

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA QUEBRADA LAS PAVAS, MUTISCUA - NORTE
DE SANTANDER**

LISETH CLARENA DELGADO ROMERO

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA
2019

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA QUEBRADA LAS PAVAS, MUTISCUA - NORTE
DE SANTANDER**

LISETH CLARENA DELGADO ROMERO

1094281334

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniera Ambiental.

DIRECTOR

MARIA ESTHER RIVERA

PhD. Hidrología & Lic. Matemáticas y Física

CODIRECTOR

JESUS RAMON DELGADO RODRIGUEZ

Geólogo MsC. Geotecnia.

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA

2019

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Pamplona, Julio de 2019.

Copyright © 2019 por Liseth Clarena Delgado Romero. Todos los derechos reservados.

Dedicatoria

A Dios por permitirme culminar esta etapa tan importante de mi vida.
Ante todo a mi mamita, gracias a su esfuerzo y amor soy lo que soy. Esto también es de ella.
A mi papá por su cariño y apoyo incondicional.
A mi amorcito Camilo por estar siempre ahí para ayudarme a salir adelante y ser mejor cada día.
A Tatta y a todas las GrlsZn porque siempre creyeron en mí y su amistad hizo parte importante
de todo este proceso.
A todas las personas que creyeron en mí y me brindaron su apoyo en cada momento que lo
necesité.

*"Long you live and high you fly
And smiles you'll give and tears you'll cry
And all you touch and all you see
Is all your life will ever be"
Pink Floyd*

Agradecimientos

A Dios nuevamente, a mis padres por permitirme llegar a este punto y a mi familia por acompañarme siempre y creer en mí.

A la Alcaldía municipal y todo su personal por brindarme la oportunidad de crecer como profesional y como persona.

A mis profesores María Esther y Chucho por su continuo acompañamiento, apoyo, orientación y consejos de vida, muchísimas gracias.

A todos mis compañeros, amigos y demás personas que de una u otra forma contribuyeron a que esto fuera posible.

Gracias totales.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Lista de Tablas	10
Lista de Imágenes	11
Lista de Gráficos	12
Lista de Ecuaciones.....	13
Lista de Fotografías.....	15
Lista de Anexos.....	16
RESUMEN	17
INTRODUCCIÓN	18
2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.....	19
3. JUSTIFICACIÓN	21
4. OBJETIVOS	22
4.1. OBJETIVO GENERAL	22
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
5. ALCANCE Y LIMITACIONES	23
5.1. ALCANCE.....	23
5.2. LIMITACIONES	23
6. MARCO REFERENCIAL.....	25
6.1. MARCO CONTEXTUAL	25
6.2. ANTECEDENTES.....	27
6.3. MARCO LEGAL	32
6.4. MARCO TEÓRICO.....	33
6.4.1. Hidrología	34
6.4.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG) en Hidrología.....	62

7.	METODOLOGÍA.....	65
7.1.	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	65
7.2.	CARACTERIZACIÓN HIDROMORFOMÉTRICA	66
7.3.	SELECCIÓN DE PUNTOS DE AFORO Y MUESTREO DE AGUA.....	67
7.4.	MEDICIONES Y TRABAJO DE CAMPO.....	71
7.5.	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE LA ZONA	75
7.6.	PROCESAMIENTO DE INSUMOS PARA LA OBTENCIÓN DE CURVAS IDF, HIETOGRAMAS, HIDROGRAMAS UNITARIOS SINTÉTICOS Y CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES.....	75
7.7.	DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA (CN).....	77
7.8.	CALIDAD DE AGUA.....	78
7.9.	CAUDAL ECOLÓGICO	78
7.10.	DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA (Oh).....	78
7.11.	DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA (Dh)	79
7.12.	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ESCASEZ (Ie).....	79
8.	RESULTADOS.....	80
8.1.	CARACTERIZACIÓN HIDROMORFOMÉTRICA	80
8.2.	GEOLOGÍA	85
8.2.1.	Geología regional.....	85
8.2.2.	Geología local	86
8.3.	ANÁLISIS HIDROLÓGICO.....	89
8.3.1.	Curvas IDF, hietogramas e hidrogramas unitarios	89
8.3.2.	Curva de duración de caudales	99
8.3.3.	Calidad del agua.....	101
8.3.4.	Número de curva.....	106
8.3.5.	Oferta hídrica	112

8.3.6. Demanda hídrica	112
8.4. ÍNDICE DE ESCASEZ.....	114
CONCLUSIONES	115
RECOMENDACIONES.....	116
BIBLIOGRAFÍA	117
ANEXOS	126

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Formas de una cuenca de acuerdo al Índice de compacidad.	36
Tabla 2. Forma de la cuenca según el factor de forma.	36
Tabla 3. Interpretación del índice de alargamiento.....	37
Tabla 4. Relieve en función de la Pendiente Media (%).	37
Tabla 5. Principales métodos para el cálculo del tiempo de concentración de una cuenca.	41
Tabla 6. Factor de ajuste F de la velocidad de un flotador en función del coeficiente R entre la profundidad del flotador sumergido y la profundidad del agua.....	45
Tabla 7. Ecuaciones de probabilidad de excedencia y Periodo de retorno.	48
Tabla 8. Rangos para la clasificación de las Condiciones Antecedentes de Humedad (AMC)....	51
Tabla 9. Valores del Número de Curva de escorrentía para complejos hidrológicos de uso agronómico.	51
Tabla 10. Calificación de la calidad del agua según el ICA.	54
Tabla 11. Variables y ponderaciones para el caso de 5 variables.	54
Tabla 12. Variables y ponderaciones para el caso de 6 variables.	54
Tabla 13. Grado de contaminación de acuerdo con los ICO.	57
Tabla 14. Bandas espectrales de los satélites Sentinel-2.	63
Tabla 15. Atributos de los polígonos del mapa de Número de Curva.	77
Tabla 16. Características morfométricas de la microcuenca Las Pavas (Mutiscua).	80
Tabla 17. Tiempos de concentración de la microcuenca Las Pavas según diferentes autores.	83
Tabla 18. Comparación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la Q. Las Pavas (nacimiento, cuenca media y desembocadura) vs. Res. 2115 (2007).	101
Tabla 19. Parámetros fisicoquímicos adicionales de la Q. Las Pavas.	105
Tabla 20. Índices de calidad de agua para el nacimiento de la Q. Las Pavas.	105
Tabla 21. Índices de calidad de agua para la cuenca media de la Q. Las Pavas.	105
Tabla 22. Índices de calidad de agua para la desembocadura de la Q. Las Pavas.	105

Lista de Imágenes

	Pág.
Imagen 1. Ubicación geográfica de la Quebrada Las Pavas, municipio de Mutiscua.	25
Imagen 2. Tipos de curva hipsométrica.	38
Imagen 3. Número de orden de corrientes según Horton.	39
Imagen 4. Algunos tipos de patrones de drenaje que puede tener una cuenca.	40
Imagen 5. Área bajo la CDC, caudal medio y caudal mediano estación hidrológica Puerto	47
Imagen 6. Logo del programa Copérnico.	62
Imagen 7. Interfaz del ArcMap.	64
Imagen 8. Diagrama de la metodología desarrollada.	65
Imagen 9. Puntos de aforo y muestreo de agua de la Q. Las Pavas.	67
Imagen 10. Mapa de orden de drenajes de la microcuenca Las Pavas.	81
Imagen 11. Modelo Digital del Terreno (MDT) de la microcuenca Las Pavas.	85
Imagen 12. Mapa geológico de la microcuenca Las Pavas.	86
Imagen 13. Mapa de pendientes de la microcuenca Las Pavas.	107
Imagen 14. Mapa de tipos de suelo de la Microcuenca Las Pavas.	107
Imagen 15. Mapa de grupos hidrológicos del suelo de la microcuenca Las Pavas.	109
Imagen 16. Mapa de cobertura del suelo de la microcuenca Las Pavas.	111
Imagen 17. Mapa del Número de Curva de la microcuenca Las Pavas.	111
Imagen 18. Mapa de usuarios del recurso hídrico.	113

Lista de Gráficos

	Pág.
Gráfico 1. Curva hipsométrica de la microcuenca Las Pavas.....	83
Gráfico 2. Perfil longitudinal de la Q. Las Pavas.	84
Gráfico 3. Curvas IDF – Estación CALDERA LA [Cód. 16020110] (Mutiscua).....	91
Gráfico 4. Hietogramas y distribución de intensidades de precipitación para diferentes periodos de retorno (T).....	92
Gráfico 5. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para T=2 años.	95
Gráfico 6. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para T=5 años.	95
Gráfico 7. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para T=10 años.	96
Gráfico 8. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para T=25 años.	96
Gráfico 9. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para T=50 años.	97
Gráfico 10. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para T=100 años.	97
Gráfico 11. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para T=500 años.	98
Gráfico 12. Régimen de precipitaciones de Mutiscua, Norte de Santander.	99
Gráfico 13. Curva de Duración de Caudales de la Q. Las Pavas (Mayo-Julio/2019).....	100
Gráfico 14. Captaciones de caudal de los Usuarios del Recurso Hídrico.....	114

Lista de Ecuaciones

	Pág.
Ec. 1. Ancho promedio.....	35
Ec. 2. Índice de compacidad de Gravelius.....	35
Ec. 3. Factor de forma.....	36
Ec. 4. Razón de elongación de Shumm.....	36
Ec. 5. Índice de alargamiento.....	37
Ec. 6. Pendiente media del cauce principal.....	37
Ec. 7. Pendiente ponderada del cauce principal.....	37
Ec. 8. Elevación media.....	38
Ec. 9. Relación de bifurcación.....	39
Ec. 10. Densidad de drenaje.....	40
Ec. 11. Ecuación de las curvas IDF.....	43
Ec. 12. Caudal.....	45
Ec. 13. Tiempo de punta.....	46
Ec. 14. Tiempo base.....	46
Ec. 15. Caudal pico.....	46
Ec. 16. Probabilidad de excedencia.....	47
Ec. 17. Oferta hídrica según el método del Número de Curva.....	50
Ec. 18. Diferencia potencial máxima.....	51
Ec. 19. Corrección de condición antecedente de humedad (I).....	52
Ec. 20. Corrección de condición antecedente de humedad (III).....	52
Ec. 21. Índice de Calidad de Agua (ICA).....	54
Ec. 22. Porcentaje de saturación de oxígeno.....	55
Ec. 23. Subíndice I_{OD} para el cálculo del ICA.....	55
Ec. 24. Subíndice I_{SST} para el cálculo del ICA.....	55
Ec. 25. Subíndice $I_{C.E.}$ para el cálculo del ICA.....	56
Ec. 26. Índice de Contaminación por Mineralización (ICOMI).....	57
Ec. 27. Subíndice $I_{C.E.}$ para el cálculo del ICOMI.....	57
Ec. 28. Subíndice I_{Dureza} para el cálculo del ICOMI.....	57
Ec. 29. Subíndice $I_{Alcalinidad}$ para el cálculo del ICOMI.....	58
Ec. 30. Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO).....	58

