

Pasantía de investigación en apoyo a la evaluación de los factores geomorfológicos en la estimación de la escorrentía en una microcuenca hidrográfica del sector Mesa de Los Santos,

Santander

Laura Sofía Puentes Argüello

Pasantía de Investigación para optar por el título de Geóloga

Directora:

MSc. María Alejandra Cetina Tarazona

Codirectora:

PhD. Sully Gómez Isidro

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Dedicado a mi abuelo José del Carmen, que dio su vida porque todos en la familia pudiéramos ser profesionales pero sobre todo que fuéramos personas éticas y empáticas. También a mi madre, mis tías, tío y primos, que me han ayudado siempre que lo he necesitado y se han esmerado por mi educación y bienestar, por ellos soy quien hoy soy.

A mis amigos y compañeros, en especial a Luis, Natalia, Héctor y Jorge, quienes han sido un apoyo incondicional y fundamental en mi vida, y con quienes he compartido momentos inolvidables en el último año.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Geología, al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental, y al proyecto de investigación “Estudio Integral del Agua en La Mesa de Los Santos” y a su director, el profesor Francisco Velandia, por proporcionarme las herramientas necesarias para llevar a cabo la realización de la presente pasantía de investigación.

A mi directora, la profesora María Alejandra Cetina, que gracias a su dedicación, orientación y paciencia, se logró el desarrollo de las actividades previstas y un buen término de la investigación.

A mi codirectora de proyecto, la profesora Sully Gómez, quien nos guio con su conocimiento para llevar a cabo un mejor análisis de los datos que se obtuvieron.

A los calificadores, el profesor Joaquín Valencia y la profesora Angélica Álvarez, por sus buenas críticas, comentarios y recomendaciones que son importantes para el futuro.

Finalmente, agradezco a Natalia García, Sebastián Moreno y Luis Eduardo Quintero, por sus consejos y recomendaciones en el desarrollo y presentación del documento final.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.1. General	13
1.2. Específicos	13
2. Generalidades	14
2.1. Localización del área de estudio	14
2.2. Antecedentes	16
2.3. Metodología	17
3. Marco teórico.....	22
3.1. Precipitación.....	23
3.2. Caudal.....	24
3.3. Escorrentía superficial.....	25
3.4. Parámetros morfométricos	30
4. Marco de Referencia.....	34
4.1. Marco Geológico: Estratigrafía	34
4.2. Marco Geológico: Geología estructural	36
4.3. Marco Geomorfológico	38
4.4. Marco hidrológico e hidrogeológico	42

5. Resultados y Discusión.....	43
5.1. Geomorfología de la microcuenca	44
5.2. Análisis de caudales	55
5.3. Análisis de la escorrentía.....	58
6. Conclusiones.....	65
7. Recomendaciones	67
Referencias bibliográficas.....	68
Anexos	74

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Coeficientes estimados según la ATHA.	27
Tabla 2. Cuadro de componentes del coeficiente de infiltración.....	29
Tabla 3. Coeficientes de infiltración debido a la textura de suelo.	30
Tabla 4. Parámetros morfométricos de forma.....	45
Tabla 5. Rangos de Pendiente en porcentaje.	50
Tabla 6. Clasificación y porcentaje de área de pendientes de la microcuenca.	50
Tabla 7. Resultados de volúmenes de escorrentía de los eventos seleccionados.....	60
Tabla 8. Parámetros para la ecuación y coeficiente de escorrentía.....	61
Tabla 9. Resultados de los cálculos de escorrentía superficial mensual.....	63
Tabla 10. Coeficiente de escorrentía mensual.	64

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización de la microcuenca objeto de estudio.	15
Figura 2. Esquema metodológico.	17
Figura 3. Ubicación del instrumento TD-DIVER.....	19
Figura 4. Fotografía de ubicación del instrumento TD-DIVER en el afluente.....	20
Figura 5. Instrumentos para la medición de caudales.....	20
Figura 6. Curva hipsométrica de Strahler.	33
Figura 7. Mapa estructural de la Mesa de Los Santos.	38
Figura 8. Fotografía de la microcuenca.	44
Figura 9. Mapa de pendientes.	49
Figura 10. Curva hipsométrica.....	52
Figura 11. Áreas ocupadas según las alturas de la microcuenca.	53
Figura 12. Mapa de orden de drenaje.....	54
Figura 13. Curva de calibración.....	56
Figura 14. Hidrograma.....	57
Figura 15. Gráfico de los eventos	59

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Mapa de cobertura de suelo.....	74
Anexo B. Mapa morfogenético.....	75
Anexo C. Mapa de pendientes	76
Anexo D. Tabla con los aforos para generar la curva de calibración	77
Anexo E. Tabla con los valores para la generación de la curva hipsométrica.....	78

RESUMEN

Título: Pasantía de investigación en apoyo a la evaluación de los factores geomorfológicos en la estimación de la escorrentía en una microcuenca hidrográfica del sector Mesa de Los Santos, Santander*

Autora: Laura Sofía Puentes Argüello**

Palabras clave: Escorrentía superficial, geomorfología, microcuenca hidrográfica.

Descripción:

En el marco del proyecto de investigación “Estudio Integral del Agua en la Mesa de Los Santos”, el presente proyecto se basa en el cálculo del coeficiente de escorrentía superficial como componente de un balance hídrico necesario para la planeación y buen manejo del recurso hídrico. En este caso, la componente de escorrentía superficial presenta diferentes obstáculos para su medición en la zona de estudio puesto que para su estimación existe una falta de instrumentación adecuada en las cuencas hidrográficas, así como también hay dificultad en el acceso a los diferentes afluentes y poco flujo del recurso en estos. Ahora bien, en dicho cálculo de escorrentía superficial influyen factores geomorfológicos como la pendiente, el área de la cuenca, entre otros; por lo tanto, se realiza una caracterización de dichos factores geomorfológicos con el fin observar y determinar la relación con el coeficiente de escorrentía superficial, realizando un análisis por medio de una recolección y un procesamiento de datos de manera mensual. En cuanto a los resultados, se obtuvieron los niveles de la corriente principal de la microcuenca seleccionada por medio de un transductor de presión absoluta marca (TD-DIVER) y un transductor de presión atmosférica (BARO-DIVER), a partir de los cuales se generó el hidrograma de la corriente en un periodo de siete meses. Así mismo se realizó el procesamiento del DEM adquirido en un software GIS. Con base a la caracterización y desarrollo del proyecto, se establece que, para eventos de lluvias cortos, el coeficiente de escorrentía superficial puede llegar a 0.17, además, el cálculo mensual arroja un coeficiente de 0.29. Las pendientes, la forma de la cuenca, entre otros factores geomorfológicos, tienen una influencia de manera directa en el proceso de escorrentía superficial.

* Trabajo de grado

** Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Directora María Alejandra Cetina Tarazona. Codirectora Sully Gómez Isidro

ABSTRACT

Title: Research internship in support of the evaluation of geomorphological factors in the estimation of runoff in a hydrographic micro-basin in the Mesa de Los Santos sector, Santander*

Author: Laura Sofía Puentes Argüello**

Key Words: Surface runoff, geomorphology, hydrographic micro-basin, slope.

Description:

Within the framework of the research project "Integral Study of Water in the Mesa de Los Santos", this project is based on the calculation of the surface runoff coefficient as a component of a water balance necessary for planning and good management of water resources. In this case, the surface runoff component presents different obstacles for its measurement in the study area since for its estimation there is a lack of adequate instrumentation in the hydrographic basins, as well as there is difficulty in accessing the different tributaries and little flow of the resource in these. However, in said calculation of surface runoff geomorphological factors such as the slope, the basin area, among others; therefore, a characterization of these geomorphological factors is carried out in order to observe and determine the relationship with the surface runoff coefficient, performing an analysis by collecting and processing data on a monthly basis. Regarding the results, the levels of the main current were obtained of the selected micro-basin by means of an absolute pressure transducer brand (TD-DIVER) and an atmospheric pressure transducer (BARO-DIVER), from which the hydrograph of the current was generated in a period of seven months. Likewise, the processing of the DEM acquired in a GIS software was carried out. Based on the characterization and development of the project, it is established that, for short rainfall events, the surface runoff coefficient can reach 0.17, in addition, the monthly calculation shows a coefficient of 0.29. The slopes, the shape of the basin, among other geomorphological factors, have a direct influence on the surface runoff process

* Bachelor Thesis

** Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Geología. Directora María Alejandra Cetina Tarazona. Codirectora Sully Gómez Isidro

Introducción

El recurso hídrico, como fuente fundamental para las actividades y el sostenimiento humano, requiere de un manejo racional que permita realizar una proyección favorable de su uso a futuro. Una herramienta útil para desarrollar dicha proyección es la realización de un balance hídrico, en el cual se hace una estimación de las ganancias y pérdidas del recurso dentro del proceso de ciclo hidrológico (PHI-UNESCO, 1982). Dentro de las variables que integran el balance hídrico se encuentra la escorrentía superficial, que se entiende como el agua que no se infiltra o se evapora, sino que escurre por la superficie (Sánchez, 2017). Con el pasar del tiempo ha adquirido mayor importancia la relación que tienen los factores geomorfológicos y su influencia en la respuesta hidrológica de las cuencas.

El área de estudio se encuentra en la zona conocida como Mesa de Los Santos, en el municipio de Los Santos, departamento de Santander. Este municipio es de interés puesto que presenta escasez en el recurso hídrico superficial, junto a la baja precipitación que reflejan diferentes documentos, como el Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio (EOT, 2003; FUNDEMESA, 2009; Becerra y Parra, 2016). En el estudio de oferta hídrica realizado en Becerra y Parra (2016) se muestra un comportamiento bimodal de las precipitaciones, en donde se presentan dos estaciones con épocas secas y dos con épocas húmedas, teniendo cada una de estas una duración de seis meses separadas en dos periodos del año, es decir, las épocas secas se pueden estimar entre los meses de diciembre a febrero y de junio a agosto, mientras que las épocas húmedas normalmente se registran en los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre. El balance hídrico a largo plazo, realizado por Becerra y Parra (2016), estima un déficit en la

infiltración potencial, reiterando la necesidad de un estudio a menor escala temporal, por ejemplo, a escala mensual.

Dado lo anterior, se desarrolla el proyecto denominado “Estudio Integral del Agua en la Mesa de Los Santos”, en donde se busca obtener un modelo conceptual del funcionamiento del recurso hídrico, para evaluar su uso y vulnerabilidad intrínseca a la contaminación que permita una gestión integral del recurso en el sector. En el marco de dicho proyecto se lleva a cabo la presente pasantía de investigación, la cual busca realizar un análisis de los factores geomorfológicos que influyen en la escorrentía superficial, por medio de recolección de datos de niveles y caudales, junto con la caracterización geomorfológica de la zona de estudio.

1. Objetivos

1.1. General

Estudiar los factores geomorfológicos que influyen y definen los procesos de escorrentía en una microcuenca hidrográfica seleccionada del sector de la Mesa de Los Santos, Santander, Colombia.

1.2. Específicos

- Caracterizar geomorfológicamente la microcuenca hidrográfica seleccionada del sector Mesa de Los Santos.
- Definir los factores geomorfológicos que influyen en el proceso de escorrentía superficial de la microcuenca seleccionada mediante observaciones y datos de campo.
- Estimar el coeficiente de escorrentía de la microcuenca seleccionada mediante el análisis de los eventos de lluvia registrados en el hidrograma.

2. Generalidades

A continuación, se describen las generalidades de la pasantía de investigación correspondientes a la localización del área de estudio, antecedentes y metodología.

2.1. Localización del área de estudio

El área de estudio se encuentra localizada en la Cordillera Oriental de Colombia, en la zona rural del municipio de Los Santos, en el departamento de Santander. En este municipio se diferencia en dos sectores principales, el sector Los Santos (o partes Bajas) y el sector La Mesa (según EOT de Los Santos, 2003). El primero se ubica hacia la zona occidental del municipio, encontrándose en esta parte la cabecera municipal, a una altura de 1310 m.s.n.m. Y el segundo (sector La Mesa) se encuentra en la parte oriental, y se diferencia por tener una altitud mayor y un relieve semiplano, más estable que el sector Los Santos. Las elevaciones en este municipio varían entre los 200 m.s.n.m. hasta los 1800 m.s.n.m. y presenta temperaturas de 17°C a 30°C.

Al oriente del municipio se puede encontrar el Rio Chicamocha, el cual funciona como límite con el municipio de Aratoca, al norte Los Santos limita con los municipios de Girón y Piedecuesta, al sur con los municipios de Jordán y Villanueva, y al occidente con el municipio de Zapatoca, marcándose este límite por el Rio Sogamoso.

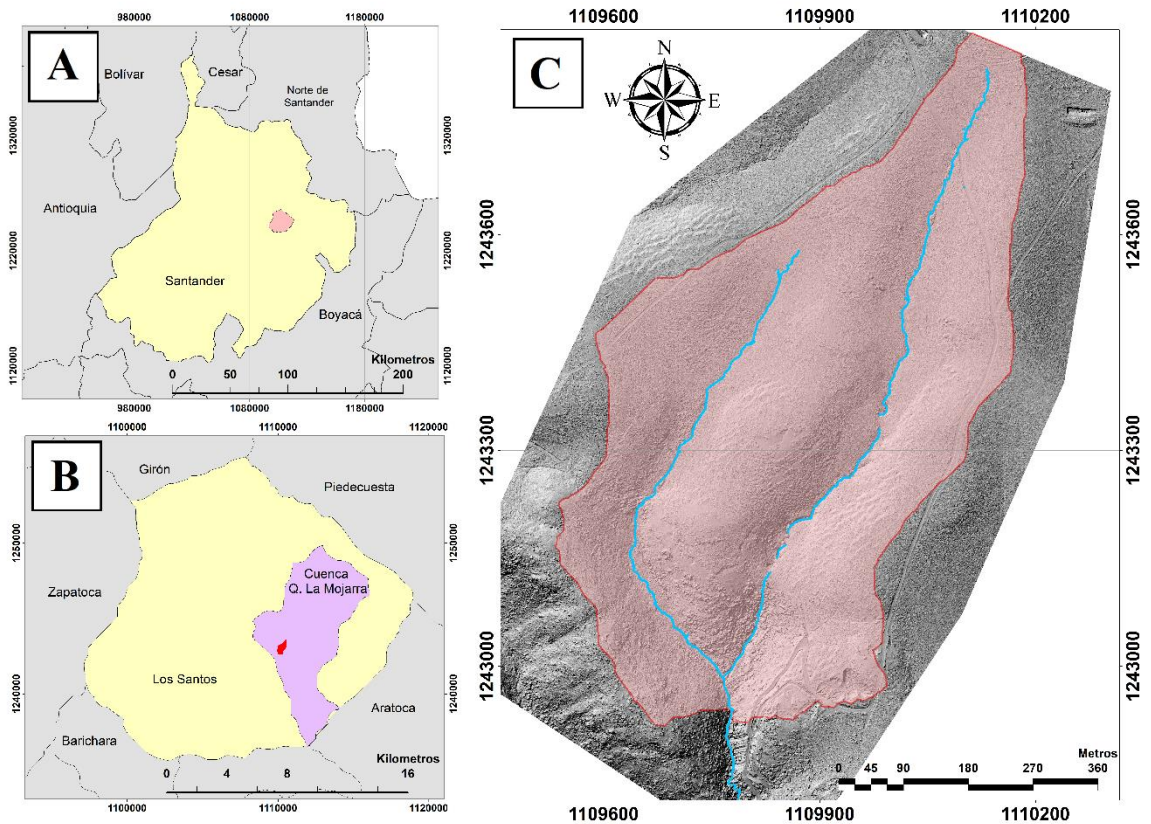
La zona seleccionada para el presente estudio corresponde a una microcuenca perteneciente a la cuenca de la quebrada La Mojarra, con un área de 359492.4 m² o 35.95 hectáreas, ubicada en las coordenadas planas (sistema de referencia Magna Sirgas, origen Bogotá) E = 1.109.777 y N = 1.242.947, localizada al sur de la Mesa de los Santos (Figura 1)

Para el caso de este estudio, se maneja una escala de 1:2.000 para la generación de mapas de la microcuenca, ya que esta cuenta con un área considerablemente pequeña frente a otros

estudios de cuencas o en el municipio, que manejan escalas menores, por ejemplo, de 1:10.000 o 1:25.000.

Figura 1.

Mapa de localización de la microcuenca objeto de estudio.



Nota: A) Departamento de Santander con la ubicación del municipio de Los Santos. B) Municipio de los Santos con la ubicación de la cuenca de la Quebrada La Mojarra y microcuenca seleccionada (indicada en rojo). C) Microcuenca seleccionada.

2.2. Antecedentes

En la Mesa de Los Santos se han realizado diferentes estudios como el de Becerra y Parra (2016), en el cual se presentan diferentes resultados a partir de la realización de un balance hídrico de largo plazo.

