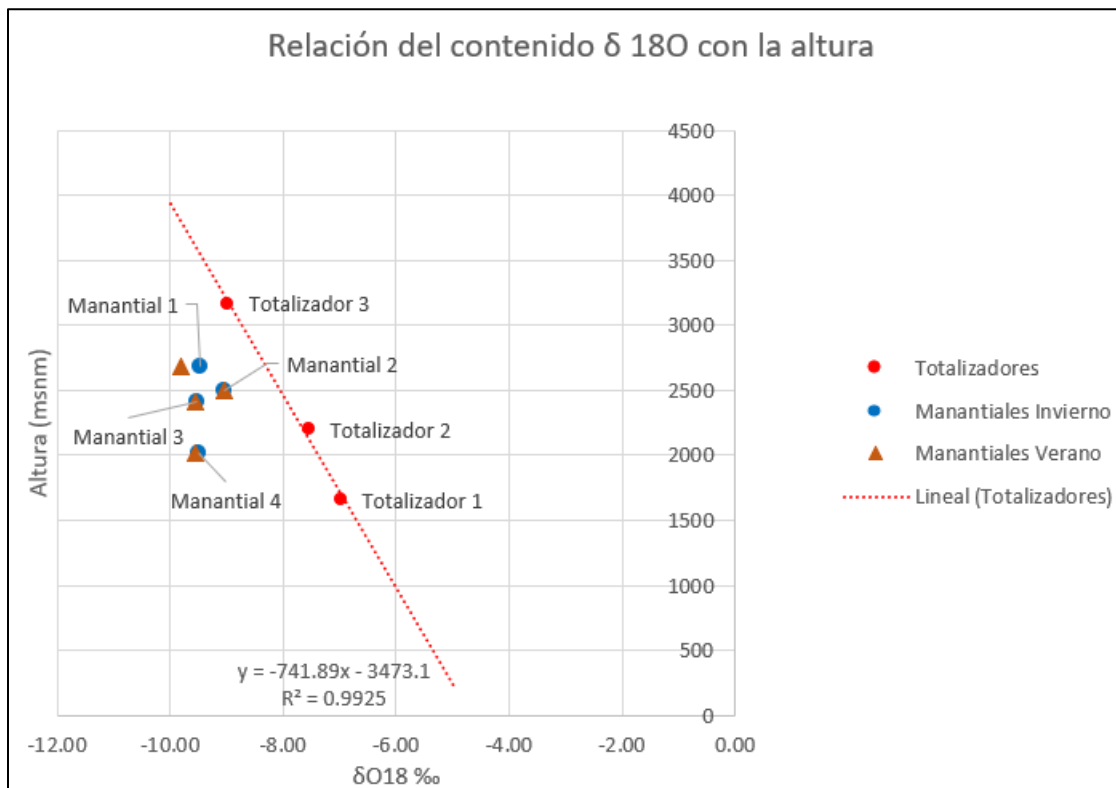


Tabla 10.

Estimación de la altura de la zona de recarga.

Estimación de la altura de recarga		
Punto	Promedio $\delta^{18}O$	Altura de recarga (msnm)
Manantial 1	-9.65	3684.11
Manantial 2	-9.04	3236.98
Manantial 3	-9.53	3595.90
Manantial 4	-9.53	3595.44

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Según la **Tabla 10**, se aprecia que las alturas de recarga de los manantiales 1, 3 y 4 tienen valores similares, mientras que la altura de recarga del manantial 2 se ubica más de 300 m por debajo de las demás.

5.4. Aproximación al modelo hidrogeológico conceptual

Integrando la información de la cartografía geológica, composición hidroquímica de las aguas subterráneas, y firmas isotópicas del agua de precipitación y manantial, se construyó una aproximación al modelo hidrogeológico conceptual en la zona de estudio. Con ayuda de la columna estratigráfica generalizada de la zona se analizaron las características hidrogeológicas de las unidades litológicas y se establecieron las unidades hidrogeológicas a las que corresponden (ver **Tabla 11**).