Ec. 31. Subíndice I_{DBO} para el cálculo del ICOMO.....	58
Ec. 32. Subíndice I_{CFT} para el cálculo del ICOMO.....	58
Ec. 33. Subíndice $I_{Oxígeno\%}$ para el cálculo del ICOMO.....	59
Ec. 34. Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos Totales (ICOSUS).....	59
Ec. 35. Demanda hídrica.....	60
Ec. 36. Índice de escasez.....	61

Lista de Fotografías

	Pág.
Fotografía 1. Bocatoma del acueducto municipal ubicada en la Q. Las Pavas.	26
Fotografía 2. Nuevo desarenador de la red de acueducto de la Q. Las Pavas.	27
Fotografía 3. Puntos de aforo de la Q. Las Pavas.	68
Fotografía 4. GPS Garmin eTrex 30x.	69
Fotografía 5. Muestreo de agua de la Q. Las Pavas.	70
Fotografía 6. Mediciones diarias de caudal y temperatura.	71
Fotografía 7. Aumento de velocidad y caudal en la Q. Las Pavas por época de lluvias.	73
Fotografía 8. Termómetro Infrarrojo Digital Industrial Laser Xueliee GM 320.	74
Fotografía 9. Fenómenos de remoción en masa en la parte media y alta de la microcuenca Las Pavas.	82
Fotografía 10. Rocas ígneas graníticas presentes en la microcuenca Las Pavas.	87
Fotografía 11. Depósitos fluviotorrenciales (Qft) presentes en la microcuenca Las Pavas.	88
Fotografía 12. Depósito coluvial (Qc) presente en la microcuenca Las Pavas.	89
Fotografía 13. Aumento de turbiedad en la Q. Las Pavas.	102
Fotografía 14. Formación de espuma en la Q. Las Pavas.	103
Fotografía 15. Contaminación por algas verdes filamentosas en época de estiaje en la Q. Las Pavas.	104
Fotografía 16. Captaciones de agua de la Q. Las Pavas.	113

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo 1. Registro de usuarios del recurso hídrico de la Q. Las Pavas-zona rural.	126
Anexo 2. Formato de monitoreo de caudales.....	129
Anexo 3. Resultados de calidad de agua (parámetros fisicoquímicos y microbiológicos).....	130
Anexo 4. Ubicación geográfica de la zona de estudio	140
Anexo 5. Modelo de Digital del Terreno (MDT) para la Microcuenca Las Pavas.....	141
Anexo 6. Mapa de puntos de aforo y muestreo de agua.	142
Anexo 7. Mapa de usuarios del recurso hídrico.....	143
Anexo 8. Mapa de orden de drenajes de la Q. Las Pavas.	144
Anexo 9. Mapa de pendientes de la microcuenca Las Pavas.....	145
Anexo 10. Mapa de tipos de suelo de la microcuenca Las Pavas.....	146
Anexo 11. Mapa de grupos hidrológicos del suelo de la microcuenca Las Pavas.....	147
Anexo 12. Mapa de cobertura vegetal de la microcuenca Las Pavas.	148
Anexo 13. Mapa del Número de Curva de la microcuenca Las Pavas.	149
Anexo 14. Mapa geológico de la microcuenca Las Pavas.....	150

RESUMEN

El comportamiento del recurso hídrico varía de acuerdo a la zona en la que se encuentre, siendo necesario particularizar su estudio para entender su dinámica y prever situaciones futuras con condiciones atípicas. Los estudios hidrológicos cumplen con ese propósito ya que abarcan aspectos como la morfología, la variación pluviométrica y el monitoreo de caudales dentro de la cuenca para generar información precisa y real de las características hidrométricas propias del lugar. En el presente proyecto se estudió la microcuenca Las Pavas jurisdicción del municipio de Mutiscua-Norte de Santander, la cual es una de las fuentes abastecedoras del acueducto municipal. Para ello, se obtuvo la caracterización física y morfométrica utilizando imágenes satelitales Sentinel-2 con un tratamiento digital en ArcGIS, la determinación de la oferta mediante el método del Número de Curva (CN) del SCS descrita en la Resolución 0865 del 2004, la demanda hídrica y el cálculo del índice de escasez. Así como, la obtención de curvas IDF, hietogramas, hidrogramas y Curva de Duración de Caudales para el periodo de estudio. Se obtuvo que la microcuenca de 5.55 Km² de superficie, presenta una red de drenaje poco jerarquizada con gran potencial erosivo y susceptibilidad a las avenidas torrenciales bajo condiciones de lluvia intensa. La permeabilidad del suelo de toda la microcuenca favorece la infiltración en la zona. El caudal ecológico (Q95) para la microcuenca es de 0.125 m³/s y el caudal medio diario para el periodo de estudio es 0.251 m³/s y los caudales máximos de escorrentía directa para periodos de retorno de 100 y 500 años de 66.2 y 107.6 m³/s, respectivamente. Con el muestreo de calidad de agua se encontró que los niveles de fosfatos, coliformes totales y fecales se encuentran por encima de la norma citada en la Resolución 2115 de 2007, cuyo origen fue establecido como natural, por la presencia de depósitos coluviales con bloques de calizas y lodolitas orgánicas que llegan a liberar carbonatos, fósforo y materia orgánica en la corriente hídrica. La presencia de espuma y el crecimiento de algas verdes filamentosas en el fondo del cauce reafirman este hecho. Además, el valor medio de CN para la microcuenca es 64.71, generando una oferta total de 6078441.83 m³/año, a la cual se le aplicó un factor de reducción del 50% por calidad y caudal ecológico, siendo la oferta neta disponible de 3039220.916 m³/año. La demanda total es 105021.1667 m³/año. Por último, el índice de escasez es 3.46% indicando una muy baja presión antrópica sobre el sistema hídrico.

Palabras Clave: *Oferta hídrica, Demanda hídrica, Índice de escasez, Número de Curva.*

INTRODUCCIÓN

El agua es la fuente de vida en el planeta, siendo importante el estudio de su comportamiento para el desarrollo de las comunidades que en él habitan. Desde la edad antigua, ya se manejaban conocimientos acerca de su importancia y de cómo era necesario tomarla limpia para evitar enfermedades, transportarla desde las fuentes hídricas hasta los hogares, estudiar su conducta en diferentes épocas del año para evitar inundaciones y sobrellevar las sequías. Con el paso del tiempo este estudio se fue perfeccionando en lo que hoy se conoce como Hidrología y según Muñoz (2014), es la ciencia interdisciplinar que estudia el agua que hay en la Tierra, su distribución, circulación, propiedades, relación con el ambiente y sus seres vivos, entre otras cosas.

El líquido vital no se comporta de la misma manera en todas las zonas geográficas de la Tierra, lo que requiere el estudio particular de cada una de las corrientes hidrológicas para la comprensión de su dinámica y sus efectos sobre las comunidades que habitan en sus alrededores y dependen de ellas para su desarrollo. Según el Estudio Nacional del Agua (ENA 2014), en Colombia se cuenta con un rendimiento hídrico a nivel nacional de 56 l/s-Km² del total del globo, lo que lo hace uno de los países con mayor oferta hídrica. En el caso particular de Mutiscua, Norte de Santander, hay multitud de nacimientos de agua y quebradas que alimentan el Río La Plata, lo que hace que el municipio sea especialmente susceptible a avenidas torrenciales.

Es así como nace el presente proyecto, enfocado en el estudio del comportamiento hídrico en la Quebrada Las Pavas, fuente de abastecimiento del acueducto municipal y de múltiples familias rurales adyacentes a su cauce, con el cual se busca establecer un antecedente académico e investigativo, que permita conocer información técnica y científica con la que se puedan generar estrategias que redunden en el bienestar de estos habitantes, sus viviendas y bienes.

El proyecto se desarrolló en cuatro fases principales, como recolección inicial de información, trabajo de campo, procesamiento de insumos y obtención de resultados. De igual manera, se agradece el acompañamiento de la Alcaldía municipal en este proceso y su disposición para la culminación del mismo.

2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

La humanidad, a través de la historia, ha logrado un avance increíble en lo relacionado con la organización social y el cubrimiento de necesidades vitales. Desde la época antigua, los asirios, egipcios, persas, romanos, entre otros, tuvieron las primeras nociones de la necesidad de transportar el agua lo más limpia posible desde las fuentes hídricas hasta las ciudades, para el consumo humano y animal, lo que implica la necesidad de mejorar las técnicas utilizadas para este propósito. De esa necesidad de garantizar ciertas condiciones básicas de vida, con el tiempo se forma el concepto de servicios públicos domiciliarios, los cuales se encargan de asegurar la calidad de vida como objetivo primordial de la sociedad.

Dentro de las prestaciones que brinda la Unidad de Servicios Públicos Domiciliarios de Mutiscua, Norte de Santander, se incluye el de acueducto o agua potable. Para esta asistencia se tienen en cuenta aspectos como la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en la fuente.

En el municipio el servicio de agua potable se brinda a través de un proceso que empieza en las bocatomas del acueducto municipal. Una de ellas está ubicada en el cauce de la microcuenca el Chorrerón y la otra dentro de la Quebrada Las Pavas. La demanda es suplida en un 70% por la bocatoma del Chorrerón, siendo el 30% restante complementado por Las Pavas, según lo descrito por la Secretaría de Agua Potable y Saneamiento Básico departamental (SAPSB, 2016).