Así mismo, la zona de estudio cuenta con un documento del Esquema de Ordenamiento Territorial (2003), en donde los resultados se dan a partir de la utilización de estaciones meteorológicas que registran la precipitación constantemente.

Adicionalmente, se cuenta con el Informe Final del Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA), presentado por Ingeoexploraciones S.A.S., en el año 2016, para la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS), se expone la realización de un Modelo Hidrogeológico Conceptual, en el cual se integra la información de los diferentes ámbitos a tener en cuenta para ilustrar los diferentes procesos que influyen en el terreno de la Mesa de Los Santos.

En cuanto a la geología del área de estudio, se dispone del artículo científico Díaz et al. (2009), en donde se presenta una evaluación hidrogeológica preliminar de las formaciones que afloran en La Mesa de Los Santos, realizando un análisis de las porosidades primaria y secundaria, basándose en la cartografía geológica, estratigrafía e inventario de puntos de agua.

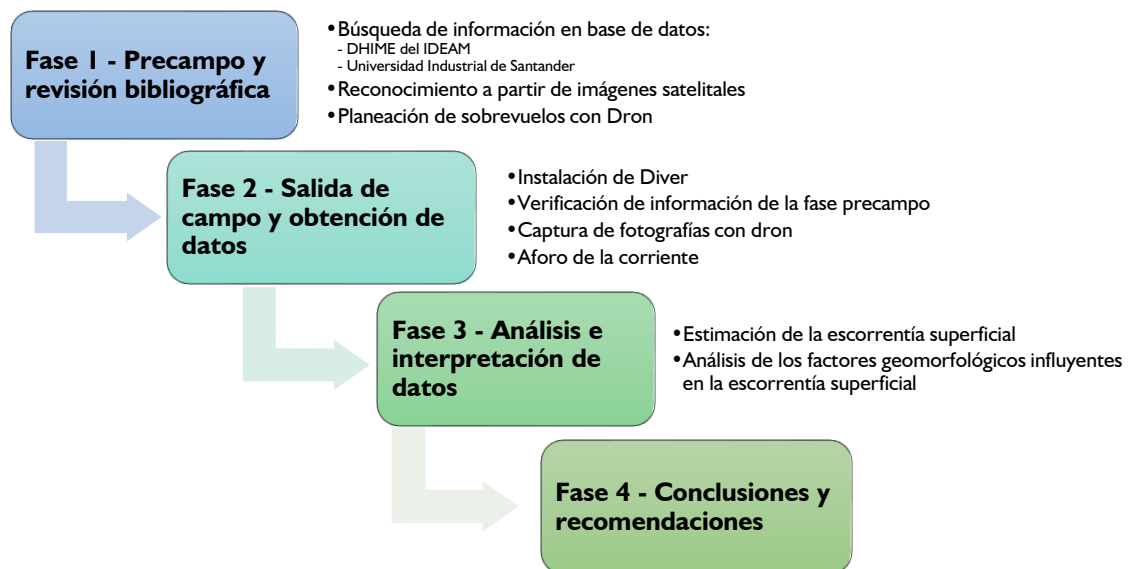
Finalmente, en el documento de Moreno y Silva (2021) se evalúan aspectos de geomorfología con ayuda de insumos como la generación de un mapa de pendientes, mapa de cuencas hidrográficas, mapa de cobertura de suelos, entre otros, que permitirán evaluar el funcionamiento del sistema hídrico de la Mesa de Los Santos en un futuro.

2.3. Metodología

La presente pasantía de investigación se realizó de acuerdo con las siguientes fases y actividades (Figura 2).

Figura 2.

Esquema metodológico.



2.3.1. Fase 1 – Precampo y revisión bibliográfica

Esta fase se basó en la recopilación de información de estudios de balance hídrico realizados con anterioridad en el área de estudio o en zonas similares. Dicha información fue relacionada con estudios de carácter geomorfológico. La revisión bibliográfica se llevó a cabo por medio de diversas bases de datos existentes y relevantes como artículos, trabajos de grado, libros, entre otros, teniendo como principal la base de datos de la Universidad Industrial de Santander. También se hizo uso de plataformas como DHIME (Datos Hidrológicos y Meteorológicos) del IDEAM para datos de precipitación, y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). La

información de bases de datos se utilizó con el objeto de establecer características previas de la zona de estudio, como lo es la geomorfología y la distribución de cuencas hidrológicas en el área, además de datos de precipitación para el posterior análisis de datos en la estimación de la escorrentía.

Se utilizaron sensores remotos como Google Earth con el fin de hacer un reconocimiento previo de la zona, determinando las vías de acceso y afluentes de agua facilitando la selección del punto de ubicación del transductor de presión TD-DIVER para la medición de niveles y posterior obtención de caudales de la corriente superficial.

De igual manera, la caracterización geomorfológica se apoyó en la utilización de un vehículo no tripulado (Dron), el cual está equipado con una cámara fotográfica encargada de realizar tomas aéreas en la microcuenca de estudio, para lo cual se realizó una planeación previa de la ruta de sobre vuelo.

2.3.2. Fase 2 – Salida de campo y obtención de datos

Luego de determinar zonas de interés, por medio de los sensores remotos, se realizó una salida de reconocimiento con el fin de corroborar y ubicar los principales afluentes superficiales del sector La Mesa. Una vez realizado este reconocimiento se seleccionó la microcuenca, perteneciente a la cuenca La Mojarra, por llevar un caudal considerable, resaltando que se encuentra la presencia de una manguera, pero siendo este afluente el que presenta una menor afectación antrópica, puesto que los demás se encuentran mayormente intervenidos con mangueras.

Seleccionada la microcuenca a trabajar, se ubica el lugar propicio para la instalación del transductor de presión absoluta TD-DIVER para posteriormente movilizarse al área e instalar el

equipo en el afluente principal de la microcuenca hidrográfica seleccionada (Figura 3, Figura 4, Figura 5). En esta fase se obtuvieron datos de niveles y datos de caudal por medio de al menos tres aforos de la corriente.

Figura 3.

Ubicación del instrumento TD-DIVER

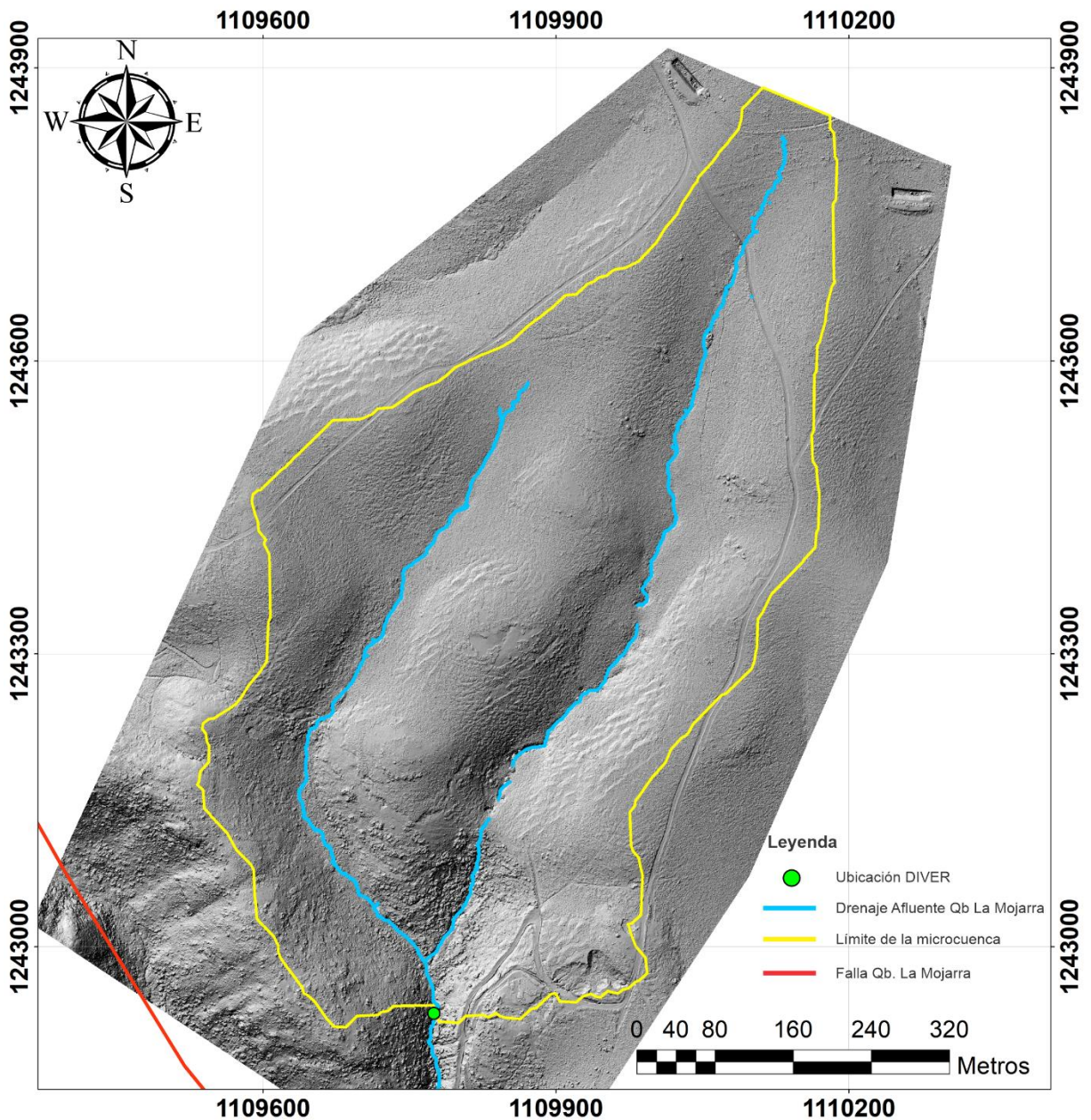


Figura 4.

Fotografía de ubicación del instrumento TD-DIVER en el afluente.



Figura 5.

Instrumentos para la medición de caudales. Transductor de presión absoluta TD-DIVER y transductor de presión atmosférica BARO-DIVER



Se realizó también la verificación de la información geomorfológica que se obtuvo en la fase de pre-campo, junto con el desarrollo de los sobrevuelos del Dron planeados, centrándose en la microcuenca de estudio, estableciendo la caracterización geomorfológica a la escala adecuada. Una vez obtenidas las imágenes del Dron, se procedió a realizar con el software Q-GIS, que es un programa de carácter libre, una delimitación de la microcuenca, en donde se genera de manera automática por las divisorias de aguas. Con dicha delimitación se extraen los parámetros como el área, el perímetro, entre otros.

Se verificó igualmente la geología presente en el área de estudio, la geomorfología y la cobertura de suelo.

2.3.3. Fase 3 – Análisis e interpretación de datos

A partir de los datos obtenidos y de la información recopilada se procedió a realizar el procesamiento, análisis e interpretación de datos. En primera medida se realizó el procesamiento de las imágenes capturadas con el Dron en el programa Global Mapper, en donde se generaron ortofotografías, las cuales se procesaron nuevamente para generar un Modelo de Elevación Digital (DEM).

Con la ayuda de material bibliográfico, se estableció la caracterización geomorfológica de la microcuenca, en donde se determinaron los diferentes parámetros morfométricos, se realizó un mapa de pendientes y se generó una curva hipsométrica.

Siguiente a esto, se realizó el procedimiento de determinación de caudales a partir de los datos de niveles y los datos de caudal de los aforos, que permitieron la obtención de la curva de calibración de caudales y el hidrograma correspondiente. El caudal que se determinó se procesó junto a los demás datos recopilados para realizar la estimación de la escorrentía superficial.

Conjuntamente, se realiza el análisis de los factores geomorfológicos determinados, relacionando el valor de la escorrentía superficial con la caracterización geomorfológica de la microcuenca.

2.3.4. Fase 4 – Conclusiones y recomendaciones

Esta última fase se llevó a cabo tras analizar en conjunto los datos obtenidos y procesados, obteniendo así un resultado estimado de escorrentía superficial y un análisis de la influencia que tiene en esta los factores geomorfológicos.

3. Marco teórico

Colombia, por su localización geográfica y diversidad climatológica, es uno de los países con mayor riqueza en recursos hídricos del mundo. A pesar de esto, la distribución espacial de las poblaciones en sectores en donde la oferta hídrica es baja influye en que el impacto al recurso sea cada vez mayor, mientras que la disponibilidad de este disminuye (IDEAM, 2019).

Los Santos es un municipio que tiene una oferta hídrica superficial media a baja debido a la baja pluviosidad, permaneciendo secas la mayor parte de las quebradas durante el verano (IDEAM, 2019). Dado lo anterior, la realización de un balance hídrico adquiere importancia, reconociendo por medio de este que es necesaria una gestión integral del recurso hídrico.

Comúnmente se tiende a confundir el concepto de Balance Hídrico con el de Ciclo Hidrológico. El Ciclo Hidrológico, se denomina como “movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea” (Sánchez, 2017), mientras que el Balance Hídrico, según el PHI-UNESCO (1982), es una herramienta útil para conseguir una planeación y manejo más racional del recurso hídrico, definiéndose matemáticamente como la equivalencia entre la cantidad de agua que entra al sistema, enmarcado en un volumen de control (cuenca hidrográfica), y la cantidad de

agua que sale del mismo. Los balances hídricos se pueden calcular de diferentes periodos de tiempo, es decir, se puede realizar un cálculo de manera anual o mensual, según sea necesario.

En el marco de un balance hídrico, uno de los parámetros principales es la escorrentía, la cual es un componente del ciclo hidrológico que se estima a partir de datos hidrogeológicos de una zona determinada, dependiendo de factores como la precipitación, la porosidad del suelo, entre otros (Becerra y Parra, 2016). En este proceso se determinan 3 tipos de escorrentía: la escorrentía superficial o directa, la subsuperficial o hipodérmica y la subterránea, siendo la escorrentía superficial el objeto de este estudio.

3.1. Precipitación

Según Sánchez (2017), la precipitación es “cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre. Esto incluye básicamente lluvia, nieve y granizo”. En algunos casos se puede incluir el rocío o la escarcha, ya que puede llegar a aportar una pequeña parte en la precipitación total. Las precipitaciones constituyen casi que completamente la entrada de agua a una cuenca, por esta razón adquiere un valor agregado dentro de los estudios hidrológicos e hidrogeológicos.

Para obtener la cantidad de precipitación de manera cuantitativa se realiza una toma de datos en un punto seleccionado, por medio de un instrumento de medida llamado Pluviómetro, el cual es capaz de leer de una manera más precisa, la cantidad el agua que cae en la precipitación. Dicha cantidad de agua se mide en láminas de agua o milímetros, representando un litro repartido en una superficie de 1 m^2 . También se analizan datos existentes en una base de datos como la del IDEAM.

3.2. Caudal

El término caudal está definido como el volumen de agua que circula por el cauce de un río en un lugar y tiempo determinados, refiriéndose al volumen de la escorrentía de una cuenca hidrográfica concentrada en el río principal de la misma (Díaz y Martínez, 2016). El caudal se mide normalmente en metros cúbicos por segundo (m^3/s) o en Litros por segundo (L/s) dependiendo del estudio a realizar, puesto que se puede entregar valores en horas e incluso en años.

El aforo de caudal hace referencia a la actividad realizada en donde se miden la velocidad, profundidad y ancho de una corriente para determinar el caudal que pasa por ella. (Díaz y Alarcón, 2018)

Por su parte, el hidrograma se define en Díaz y Martínez (2018) como la gráfica que muestra las variaciones de caudal de un río o del nivel de agua subterránea en una perforación respecto a un nivel de referencia frente al tiempo, es decir, representa las variaciones del caudal de un afluente respecto al tiempo.

Según Sánchez (2017), uno de los objetivos principales de la hidrología superficial es calcular la escorrentía que se va a generar si se produce una precipitación determinada. Dicho cálculo puede estimarse para un evento concreto, estudiando qué caudales generará cierta precipitación, o un proceso continuo, estableciendo periodos de tiempo más amplios como, por ejemplo, un año.

Sánchez (2017) presenta el proceso de estimar el volumen de escorrentía superficial a partir del hidrograma. Como primer paso, se representa gráficamente la precipitación neta, por medio de un hietograma, siendo este un gráfico de forma escalonada que representa la variación de la

intensidad de la precipitación. Seguido a esto se genera el hidrograma del evento o del tiempo establecido, separando gráficamente el flujo o caudal base de lo que sería la escorrentía superficial, ya que se genera un pico de gráfica. Para determinar el flujo base se toman los dos puntos principales de caudales en la gráfica, es decir, justo cuando inicia el evento y cuando termina. Este caudal se multiplica por el tiempo transcurrido para determinar el volumen en dichos puntos y se suman para determinar el volumen de flujo base. Teniendo esta información y el dato del volumen total, se realiza una operación sencilla de resta y el resultado será el volumen de escorrentía superficial.