Tabla 11.

Unidades hidrogeológicas.

Unidad geológica	Segmento	Textura	Características hidrogeológicas	Unidad hidrogeológica	Condición especial	Espesor promedio (m)
Depósitos cuaternarios	NO aplica	Depósito coluvial, compuesto por bloques angulares de roca sumergidos en una matriz de materiales finos. Depósito aluvial compuesto por materiales tipo arena y finos.	Buena porosidad primaria y permeabilidad. poca compactación.	Acuíferos libres y acuitardos de poco espesor	NO aplica	28.1*
Formación Tibú-Mercedes	Clástico	Intercalaciones de areniscas de grano muy fino con venas rellenas de calcita, lodolitas y niveles caliza tipo wackestone y mudstone	Con porosidad primaria baja, porosidad secundaria considerable producto de diaclasas, fracturas no tan continuas ni extensas. Afloramientos con grado alto a medio de meteorización, con cemento calcáreo.	Acuífero fracturado	Confinado localmente	350**
	Calcáreo	Intercalaciones de calizas tipo mudstone, wackestone y packstone con matriz tipo lodo calcáreo, con fósiles de bivalvos y conchas	Poca porosidad primaria y alta porosidad secundaria producto de las fracturas que atraviesan los estratos, estas fracturas son continuas y con gran apertura, algunas presentan evidencias del paso de			

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

			agua. Meteorización media a baja en los afloramientos.	
Formación Río Negro	NO aplica	Intercalaciones de areniscas de grano medio a grueso con gránulos, areniscas de grano fino a medio, areniscas de grano fino y lodolitas	Porosidad primaria baja pero buena porosidad secundaria producto de las fracturas, estas fracturas son continuas y con evidencia de circulación de agua en algunas zonas, afloramientos con meteorización media a baja (a excepción de las lodolitas con alta meteorización) y presencia de cemento calcáreo en algunos de ellos.	135***

*Rincón (2019) y Rincón-Jaimes *et al.*, (2019). ** Cardozo *et al.*, (2016). ***Vargas *et al.*, (1981).

Como se observa en la **Tabla 11** las formaciones Río Negro y Tibú-Mercedes corresponden a un acuífero fracturado confinado localmente debido a los niveles arcillosos de las formaciones y los depósitos suprayacentes, en cuanto a los depósitos cuaternarios se estableció que corresponden a acuíferos libres y acuitardos de poco espesor.

La recarga de estos sistemas acuíferos se efectúa en dos alturas diferentes (ver **Tabla 10**), por una parte, las firmas isotópicas de los manantiales M1, M3 y M4 mostraron que su recarga ocurre a una altura entre 3592.44 y 3684.11 msnm (ver **Figura 47**), mientras que la del manantial M2 ocurre a 3236.98 msnm (ver **Figura 48**).

Adicionalmente, la firma isotópica también refleja una buena mezcla del agua subterránea en el subsuelo por la poca variación temporal en las concentraciones isotópicas de los manantiales (ver **Figura 45**), lo cual muestra que los flujos que alimentan a estos manantiales no son superficiales, sino que se dan en profundidad.

Figura 47.

Bloquediagrama 1 aproximación al modelo hidrogeológico conceptual.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