El problema radica en que, en épocas de estiaje, los niveles de ambas quebradas se reducen significativamente, lo que dificulta la prestación del servicio bajo esas condiciones. Así mismo, cuando hay precipitación en exceso, implica un inconveniente para la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), ya que aumenta la turbiedad del agua y de sedimentos arrastrados y, por tanto, se complica su tratamiento. Según la SAPSB (2016), en periodos de lluvias llegan a presentarse incluso crecientes súbitas, lo que pone en riesgo además la infraestructura física de la captación.

La quebrada Las Pavas es fundamental para complementar la demanda hídrica del acueducto en situaciones de sequía y puesto que hacen falta datos actualizados y completos sobre ella, es necesario llevar a cabo el estudio de la dinámica hidrológica de la microcuenca,

de sus caudales, litología, topografía, geología, precipitaciones, cobertura del suelo, entre otros aspectos, para la determinación de la oferta y demanda hídrica y su respectivo índice de escasez.

De no obtener esta información, no se podría asegurar la prestación cuando las temporadas de estiaje se prolonguen a causa del fenómeno del Niño y esto, a su vez, conllevaría a dificultades de tipo social, legal y económico para la administración.

Con base a lo anterior, se plantean las siguientes preguntas: ¿Cuál es la oferta y la demanda hídrica de la microcuenca Las Pavas? ¿Cuáles son los caudales pico en la Quebrada Las Pavas, que pueden poner en riesgo la prestación del servicio de agua potable a la población?

3. JUSTIFICACIÓN

En Colombia, Cardona, Gaviria, Piedrahíta y Salazar (2016) mencionan que la corte constitucional fue la primera en dar la noción de los servicios públicos domiciliarios, la cual manifestó que son una clase de prestación pública que se suministra a través de una red física o humana, que tiene enlace directo con viviendas o sitios de trabajo de los usuarios y cuyo fin último es satisfacer las necesidades esenciales de los mismos. Esta prestación está reglamentada bajo la Ley 142 de 1994, describiendo el Régimen de Servicios Públicos Domiciliarios, cuyo objetivo debe ser el cubrimiento del total de los usuarios y garantizar la calidad y continuidad del servicio ofrecido. En Mutiscua, la encargada de la prestación es la Unidad de Servicios Públicos Domiciliarios.

Por otra parte, la alteración del equilibrio natural del planeta tal y como se está presenciando, se traduce en fenómenos naturales cada vez más frecuentes, como sequías o temporadas muy largas de lluvias, que a corto o mediano plazo generan inundaciones y pérdidas económicas y humanas. Por esto, se hace trascendente que estos eventos puedan ser previstos con antelación, estudiados y monitoreados en el tiempo, para poder tener rápida respuesta en caso de que sucedan.

Teniendo en cuenta la problemática planteada anteriormente, este proyecto es una base académica con la que se busca generar conocimiento acerca del comportamiento hidrológico de la Q. Las Pavas. Para ello, se realizó el monitoreo de caudales que implicó un registro real de ellos, y se obtuvo información relacionada a valores mínimos y máximos que se presenten en el periodo de estudio en la misma. Además, se determinó la relación entre precipitaciones y escorrentía de la zona para la obtención de la oferta hídrica, entre otros aspectos.

Esta investigación además es una contribución para respaldar la actualización de los planes de contingencia que maneja la alcaldía de Mutiscua para épocas de estiaje y de lluvias, con el fin de garantizar el servicio de agua potable para la población mutiscuana.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar hidrológicamente de la Quebrada Las Pavas del municipio de Mutiscua.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Caracterizar hidromorfológicamente la microcuenca Las Pavas del municipio de Mutiscua, Norte de Santander.
- ❖ Obtener curvas IDF, hietogramas, hidrogramas y curva de duración de caudales a partir de insumos de precipitación y trabajo de campo.
- ❖ Monitorear el caudal en la Quebrada Las Pavas.
- ❖ Calcular la oferta y la demanda hídrica de la Quebrada Las Pavas.
- ❖ Establecer el Índice de escasez de la Q. Las Pavas.

5. ALCANCE Y LIMITACIONES

5.1. ALCANCE

Este proyecto tiene un alcance experimental cuantitativo, es decir, busca estudiar la relación entre los factores morfométricos y meteorológicos de la zona de estudio y comprender su incidencia en el comportamiento de los caudales que se presentan dentro de ella. Además, el análisis incluye la determinación de la oferta y la demanda hídrica de la Quebrada Las Pavas.

5.2. LIMITACIONES

La poca disponibilidad de recursos tanto físicos, humanos y económicos, limitó en gran medida la frecuencia y eficacia de las mediciones de campo. La Alcaldía municipal no cuenta con instrumentos para la medición de caudal; ante esto, los aforos se realizaron por el método de flotador, tal como lo recomiendan la OMM (2011) y el IDEAM (2007) en sus guías de medición y monitoreo del agua, en las cuales sugieren su utilización en caso de que las otras técnicas no puedan aplicarse, destacando que debe utilizarse un factor de corrección para estos casos.

Adicionalmente, el acceso a la zona de estudio se dificultó por aspectos como pendientes muy pronunciadas y vegetación densa, por lo que en las visitas de campo se seleccionaron los puntos para el aforo y muestreo de agua que podían ser fácilmente accesibles.

Asimismo, el municipio posee 3 estaciones meteorológicas. Sin embargo, dos de ellas contienen registros deficientes, ya que una fue desactivada en 1976 y la otra fue activada en el año 2018. Por esto, la información pluviométrica, se recolectó de la tercera estación, ubicada en el corregimiento de La Caldera, perteneciente al municipio de Mutiscua. De igual manera, no existen estaciones limnimétricas o de aforo por lo cual los datos de caudal debieron ser recolectados en esta investigación.

Finalmente, se debe tener en cuenta que los resultados presentados son significativos sólo para el periodo de estudio, debido a que las condiciones atmosféricas e hidrológicas varían de un lapso de tiempo a otro, al igual que el comportamiento del flujo de la Quebrada.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1. MARCO CONTEXTUAL

Mutiscua se encuentra al oriente del país, en la subregión Suroccidental del departamento de Norte de Santander sobre la cordillera Oriental. La cabecera municipal se encuentra en las coordenadas $7^{\circ}18'N$ $72^{\circ}45'W$ respecto al meridiano de Greenwich, a 2685 m.s.n.m., aproximadamente (Alcaldía Municipal de Mutiscua, 2015). La Quebrada Las Pavas (ver Imagen 1), se encuentra ubicada al sureste del municipio, dentro la cuenca del Río La Plata. Su nacimiento se encuentra ubicado a 3452 m.s.n.m. y abastece una de las bocatomas del acueducto municipal, siendo ficha clave del suministro para las épocas de sequía.

Imagen 1. Ubicación geográfica de la Quebrada Las Pavas, municipio de Mutiscua.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Esta región se caracteriza por pendientes pronunciadas, vegetación densa, bajas temperaturas, abundante precipitación, de acuerdo con las visitas de campo, su parte alta se encuentra muy poco intervenida, mientras que en su parte baja existe mayor intervención antrópica con cultivos y ganadería.

La nueva red de aducción y conducción fue construida a principios del 2019, con el propósito de mejorar la prestación del servicio. Se renovaron las estructuras físicas de toda la red de la Q. Las Pavas, incluyendo bocatoma y desarenador, como se muestra en las Fotografías 1 y 2, ya que la anterior se encontraba en pésimo estado. Además, se puede observar que la bocatoma no cuenta con rejilla, lo que ocasiona que esta capte más caudal del deseado y esté expuesta a posibles taponamientos.

En la Fotografía 1 se muestra a) Panorámica aguas abajo de la bocatoma, b) Panorámica aguas arriba de la bocatoma, c) Cámara de recolección y d) Vista superior de la captación de fondo.

Fotografía 1. Bocatoma del acueducto municipal ubicada en la Q. Las Pavas.



En la Fotografía 2 se puede observar a) y b) Cámara de excesos del desarenador y c) Panorámica de la ubicación de desarenador.

Fotografía 2. Nuevo desarenador de la red de acueducto de la Q. Las Pavas.



Fuente: Delgado R., 2019.

El casco urbano está comunicado con la vía nacional Cúcuta-Bucaramanga por medio de un ramal de 2.4 Km y otro alterno denominado “Las Pavas”. En el municipio existen 14 veredas distribuidas en el territorio además del casco urbano, las cuales están comunicadas con este último por medio de vías terciarias en regular estado. El acceso a la zona de estudio es por medio del ramal de Las Pavas, el cual conecta hasta la parte media de la cuenca, de donde después se debe subir a pie unos 25 minutos para encontrar la bocatoma del acueducto.

6.2. ANTECEDENTES

A continuación se describen algunos casos internacionales, nacionales y regionales en su orden, relacionados con el análisis hidrológico de fuentes de agua superficiales:

Castillo (2005) desarrolló el estudio de los cambios de caudales máximos en las cuencas La Reina, Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2, los cuales poseían una cobertura compuesta por *Eucalyptus nitens*, plantadas en los años 2000, 1997 y 2000, respectivamente. Anteriormente, en la cuenca La Reina, la cobertura vegetal era de *Pinus radiata*, la cual fue cosechada a tala rasa y reemplazada por la especie mencionada. El periodo de estudio comprendió del año 1997 al 2005 para La Reina y de 2000 a 2005 para Los Ulmos 1 y 2. Esta investigación concluyó que los caudales máximos aumentaron considerablemente en la cuenca La Reina después de la cosecha de pinos, indicando que la remoción de cobertura vegetal influye en la variación de caudales de la zona. De igual manera, se concluyó que la influencia de la cobertura arbórea en los caudales máximos fue para eventos de pequeña magnitud (5-10 mm) con periodos de retorno menores.

Del mismo modo, Juela (2011) ejecutó su tesis de grado haciendo un estudio hidrológico a la cuenca alta del río Catamayo en Ecuador, la cual se caracterizó morfométricamente, se hallaron las curvas de calibración y duración de caudales y se determinó el régimen de precipitaciones a lo largo del año. De este modo se determinó un régimen monomodal de lluvias, concentradas en los meses de diciembre a abril con valor medio anual de 910 mm y caudales que pueden ser utilizados para riego de 16,85 y 14,03 m³/s, conforme a las probabilidades del 70 a 80% de la curva de duración, respectivamente.