3.3. Escorrentía superficial

La escorrentía superficial, siendo uno de los componentes para la realización de un balance hídrico, está definida por Sánchez (2017) como “el agua que no es evaporada ni infiltrada, sino que escurre superficialmente”, siendo calculada de forma matemática por diferentes métodos, utilizando valores ya sean reales o estimados, según sea el caso. A continuación, se presentan dos métodos utilizados para la estimación de la escorrentía:

3.3.1. Método Racional (Sánchez, 2017):

En este método se estima el caudal, el cual está definido como el volumen de agua que atraviesa una superficie establecida en una unidad de tiempo. Es considerado como el método más sencillo, ya que se basa en evaluar el caudal que produce una precipitación en un área determinada.

Suponiendo que una precipitación tiene una intensidad I en un periodo de tiempo establecido y cae homogéneamente sobre una cuenca de una superficie A , se producirá un caudal Q , mediante la ecuación:

$$Q = C * I * A$$

Ecuación 1

Donde, en este caso, se tiene que:

Q = Caudal (m³/día)

I = Intensidad de precipitación (m/día)

A = Superficie de la microcuenca (m²)

C = Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía **C** representa la fracción de precipitación que se convierte en caudal, teniendo valores entre 0.1 y 0.7 normalmente, pero siendo 1 su máximo valor adimensional. Algunos valores estimados del coeficiente de escorrentía se pueden encontrar en diferentes textos de hidrología, por medio de tablas de diferentes autores, así como también se puede estimar teniendo los parámetros necesarios como en el presente estudio.

Este coeficiente varía con la pendiente, las condiciones de la superficie, la cubierta vegetal y el tipo de suelo hidrológico, intuyendo que las superficies que son relativamente impermeables, como lo es el caso de suelos arcillosos o urbanizaciones, tienen coeficientes de escorrentía aproximados al valor 1, mientras que las superficies que contienen vegetación y suelos que permiten la infiltración, tienen coeficientes de escorrentía bajos, cercanos a cero (Chiarito, et. al. 2018).

Según estudios realizados por la Asociación de Fabricantes de Tubos de Hormigón Armado (ATHA) (2010), en su Manual de Cálculo, Diseño e Instalación de Tubos de Hormigón Armado, para una misma cuenca, el coeficiente puede variar entre los valores 0 y 1, dependiendo de la duración de la lluvia, es decir, para lluvias largas el coeficiente va a ser mayor que para lluvias

cortas. En este manual se expone una tabla (Tabla 1), en la cual se encuentran unos rangos de coeficientes de escorrentía dependiendo de la duración de la lluvia y del tipo de área o cobertura de suelo.

Tabla 1.

Coeficientes estimados según la ATHA.

Tipo de área o cobertura	C. lluvias cortas	C. lluvias largas
Residencial (urbano, según viviendas por hectárea)	0.10 a 1	0.50 a 1
Comercial (urbano)	0.50 a 0.95	1
Parques y jardines	0.10 a 0.25	0.40
Pavimentos (urbano, según tipo de pavimento)	0.20 a 1	1
Cubierta	0.90 a 1	1
Cultivos (según pendiente)	0.05 a 0.20	0.15 a 0.50
Bosques (según pendiente)	0.05 a 0.15	0.10 a 0.35

En el presente estudio, se realizó la estimación del Coeficiente de escorrentía (C), por lo tanto, se despeja de la ecuación principal (Ecuación 1), dando como resultado la siguiente ecuación:

$$C = \frac{Q}{I \cdot A} \quad \text{Ecuación 2}$$

3.3.2. Cálculo de la escorrentía superficial mensual (Schosinsky, 2006):

La escorrentía superficial mensual de una cuenca se puede calcular como la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje, menos la infiltración, a partir de la siguiente ecuación:

$$ESC = P - Ret - P_i \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

ESC = Escorrentía superficial (mm/mes)

P = Precipitación (Dato meteorológico en mm/mes)

Ret = Retención de lluvia mensual por follaje (mm/mes)

Pi = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo (mm/mes)

La retención de lluvia por follaje **Ret** hace referencia a la cantidad de lluvia que se acumula en el follaje de las plantas, calculándose a partir del parámetro de precipitación **P**, en donde se considera que, si **P** es menor o igual a 5 mm/mes, entonces **Ret=P**, mientras que, si **P** es mayor o igual a 5 mm/mes, se utiliza **Ret=(P)(Cfo)**, siendo **Cfo** el coeficiente de follaje que, para bosques muy densos es **Cfo=0.20** y para demás coberturas **Cfo=0.12**. En el caso en que **P** sea mayor a 5 mm y el producto de **(P)(Cfo)** sea menor a 5, entonces se tiene que **Ret=5**.

El parámetro **Pi** representa la precipitación que se infiltra mensualmente al suelo, dándose por la ecuación:

$$P_i = (C_i)(P - Ret) \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde **Ci** es el coeficiente de infiltración del suelo, hallándose mediante la ecuación **Ci=Kp+Kv+Kfc**, cuando el resultado de esta suma sea menor o igual a 1, mientras que se toma que **Ci=1** si dicha suma es mayor a 1. **Kp** y **Kv** hacen referencia a la fracción de agua que se infiltra por efecto de la pendiente y por efecto de la cobertura vegetal respectivamente, utilizándose unos valores sugeridos para estos, expuestos en la Tabla 2.

Tabla 2.

Cuadro de componentes del coeficiente de infiltración. A. Valores para K_p . B. Valores para K_v . Tomado de Schosinsky, 2006.

A. Valores para K_p

Por pendiente	Pendiente	K_p
Muy plana	0.02% - 0.06%	0.30
Plana	0.03% - 0.4%	0.20
Algo plana	1% - 2%	0.15
Promedio	2% - 7%	0.10
Fuerte	Mayor de 7%	0.06

B. Valores para K_v

Por cobertura vegetal	K_v
Cobertura con zacate menos del 50%	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate más del 75%	0.21

K_{fc} se refiere al coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo, utilizando la infiltración básica del suelo f_c (mm/día), dándose por la ecuación $K_{fc} = 0.267 \ln (f_c) - 0.000154 f_c - 0.723$, para valores en donde f_c se ha de encontrar entre 16 a 1568 mm/día. En el caso en que f_c sea menor a 16 mm/día, la ecuación para K_{fc} es $K_{fc}=0.0148 f_c /16$, mientras que, si f_c es mayor a 1568 mm/día, se utiliza la ecuación $K_{fc}=1$.

En este caso, ya que no se realiza toma de datos de infiltración en campo, se utilizan como referencia los valores estimados expuestos en la Tabla 3, presentados en el documento Manual para Estudios Hidrológicos de la ONU (1972).

Tabla 3.***Coefficientes de infiltración debido a la textura de suelo.***

Por tipo de Suelo	<i>K_{fc}</i>
Arcilla compacta impermeable	0.10
Combinación de limo y arcilla	0.20
Suelo limo-arenoso no muy compacto	0.40

Nota: Tomado de ONU, 1972.

Por último, ya que el coeficiente de escorrentía se define como la fracción de precipitación que se convierte en caudal (Sánchez, 2017), o la relación entre la parte de precipitación que circula superficialmente y la precipitación total (ATHA, 2010), se utiliza la Ecuación 5 para la determinación del coeficiente. En este caso, las unidades utilizadas para resolver la ecuación se encuentran en m³ por mes, puesto que el cálculo de la escorrentía superficial es de manera mensual.

$$C = \frac{\text{Escorrentía superficial (m}^3/\text{mes)}}{\text{Precipitación total (m}^3/\text{mes)}} \quad \text{Ecuación 5}$$

3.4. Parámetros morfométricos

La morfometría permite la caracterización de un ambiente o un terreno por medio de parámetros susceptibles a tratamiento matemático (Cruz Romero et al., 2015). Para este caso, se clasificaron los parámetros en tres grupos que son: Parámetros morfológicos de forma, de relieve y de red hidrográfica. A continuación, se describen cada uno de estos parámetros:

3.4.1. Parámetros de Forma (Cruz Romero et al., 2015):

- Perímetro de la cuenca (P) (metros): Corresponde a la línea formada por la divisoria de aguas de la cuenca que se estudia.
- Área de la cuenca (A) (Hectáreas/Metros cuadrados): Superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio.

- Longitud axial (L_a) (metros): Distancia entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca.
- Ancho promedio (A_p) (metros): Expresado por el cociente entre el área de la cuenca y su longitud axial.

$$A_p = \frac{A}{L_a} \quad \text{Ecuación 6}$$

- Índice de forma de la cuenca (IF): Comprende la distribución o arreglo geométrico de los ríos tributarios que integran la red hidrográfica. Cuando IF es cercano a 1, la cuenca tiene una forma redondeada, mientras que, si dicho valor decrece, la cuenca tiende a ser alargada.

$$I_f = \frac{A_p}{L_a} \quad \text{Ecuación 7}$$

- Coeficiente de compacidad de Gravelius (K_c): Relaciona el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca. Si el resultado de la ecuación es cercano a 1, demuestra que la cuenca tiene una forma circular y se convierte en alargada a medida que el valor aumenta aproximándose a 1.75. Cuando los valores son mayores a 1.75, se dice que la cuenca es irregular.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ecuación 8}$$

- Razón de elongación (R_e): Compara la longitud del eje mayor de la cuenca con el diámetro de un círculo de igual área que la cuenca. Los valores inferiores a 1 implican formas alargadas, entre menor sea el valor de R_e , más alargada es la forma de la cuenca (González, 2004).

$$R_e = 1.129 \frac{A^{0.5}}{La} \quad \text{Ecuación 9}$$

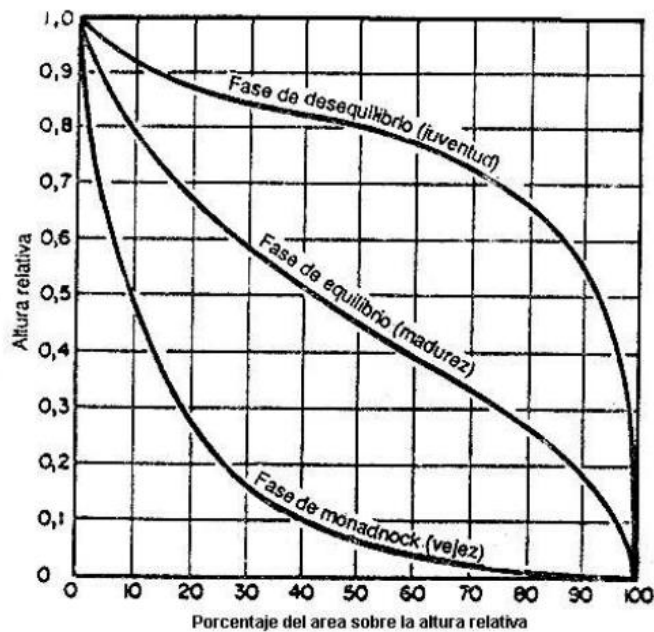
- Índice de circularidad de Miller (R_c): Compara el área de la cuenca con el área de un círculo cuya circunferencia es igual al perímetro de la cuenca. Los valores resultantes oscilan entre 0 y 1, siendo la unidad el máximo valor, lo que correspondería a una cuenca de forma circular (González, 2004).

$$R_c = 4\pi \frac{A}{P^2} \quad \text{Ecuación 10}$$

3.4.2. *Parámetros de Relieve (Cruz Romero et al., 2015):*

- Curva hipsométrica: Representación gráfica de la distribución del área de acuerdo con su elevación. Proporciona información sintetizada sobre la altitud y forma de la cuenca. También se utiliza para interpretar las etapas del paisaje y procesos de erosión en una cueca.

El análisis hipsométrico lo define Strahler (1952) como el estudio de la distribución del área de la superficie del suelo, o el área de la sección transversal horizontal, de una masa de tierra con respecto a la elevación, es decir, es la repartición del área de una cuenca respecto a la elevación del terreno donde se encuentra. Esta gráfica arroja una curva en donde su forma indica la edad de evolución del paisaje, por lo tanto, la cuenca con una curva hipsométrica cóncava hacia abajo está en etapa juvenil con potencial erosivo, una curva en forma de “S” indica una cuenca en equilibrio o etapa de madurez, y una curva cóncava hacia arriba muestra que la cuenca está en una etapa antigua o de vejez (Figura 6, Strahler, 1952).

Figura 6.**Curva hipsométrica de Strahler.**

Nota: Tomada de Guerra y González, 2002.

- Pendiente media de la cuenca (P_m)
- Altitud media de la cuenca (A_m)

3.4.3. *Parámetros de Red Hidrográfica (Cruz Romero et al., 2015):*

- Orden de drenajes de la cuenca
- Tiempo de concentración (T_c) (horas): Tiempo mínimo necesario para que todos los puntos hidrológicos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía al punto de salida y está determinado por el tiempo que tarda una partícula hidrológicamente más lejana en viajar hasta el punto emisor de la cuenca. Se define con la siguiente ecuación:

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76} \quad \text{Ecuación 11}$$

En dónde,

T_c = Tiempo de concentración (h)

L = Longitud del cauce (Km)

J = Pendiente media del cauce (%)

La pendiente media del cauce se puede evaluar mediante la Ecuación 12, siendo el resultado adimensional. Este resultado se convierte en porcentaje para ser evaluado en la Ecuación 11, de ahí la multiplicación por cien que se observa en la ecuación.

$$J = \frac{(Cota\ máxima - Cota\ mínima)}{Longitud\ del\ cauce} * 100 \quad \text{Ecuación 12}$$

4. Marco de Referencia

En el presente capítulo se exponen las características del área de estudio referentes al marco geológico (estratigrafía y geología estructural), marco geomorfológico y marco hidrológico e hidrogeológico.

4.1. Marco Geológico: Estratigrafía

La estratigrafía del área de estudio se conforma por sedimentos de edad Cretácica Inferior correspondientes a la Formación Los Santos, también encontrada en diferentes estudios con el nombre de Formación Tambor. La Formación Los Santos está subdividida en tres miembros litoestratigráficos, el miembro superior, medio e inferior. El primero en definir esta formación fue

Cediel (1968) pero ha sido redefinida en estudios posteriores. El ambiente de sedimentación está interpretado como depósitos fluviales acumulados por corrientes trenzadas (Clavijo, 2001).

Los miembros litoestratigráficos se definen, en Díaz et al., 2009, de la siguiente manera:

- **Miembro Inferior:** El miembro inferior de la formación está conformado hacia la base por intercalaciones de conglomerados arcillo arenosos con areniscas conglomeráticas arcillo arenosas, y hacia el tope, por intercalaciones de areniscas de grano fino con areniscas conglomeráticas, de color rojo grisáceo y gris amarillento, con laminación cruzada. Este miembro tiene un contenido alto de matriz arcillo arenosa de composición illítica, lo que reduce la permeabilidad de la formación.
- **Miembro Medio:** Constituido por intercalaciones de areniscas de grano fino a muy fino, con capas de arcillolita a limolita, de color marrón rojizo, con laminación plano-paralela y cruzada. Tiene baja porosidad primaria, pero se puede encontrar fracturado, lo que aumenta la permeabilidad secundaria.
- **Miembro Superior:** Este miembro se compone hacia la base, de areniscas de grano fino con algunas intercalaciones delgadas de areniscas de grano grueso. Hacia el tope de la formación se encuentran intercalaciones de capas de areniscas de grano medio con capas finas de areniscas de grano fino. Esta formación se encuentra de color amarillo grisáceo, con estratificación planoparalela y laminación cruzada. Este miembro presenta, una porosidad primaria de media a alta, pero se caracteriza por tener porosidad secundaria asociada a fracturas, aumentando de norte a sur, es decir, hacia el sur de la formación se puede encontrar este miembro mayormente fracturado. Se considera que miembro como un acuífero hacia el norte y como un acuífero fracturado hacia el sur.

La Formación Los Santos se encuentra suprayaciendo a la formación Jordán en discordancia angular, estando también en contacto concordante con la suprayacente Formación Rosablanca (Ingeominas, 2008).

4.2. Marco Geológico: Geología estructural

La Mesa de Los Santos, por su ubicación central en el departamento de Santander, se caracteriza por ser el resultado de complejos procesos sedimentarios y tectónicos regionales, en donde se puede encontrar la influencia de dos estructuras importantes, las cuales corresponden a los sistemas de fallas de Bucaramanga-Santa Marta y Suárez. La Falla del Suárez se encuentra como límite al oeste del municipio, mientras que la Falla Bucaramanga lo limita al este. En el norte se encuentra limitado por la falla Los Montes (Díaz et al, 2009).

Al encontrarse en una zona muy activa tectónicamente, se pueden encontrar diferentes estructuras a lo largo del sector como fallas y fracturas. Estas estructuras influyen en la porosidad secundaria de las rocas, convirtiendo la zona en hidrológicamente importante, puesto que esta porosidad permite la infiltración del agua hacia el subsuelo y controla el comportamiento del flujo subterráneo (Díaz et al, 2009).

En Díaz et al. (2009), se reconocen los esfuerzos locales principales, uno compresivo con dirección N-S y uno distensivo con dirección E-W. Dichos esfuerzos generan tres tipos de fallas, definidas en Vargas (2008), como fallas principales, secundarias y menores.