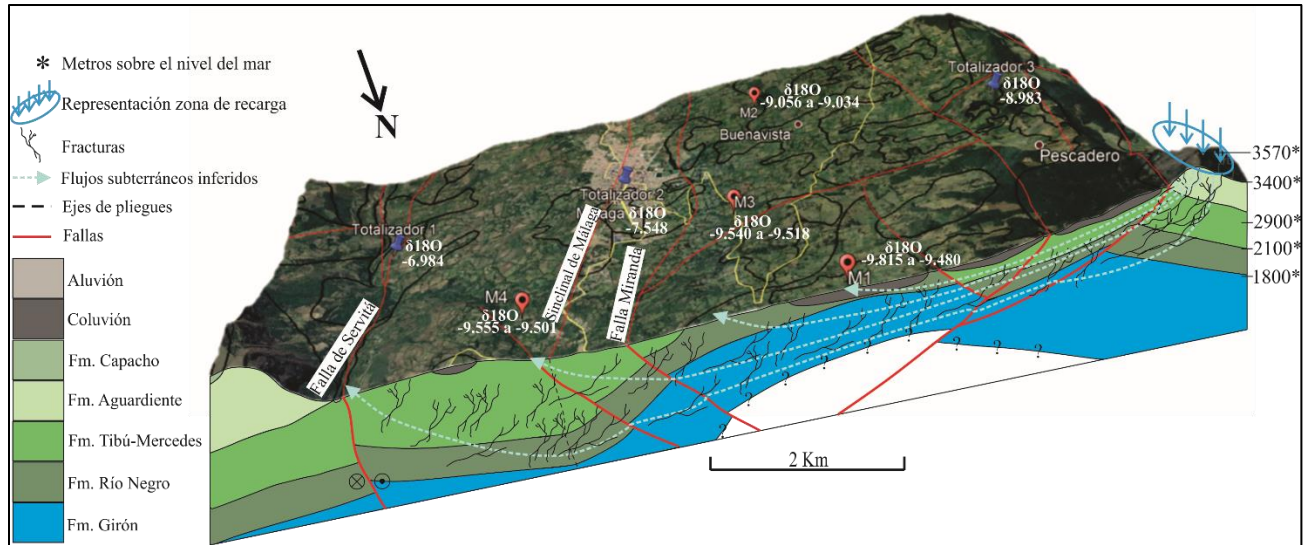
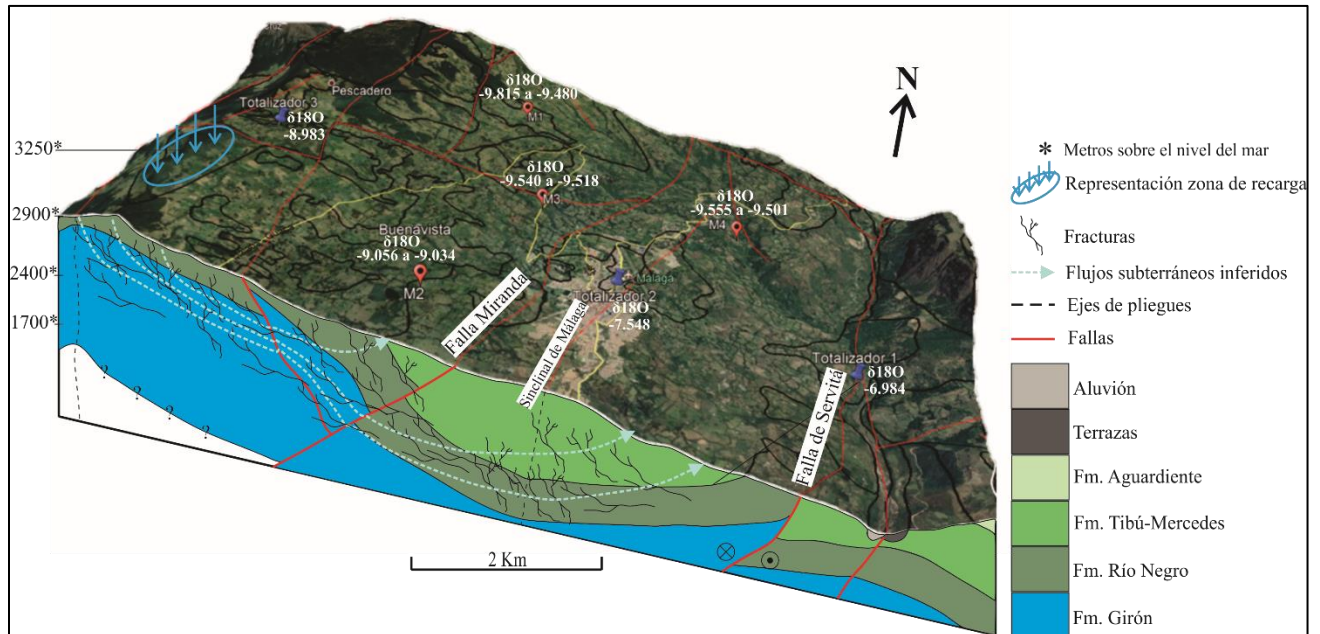


Figura 48.