Sin embargo, la Confederación Hidrográfica del Segura (2013) en España, publicó el Plan Hidrológico de la cuenca del Segura 2009/2015, debido a que en la zona se ejerce una gran presión al recurso hídrico, siendo este un bien escaso. En la legislación española se regula la restricción al uso del recurso para mantener la funcionalidad del ecosistema, evitando su deterioro; además, se establece la necesidad de determinar los caudales ambientales en los planes de cuenca, los cuales sirven como limitación a los sistemas de explotación. La implantación del régimen de caudales se realizó en 3 fases: desarrollo de estudios técnicos, proceso de concertación con los usuarios e implantación de los regímenes de caudales ambientales concertados. Para ejecutar la evaluación del grado de alteración hidrológica se empleó el programa IAHRIS, teniendo en cuenta 21 indicadores. En los estudios técnicos se determinaron los caudales mínimos precisos dentro de la cuenca desde la perspectiva hidrológica y de simulación de hábitat. Finalmente, se determinaron los caudales obtenidos por ajuste de la idoneidad del hábitat de los resultados obtenidos con métodos hidrológicos.

De igual manera, Barbero (2014) generó un estudio del comportamiento hidrológico de una cuenca de 800 Ha ubicada en la provincia de Valencia, España, para lo cual se utilizó el método racional y el de Número de Curva con el fin de calcular el caudal pico de escorrentía dentro de dicha cuenca. Se usó el software ArcGIS para la determinación de los coeficientes de escorrentía para Raws y Prevert y del Número de Curva. Posteriormente se obtuvieron valores de 35.31, 37.11 y 34.60 m³/s, para los casos anteriores respectivamente.

Poco después Flores y otros (2016) presentaron un método para realizar el análisis morfométrico de la red de drenaje de una cuenca, en Perú. En esta monografía se recopiló información de diferentes autores acerca de las características generales, de forma, de relieve y de drenaje de cualquier cuenca, incluyendo ecuaciones y procedimientos para determinar cada una de estas. También se involucraron técnicas manuales para la determinación de algunos de los parámetros en caso de no contar con herramientas avanzadas.

En el caso de Colombia, específicamente en Bucaramanga, Ramírez y otros (1997), hicieron una publicación relativa a la calidad del agua en la que se estudió la normativa de varios países y la correlación entre variables fisicoquímicas del agua, resultando en la formulación de los cuatro índices de contaminación (ICO), destinados a la evaluación de ciertas características de las aguas. Estos índices son el ICOMI, el ICOMO, el ICOSUS y el ICOTRO, los cuales serán explicados dentro del marco teórico más adelante. Estos indicadores fueron posteriormente adoptados por el IDEAM para la valoración de la calidad del recurso hídrico en el país debido a su fácil estimación, la reducida cantidad total de variables involucradas (8) y la particularización del tipo de problema ambiental existente.

Posteriormente en Bogotá, Lavao y Corredor (2014), desarrollaron un estudio a la cuenca del río Murca, que se encuentra en el costado oriental de la hoya hidrográfica del río Negro, en el que se identificaron las coberturas terrestres a través de imágenes Landsat 5 y 8 que fueron procesadas con ayuda de la herramienta HEC Geo-HMS. Luego se procedió a la aplicación de la teoría del Número de Curva con el fin de transformar la precipitación total en efectiva. Se determinó que los valores de caudales máximos instantáneos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años fueron de 102.10, 153.50, 204.00, 266.00, 368.90 y 464.90 m³/s, respectivamente.

Por otra parte, al occidente de Boyacá, Gonzalez y Ortegon (2016), realizaron el estudio hidromorfométrico de la Quebrada Guaguaqui con el fin de determinar los caudales pico de creciente para diferentes periodos de retorno dentro de la microcuenca. Para ello, se usó del método racional. Para periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, obteniendo caudales pico de 4.44, 5.44, 6.11, 7.44, 8.11 y 9.11 m³/s, respectivamente. La cuenca tenía 60 Km² de área, aproximadamente.

De igual forma, Pérez y Vanegas (2016) estudiaron hidrológica e hidráulicamente la zona baja de la cuenca del río Frío en Chía, mediante el análisis de caudal por mediciones hechas en campo y caracterización física y morfométrica de la cuenca. También se estudió la precipitación de la zona mediante los métodos de polígonos de Thiessen e isoyetas. Utilizando HEC-RAS modelaron el comportamiento hidrológico de la zona, obteniendo láminas de agua entre 2.89 y 3.97 m de altura para periodos de retorno entre 10 y 100 años, pero que en ningún caso superaron el nivel de las estructuras de protección para avenidas de 100 años de retorno.

En otro caso, Salazar (2016) estudió a fondo la metodología para la determinación de la oferta hídrica superficial aplicando la relación lluvia-escorrentía en la cuenca de la quebrada Apauta, en el departamento de Cundinamarca. Para la aplicación del método de número de curva-NC usado dentro de esta, se delimitó la cuenca con ayuda de un software GIS teniendo en cuenta que su superficie se encuentra distribuida sobre 4 municipios, siendo Jerusalén el que mayor área posee; seguidamente, se obtuvo la capa de cobertura terrestre por medio de clasificación no supervisada, resultando así en 6 tipos de cobertura (agua, área urbana-patio, bosque, suelo desnudo-camino de tierra, pasto de pastoreo y rastrojo). Por otra parte, se realizó la clasificación de los suelos a partir de las unidades existentes, resultando en suelos tipo B y C. De igual manera, se procedió a determinar el CN por medio del software HEC-GeoHMS arrojando que la oferta hídrica neta disponible dentro de la cuenca era de 0.891 m³/s para el año 2015, con un índice de escasez de 4.5% (demanda muy baja).

Asimismo, Diaz y Mercado (2017), en Córdoba, llevaron a cabo una investigación similar, en la que aplicaron la metodología del número de curva del SCS a la subcuenca de Betancí, la cual posee un área de 1.202 Km². La teledetección fue utilizada para establecer las coberturas del terreno, donde el pasto ocupa el 85% del área total y el 83% de los suelos tienen un alto potencial de escorrentía, por ello la mayor parte de la superficie tiene un NC entre 81 y 86. Así, los autores

establecieron que la escorrentía tiende a ser mayor a la infiltración con lo cual se favorecen los procesos erosivos, las inundaciones e incluso la desertificación del territorio.

Además, Díaz y Alarcon (2018), realizaron el estudio hidrológico de la quebrada Niscota ubicada en Nunchía, Casanare. Esto para determinar la oferta y demanda de la zona y así conocer su potencial como fuente abastecedora de agua para un acueducto interveredal. La oferta hídrica se calculó con el método de balance hídrico en base a información de censos poblacionales, datos meteorológicos oficiales, imágenes satelitales y mapas geológicos de la cuenca. Se determinó que los meses con mayor y menor índice de escasez fueron enero y mayo con 4.61% y 0.14%, respectivamente. Por esto, el potencial de la quebrada como fuente abastecedora fue catalogado como alto. Asimismo, se encontró que el caudal máximo calculado por el método de Número de Curva fue de 385.3 m³/s, aproximadamente, y que aún en la época más seca del año el agua que escurre por el cauce principal de la cuenca es suficiente para abastecer el proyecto del acueducto interveredal sin experimentar presiones sobre la cuenca incluso cuando se presentan los caudales mínimos.

A nivel regional, Leal (2016) y Suarez (2016) desarrollaron dos estudios hidrológicos en zonas diferentes de Norte de Santander, microcuenca de la quebrada El Bobo y cuenca del Río La Plata respectivamente, en las cuales aplicaron la metodología de distintos autores para la caracterización morfométrica de la zona y determinación de curvas IDF, hietogramas e hidrogramas. Además modelaron el comportamiento de las corrientes hídricas en cada caso con ayuda de softwares diseñados para tal fin (MIKE y HEC-RAS). De esta forma, en ambos escenarios resultaron muy susceptibles a avenidas torrenciales por ser cuencas de montaña y poseer topografía con pendientes fuertes, con gran potencial erosivo.

Localmente, el Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua (2017) y la concesión de aguas del acueducto del municipio (2017) contienen información generalizada del sistema de tratamiento de agua potable, en el que se incluyen datos universales de las fuentes abastecedoras, como su descripción, condiciones del medio geológico y condiciones bioclimáticas.

6.3. MARCO LEGAL

La Unidad de Servicios Públicos Domiciliarios de Mutiscua fue creada mediante acuerdo No. 25 del 4 de octubre de 1998 y es la encargada de prestar todos los servicios públicos domiciliarios que hay en el municipio, tales como agua potable, alcantarillado, luz eléctrica, aseo urbano y rural, entre otros. Esta unidad fue creada en el marco de transformación empresarial establecido en la Ley 142 de 1994 dictada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MADVT), de acuerdo con la Secretaría de agua Potable y Saneamiento Básico (2014).

La normativa vigente que regula o reglamenta las actividades a desarrollar en esta pasantía investigativa, para cada uno de los aspectos a trabajar, es la siguiente:

Ley 142 del 11 de Julio de 1994, por la cual “se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones”. En el título I de esta ley se dictan los aspectos relacionados a la prestación de los servicios públicos domiciliarios, en especial lo referente a las Empresas Prestadoras de Servicios (ESP).

Decreto 302 del 25 de Febrero de 2000, por el cual se reglamenta “la Ley 142 de 1994, en materia de prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado”. Contiene el conjunto de normas que regulan las relaciones que se generan entre la entidad prestadora de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado y los suscriptores y usuarios, actuales y potenciales, del mismo. Específicamente en el Art. 6 habla de la responsabilidad de usuarios y entidad prestadora del servicio de hacer uso del servicio de agua potable con racionalidad y siempre garantizando su ahorro y uso eficiente.

Decreto 1575 del 09 de Mayo de 2007, por el cual se establece “el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano”. En el art. 9 describe la responsabilidad que tiene la entidad prestadora del servicio de agua potable en cuanto al control sobre la calidad del agua para consumo humano. También habla acerca de los controles de la calidad del agua y los mapas de riesgo en el capítulo IV y los planes de contingencia en el art.31.