Las fallas principales, según Vargas (2008) se caracterizan por ser fallas normales o rumbo dextrales con componente normal, tienen expresiones rectas y sinuosas, paralelas y subparalelas, con orientación NW-SE. La vergencia de estas fallas es subvertical, característica de procesos tectónicos y con un grado de penetrabilidad alto. Las fallas secundarias se reconocen debido a que

son fallas inversas y tienen una dirección preferencial hacia el NE-SW. Generalmente se encuentran contenidas en las fallas principales y con un trazo sinuoso y curvo. Dentro de las fallas secundarias se pueden reconocer la falla San Javier y la falla Los Montes (Vargas, 2008). Por último, las fallas menores, observadas con dirección E-W, que pueden ser producto de una tectónica local por acomodación de materiales. En esta categoría se pueden encontrar fallas como La Pilonera, Zajón de Pardo, entre otras (Vargas, 2008).

- ***Falla la Mojarra***

Según Ingeominas (2008), la falla La Mojarra se localiza sobre el cauce de la quebrada que lleva este mismo nombre. Esta falla controla buena parte del cauce, desde su nacimiento hasta el río Chicamocha, y se extiende al noreste, controlando parte de la quebrada los Pozos y la cañada Sauz, para terminar su trazo en la Falla Potreros. Se caracteriza por ser rumbo dextral con componente normal y vergencia al noreste, afectando las litologías de las formaciones Silgará, Jordán y Los Santos.

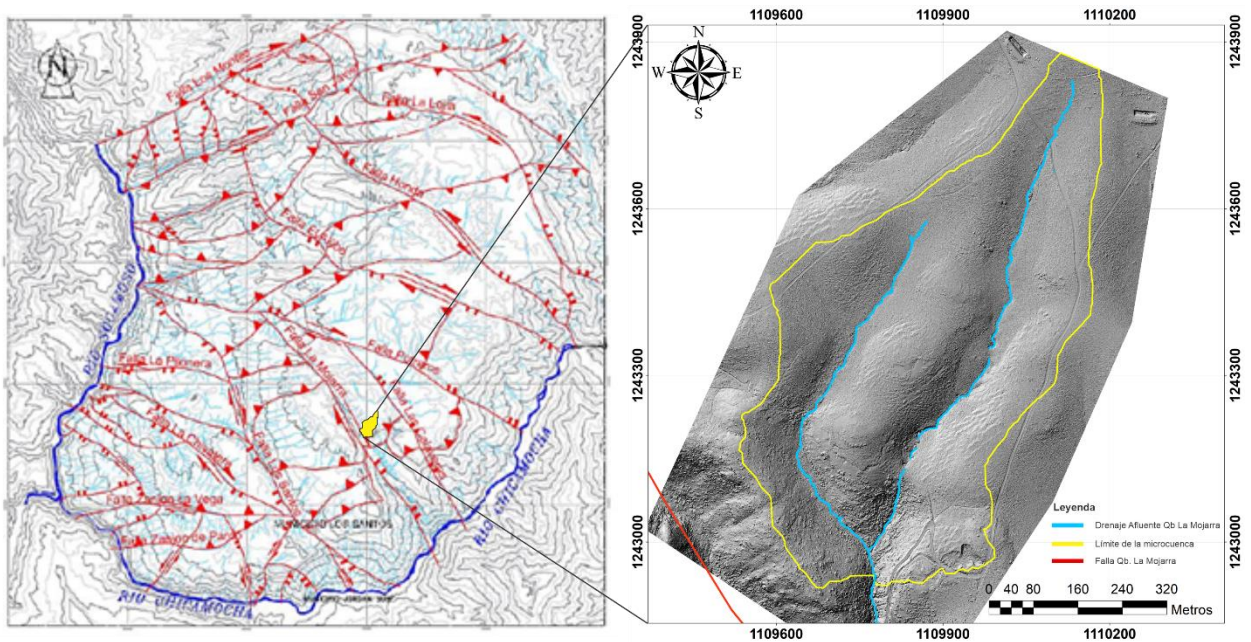
En Tarazona et al. (2022), se realiza un estudio de análisis cuantitativo del sistema de facturas de la zona sur del municipio, en donde se establecen estaciones de toma de datos y se procesa para dar como resultado que, en las estaciones cercanas a la Falla La Mojarra, se registran los valores más altos de densidad e intensidad de fracturas, por lo tanto, se estima una mayor porosidad secundaria asociada al miembro superior de la Formación Los Santos. Allí también se hace énfasis en la zona de influencia de la Falla La Mojarra como el área más favorable para la infiltración y flujo subsuperficial.

En el caso del presente proyecto, la Falla La Mojarra se encuentra al occidente de la zona de estudio, como se puede observar en la Figura 7. Esta falla tiene una influencia en la dirección

de los cauces de la microcuenca, puesto que, gracias a la cercanía a la falla, los drenajes se desvían o cambian su dirección hacia el sur, confirmando la componente dextral que tiene la falla.

Figura 7.

Mapa estructural de la Mesa de Los Santos.



Nota: Tomado y modificado de Díaz, 2008.

4.3. Marco Geomorfológico

La Mesa de Los Santos se distingue por hacer parte del Cañón del Chicamocha, ubicándose en la Cordillera Oriental Colombiana, la cual es un cinturón orogénico cuya formación ocurrió gracias a la reactivación e inversión tectónica de fallas normales de antiguas cuencas extensionales (Caballero et al, 2010).

El relieve de la zona se caracteriza por tener predominancia de “relieves tabulares acinales degradados y formas de relieves de fracturación, constituidos por capas sedimentarias de bajo

ángulo de buzamiento que se encuentran rodeadas por profundos cañones, fuertemente escarpados, producto de la intensa red de drenaje, formando una plataforma estructural semihorizontal” (Gómez y Cuervo, 2012). De esta manera, se evidencia la mayor variación de alturas hacia los límites del municipio, puesto que dichos límites son valles con pendientes abruptas producto de los cauces de los ríos Chicamocha y Sogamoso, siendo la pendiente mayormente estable a lo largo del municipio, lo cual es uno de los condicionantes del potencial de recarga que, según el IDEAM 2019, es moderado a bajo.

El relieve de La Mesa de Los Santos se clasifica como Montaña Media, según el IDEAM en Sistemas Morfogénicos de Colombia (2010), dado que esta comprende sistemas de montaña altitudinalmente debajo de 2700 m.s.n.m.

En el estudio por Ingeoexploraciones (2016) para la CAS, tuvieron en cuenta dos aspectos principales en la caracterización geomorfológica que fueron la morfometría y la morfodinámica, en donde, con la morfometría se estableció una clasificación de pendientes del municipio, mientras que con la morfodinámica se observa una clasificación e identificación de unidades geomorfológicas, teniendo presentes unidades de origen denudacional, denudacional estructural, fluvial y fluvioglacial.

Las geoformas que se pueden encontrar en la zona se identifican según la génesis de su formación, observando diferentes ambientes como kárstico, estructural, fluvial y denudacional, influenciados por la geología y el clima, como se describe en Gómez y Cuervo (2012) y se resume a continuación:

4.3.1. Ambiente estructural

El ambiente estructural comprende geoformas causadas por la dinámica interna de la tierra, como lo son plegamientos y fallas. Generalmente en este ambiente se incluye el ambiente neotectónico, en el cual se originan geoformas por actividad tectónica activa (p. 59).

Dentro de la zona se pueden encontrar planos o laderas estructurales, correspondiendo a superficies naturales de terreno inclinadas, formadas por capas o planos de discontinuidad tales como planos de foliación, estratificación, entre otros, dispuestos en el mismo sentido de la pendiente (p. 59). Igualmente se puede encontrar laderas irregulares o escalonadas, que son producto de capas compuestas por materiales de diferentes resistencias, dispuestas en contra de la pendiente (p. 59-60). Se presentan también lomos o cimas estructurales, cuevas y laderas estructurales disectadas, que se caracterizan por tener una pendiente fuerte.

4.3.2. Ambiente denudacional

Las geoformas derivadas de este ambiente se determinan por la actividad de procesos de erosión generados por la acción del agua y el viento, y procesos de remoción en masa sobre otras geoformas preexistentes (p. 63).

Entre las geoformas reconocidas en el municipio están los escarpes, los cuales se identifican por ser geoformas con pendientes pronunciadas producto de la erosión diferencial en la roca (p. 63). De igual manera se registran depósitos coluviales, presentando formas irregulares con pendientes leves, que son producto de la acumulación de materiales como suelos residuales y/o fragmentos de roca que son transportados por acción de la gravedad desde zonas de mayor a menor altura (p. 64).

Por procesos denudacionales se pueden encontrar en la zona planicies y pendientes. Las planicies denudacionales se identifican por ser geoformas planas con muy baja pendiente y que están ligeramente disectadas. Las pendientes denudacionales son superficies suavemente inclinadas, con pendiente mayor a las planicies denudacionales, pero con un ángulo menor a 10° (p. 65-66).

4.3.3. *Ambiente kárstico*

La Mesa de Los Santos tiene zonas con influencia de meteorización y disolución de rocas y materiales de fácil disolución, que dan paso a geoformas típicas del ambiente kárstico, bajo condiciones de humedad y calidez (p. 68).

4.3.4. *Ambiente fluvial*

El ambiente fluvial se caracteriza por tener depósitos de superficie dispuestos de manera plana y horizontal que son producto de procesos de erosión y arrastre de sedimentos, los cuales se acumulan hacia las márgenes de los afluentes de agua, en este caso, como los ríos Chicamocha y Sogamoso (p. 70).

En la zona de estudio se pueden encontrar planicies o llanuras de inundación, las cuales presentan una geomorfología casi plana, inundándose de manera estacional debido a la cantidad de precipitación y a la colmatación por acumulación fluvial que tenga el afluente (p. 71).

Así mismo, se encuentran terrazas aluviales, generadas a partir de cauces antiguos que constituyen superficies sedimentarias planas o con una pendiente suave y un valle fluvial, depositando los sedimentos a los lados del cauce en zonas donde la pendiente se reduce y, por consiguiente, la capacidad de arrastre (p. 71-72).

4.4. Marco hidrológico e hidrogeológico

La Mesa de Los Santos se caracteriza por contar con una red hidrográfica importante, en donde se resaltan zonas como el río Suárez y el río Chicamocha, los cuales se unen y toman el nombre de río Sogamoso hacia el sector de Zapatoca, pertenecientes a la cuenca del río Magdalena. La zona de estudio, por su parte, se encuentra en la cuenca La Mojarra, al sur del municipio, en donde aflora la Formación Los Santos, descrita en el numeral 4.1.

En la Formación Los Santos predomina la infiltración del recurso hídrico a causa de la porosidad secundaria, la cual es reconocida por las fracturas generadas por esfuerzos, las cuales captan la precipitación. Las zonas de escarpe tienen la característica de presentar mayor escorrentía superficial, por lo tanto, también se evidencia mayor infiltración de agua en las zonas de pendientes menores y topográficamente más altas. (Ingeominas, 2009)

La geología de la zona presenta que el mayor potencial hidrogeológico de esta se encuentra en el miembro superior, puesto que dicho miembro tiene una porosidad primaria media y una porosidad secundaria alta, lo que aumenta la permeabilidad de la roca. (Díaz, 2008)

En Becerra y Parra (2016) se presenta la precipitación de la zona como caracterizada por la influencia de la ubicación del país, puesto que se encuentra en la zona de convergencia intertropical (ZCIT), dando como resultado un comportamiento bimodal exponiendo dos épocas secas, las cuales se encuentran entre los meses de Diciembre a Febrero y Junio a Agosto; y dos épocas húmedas entre los meses de Marzo a Mayo y Septiembre a Noviembre. De igual manera, se expone en el análisis que, en un periodo de 20 años comprendidos entre 1995 a 2014, la precipitación oscila entre 900 y 1400 mm/año con un valor multianual promedio de 1146 mm/año. También exponen que la escorrentía superficial varía entre los 160 y 520 mm/año, con un promedio

multianual de 400.43 mm/año. En cuanto a la recarga potencial para la Mesa de Los Santos, es realmente baja en una escala anual dando como resultado un valor negativo de (-) 82.07 mm/año, debido a la poca precipitación y altos valores de evapotranspiración.

En el documento del EOT (2003) se evidencia también la realización de balances hídricos para la planeación del recurso, estudiando el índice de aridez de la zona, en donde da un resultado entre 0.25 y 0.10, indicando un índice alto con un déficit de agua de 3 a 6 meses, generando una necesidad del recurso hídrico indispensable para consumo humano, abastecimiento doméstico, labores como riego de cultivos, abastecimiento de agua para animales, entre otros.

Ingeoexploraciones (2016) realiza un cálculo de escorrentía superficial que da como resultado un módulo de 108 mm/año para las corrientes del municipio, fuera de la quebrada La Cañada, puesto que esta es la corriente más significativa, siendo la principal receptora del caudal medio estimado en 342.4 L/s, a la salida de La Mesa de Los Santos.

5. Resultados y Discusión

La zona de estudio, ubicada en la parte centro sur del municipio, hace parte del sector denominado como La Mesa, encontrando en el área el Miembro Superior de la Formación Los Santos, el cual está compuesto por cuarzoarenitas y sublitarenitas en capas medianas a gruesas, de color amarillo pálido, con laminación cruzada, plano paralelo y en artesa (Ingeominas, 2008).

En el caso de la cobertura de suelo, se estableció como Herbazal (Anexo A. Mapa de cobertura de suelo), ya que la composición vegetal de la zona son elementos herbáceos desarrollados de manera natural y tienen una densidad de ocupación del terreno variable, formando

una cobertura abierta, con plantas que no superan los 50 cm de altura. Lo anterior se encuentra descrito en Moreno y Silva (2020) basados en la Metodología Corine Land Cover del IDEAM.

5.1. Geomorfología de la microcuenca

Como resultado del procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM), en el software Q-GIS, se determinaron los diferentes parámetros morfométricos, como lo son la forma, el relieve y la red hidrográfica de la microcuenca objeto de estudio, entre otros.

Dentro de estos parámetros se estableció que la cuenca objeto de estudio se clasifica morfogenéticamente como Ladera Ondulada de Longitud Media (Anexo B. Mapa morfogenético). Lo anterior se determinó a partir de lo presentado en Moreno y Silva, 2020, quienes se basaron en el Glosario de Unidades y Subunidades Geomorfológicas de Leiva, 2012. En dicho glosario, se describe esta subunidad como una terreno alomado o colinado, cuya pendiente varía de inclinada a escarpada (Figura 8).

Figura 8.

Fotografía de la microcuenca.



5.1.1. *Parámetros de forma*

En la Tabla 4, se encuentran dispuestos los parámetros de forma, cada uno de ellos con su valor resultante y las unidades correspondientes. Como se puede observar en la Tabla 4, la microcuenca tiene un perímetro de 2759.7 m, y un área de 35.95 hectáreas o 359492.4 m². Ambos parámetros mencionados se midieron con ayuda del software, teniendo en cuenta la línea de divisoria de aguas generado por el mismo. El área es un parámetro importante a tener en cuenta, ya que este incide directamente en otras mediciones y cálculos.

Teniendo en cuenta el resultado de los parámetros de forma, se analizan uno a uno con el fin de comprobar la coincidencia de la forma resultante de la microcuenca objeto de estudio.

Tabla 4.

Parámetros morfométricos de forma.

Parámetro	Valor	Unidades
Perímetro (P)	2759.7	m
Área (A)	359492.4	m ²
Longitud Axial (La)	988	m
Ancho promedio (Ap)	363.8	m
Índice de forma de la cuenca (IF)	0.37	-
Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc)	1.2888	-
Razón de elongación (Re)	0.2452	-
Índice de circularidad de la cuenca (Rc)	0.5932	-

Como primer parámetro encontrado, se hallan la longitud axial (La), la cual se mide con ayuda del software Q-GIS, dando como resultado una distancia de 988 m. Seguido a esto, se halla el ancho promedio (Ap), el cual se encuentra sustituyendo los términos en la Ecuación 6. Al realizar la relación de los dos parámetros, se observa que la longitud axial es mucho mayor que el

ancho promedio, lo que demuestra que es una microcuenca alargada en la dirección del cauce del drenaje.

$$A_p = \frac{359492.4}{988} = 363.8 \text{ m} \quad \text{Ecuación 13}$$

Como segundo cálculo, se halla el índice de forma de la cuenca (IF), que da como resultado un valor de 0.37 aproximadamente, al desarrollar la Ecuación 7. Teniendo en cuenta las condiciones para definir la forma a partir del Índice de forma de la cuenca, se encuentra que la microcuenca objeto de estudio tiene una forma alargada, puesto que el parámetro da un valor menor a 1, como se observa en la Ecuación 14.

$$If = \frac{363.8}{988} = 0.37 \quad \text{Ecuación 14}$$

El parámetro Coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc), da un resultado aproximado de 1.29 al aplicar la Ecuación 8, el cual se compara con la condición que señala que entre 0 y 1 la forma es circular, entre 1 y 1,7 la forma es alargada y un coeficiente mayor a 1,7 es irregular. En la Ecuación 15, se puede observar el resultado que, al relacionarlo con la condición anterior, demuestra que la microcuenca tiene una forma alargada.

$$Kc = 0.28 \frac{2759,7}{\sqrt{359492,4}} = 1.29 \quad \text{Ecuación 15}$$

Por último, los parámetros Razón de elongación (Re) e Índice de circularidad de la cuenca (Rc) tienen la misma condición, la cual expresa es que si el valor resultante de la ecuación oscila entre 0 y 1, la cuenca es alargada, mientras que, si el valor es 1, la cuenca es circular. Como se puede observar en la Tabla 4 y al aplicar la Ecuación 9 y Ecuación 10, los resultados del cálculo

de estos dos parámetros dan un valor cercano a 0.25 y 0.59 respectivamente, lo que quiere decir, con ambos parámetros, que la forma de la microcuenca es alargada.

$$R_e = 1.129 \frac{359492.4^{0.5}}{2759.7} = 0.25 \quad \text{Ecuación 16}$$

$$R_c = 4\pi \frac{359492.4}{2759.7^2} = 0.59 \quad \text{Ecuación 17}$$

Al reunir los resultados de los diferentes parámetros de forma, se observa que todos coinciden con que la microcuenca estudiada tiene una forma alargada.