Bloquediagrama 2 aproximación al modelo hidrogeológico conceptual.



Se puede observar en la **Figura 47** y **48** que el recorrido que realizan los flujos subterráneos desde la zona de recarga para salir a la superficie en los manantiales es considerable, por lo tanto, se esperaría que su concentración de iones fuera elevada y estuvieran más evolucionados químicamente, sin embargo, como se mencionó en el título 5.2.2. Análisis de iones mayoritarios,

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

la composición hidroquímica de las aguas de manantial corresponde a la facies bicarbonatada cálcica, lo cual indica un agua poco evolucionada y con un tiempo de permanencia corto en el subsuelo. Con base en esto y las observaciones de campo sobre fracturas con evidencia de flujo de agua, se plantea que los flujos se mueven por estas fracturas que interconectan las formaciones de la zona y le permite al agua desplazarse rápidamente. Estos flujos deben atravesar estructuras falladas como la Falla Miranda y otras fallas locales, lo cual indica que estas estructuras no detienen la recarga de los manantiales.

En cuanto a las alturas de las zonas de recarga se destaca la altura de los manantiales M1, M3 y M4, la cual es sobre los 3500 msnm, debido a que en los alrededores de la zona de estudio hay limitadas áreas con esa altura donde pudiera recargarse el agua de esos manantiales. Hacia el noroeste de la zona, un área conocida como Peña Lisa o Cerro El Contento alcanza alturas superiores a los 3500 msnm, por lo tanto, constituye una potencial zona de recarga para esos manantiales (ver **Figura 49**).

Figura 49.

Peña Lisa (elipse roja), posible zona de recarga para los manantiales (M1, M3 y M4).



6. Conclusiones

En la zona de estudio afloran rocas de las formaciones Río Negro y Tibú-Mercedes. Las rocas presentan planos de discontinuidad con aberturas favorables para el flujo de agua. En algunos casos se evidencia el paso de flujo de agua debido a humedad encontrada en los planos, con vegetación, señales óptimas para la acumulación de agua subterránea en la zona.

El sistema acuífero identificado en la zona del municipio de Málaga (Santander) compuesto por las formaciones Río Negro y Tibú-Mercedes, corresponde a un acuífero fracturado confinado localmente por niveles arcillosos de estas formaciones, además de contar con acuíferos libres y acuitardos compuestos por los depósitos coluviales y aluviales distribuidos en la superficie

Se deduce que el movimiento de los flujos que se desplazan por el sistema acuífero se efectúa a través de fracturas en las formaciones rocosas, permitiéndoles desplazarse rápidamente y presentar baja mineralización. Las estructuras falladas de la zona no constituyen una barrera para el movimiento de estos flujos que alimentan los manantiales y al **reservorio**.

Se establece por la composición química representada en los gráficos de Stiff y Piper que en la zona de estudio se encuentran aguas con facies bicarbonatadas cálcicas, caracterizadas por un período de residencia corto en los flujos subterráneos y con poca evolución hidroquímica. La conductividad eléctrica es proporcional con al aumento de los iones bicarbonato y calcio en las dos temporadas de muestreo (invierno y verano).

Con los resultados obtenidos de la composición isotópica de las aguas de precipitación se pudo observar el efecto de estacionalidad, al presentar en los meses más lluviosos mayor empobrecimiento en el contenido isotópico. También se evidenció el efecto de la altitud, al ser

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

el totalizador 1 (ubicado a 1655 msnm) más enriquecido que el totalizador 3 (ubicado a 3170 msnm).

La gráfica de la Recta Meteórica Local obtenida ($\delta^2\text{H} = 7.593 \delta^{18}\text{O} + 10.317$) con los valores de las firmas isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ ajustándose a la Recta Meteórica Mundial ($\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$).