Decreto 1076 del 26 de Mayo de 2015, por medio del cual “se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”. En el numeral 2.2.9.6.1.21.

(Metodologías para el cálculo del índice de escasez) se refiere a las Resoluciones 0865 de 2004 y 872 de 2006, que expone las metodologías de cálculo de oferta hídrica sobre el territorio colombiano para aguas superficiales y subterráneas, respectivamente.

Resolución 0865 del 22 de Julio de 2004, por el cual se adopta “la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones”. Esta resolución presenta 3 métodos por los cuales se puede calcular la oferta hídrica, del cual se adopta el método de Lluvia-Escorrentía (numeral 3.3), específicamente para el cálculo de la oferta hídrica en la microcuenca Las Pavas. El Índice de Escasez por su parte es la relación de dicha oferta, reducida por calidad del agua y caudal ecológico, y la demanda hídrica ejercida sobre el cauce.

Resolución 2115 del 22 de Junio de 2007, por medio de la cual se señalan “características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”. Este documento expone los valores límites de las características físicas, químicas y microbiológicas recomendadas del agua para consumo humano (Capítulos I y II). Además establece el método de cálculo para el IRCA y el IRABAm y su respectiva clasificación del nivel de riesgo en salud (Capítulo IV).

Resolución 0330 del 08 de Junio de 2017, por el cual se actualiza “el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS”. El RAS nos describe en cada uno de sus títulos la normativa, procesos y recomendaciones que se deben tener en cuenta para la prestación de cada uno de los servicios domiciliarios ofrecidos, en este caso, por la Unidad de Servicios Públicos de Mutiscua.

6.4. MARCO TEÓRICO

El agua es uno de los recursos naturales esenciales para la vida en este planeta, es por esto que su estudio ha sido muy importante en el desarrollo de las comunidades, especialmente el de los sistemas denominados cuencas hidrográficas.

Se puede entender una cuenca hidrográfica como un área de terreno delimitado por los puntos más altos (línea divisoria de aguas), en la cual el agua producto de las precipitaciones escurre hasta los puntos más bajos de manera superficial o subterránea, de manera intermitente o perenne, en la que el cauce principal recibe en su recorrido diferentes afluentes de menor caudal y extensión y todo su sistema de drenaje confluye en un único punto, entregando sus aguas bien sea a una río de mayor envergadura o al mar.

6.4.1. Hidrología

Como se había mencionado en un principio, la hidrología es la ciencia que se encarga del estudio del agua terrestre, incluyendo su origen, movimiento, distribución, propiedades físicas y químicas, su interacción con el medio en que se encuentra y su repercusión en las actividades humanas (IDEAM, 2014). Este mismo autor indica que la hidrología superficial es la rama encargada de la observación del comportamiento del recurso hídrico sobre la superficie terrestre, tal como la escorrentía superficial, la cual termina formando los ríos y arroyos, entre otros. De esta manera, los factores de los que depende la escorrentía superficial son básicamente clima (precipitaciones, temperatura, etc.), relieve, vegetación y geología (factor generador a su vez de los suelos en función también del clima).

En la particularización de casos para el análisis de redes de drenaje, se tienen en cuenta los factores mencionados anteriormente, los cuales en conjunto arrojan información importante sobre la dinámica de los ecosistemas. Para esto, dichas redes se tratan como una unidad independiente con características propias, las cuales se describen en su morfometría.

Flores y colaboradores (2016) mencionan que en 1932, Robert Ermer Horton publicó el artículo “características de una cuenca de drenaje” y, posteriormente, en 1945 publicó otro denominado “Enfoque hidrofísico a la morfología cuantitativa”, los cuales son dos referentes de la morfometría de cuencas y por los cuales se le considera el padre de la hidrología. Horton fue el precursor del sistema para análisis de red de drenaje modificado y mejorado por Arthur Newell Strahler en 1950, en el cual se clasifican los órdenes de los cauces de acuerdo a su jerarquía y su potencial de escorrentía.

6.4.1.1. Morfometría

Las características hidromorfométricas de una cuenca dependen de factores propios como la red de drenaje, forma, relieve, tipo y uso del suelo y cobertura vegetal, entre otros, y con ellos se puede deducir el comportamiento del agua dentro de ella (Vásquez, Herrera y Gutierrez, 2014). Dentro de los rasgos hidromorfométricos de una cuenca se encuentran:

➤ **Parámetros de superficie**

- ❖ Área (A): corresponde a la superficie total dentro de la divisoria de aguas. Las cuencas se pueden clasificar según su área, de acuerdo con el Centro Iberoamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Suelos en Carrión (2014), como: sistema hidrográfico (>3000 Ha), cuencas (60000-300000 Ha), Subcuenca (10000-69000 Ha) y microcuencas (<10000 Ha) citado por Suarez (2016).
- ❖ Perímetro (P): es la longitud de la línea divisoria de aguas en línea recta.
- ❖ Longitud axial (La): corresponde a la distancia en línea recta desde el punto más alto a la desembocadura de la vertiente.
- ❖ Longitud del cauce principal (L): es la distancia total recorrida por el agua siguiendo la corriente desde el nacimiento al desagüe.
- ❖ Ancho promedio (Ap): se define como la relación entre el área y la longitud de la cuenca, tal como lo describe Jimenez (2017), en la Ecuación 1. A menor Ap, menor susceptibilidad a la torrencialidad en la cuenca.

$$Ap = \frac{A}{La} \quad Ec. 1$$

➤ **Parámetros de forma**

- ❖ Índice de compacidad (Kc): Indica qué tan cercana es una cuenca a la forma circular, según Gravelius citado en Lux (2016). Cuanto más se aproxime este valor a uno, más volumen de agua de escurrimiento concentrará la cuenca y mayor riesgo de crecidas tendrá. En la Ecuación 2, R es el radio de una circunferencia de igual área que la cuenca.

$$Kc = \frac{P}{2\pi R} = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad Ec. 2$$

Este índice se puede interpretar de acuerdo con la Tabla 1:

Tabla 1. Formas de una cuenca de acuerdo al Índice de compacidad.

Clase de forma	Índice de compacidad	Forma de la cuenca
Clase I	1.00 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval-redonda a oval-oblonga
Clase III	1.51 o más de 2	Oval-oblonga a rectangular-oblonga

Fuente: Campos, 1992 en Lux, 2016.

- ❖ **Factor de forma (Rf):** Según Jimenez (2017), es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud del cauce (Ver Ecuación 3), que permite establecer la forma de la cuenca y, por tanto, su tendencia a las crecidas rápidas e intensas. Una cuenca con un factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma.

$$Rf = \frac{A}{L^2} \quad Ec. 3$$

La forma de la cuenca se clasifica, según el factor de forma, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2. Forma de la cuenca según el factor de forma.

Factor de forma aproximado	Forma de la cuenca
< 0.22	Muy alargada
0.22-0.3	Alargada
0.3-0.37	Ligeramente alargada
0.37-0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45-0.6	Ligeramente ensanchada
0.6-0.8	Ensanchada
0.8-1.2	Muy ensanchada
> 1.2	Rodeando el desagüe

Fuente: Strahler, 1957 en Chester y otros, 2017.

- ❖ **Razón de elongación (Re):** La fórmula propuesta por Shumm (1956) y citada en Lux (2016), relaciona el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca (D) y la longitud máxima de la misma (Ver Ecuación 4).

$$Re = \frac{D}{L} \quad Ec. 4$$

- ❖ **Índice de alargamiento (Ia):** Se refiere a la relación entre la distancia desde la salida de la microcuenca hasta el punto más alejado y el ancho máximo perpendicular a esta

distancia (A_{max}), tal como se muestra en la Ecuación 5 (Vásquez, Herrera y Gutierrez, 2014). Este índice se puede interpretar como lo muestra la Tabla 3 (Díaz y Alarcon, 2018).

$$Ia = \frac{La}{A_{max}} \quad Ec. 5$$

Tabla 3. Interpretación del índice de alargamiento.

Ia	Interpretación
> 1	Cuenca alargada
= 1	Cuenca cuadrada o circular
< 1	Cuenca achatada

Fuente: Jimenez, 1986 en Díaz y otros, 2018.

➤ **Parámetros de relieve**

- ❖ Pendiente media del cauce principal (Sc): Peña (2015) describe este parámetro como la relación entre la variación de altura entre el nacimiento y la desembocadura de la cuenca (ΔH) y la longitud de esta (L) (Ver Ecuación 6).

$$Sc = \frac{\Delta H}{L} \quad Ec. 6$$

Por otra parte, también se puede realizar este cálculo con la media ponderada, siendo L_i la longitud del cauce dentro de cada curva y E la equidistancia entre curvas de nivel. Se expresa en porcentaje, de acuerdo con Gaspari y otros (2012) con la Ecuación 7.

$$Sc = \frac{\sum L_i * E}{A} * 100 \quad Ec. 7$$

La pendiente puede ser interpretada según lo muestra la Tabla 4, de acuerdo con López (1998) citado en Gaspari y otros (2012).

Tabla 4. Relieve en función de la Pendiente Media (%).