5.1.2. *Parámetros de relieve*

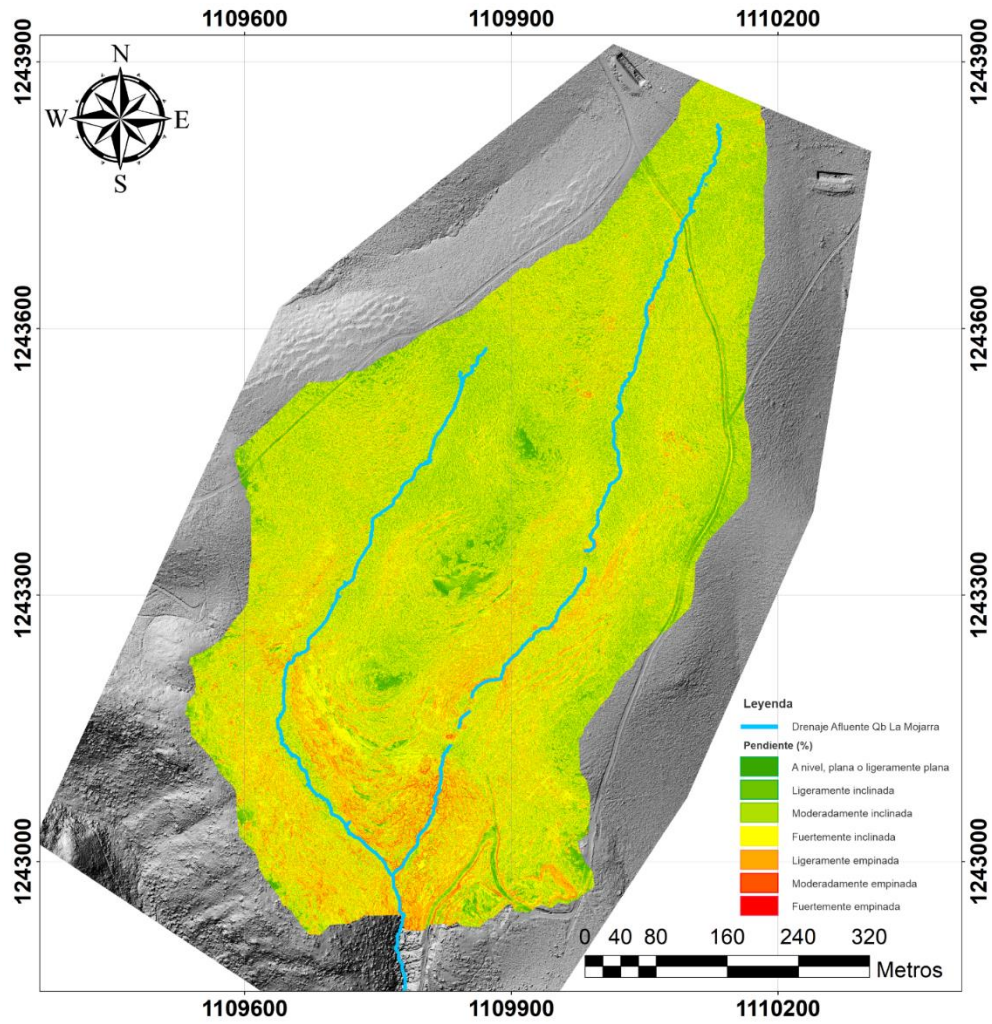
Con el procesamiento del DEM también se obtiene en el software Q-GIS, un mapa de pendientes de la microcuenca (Figura 9), que se utiliza posteriormente para obtener los parámetros de relieve. En la Tabla 6 se muestra una distribución, por medio de intervalos, de las pendientes que tienen lugar en la zona de estudio, realizada en base a los rangos que establece en Instituto Geográfico Agustín Codazzi 'IGAC' (2014) en el documento "Códigos para los levantamientos de suelos", los cuales se encuentran expuestos en la Tabla 5.

En la Figura 9, se observa que la microcuenca tiene una predominancia de pendientes de ligeramente a moderadamente empinadas hacia las zonas cercanas al drenaje, que puede verse representadas en los colores de tonalidades naranja de la figura; mientras que, hacia las zonas alejadas del drenaje, puede observarse una pendiente menos inclinada, clasificándose como ligeramente plana a ligeramente inclinada, representada por los colores de tonalidades verdes.

Gracias a las herramientas que contiene el software Q-GIS y el procesamiento del Modelo Digital de Elevación, se pudieron establecer porcentajes de cada una de las clases definidas por el IGAC (2014), dando como resultado lo presentado en la Tabla 6. En dicha tabla se puede observar

que la pendiente que comprende mayor área es la que se encuentra en el rango de 12% a 25% de inclinación, que dentro de la clasificación del IGAC (2014) se denominan pendientes fuertemente inclinadas. Dicho rango de pendientes abarca aproximadamente el 44.18% del área la microcuenca, por lo tanto, se dice que es el rango de pendiente con mayor predominancia en la zona.

Discriminando los resultados de porcentaje de área para cada rango de pendientes, los sectores con pendiente a nivel, plana o ligeramente plana, que es la que se encuentra entre 0% y 3%, comprenden el 4.65% del área de la cuenca, seguido del rango de 3% a 7% de inclinación que ocupa un área del 14.42% de la zona, que corresponden a pendientes ligeramente inclinadas. El 22.83% del terreno comprende pendientes moderadamente inclinadas, que se encuentran entre 7% y 12% de inclinación. Las pendientes entre el 25% y 50% de inclinación abarcan un área del 13.19% de la zona de estudio, denominadas como pendientes ligeramente empinadas o ligeramente escarpadas. El 0.71% del área se encuentra en un rango de pendientes del 50% al 75%, lo que se refiere a pendientes moderadamente empinadas o escarpadas. Por último, las pendientes con un porcentaje mayor al 75% corresponden a pendientes fuertemente empinadas o escarpadas, ocupando un área de 0.02% del terreno.

Figura 9.**Mapa de pendientes.**

Nota: Anexo C.

Tabla 5.**Rangos de Pendiente en porcentaje.**

Rango de pendiente (%)	Procesos característicos y condiciones del terreno
0-3	A nivel, plana o ligeramente plana
3-7	Ligeramente inclinada
7-12	Moderadamente inclinada
12-25	Fuertemente inclinada
25-50	Ligeramente empinada o ligeramente escarpada
50-75	Moderadamente empinada o moderadamente escarpada
>75	Fuertemente empinada o fuertemente escarpada

Nota: Tomado y modificado de IGAC, 2014.

Tabla 6.**Clasificación y porcentaje de área de pendientes de la microcuenca.**

Pendiente (%)	Área (m²)	Porcentaje de área (%)
0-3	16756.5	4.65
3-7	51888.1	14.42
7-12	82073.3	22.83
12-25	158854.7	44.18
25-50	47418.8	13.19
50-75	2583.3	0.71
>75	77.2	0.02

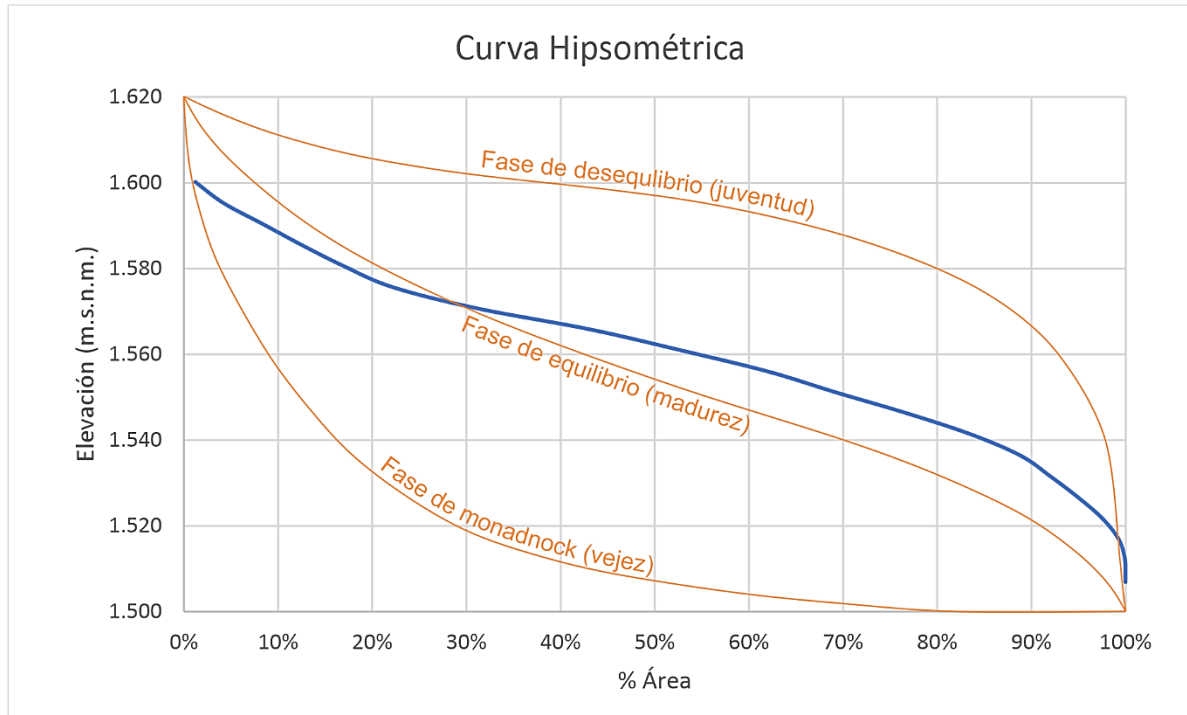
La pendiente media de la cuenca es un concepto que trata de ser representativo de las infinitas pendientes que pueden existir dentro de una cuenca y está relacionado con los fenómenos erosivos que se manifiestan en la superficie (Guerra y González, 2020).

Con ayuda del software Q-GIS que se ha venido utilizando, fue posible determinar la pendiente media de la cuenca, la cual dio como resultado 15.27%, representativa de un relieve

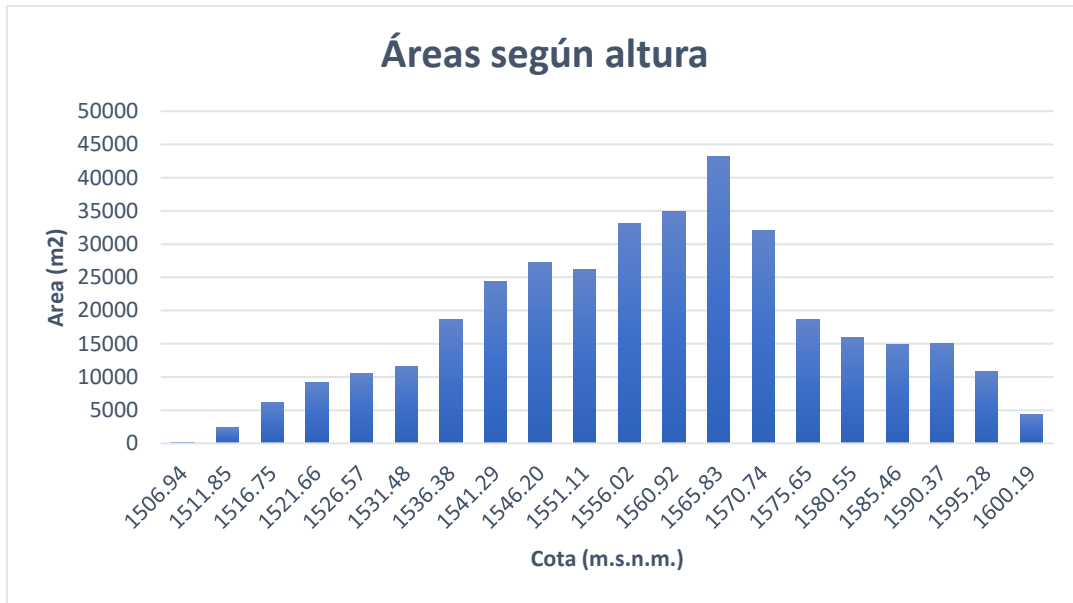
fuertemente inclinado, lo que genera que tenga moderada influencia en la escorrentía superficial en eventos cortos de precipitación. Adicional a lo anterior, se debe tener en cuenta la cobertura vegetal que se encuentra en el área, puesto que esta intercepta la lluvia, disminuyendo la cantidad de agua disponible para convertirse en escorrentía.

Para realizar el análisis también se tiene en cuenta la elaboración de la curva hipsométrica, en donde se toman datos equidistantes de las alturas en la cuenca (Anexo E. Tabla con los valores para la generación de la curva hipsométrica), y se genera una gráfica con la cual se puede calcular la elevación media de la microcuenca, que para este caso tiene un valor de 1553.5 m.s.n.m.

En la Figura 10, se observa el resultado de la gráfica elaborada, en donde se nota de manera clara que la cuenca se encuentra en una etapa de equilibrio o madurez, ya que está demostrando una forma de “S”. Strahler (1952) sugiere que esta etapa es característica cuando las rocas son relativamente homogéneas, es decir, se encuentran en equilibrio la erosión y la resistencia que, con la ayuda de la cubierta vegetal, actúan sobre la microcuenca. En la Figura 11 se observa que las alturas de 1560 m.s.n.m. a 1570 m.s.n.m. ocupan la mayor área del total la microcuenca, superando los 40000 m².

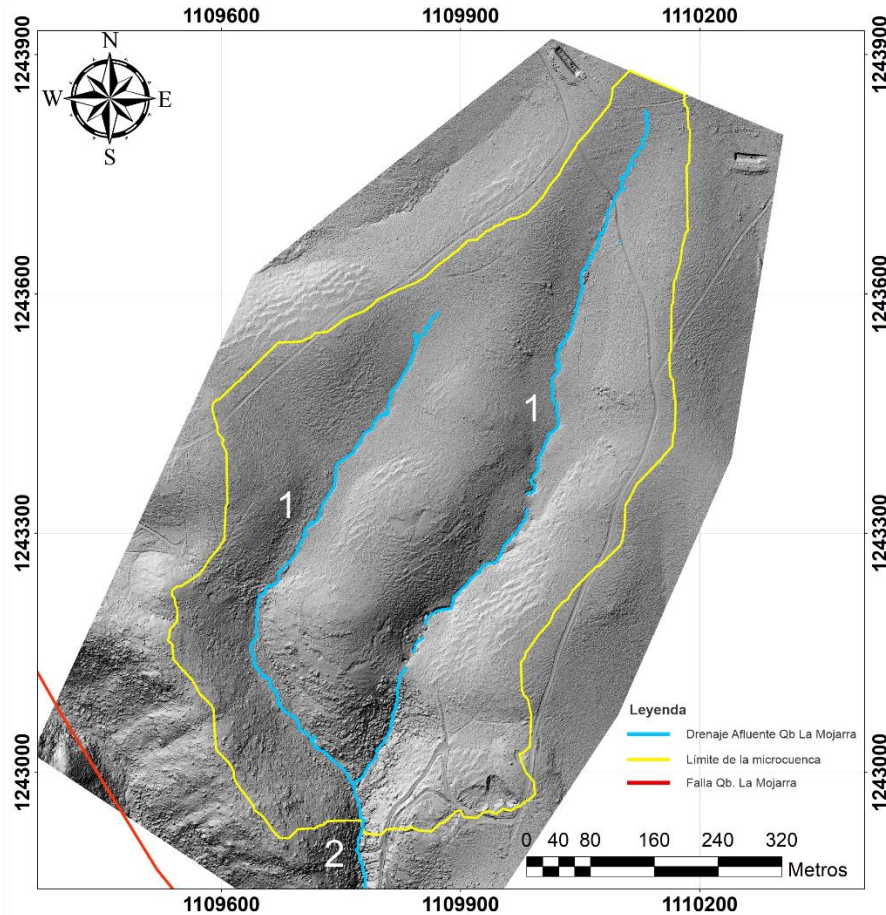
Figura 10.**Curva hipsométrica**

Nota: En azul se representa la curva hipsométrica generada con los datos de la microcuenca. En naranja se representan las curvas de referencia, tomadas y modificadas de Guerra y González, 2002.