La composición isotópica del agua de manantial arrojó valores promedio de -9.65‰, -9.04‰, -9.53‰, -9.53‰, para M1, M2, M3 y M4 respectivamente. Estos valores se ubican sobre la Recta Meteórica Local indicando que no sufrieron procesos de evaporación en su etapa de infiltración o en su afloramiento, y que corresponden a las aguas precipitadas de origen meteórico. Adicionalmente, la poca variación temporal en las firmas isotópicas de estas aguas de manantial, indica que existe un reservorio donde se almacenan y se efectúan buenos procesos de mezcla de las aguas infiltradas, y que los flujos que alimentan estos manantiales no son superficiales, sino que se mueven en profundidad. A partir de la composición isotópica se establece que la zona de recarga se ubica a una altura aproximada entre 3600 y 3700 msnm (para los manantiales M1, M3 y M4), y a 3200 msnm (para el manantial M2).

7. Recomendaciones

Para mejorar la definición de la Recta Meteórica Local se hace necesario ampliar el tiempo de muestreo durante un mínimo de 3 años adicionales, con el fin de caracterizar su composición isotópica durante varios períodos hidrológicos que muestren la influencia del fenómeno del niño y de la niña, para definir con mayor precisión la Recta Meteórica Local de la zona.

Realizar un balance hídrico a largo plazo (con series de tiempo de mínimo 20 años de las variables meteorológicas) que permita estimar la recarga del sistema acuífero, adicionalmente, determinar los tiempos de residencia de los flujos del agua subterránea con el fin de estimar la tasa de recarga.

La realización de estudios geofísicos en el casco urbano y sus alrededores será vital para delimitar el reservorio y dar una idea inicial de su capacidad de almacenamiento, además de estudios de fracturación de las rocas y de geología estructural. De esta manera se establecerá un modelo hidrogeológico conceptual más detallado y robusto.

Realizar perforaciones de pozos auxiliares (piezómetros) para registrar la variación en tiempo y espacio de los niveles piezométricos y un pozo profundo para la realización de pruebas de bombeo, esto con el fin de construir y calibrar el modelo numérico del reservorio.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Bibliografía

- Aemisegger, F., Pfahl, S., Sodemann, H., Lehner, I., Seneviratne, S. I., & Wernli, H. (2014). Deuterium excess as a proxy for continental moisture recycling and plant transpiration. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4029-4054.
- Alcaldía del Municipio de Málaga. (2003). *Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT)*. Málaga, Santander.
- Alcaldía Municipal de Málaga. (2020, Abril 10). *Alcaldía Municipal de Málaga Santander*. Retrieved from Alcaldía Municipal de Málaga Santander: <http://www.malaga-santander.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Appelo, C. A., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Amsterdam, Netherlands: Ben Akkerman collection Stedelijk Museum, Amsterdam.
- Barragán, E. K., & Forero, A. J. (2014). *Análisis mesoestructural en el corredor aledaño al Río Servitá entre Enciso y el Río Chicamocha, Santander (Tesis de pregrado)*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Camacho, H. A., & Guzman, D. A. (2005). *Implementación de una red de muestreadores de isótopos estables en la precipitación para obtener la recta meteórica local*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Cárdenas, J. A., & Herrera, J. S. (2018). *Caracterización florística y georreferenciación de los afloramientos hídricos comprendidos en las veredas de la parte alta del municipio de Málaga, Santander, Colombia*. Universidad Industrial de Santrander, Málaga.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

Cardozo, A. M., Cetina, M. A., Ibáñez, D. G., Castro, E., & Villabona, J. J. (2016). *Memoria Explicativa Mapa Geológico de la Plancha 136-II Escala 1:50000*. Bucaramanga: Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Cetina, M. A. (2019). *Modelo Hidrodinámico de Flujos Subterráneos en Sistemas Cársticos y su Interacción con las Rocas Adyacentes. Caso de Estudio: Parte Alta de la Cuenca del Río de Oro, Departamento de Santander*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in Hydrogeology*. Nueva York: CRC Press.

Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1702-1703.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrología subterránea*. Barcelona, España: Omega.

Domenico, P. A. (1987). An analytical model for multidimensional transport of a decaying contaminant species. *Journal of Hydrology*, 49-58.

Fabre, A. (1981). Estratigrafía de la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá y Arauca, Cordillera Oriental (Colombia). *Geología Norandina*, 3-12.

Gómez-Isidro, S. (2014). *Aguas Subterráneas en Zonas de Montaña y Trazadores Ambientales*. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander.

Gonfiantini, R., Roche, M. A., Olivry, J. C., Fontes, J. C., & Zuppi, G. (2001). The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. *Chemical Geology*, 147-167.

IDEAM. (2015). *Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas-Contenidos del taller de formación*. Bogotá, D. C: Imprenta Nacional de Colombia.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

- Kendall, C., & Doctor, D. H. (2003). Stable isotope applications in hydrologic studies. *Treatise on geochemistry*, 320-358.
- Mijailov, L. (1985). *Hidrogeología*. Moscú, Rusia: Editorial Mir.
- Mook, W. G. (2002). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico: principios y aplicaciones*. Madrid (España): IGME.
- Mora, A., Horton, B., Mesa, A., Rubiano, J., Ketcham, R., Parra, M., & Stockli, D. (2010). Migration of Cenozoic deformation in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships. *AAPG Bulletin*, 1543-1580.
- Notestein, F. B., Hubman, C. W., & Bowler, J. W. (1944). Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. *Geology Society America Bulletin*, 1165-1216.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 914-928.
- Rincón, J. L. (2019). *Prospección geoeléctrica para el modelado 2D de la resistividad del subsuelo en el área perimetral del casco urbano del municipio de Málaga (Santander) (Tesis de Maestría)*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Rincón-Jaimes, J. L., Ríos-Reyes, C. A., Chacón-Ávila, C. A., & Moreno-Torres, L. E. (2019). Processing of synthetic data for the treatment of geoelectric information for hydrogeological purposes of the Málaga town, Santander (Colombia). *Boletín de Geología*, 145-161.
- Royero, J. M., & Clavijo, J. (2001). *Mapa geológico generalizado-Departamento de Santander. Memoria Explicativa*. Bogotá: INGEOMINAS.

APROXIMACIÓN A LA RECTA METEÓRICA LOCAL

- Salamanca, M. A. (2017). *Caracterización del subsuelo mediante prospección geofísica de resistividades (Tomografía de Resistividad Eléctrica "TRE" y Sondeos Eléctricos Verticales "SEV'S") con fines hidrogeológicos en la sede de Málaga de la Universidad Industrial de Santander (U. Universidad Industrial de Santander , Bucaramanga.*
- Sánchez, J. (2012). *Evolución geoquímica de las aguas subterráneas.* Salamanca, España: Departamento de Geología-Universidad de Salamanca.
- Stiff, H. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal Petroleum Technology.*
- Toussaint, J., & Restrepo, J. (1994). The Colombian Andes During Cretaceous Times. *Cretaceous Tectonics of the Andes*, 61-100.
- UIS; SGC. (2014). *Memoria Explicativa del Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa Escala 1:100000 Plancha 136-Málaga, Departamentos de Santander y Boyacá.* Bogotá D. C: Servicio Geológico Colombiano.
- Vargas, R., Arias, A., Jaramillo, L., & Téllez, N. (1981). *Geología de las Planchas 136 Málaga y 152 Soatá Cuadrángulo I-13.* Bogotá: INGEOMINAS.
- Vélez-Otálvaro, M. V. (1999). *Hidráulica de Aguas Subterráneas.* Medellín: Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Jimeno, A, Cruz, J., Restrepo, H., & Gómez, E. (1973). Geología De Los Cuadrantes H-12 Bucaramanga Y H-13 Pamplona, Departamento De Santander . *Boletín Geológico.*