Pendiente media (%)	Relieve
< 0.5	Muy plano
0.5 – 1	Plano
1 – 3	Suave
3 – 12	Lomadas

12 – 20	Accidentado o pronunciado
20 – 50	Muy fuerte
50 – 75	Escarpado
> 75	Muy escarpado

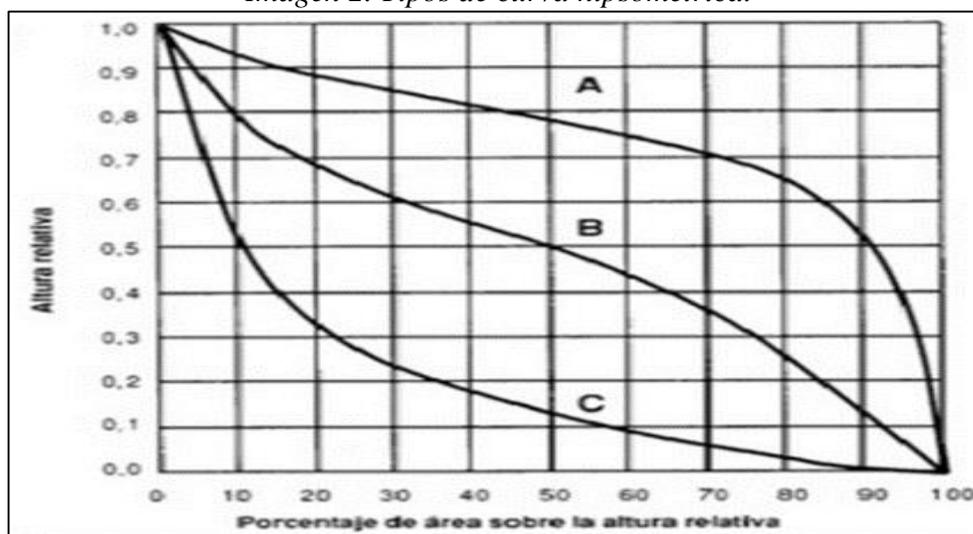
Fuente: López, 1998 en Gaspari y otros, 2012.

- ❖ **Elevación media (Em):** Es la elevación media ponderada del relieve referida al nivel del mar, según lo descrito por Peña (2015). Relaciona el área de cada franja (A_i), la equidistancia entre curvas de nivel (E_i) y el área total de la cuenca, de acuerdo con la Ecuación 8.

$$Em = \frac{\sum(A_i * E_i)}{A} \quad Ec. 8$$

- ❖ **Curva hipsométrica:** Según Strahler (1952), es la representación gráfica de la variación altitudinal de una cuenca, por medio de una curva tal que a cada altura le corresponde un respectivo porcentaje del área ubicada por encima de esa altura, como se muestra en la Imagen 2.

Imagen 2. Tipos de curva hipsométrica.



Fuente: Strahler, 1952 en Rojas, 2015.

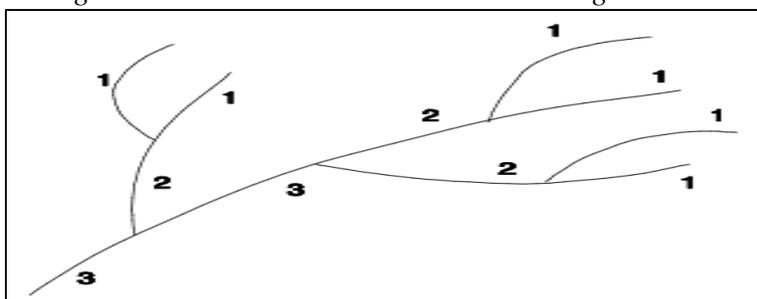
Donde la curva A representa una cuenca con gran potencial erosivo (fase de juventud); la curva B representa una cuenca en equilibrio (fase de madurez); la curva C representa una cuenca sedimentaria (fase de vejez).

- ❖ Perfil longitudinal del cauce: Representa la elevación del cauce en función de la longitud del mismo.

➤ **Parámetros de drenaje**

- ❖ Orden de la red de drenaje: Es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación de los afluentes de la cuenca. Según el método de Horton (1945), citado en Lux (2016), se consideran corrientes de primer orden, aquellas corrientes fuertes, portadoras de aguas de nacimientos y que no tienen afluentes. Cuando dos corrientes de orden uno se unen, resulta una corriente de orden dos. De manera general, cuando dos corrientes de orden i se unen, resulta una corriente de orden $i+1$. Cuando una corriente se une con otra de orden mayor, resulta una corriente que conserva el mayor orden.

Imagen 3. Número de orden de corrientes según Horton.



Fuente: Horton, 1945 en Lux, 2016.

- ❖ Relación de bifurcación (Rb): Es la relación existente entre el número de cauces de cualquier orden (N_u) y el número de cauces del siguiente orden (N_{u+1}) (Ver Ecuación 9), según Strahler (1969) citado en Lux (2016).

$$Rb = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad \text{Ec. 9}$$

En condiciones naturales y en general, el valor promedio es 3.5, pero el valor mínimo teóricamente posible para Rb es 2.0. Coates infirió que la Rb de corrientes de primero a segundo orden varía de 4.0 a 5.1 y de las de segundo a tercer orden varía de 2.8 a 4.9 (Lux, 2016). Además, Strahler (1964) dice que los valores bajos de Rb indican cuencas bien drenadas que a su vez pueden ser más susceptibles a avenidas torrenciales.

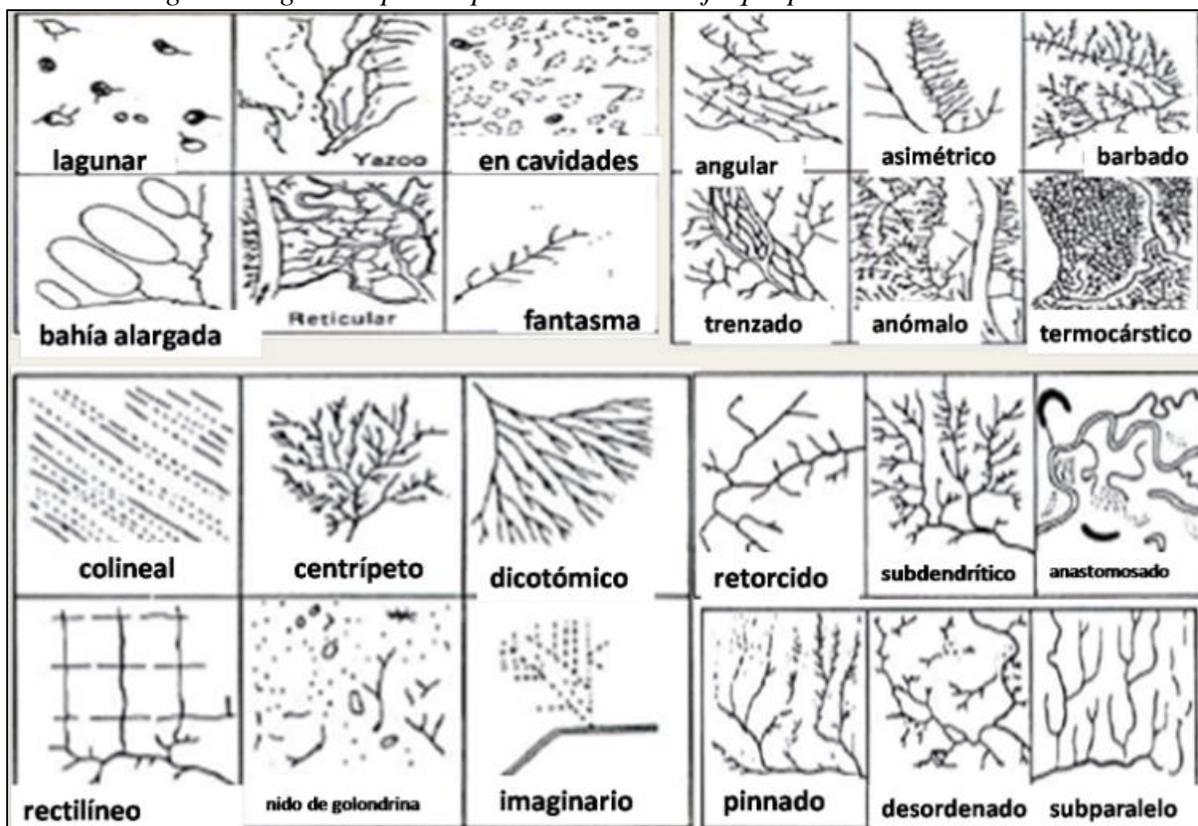
- ❖ Densidad de drenaje (Dd): La longitud total de los afluentes dentro de una cuenca hidrográfica (Lc), dividida por la superficie total de la cuenca (A), define la densidad de drenaje o longitud de cauces por unidad de área, tal como se describe en la Ecuación 10, tomada de Aguilar (2007). Este parámetro se expresa en Km/Km² (Vásquez, Herrera y Gutierrez, 2014).

$$Dd = \frac{Lc}{A} \quad \text{Ec. 10}$$

Esta medida da una noción de las condiciones del suelo y su cobertura de una cuenca, ya que según Flores y otros (2016), valores altos indican zonas con poca cobertura vegetal, suelos erosionados o impermeables, caso contrario para valores bajos.

- ❖ Patrón de drenaje, vías de drenaje de una cuenca, las cuales contribuyen a evacuar las aguas superficiales y dependen de factores como pendiente, geología, cobertura vegetal, entre otros. Este patrón puede ser de varias clases, tal y como se muestra en la Imagen 4.

Imagen 4. Algunos tipos de patrones de drenaje que puede tener una cuenca.



Fuente: Graciela, 2018.

- ❖ **Tiempo de concentración (tc):** Indica el tiempo mínimo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el sitio de cierre (Vélez Upegui y Botero Gutiérrez, 2011). Kirpich (1940) desarrolló una ecuación empírica, a partir de información antecedente de siete cuencas rurales estadounidenses con canales bien definidos y pendientes pronunciadas (3 a 10%), según Chow, Maidment y Mays (1994) citados en Gaspari y otros (2012). Así mismo, otros autores plantearon distintas ecuaciones para determinar el tiempo de concentración, tal como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Principales métodos para el cálculo del tiempo de concentración de una cuenca.