Figura 11.**Áreas ocupadas según las alturas de la microcuenca.**

5.1.3. Parámetros de red hidrográfica

El orden de drenaje se establece según el método de Horton (1945), en donde el drenaje de primer orden es aquel que no tiene afluentes y se relaciona a nacimientos, así mismo el drenaje de segundo orden corresponde a la intersección de dos drenajes de primer orden, igualmente el de tercer orden es aquel en donde confluyen dos drenajes de segundo orden y así sucesivamente. Cabe aclarar que, en este método, la intersección de afluentes de diferente orden no aumenta el mismo, sino que se mantiene el orden mayor de drenaje (Figura 12).

Figura 12.**Mapa de orden de drenaje.**

Nota: Asignados según Horton (1945).

Los drenajes que se pueden identificar en la microcuenca son de primer orden, señalados en la Figura 12 como 1, los cuales se interceptan hacia la parte sur de la microcuenca, generando un drenaje de segundo orden. Cabe mencionar que el cauce oriental se pierde en tres zonas, donde el agua se infiltra y vuelve a salir aguas abajo.

Por otra parte, se calcula el parámetro de Tiempo de Concentración, el cual se halla mediante la Ecuación 11. La longitud del cauce se obtiene por medio del software Q-GIS, en donde la tabla de atributos generada a partir del procesamiento del DEM realiza la medición automática

de este, dando como resultado 2.294 Km. La pendiente media del cauce se puede evaluar mediante la expresión de la Ecuación 12, que da como resultado un valor de 4.27%, considerándose como una pendiente baja.

$$T_c = 0,3 \left(\frac{2.294}{4.27^{1/4}} \right)^{0,76} = 0.428 h \quad \text{Ecuación 18}$$

Como se muestra en la solución de la Ecuación 18, el tiempo de concentración del cauce es de 0.428 horas, haciendo referencia a que una gota de agua en un evento de precipitación dura aproximadamente 0.4 horas o 24 minutos en llegar al punto de desfogue de la cuenca. Este tiempo es importante a la hora de planificar el uso de suelo del terreno y la gestión del recurso hídrico, ya que se puede notar que el tiempo de concentración es casi inmediato o directo.

5.2. Análisis de caudales

La toma de datos se realizó a lo largo de varios meses, seleccionando como los meses de enero a inicio de agosto de 2022 (siete meses), obteniendo resultados de niveles gracias a la utilización de un transductor de presión absoluta TD-DIVER y un transductor de presión atmosférica BARO-DIVER. De igual manera se realizaron aforos de caudal para obtener datos de campo y posteriormente generar la curva de calibración.

En la Figura 13 se puede observar la curva de calibración con la ecuación que se generó a partir de los datos de caudal obtenidos en los aforos mensuales (Anexo D. Tabla con los aforos para generar la curva de calibración). A partir de aplicar dicha ecuación y de utilizar los valores de niveles conseguidos con los instrumentos TD-DIVER y BARO-DIVER como la variable independiente, se obtienen los caudales que se presentaron en la microcuenca

durante los meses observados. Teniendo los resultados de los caudales, se genera el hidrograma general de los datos obtenidos, el cual se muestra en la Figura 14.

Figura 13.

Curva de calibración

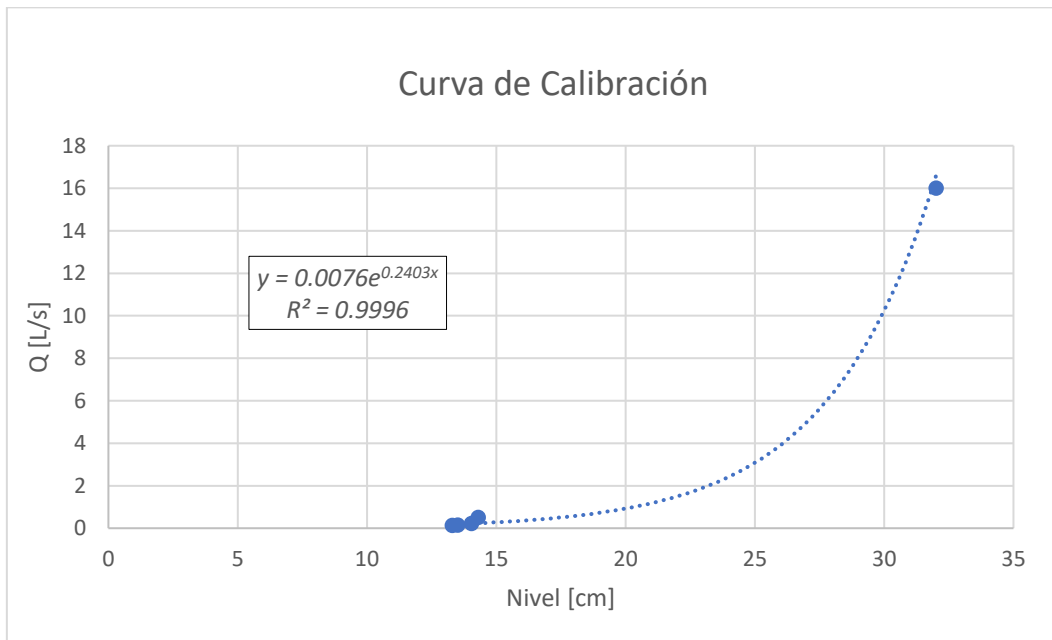
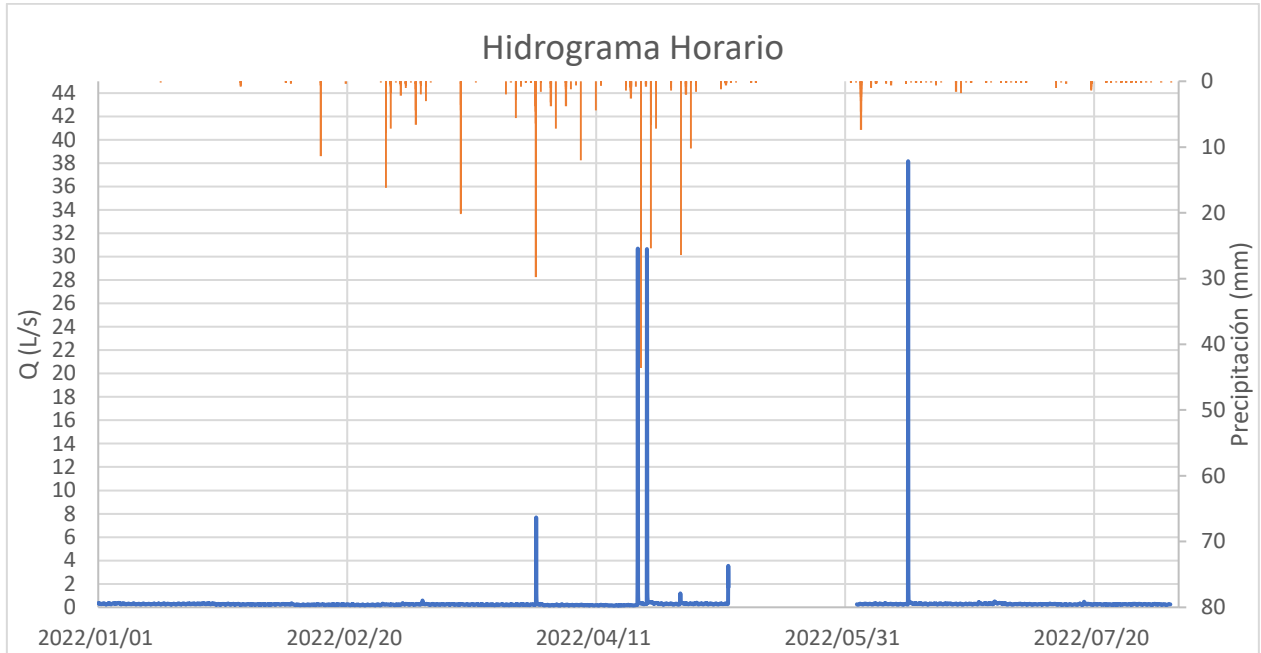


Figura 14.**Hidrograma**

Nota: En el eje principal, de color azul, se muestran los resultados de caudales obtenidos. El eje secundario, en color naranja, muestra las precipitaciones durante los meses en cuestión.

El resultado del hidrograma arroja un caudal medido en Litros por segundo, observando que a lo largo de los meses estudiados la tendencia es similar, con algunos picos de gráfica, que son puntos de mayor afluencia de caudal, siendo tres eventos principales, los cuales corresponden a las fechas del 19 de abril, 21 de abril y 12 de junio, respectivamente. Además del hidrograma, la Figura 14 muestra valores de lluvia horaria tomados de una estación meteorológica ubicada en la zona de estudio del proyecto “Estudio Integral del Agua de la Mesa de Los Santos”.

Además de lo anterior, se puede analizar en la gráfica la interacción que tienen las precipitaciones con el comportamiento de los caudales, mostrando la reacción casi directa que

tienen estos con los eventos de lluvias, observándose que en el último evento registrado, el aumento del caudal no coincide con las precipitaciones informadas, por lo cual se plantea que esto posiblemente tiene relación con la intervención antrópica que tiene el afluente, puesto que en el cauce de este se puede encontrar una manguera que puede estar mostrando una intervención de pobladores en un punto aguas arriba del lugar de instalación del TD-DIVER.

5.3. Análisis de la escorrentía

Teniendo en cuenta los resultados de caudales obtenidos, es posible aplicar los métodos para obtener una relación de la escorrentía superficial. A continuación, se presentan los resultados de la aplicación de los dos métodos seleccionados para este proyecto.

5.3.1. Método racional

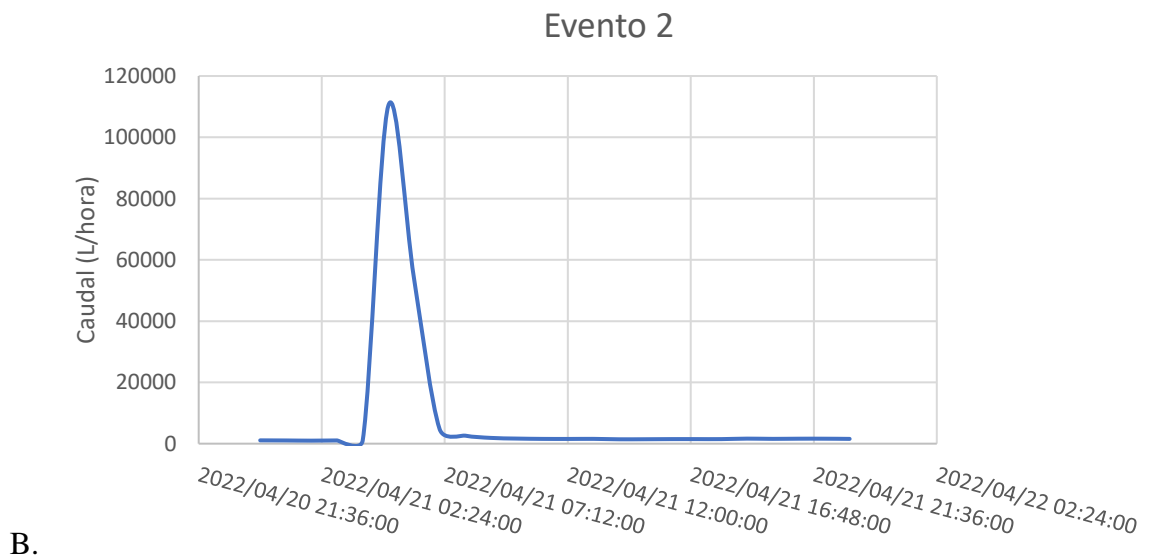
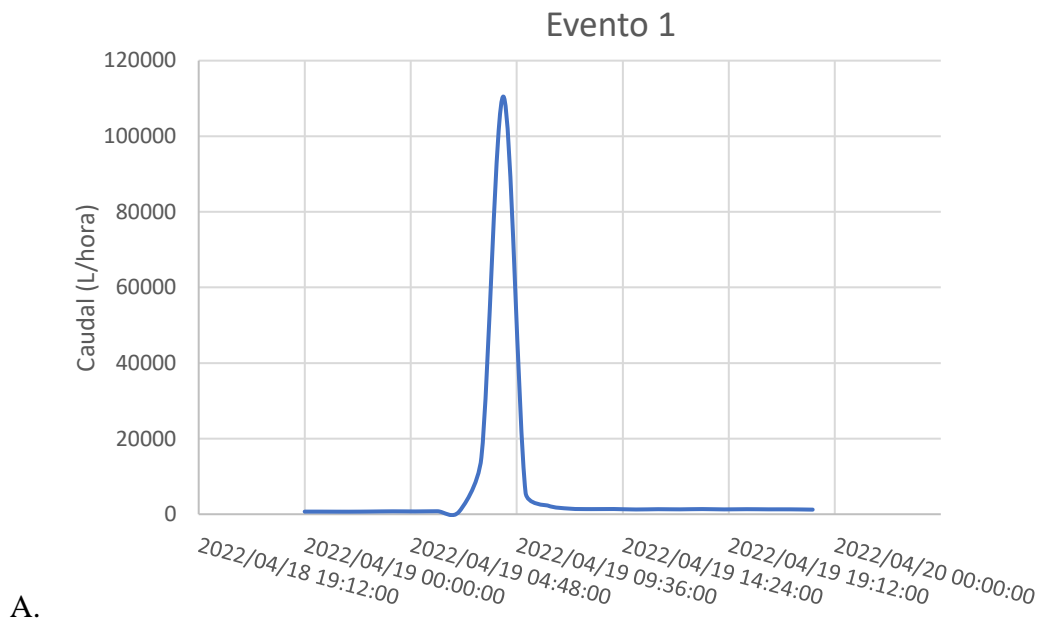
Para este método se realiza el cálculo por medio de la Ecuación 2, para lo cual se toman los tres eventos de aumento anormal de caudal o picos de gráfica, que se pueden observar en el hidrograma (Figura 14), los cuales presentan un tiempo de evento específico.

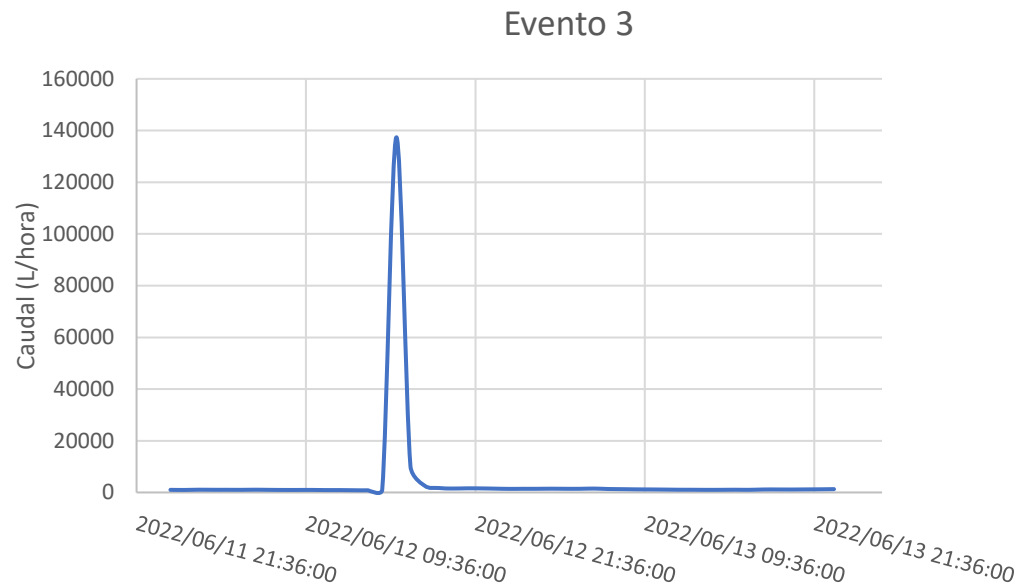
En la Tabla 7 se pueden observar los resultados de la aplicación de la ecuación en los eventos seleccionados. Para llegar a estos resultados se trabajó el caudal por horas, observando gráficamente cada uno de los eventos (Figura 15).

Con los datos de caudal y de precipitaciones, se halla el volumen de escorrentía total en cada evento para posteriormente calcular el volumen de escorrentía subterráneo, el cual es la diferencia entre los volúmenes al iniciar y terminar el evento. Luego de esto, se calcula el volumen de escorrentía superficial, restando del volumen de escorrentía total, el volumen de escorrentía subterránea.