Método	Ecuación	Parámetros
Bransby-Williams	$tc = \frac{14.6 * L}{A^{0.1} * S^{0.2}}$	tc - tiempo de concentración de la cuenca (min); L - Longitud del cauce principal (Km); A - Área de la cuenca (Km ²); S - Pendiente promedio del cauce principal (%).
Kirpich	$tc = 0.02 * \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$	tc - tiempo de concentración de la cuenca (min); L - Longitud del cauce principal (Km); S - Pendiente promedio del cauce principal (m/m).
Ventura-Heras	$tc = a * \frac{A^{0.5}}{S}$ $a = L / \sqrt{A}$	tc - tiempo de concentración de la cuenca (h); L - Longitud del cauce principal (Km); A - Área de la cuenca (Km ²); S - Pendiente promedio del cauce principal (%); a - Alejamiento medio. Siendo $0,05 \leq a \leq 0,5$.
Passini	$tc = \frac{0.108 * (A * L)^{1/3}}{S^{0.5}}$	tc - tiempo de concentración de la cuenca (h); L - Longitud del cauce principal (Km); A - Área de la cuenca (Km ²); S - Pendiente promedio del cauce principal (m/m).
Giandotti	$tc = \frac{4 * \sqrt{A} + 1.5 * L}{25.3 * \sqrt{S * L}}$	tc - tiempo de concentración de la cuenca (h); L - Longitud del cauce principal (Km); A - Área de la cuenca (Km ²); S - Pendiente promedio del cauce principal (m/m).
Témez	$tc = 0.3 * \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$	tc - tiempo de concentración de la cuenca (h); L - Longitud del cauce principal (Km); S - Pendiente promedio del cauce principal (m/m).
California Culvert Practice	$tc = 60 * \left[\frac{0.87075 * L^3}{H} \right]^{0.385}$	tc - tiempo de concentración de la cuenca (min); L - Longitud del cauce principal (Km); H - Diferencia de alturas entre la divisoria de aguas y la desembocadura (m).

Clark
$$tc = 0.335 * \left(\frac{A}{S^{0.5}} \right)^{0.593}$$
 tc - tiempo de concentración de la cuenca (h); A - Área de la cuenca (Km²); S - Pendiente promedio del cauce principal (m/m).

Fuente: Ibáñez y otros, 2011 en Suarez, 2016.

6.4.1.2. Precipitación

La precipitación es el resultado del proceso de condensación del agua en la atmósfera, asunto que resulta en la caída de conglomerados de esta hacia la superficie, por gravedad. Esta ocurre cuando el aire se satura por dos procesos: por enfriamiento o exceso de humedad. Dentro del ciclo hidrológico cumple la función de distribuir el recurso por todo el planeta. Existen varios tipos de precipitación, de los cuales la más común es la precipitación líquida, es decir, la lluvia. Según la definición oficial de la OMM y el IDEAM, la lluvia “es la precipitación de partículas líquidas de agua, de diámetro mayor de 0,5 mm o de gotas menores, pero muy dispersas”. La escorrentía resultante de un evento de lluvia depende en gran medida de factores como tipo de suelo, relieve, cobertura vegetal, intensidad y duración del evento, entre otros.

En Colombia no se presentan las cuatro estaciones, por lo que normalmente solo hay épocas de invierno (muchas lluvias) o de estiaje (poca precipitación, sequía, verano según los pobladores), cuyo comportamiento tiende a ser monomodal, bimodal o interacciones entre las dos anteriores. La precipitación varía temporalmente aumentando un 92% en un año húmedo y disminuyendo hasta un 53% en un año seco, respecto de un año promedio de precipitación (IDEAM, 2018).

En el caso particular de Mutiscua, ubicada en la cordillera Oriental, presenta una tendencia al régimen de lluvias bimodal causado por la influencia que tiene la Zona de Convergencia Intertropical en la región, condicionado por parámetros de nubosidad, altitud, orientación de las montañas y actividad convectiva, según Jaramillo y Chaves (2000) y el IDEAM (2012).

➤ *Curvas IDF*

Por otra parte, las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia son la representación gráfica de la relación intensidad/duración de un evento de lluvia extrema, y están asociados a ciertos periodos de frecuencia de ocurrencia, denominados periodos de retorno. Para ello, se debe tener en cuenta que el comportamiento de la precipitación varía entre zonas, por lo que es necesario regionalizar las ecuaciones de estas curvas, adaptándolas a las condiciones de la región en estudio.

En la Ecuación 11, formulada por Aparicio (1997) y citada en Suarez (2016), se describe la intensidad en función de K, m, n y c, que son constantes características de la zona de estudio, la cual se calculan aplicando la distribución de Gumbel y regresiones potenciales, e I y d que corresponden a la intensidad de máxima y duración, respectivamente.

$$I = \frac{KT^m}{(d+c)^n} \quad \text{Ec. 11}$$

Es en estos eventos cuando se presentan los caudales máximos que, como su nombre lo indica, son los picos superiores de volumen de agua de fluye por unidad de tiempo dentro de un cauce y pueden representar un riesgo para las comunidades que se encuentran adyacentes a estos cauces, principalmente por desbordamientos, inundaciones o avalanchas. De igual manera, los caudales mínimos son aquellos valores que se presentan en época de estiaje, como resultado de las pocas precipitaciones.

Para el cálculo de las curvas, se suelen tener en cuenta la precipitación máxima probable en 24 horas, la cual puede entenderse como la cantidad de precipitación teóricamente más alta para una duración dada que es físicamente posible sobre una localidad, en un área de tormenta y una época del año especificadas, según Hansen y otros (1982) citado en Leal (2016). La mayoría de métodos propuestos para su determinación tienen sus bases en los análisis meteorológicos, mientras otros se fundamentan en análisis de tipo estadístico (Castello y otros, 2013 citado en Leal, 2016).

En Colombia, el IDEAM (2016) actualizó las curvas IDF de 110 de las 8858 estaciones hidrometeorológicas que operan en el país, a través de la Subdirección de Hidrología del instituto. Esto quiere decir que la mayoría de estaciones no cuentan con este tipo de información, como es el caso de la que se encuentra en Mutiscua, denominada CALDERA LA [Cód. 16020110].

➤ **Hietograma**

Un hietograma se puede entender como una representación gráfica de la cantidad de precipitación caída en un episodio tormentoso, en intervalos regulares de tiempo. Comúnmente se constituye con un gráfico de barras (Sánchez, 2004). Para su elaboración, si se trata de un hietograma mensual o anual, bastará con representación de datos diarios pero si en su defecto es un hietograma para un día o unas horas de duración, se hace necesario implementar una banda pluviográfica, para leer la precipitación de caída en los intervalos elegidos (Suarez, 2016).

Para la obtención del Hietograma en este trabajo, se utilizó el método de bloques alternos propuesto por Chow y otros (1994) citado por Sánchez (2004), el cual consiste en elegir la curva IDF correspondiente al periodo de retorno deseado, de la que se lee gráficamente la precipitación para diversos incrementos de tiempo. Luego, se calcula la cantidad de precipitación acumulada caída en un intervalo de tiempo dado multiplicando la intensidad de la lluvia por la cantidad de tiempo de dicho intervalo. Seguidamente, se halla la variación de precipitación en cada uno, restando la precipitación acumulada de un intervalo, de la precipitación acumulada del intervalo inmediatamente anterior (Sánchez, 2004).

6.4.1.3. Caudal (Q)

La OMM (2011) conceptualiza el caudal como “la tasa a la que el agua discurre a través de una sección transversal, expresada en unidades de volumen por unidad de tiempo”. Existen varios métodos para su determinación y la selección del más adecuado depende de las condiciones existentes en la zona de estudio. Para el caso específico de este proyecto, estas mediciones pueden hacerse por vadeo ya que la quebrada tiene poca profundidad, según lo recomendado por el IDEAM (2007).

El aforo con molinete es uno de los métodos para aforar corrientes naturales en el que la velocidad del agua se mide por medio de un instrumento llamado “correntómetro” o “molinete”. Existen distintos tipos de correntómetros, siendo los de hélice los más usados. Cada molinete cuenta con un certificado de calibración en el cual figura la fórmula propia del aparato para el cálculo de la velocidad del agua, según el número de revoluciones por segundo (RPS). En general, esta técnica consiste en la medición de la velocidad del agua en un punto determinado, en el que se debe hacer la medición en dos, tres o más puntos, a distintas profundidades a lo largo de la vertical y a partir de la superficie del agua.

Estas profundidades están en función de la altura del tirante de agua y, de acuerdo con el conocido método de dos puntos, la velocidad media a lo largo de un tirante se determina tomando la media de las velocidades a 0.2 y 0.8 de profundidad, según las recomendaciones del Departamento de Investigaciones Geológicas de los Estados Unidos citadas en Franquet (2019). Después se calcula el área de la sección transversal mojada, que se utilizará para el cálculo del caudal, relacionándola con la velocidad media hallada anteriormente.

Otro método utilizado con frecuencia es el aforo volumétrico, procedimiento que sirve para caudales pequeños y requiere una sección donde la totalidad del volumen de agua discurra por un punto de fácil medición; consiste en recolectar en un recipiente previamente calibrado, un volumen de agua conocido y tomar con precisión el tiempo de recolección, preferiblemente con cronómetro.

Además, existe el método de aforo área-velocidad conocido comúnmente como el método de flotador, que relaciona estas dos variables de la misma forma que el método anterior. La diferencia es que este se aplica cuando no es posible el aforo volumétrico, debido al ancho de la sección. El proceso consiste en mediciones del tiempo que tarda un flotador en recorrer una distancia superficial previamente medida hasta la sección de aforo, de donde se obtiene la velocidad media. Este dato se multiplica por un factor de ajuste F que está en función del coeficiente R obtenido de la relación entre la profundidad del flotador sumergido y la profundidad del agua (Ver Tabla 6). Esta velocidad corregida (v) se multiplica por el área total de la sección (A) para la obtención del valor del caudal (Q) como se muestra en la Ecuación 12 (OMM, 2011).

$$Q = A * v \quad \text{Ec. 12}$$

Donde, Q está dado en [m³/s], A en [m²] y v en [m/s].

Tabla 6. Factor de ajuste F de la velocidad de un flotador en función del coeficiente R entre la profundidad del flotador sumergido y la profundidad del agua.

R	F
0.10 o menos	0.86
0.25	0.88
0.50	0.90
0.75	0.94
0.95	0.98

Fuente: OMM, 2011.

➤ *Hidrograma Unitario Sintético*

Con respecto al Hidrograma Unitario (HU), es el hidrograma generado por la unidad de escorrentía. Fue propuesto por Sherman (1932) y se trata de un hidrograma unitario o “patrón”, que sirve para calcular el hidrograma de una tormenta dada, partiendo de una serie de hipótesis de cálculo. En caso de no existir datos de caudales relacionados con lluvias, se utilizan el HU

Sintético, que es aquel derivado de fórmulas empíricas, que se puede utilizar en cuencas donde no existen datos de aforos.