Figura 15.

Gráfico de los eventos. A. Evento 1, del 19 de Abril. B. Evento 2, del 21 de Abril. C. Evento 3, del 12 de Junio.





C.

Tabla 7.**Resultados de volúmenes de escorrentía de los eventos seleccionados.**

Evento	Fecha (año/mes/día)	Vol. de escorrentía total (L/hora)	Vol. de escorrentía subterránea (L/hora)	Vol. de escorrentía superficial (L/hora)	Vol. de escorrentía superficial (m³/hora)
1	2022/04/19	134626,91	5548,22	129078,68	129,078
2	2022/04/21	173215	7357,56	165857,43	165,85
3	2022/06/12	151590,58	5517,98	146072,60	146,07

Teniendo en cuenta el resultado de escorrentía superficial mostrado en la Tabla 7, se procede a hallar el Coeficiente de escorrentía junto a los parámetros expuestos en la Tabla 8, en donde se observa que el área es igual para cada caso, la cual equivale a 359492,4 m². El coeficiente se obtiene de la siguiente manera:

$$C_1 = \frac{(129.07 \frac{m^3}{hora})}{(0.08844 \frac{m}{hora}) \cdot (359492.4 m^2)} = 0.004 \quad \text{Ecuación 19}$$

Con este mismo procedimiento se hallan los coeficientes de escorrentía de los momentos seleccionados, ordenados y expuestos en la Tabla 8, recordando que el área es igual para cada caso.

Tabla 8.

Parámetros para la ecuación y coeficiente de escorrentía

Coefficiente por evento	Área de la cuenca (m²)	Intensidad de precipitación (m/hora)	Caudal Q (m³/hora)	Coefficiente de escorrentía
C₁	359492.4	0.0884	129.07	0.004
C₂		0.0354	165.85	0.013
C₃		0.0024	146.07	0.169

Para el caso de los tres eventos seleccionados, se puede observar que los coeficientes se encuentran en un rango de 0.004 a 0.17, o expresado en porcentaje se encuentra el coeficiente entre 0,4% a 17%. Lo anterior se relaciona directamente con el tiempo de lluvia de los eventos, ya que cada uno de ellos tiene una duración entre 4 y 5 horas.

El coeficiente de escorrentía se considera diferente para cada cálculo, puesto que depende de los factores que condicionan el evento, como lo es la precipitación y el caudal. Cabe resaltar que para los tres eventos el coeficiente de escorrentía es menor al 20%, dando a entender que menos del 20% de la precipitación se convierte en escorrentía superficial, acorde con los coeficientes estimados en el manual de ATHA (2010) para eventos de lluvia corta y zonas de cultivos (entendiéndose en este manual como zonas no edificadas).

Estos resultados de coeficiente expuestos en la Tabla 8, pueden estar ligados a los datos de precipitación utilizados en el estudio, puesto que un factor que puede influir en cálculo del coeficiente es que los datos de precipitación utilizados no se toman directamente en el lugar sino que se utilizan los registrados en una estación meteorológica ubicada en un sector cercano.

5.3.2. Escorrentía superficial mensual

Como se expone en el numeral 3.3.2 del presente proyecto, la escorrentía superficial se puede hallar de manera mensual por medio de la Ecuación 3. En este caso, se tiene en cuenta la influencia que tiene la cobertura de suelo, la pendiente y la textura de la roca presentes en la zona de estudio.

Se halló la escorrentía superficial para los meses de enero a julio de 2022, puesto que son los meses en los que se encuentran datos suficientes de precipitaciones.

Los parámetros que se utilizan al momento de realizar los cálculos correspondientes se presentan en la Tabla 9, en donde se puede observar que para todos los meses estudiados se utilizan los mismos coeficientes para calcular el parámetro C_i , que es el coeficiente de infiltración del suelo.

Tabla 9.**Resultados de los cálculos de escorrentía superficial mensual.**

Mes	K _{fc}	K _p	K _v	C _i	C _{fo}	P _i (mm/mes)	Ret (mm/mes)	P (mm/mes)	ESC (mm/mes)
Enero					N/A	0	2	2	0
Febrero						29,83	6,07	50,60	14,69
Marzo						82,31	16,75	139,60	40,54
Abril	0,40	0,06	0,21	0,67	0,12	113,20	23,04	192,00	55,76
Mayo						5,54	1,13	9,40	2,73
Junio						24,29	4,94	41,20	11,96
Julio						9,67	1,97	16,40	4,76

Se utilizó la tabla presentada en el documento Manual de Estudios Hidrológicos de la ONU presentado el año 1972 (Tabla 3), para seleccionar el coeficiente K_{fc} , ya que expone coeficientes aproximados de infiltración según la textura para los diferentes tipos de suelo cuando no se realiza toma de datos de infiltración. En el caso de este estudio, se selecciona el valor 0.40 que corresponde a suelo limo-arenoso no muy compacto, empleándolo para el cálculo de C_i . De igual manera, con ayuda de la Tabla 2 se establecen los valores para K_p y K_v , siendo 0.06 y 0.09 respectivamente.

En la Tabla 9, se puede observar que la escorrentía superficial del mes de enero da como resultado 0 (cero). Este resultado es debido a que la precipitación en el mes es menor a 5 mm, por lo tanto, según Schosinsky (2006), la retención por follaje es igual a la precipitación, causando que esta sea interceptada totalmente por el follaje, lo que quiere decir que no existe infiltración ni escorrentía.

Contrario al mes de Enero, los demás meses tienen una precipitación mayor a 5 mm/mes, por lo tanto, la retención por follaje es una fracción de la precipitación, así como también lo es la

infiltración. En estos casos se utiliza el coeficiente de follaje C_{fo} con el valor de 0.12, puesto que la cobertura vegetal corresponde a herbazales.

Ahora bien, para el cálculo del coeficiente de escorrentía se resuelve la Ecuación 5 para cada uno de los meses estudiados, excepto enero, dando como resultado un coeficiente mensual de 0.29, expuesto de manera detallada en la Tabla 10.

Tabla 10.

Coeficiente de escorrentía mensual.

Mes	Escorrentía superficial	Precipitación total	Coeficiente de escorrentía
Febrero	14.69	50.60	0.29
Marzo	40.54	139.60	
Abril	55.76	192.00	
Mayo	2.73	9.40	
Junio	11.96	41.20	
Julio	4.76	16.40	

En este caso, el coeficiente de escorrentía da como resultado 0.29 o expresado en porcentaje da 29%. En la Tabla 10 se puede observar la escorrentía que se genera en cada mes y que al hacer el cálculo del coeficiente, este da como resultado 0.29 en todos los meses.

Teniendo en cuenta las dos metodologías expuestas con resultados de coeficientes de escorrentía de 0.17 y 0.29, y una precipitación multianual promedio de 1146 mm/año (Becerra y Parra, 2016) se puede estimar una lámina de escorrentía entre 195 mm/año y 332 mm/año, valores acordes con los resultados obtenidos en el estudio de Becerra y Parra (2016). Cabe mencionar que para estimar la recarga potencial, el análisis debe realizarse mes a mes, para lo cual el método de escorrentía superficial mensual es el apropiado.

6. Conclusiones

La cuenca objeto de estudio se estableció, dentro de la clasificación que realiza Leiva (2012) en el Glosario de Unidades y Subunidades Geomorfológicas, como una subunidad geomorfológica de Ladera ondulada de longitud media (Dlom), que se encuentra dentro de la unidad de Ladera ondulada, perteneciente al ambiente geomorfológico denudacional. Esta clasificación se asigna debido a que la morfología observada es alomada o colinada, con pendientes inclinadas y longitud de ladera no mayor a 1000 metros.

La curva hipsométrica generada con las alturas de la microcuenca determina, según su resultado, que la microcuenca estudiada se encuentra en una etapa de madurez o equilibrio, es decir, el proceso de erosión y la resistencia que presenta la zona a ser erosionada se encuentra en equilibrio.

De acuerdo con los parámetros morfológicos hallados, se establece que la microcuenca tiene una forma alargada, con una predominancia de pendientes del 12% a 25% de inclinación, con una pendiente media de 15,27%, rango que abarca aproximadamente el 44% del área de estudio, correspondiendo estas pendientes a un terreno fuertemente inclinado.

El coeficiente de escorrentía, que se entiende como el porcentaje de escorrentía generado en un evento, hallado por medio del análisis de caudales y convertido en porcentaje, da como resultado un aproximado de 0.4%, 1.3% y 17% para los eventos 1, 2 y 3 respectivamente según el método racional. Lo anterior quiere decir que la escorrentía superficial en la zona es baja, relacionado a que las precipitaciones son escasas, considerando también que una parte del recurso

en los eventos de lluvia es retenido por las plantas y otra parte se infiltra, por lo tanto, es muy poca la disponibilidad de recurso a ser convertido en escorrentía superficial.

El cálculo de la escorrentía superficial, por medio del segundo método expuesto en el presente proyecto (Schosinsky, 2006), da como resultado un coeficiente de escorrentía mensual de 0,29, lo que quiere decir que un 29% de la precipitación total mensual de la microcuenca, se convierte en escorrentía superficial.

El resultado del coeficiente de escorrentía determinado por las metodologías expuestas, el cual da como resultado un valor menor al 30%, permite, junto a la precipitación multianual promedio, la estimación de una lámina de escorrentía superficial entre 195 mm/año y 332 mm/año.

El tiempo de concentración calculado es de 24 minutos, produciéndose una respuesta muy rápida en la corriente ante los eventos de precipitación como se evidencia en la relación de caudales y precipitación en el hidrograma.

El relieve es uno de los factores importantes a considerar en estudios integrales puesto que con el tiempo se ha visto el aumento en el interés de conocer la relación de este con la respuesta hidrológica que tiene en un ambiente determinado. En el área de estudio, el coeficiente de escorrentía medio a bajo estimado muestra que no hay una relación predominante con la pendiente fuertemente inclinada de la microcuenca, por lo tanto, se plantea que la naturaleza fracturada de las rocas domina el proceso y facilita la infiltración.

7. Recomendaciones

Se recomienda instrumentar la cuenca con demás parámetros hidroclimáticos (precipitación, humedad relativa, temperatura, entre otros) con el fin de mejorar la estimación de la escorrentía por el método racional.

Por último, se recomienda en lo posible tomar una escala de tiempo mayor para estudios a una escala menor que este proyecto, es decir, para realizar un análisis a mayor tamaño de cuenca, se debe considerar un lapso de tiempo mayor, con el fin de que un estudio más amplio en el municipio tenga una mayor claridad en la estimación de escorrentia superficial, puesto que esta es un parámetro importante a la hora de la realización de un Balance Hídrico.

Referencias bibliográficas

- Arguello, C., Guerrero, J. (2015). Estratigrafía de la Formación Jordán entre el municipio de Piedecuesta y La Puente de La Mesa de Los Santos, Santander. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Asfaw, D., & Workineh, G. (2019). Quantitative analysis of morphometry on Ribb and Gumara watersheds: Implications for soil and water conservation. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(2), 150-157. DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.02.003
- Asociación de Fabricantes de Tubos de Hormigón Armado (ATHA) (2010). Manual de Cálculo, Diseño e Instalación de Tubos de Hormigón Armado. Madrid, España. 245 p.
- Becerra, N., Parra, C. (2016). Balance Hídrico para estimar la recarga potencial en La Mesa de Los Santos y dirección de flujo de agua subterránea. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Caballero, V., Parra, M., Mora, A.R. (2010). Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno Tardío – Oligoceno Temprano: Proveniencia Sedimentaria en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca Valle Medio del Magdalena. *Boletín de Geología*, Volumen XXXII. Universidad Industrial de Santander.
- Camino, Mariana A.; Bó, María Juliana; Cionchi, José L.; Del Río, Julio L.; López de Armentia, Adriana; De Marco, Silvia G. Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires *Revista Universitaria de Geografía*, vol. 27, núm. 1, 2018. Universidad Nacional del Sur, Argentina.
- Cediel, F. (1968). Grupo Girón, una molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental. *Boletín Geológico*, Vol. 16.

- Chiarito, E.; Zimmermann, E. y Méndez Zacarías, S. (2018). Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección. Cuadernos del CURIHAM. 24, 25-36. DOI: 10.35305/curiham.v24i0.126
- Clavijo, J., Royero, J. (2001). MAPA GEOLÓGICO GENERALIZADO DEPARTAMENTO DE SANTANDER ESCALA 1:400.000 Memoria explicativa. Servicio Geológico Colombiano.
- Colombia, Alcaldía de Los Santos (2003). Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Los Santos, Título 4, Caracterización componente físico-Biótico.
- Cruz Romero, B., Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría A. M., Carrillo González, F. M., Téllez López, J (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Número 64: 26-34, enero-abril 2015. pp. 26-34. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México
- Díaz, A., Martínez, J. (2016). Cartografía geológica y cálculo de balance hídrico para la construcción de la represa de la hidroeléctrica de Santander- municipio de los Santos, Santander. Tesis de grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Sogamoso, Colombia.
- Díaz, E., Contreras, N., Pinto, J., Velandia, F., Morales, C., Hincapié, G. (2009). Evaluación Hidrogeológica Preliminar de las Unidades Geológicas de la Mesa De Los Santos, Santander.
- Díaz, E. (2008). Análisis Preliminar del Potencial Hidrogeológico en La Mesa De Los Santos, Región Central del Departamento de Santander. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Díaz, L., Alarcón J. (2018). Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada Niscota para un acueducto interveredal en Nunchía, Casanare. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Fundación para el Desarrollo de la Mesa de los Santos -FUNDEMESA, 2009. Mesa de los Santos. Memorias del paraíso. FUNDEMESA, Bucaramanga. 96 p.

García, S., Gómez, E. (2015). Modelo Conceptual Hidrogeofísico para evaluar el Potencial Hidrogeológico de la Formación Los Santos en la Mesa De Los Santos, Santander, Colombia. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Gómez, J., Cuervo, R. (2012). Estudio Geológico enfocado a la Caracterización Paisajística de la Mesa de Los Santos, Santander, Colombia. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Guerra, F. González, J. (2002). Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. Universidad de los Andes, San Cristóbal, Venezuela. *Geoenseñanza*, vol. 7, núm. 1-2, 2002, pp. 88-108.

Horton, R. E (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol, Soc. America Bull.*, 56: 275-280 p.

IDEAM (2010). Sistemas morfogénicos del territorio colombiano. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales; IDEAM. Bogotá D. C., Colombia. 252 p.

IDEAM (2015). ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA 2014. Bogotá, D.C.

IDEAM (2019). ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA 2018. Bogotá: 452 pp.

- INGEOEXPLORACIONES S.A.S. (2016). Elaboración y Formulación del Plan de Manejo de Aguas Subterráneas en el sector de La Mesa, Municipio De Los Santos. Fase II. Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS). 263 pp.
- IGAC (2014). Códigos para los levantamientos de suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Colombia. 92 p.
- Ingeominas (2008). Integración geológica e hidrogeológica del centro de Santander. Instituto de Investigaciones e Información Geocientífica Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS, ahora Servicio Geológico Colombiano), Bogotá, 117 p.
- Ingeominas (2009). Informe hidrogeológico de la Mesa de Los Santos. Instituto de Investigaciones e Información Geocientífica Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS, ahora Servicio Geológico Colombiano), Bogotá, 75p.
- Leiva, O. (2012a). Anexo A. Glosario de Unidades y Subunidades Geomorfológicas. Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. SGC (Servicio Geológico Colombiano).
- Moreno, M., Silva, K. (2020). Identificación de Ambientes Geomorfológicos y Elaboración de un Mapa de Favorabilidad para la Percolación de la Zona de la Mesa de Los Santos, Santander. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Ochoa-Tocachi, B. F., W. Buytaert, and B. De Bièvre (2016), Regionalization of land-use impacts on streamflow using a network of paired catchments, *Water Resour. Res.*, 52, 6710–6729, doi:10.1002/2016WR018596.

Organización de las Naciones Unidas (ONU) (1972). Manual de Instrucciones, Estudios Meteorológicos. Publicación No. 70. San José, Costa Rica. 556 p.

Reátiga, G. (2008). Cartografía Geológica a escala 1:25.000 del Sector Noreste de Curití, Departamento de Santander. Tesis de grado para optar al título de Geólogo. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Sánchez, F. J. (2017). Hidrología Superficial y Subterránea. Universidad de Salamanca, España. Createspace Independent Publishing Platform., 414 pp.

Schosinsky N., Gunther (2006). CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS. Revista Geológica de América Central, (34-35),13-30. ISSN: 0256-7024. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=454/45437342002>

Strahler. A. (1952). HYPOMETRIC (AREA-ALTITUDE) ANALYSIS OP EROSIONAL TOPOGRAPHY. Bulletin of the Geological Society Of America. Vol. 63. Pp. 1117-1142.

Tarazona-Lizcano, Yessenia, Vargas-López, María Camila, & Velandia, Francisco. (2021). Análisis cuantitativo de sistemas de fracturas y sus implicaciones hidrogeológicas en la zona sur de la Mesa de Los Santos, Santander - Colombia. Boletín de Geología, 43(3), 107-123. Epub April 01, 2022. <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n3-2021005>

Thorntwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review, 38(1), 55. doi:10.2307/210739

UNESCO (1982). Métodos de cálculo del balance hídrico. Programa Hidrológico Internacional. Instituto de Hidrología de España.

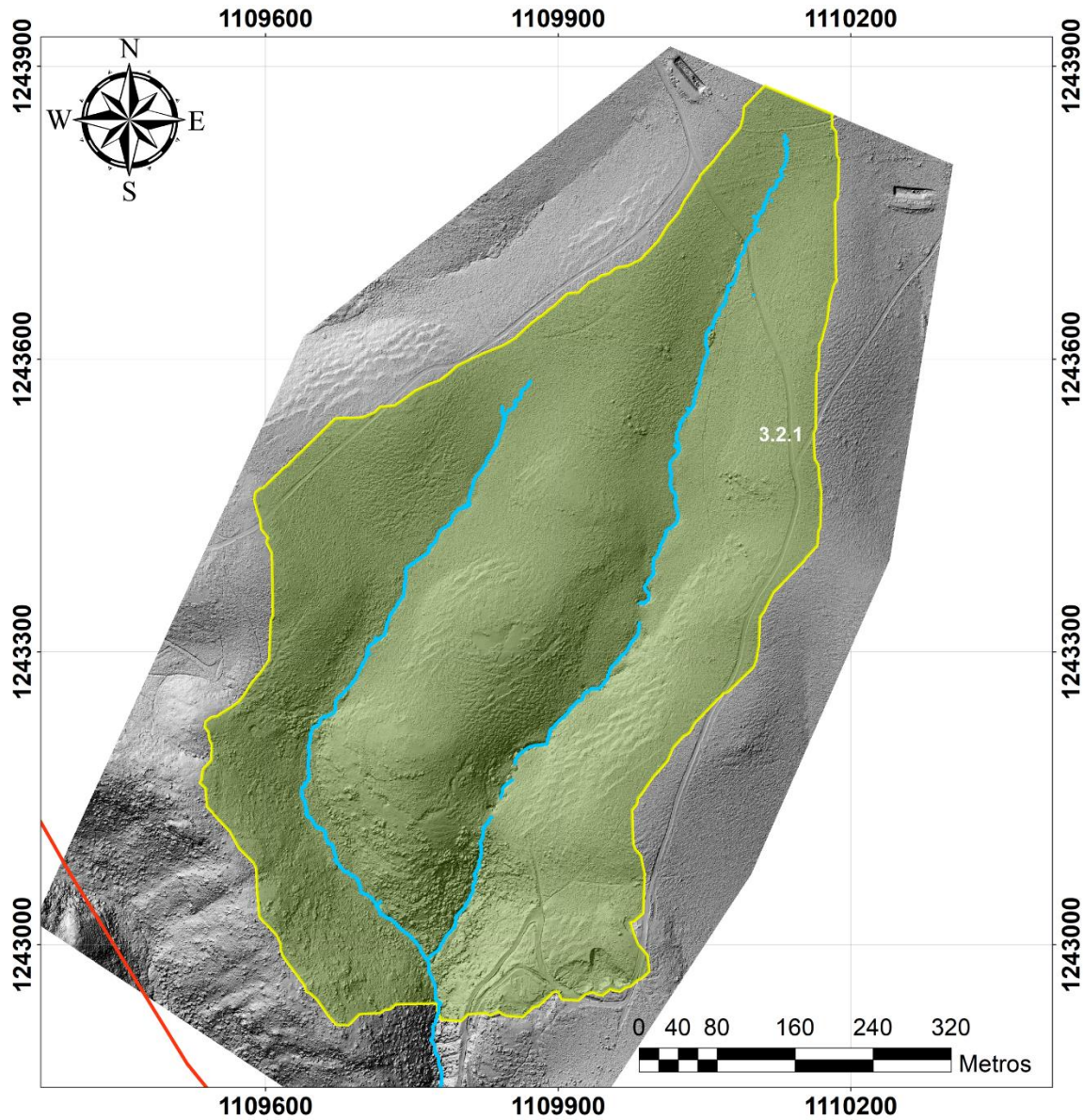
Vargas, C. (2008). Cartografía Geológica a Escala 1:25.000 de la Mesa De Los Santos, Departamento de Santander. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona Departamento de Santander. Boletín Geológico, Volumen XXI. Servicio Geológico Colombiano.

Anexos

Anexo A.

Mapa de cobertura de suelo



MAPA DE COBERTURA DE SUELO DE LA ZONA DE ESTUDIO
Escala 1:2000

Leyenda

- 3.2.1. Herbazal
- Drenaje Afluente Qb La Mojarra
- Límite de la microcuenca

Sistema de Coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá
Proyección: Transversa de Mercator
Falso Origen: E=1.000.000 m
N=1.000.000 m
Datum: MAGNA
Unidades: Metros (m)

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Físicoquímicas
Escuela de Geología
2022

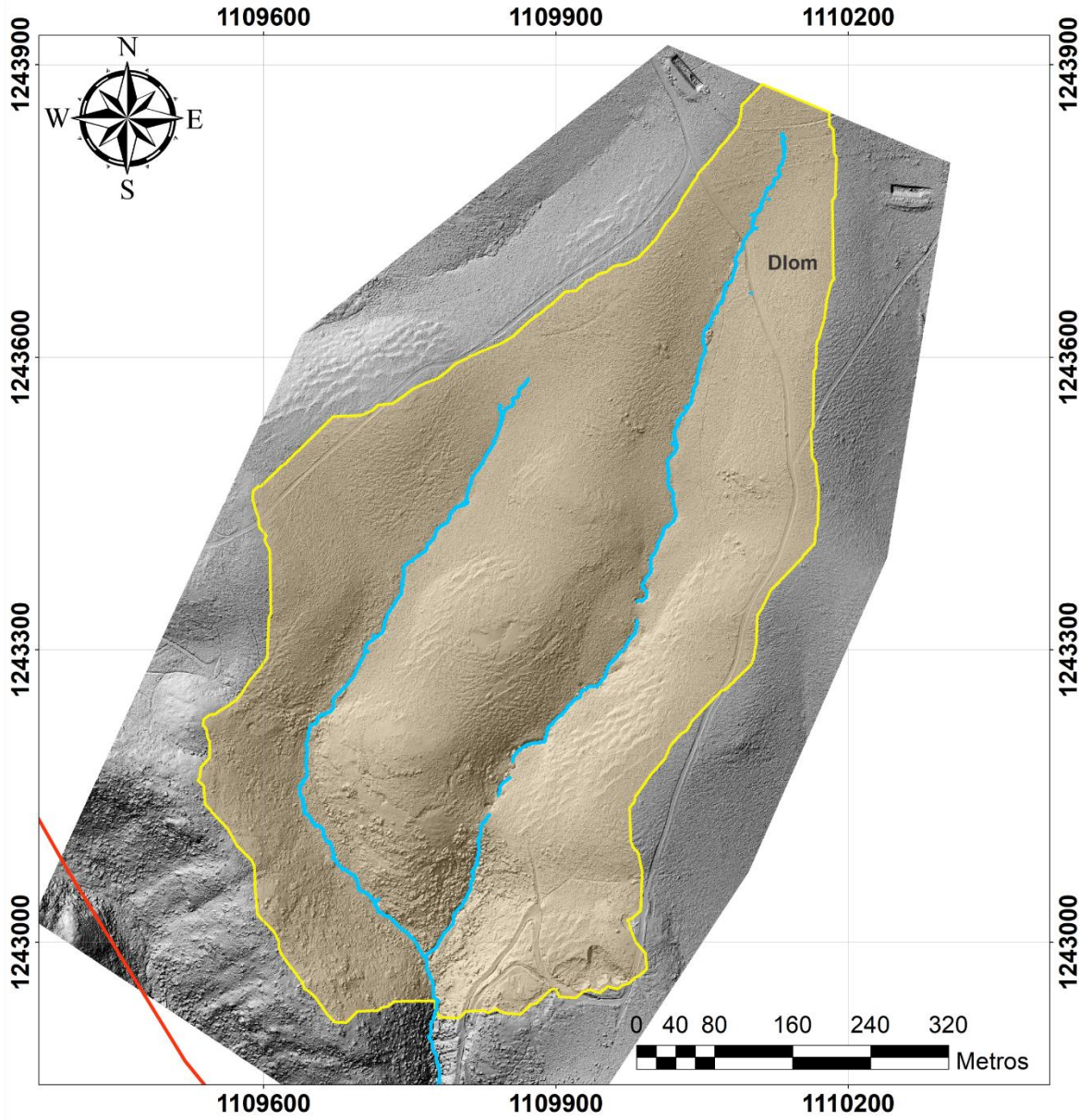
Escuela de Geología

Universidad Industrial de Santander

Digitalizado por: Laura Sofia Puentes Argüello

Anexo B.

Mapa morfogenético



MAPA MORFOGENÉTICO DE LA ZONA DE ESTUDIO
Escala 1:2000

Leyenda

- Dlom - Ladera Ondulada de longitud media
- Drenaje Afluente Qb La Mojarra
- Límite de la microcuenca

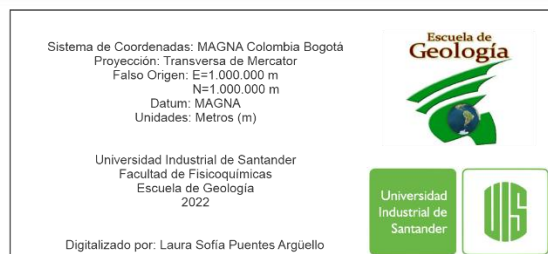
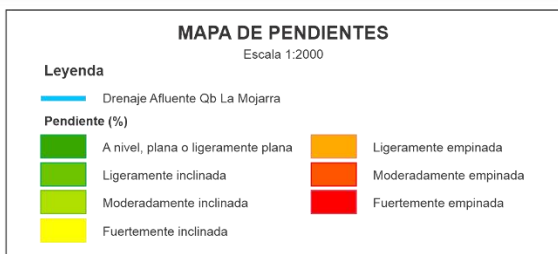
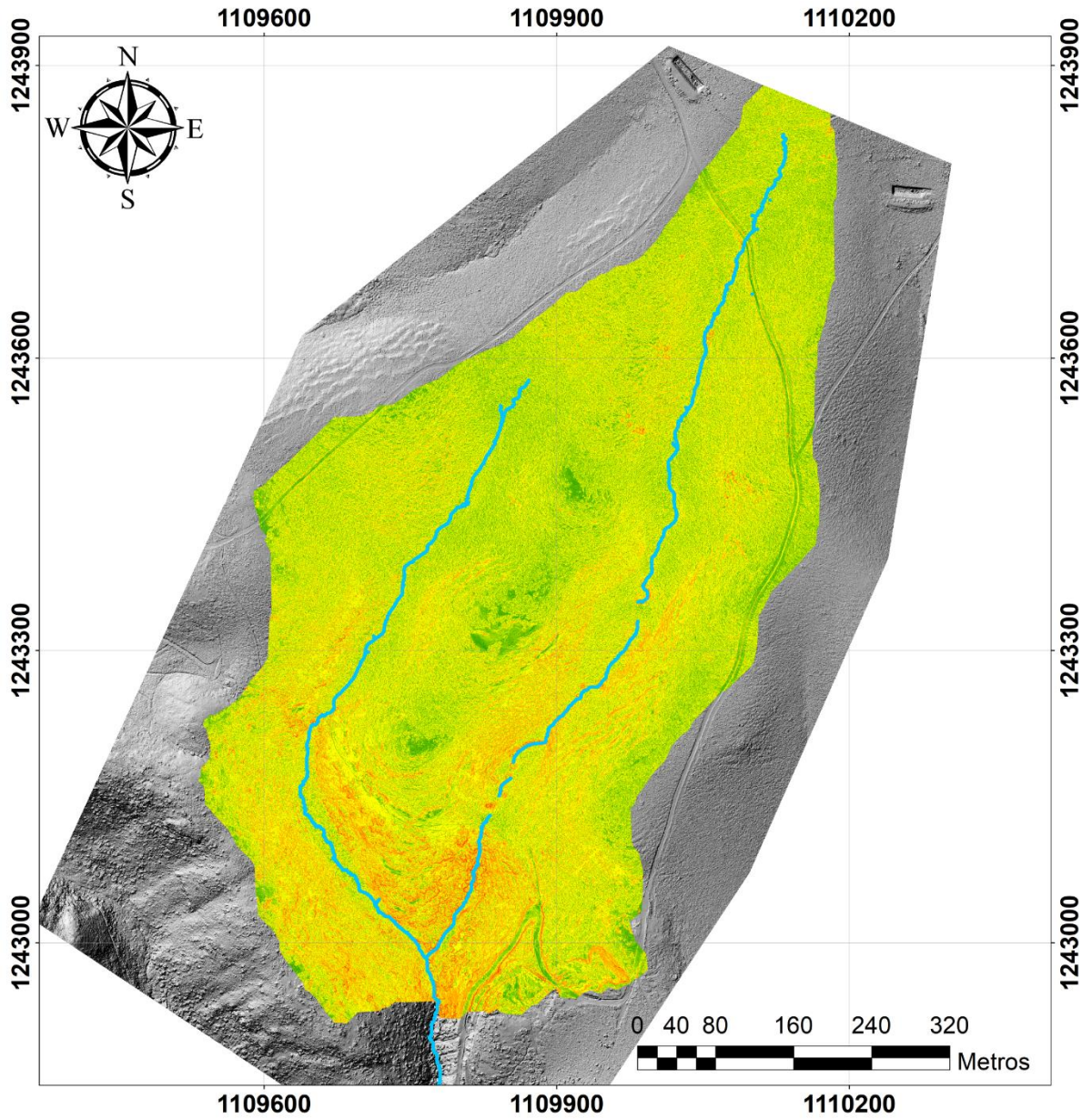
Sistema de Coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá
Proyección: Transversa de Mercator
Falso Origen: E=1.000.000 m
N=1.000.000 m
Datum: MAGNA
Unidades: Metros (m)

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Físicoquímicas
Escuela de Geología
2022

Digitalizado por: Laura Sofia Puentes Argüello

Anexo C.

Mapa de pendientes



*Anexo D.**Tabla con los aforos para generar la curva de calibración*

Fecha	Nivel	Q aforo manual	Q teórico
5/01/2022	14.04	0.21	0.221840853
2/02/2022	13.300	0.1316	0.185701073
4/03/2022	13.500	0.1406	0.194843807
12/06/2022	32	16	16.60980142
4/08/2022	14.3	0.5	0.236143164

*Anexo E.**Tabla con los valores para la generación de la curva hipsométrica*

No. Cota	Cotas (m.s.n.m.)			Área (m ²)			
	Min	Max	Promedio	Área entre curvas	Área acumulada	% área acumulada	% intercota
1	1504,48	1509,39	1506,94	139,90	139,90	100,00%	0,0389%
2	1509,39	1514,30	1511,85	2320,33	2.460,23	99,9611%	0,6454%
3	1514,30	1519,21	1516,75	6226,95	8.687,18	99,3156%	1,7321%
4	1519,21	1524,11	1521,66	9215,94	17.903,12	97,5835%	2,5636%
5	1524,11	1529,02	1526,57	10563,44	28.466,57	95,0199%	2,9384%
6	1529,02	1533,93	1531,48	11557,99	40.024,55	92,0815%	3,2151%
7	1533,93	1538,84	1536,38	18703,76	58.728,32	88,8665%	5,2028%
8	1538,84	1543,75	1541,29	24344,75	83.073,06	83,6637%	6,7719%
9	1543,75	1548,65	1546,20	27292,57	110.365,64	76,8918%	7,5919%
10	1548,65	1553,56	1551,11	26146,13	136.511,77	69,2999%	7,2730%
11	1553,56	1558,47	1556,02	33028,13	169.539,90	62,0269%	9,1873%
12	1558,47	1563,38	1560,92	34930,65	204.470,55	52,8396%	9,7166%
13	1563,38	1568,28	1565,83	43126,03	247.596,57	43,1230%	11,9962%
14	1568,28	1573,19	1570,74	32031,30	279.627,87	31,1268%	8,9101%
15	1573,19	1578,10	1575,65	18698,09	298.325,96	22,2167%	5,2012%
16	1578,10	1583,01	1580,55	16006,46	314.332,41	17,0155%	4,4525%
17	1583,01	1587,92	1585,46	14942,95	329.275,36	12,5630%	4,1566%
18	1587,92	1592,82	1590,37	15062,47	344.337,83	8,4064%	4,1899%
19	1592,82	1597,73	1595,28	10760,41	355.098,25	4,2165%	2,9932%
20	1597,73	1602,64	1600,19	4397,75	359.496,00	1,2233%	1,2233%
					359.496,00	0,00%	100,00%