Uno de los más utilizados es el propuesto por el SCS de Estados Unidos (1950) que se representa mediante un triángulo que proporciona el caudal punta (Q_p). Este a su vez se relaciona con el tiempo base (t_b) y el tiempo de concentración (t_c), a partir de las Ecuaciones 13, 14 y 15, en función de la duración de determinada precipitación (D), tal como lo planteó el SCS (1985), citado en Suarez (2016). El Hidrograma triangular del SCS es resultado de las ecuaciones obtenidas de Hidrogramas de crecida provocados por precipitaciones cortas y uniformes en numerosas cuencas.

$$t_p = 0.5D + t_r \approx 0.5D + 0.6t_c \quad \text{Ec. 13}$$

$$t_b = 2.67t_p \quad \text{Ec. 14}$$

$$Q_p = \frac{P \cdot A}{1.8 \cdot t_b} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde, t_p es el tiempo de punta (h); D es la duración de la precipitación neta (h); t_r es el tiempo de retardo (h); t_c es el tiempo de concentración (h); t_b es el tiempo base (h); Q_p es el caudal de punta (m^3/s); P es la precipitación neta (mm) y A es el área de la cuenca (Km^2). El coeficiente 2.67 de la Ecuación 14 es un valor empírico propuesto por el SCS a partir de los valores planteados para ese factor por Wanielista (1997) citado en Sanchez (2016). Actualmente existen softwares que se encargan de la modelación de este tipo de hidrogramas, tal como HEC-HMS.

➤ *Curva de Duración de Caudales (CDC)*

Las CDC se erigen con base en registros reales de caudales y en un sentido estricto, la curva de duración de caudales es aplicable únicamente a los valores del periodo de estudio con el que fue construida. Según Salazar (2016), las CDC describen las características del flujo en una corriente y su forma es un indicativo del proceso de drenaje en la cuenca. Generalmente, se asume que la CDC representa el comportamiento del flujo en un año típico, por lo que el área bajo ella representa el volumen promedio de agua transportado en un año y este valor dividido en 365 días representa el caudal medio diario.

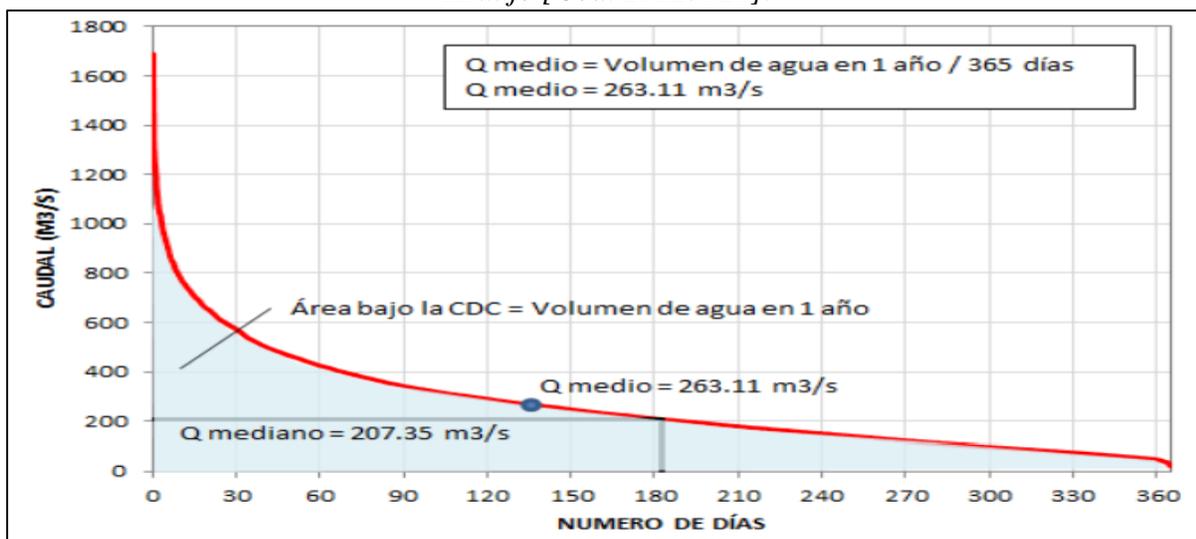
Este mismo autor describe el método tradicional de construcción de la CDC propuesto por el USGS, el cual se describe como: “A los caudales observados q_i , $i = 1, 2, \dots, N$, se les asigna un número de orden para establecer una serie ordenada (i) , $i = 1, 2, \dots, N$, en donde N es el número de datos y $q_{(1)}$ y $q_{(N)}$ son el caudal mayor y el caudal menor de la serie, respectivamente.

Posteriormente, se calcula la probabilidad de excedencia de los caudales ordenados p_i . Si se emplea la distribución de probabilidad de Weibull (comúnmente empleada) se obtiene la probabilidad de excedencia o probabilidad de ser igualado o excedido, mediante la siguiente Ecuación 16:

$$p_i = P(Q \geq q_{(i)}) = \frac{i}{N+1} \quad \text{Ec. 16}$$

Finalmente, cada uno de los datos ordenados (i) es graficado en pareja con su correspondiente valor de probabilidad de excedencia p_i , obteniendo la curva de duración de caudales CDC. En caso de que existan valores iguales de caudal dentro de la serie, se deben graficar todos los valores iguales de caudal en pareja con la mayor probabilidad calculada para dicho valor” (Salazar, 2016). Tradicionalmente, se constituye que los caudales del 0.1% al 10% de excedencia corresponden a caudales altos, los caudales del 20% al 60% de excedencia conciernen a caudales medios y finalmente los caudales del 70.0% al 99.0% de excedencia son caudales bajos.

Imagen 5. Área bajo la CDC, caudal medio y caudal mediano estación hidrológica Puerto Araujo [Cód. 23127020].



En cuencas de montaña la CDC tiende a tener una pendiente pronunciada en el tramo inicial, lo cual supone que los caudales mayores se presentan durante lapsos de tiempo cortos; caso contrario de los ríos de llanura, donde la variación de la pendiente de la curva no es tan notable. Este tipo de curvas son eficientes para determinar si hay o no necesidad de almacenamiento para satisfacer la demanda hídrica sobre una cuenca.

❖ *Imputación de datos faltantes por medias condicionadas para datos agrupados*

Este proceso consiste en “consiste en formar categorías a partir de covariables correlacionadas con la variable de interés, e imputar los datos omitidos con observaciones provenientes de la submuestra que comparte características comunes” según Acock y Demo (1994) citados en Medina y Galván (2007). Además este procedimiento asume que los datos faltantes siguen un patrón Missing Completely At Random (MCAR) y que existen tantos promedios como categorías formadas, lo cual contribuye a atenuar los sesgos en cada caso pero de ninguna manera los elimina.

❖ *Probabilidad de excedencia*

Para la elaboración de la CDC se tienen en cuenta los Periodos de Retorno (T), los cuales se definen como como “el intervalo medio de tiempo durante el cual existe la probabilidad de que se produzca una avenida con un caudal igual o superior al prefijado”, según Blázquez y García (2000) citados en Leal (2016). La probabilidad de excedencia (P) es inversamente proporcional a dicho periodo de retorno (T).

El uso de modelos probabilísticos en ingeniería es bastante común, ya que en hidrología la gran mayoría de procesos que interesan en este campo hacen parte de la categoría de fenómenos probabilísticos. Todo el proceso para el estudio de este tipo de sucesos o eventos se describe en el capítulo 10 “Elementos de Hidrología Estadística” del libro “Hidrología: para estudiantes de Ingeniería Civil” de Chereque (1989). Este mismo autor presenta la Tabla 7, en la cual recopila las ecuaciones propuestas por diferentes autores para calcular periodos de retorno y probabilidades de excedencia de caudal para la generación de las CDC.

Tabla 7. Ecuaciones de probabilidad de excedencia y Periodo de retorno.

Autor	Año	Probabilidad de excedencia P	Periodo de retorno T (años)
California	1923	m/N	N/m
Hazen	1930	$(2m - 1)/2N$	$2N/(2m - 1)$
Weibull	1939	$m/(N + 1)$	$(N + 1)/m$
Chegodayev	1955	$(m - 0.3)/(N + 0.4)$	$(N + 0.4)/(m - 0.3)$

Blom	1958	$(m - 3/8)/(N + 1/4)$	$(N + 1/4)/(m - 3/8)$
Tukey	1962	$(3m - 1)/(3N + 1)$	$(3N + 1)/(3m - 1)$
Gringorten	1963	$(m - 0.44)/(N + 0.12)$	$(N + 0.12)/(m - 0.44)$

Fuente: Chereque, 1989.

En la Tabla 7, N es el tamaño de la muestra y m representa la posición en la que se encuentra el valor del caudal en la columna ordenada en forma decreciente.

➤ *Oferta hídrica (Oh)*

Según el IDEAM (2014), la oferta hídrica superficial se entiende como “el volumen de agua continental, almacenada en los cuerpos de agua superficiales en un periodo determinado de tiempo y se cuantifica a través de la escorrentía y rendimientos hídricos (l/s-km²)”. En otras palabras, se trata de la cantidad de agua que escurre superficialmente por las redes de drenaje y que no se infiltra o se evapora. Para su determinación se debe contar con registros históricos de caudales y precipitación, principalmente, por medio del método de lluvia – escorrentía.

La Resolución 0865 (2004) especifica que la oferta hídrica neta disponible debe someterse a una reducción por calidad de agua y otra por caudal mínimo ecológico, esto con el fin de garantizar el bienestar y supervivencia del ecosistema de la zona y sus componentes (flora y fauna), además de la disponibilidad del recurso a futuro para diversos usos.

Debido a que la zona de estudio no tiene registro de caudales, se deben realizar mediciones que sean representativas para el periodo de estudio. Para eso, los puntos de aforo deben ser seleccionados siguiendo los criterios recomendados por el numeral 2.2.1.1 del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua (2007) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. De igual manera, los puntos de muestreo para calidad del agua deben ser identificados aguas arriba del sitio de interés, con el fin de determinar las propiedades del fluido al llegar a dicho punto.

❖ *Método del Número de Curva (CN)*

En un estudio hidrológico, se debe tener en cuenta la precipitación efectiva, es decir, la porción de la lluvia que produce escorrentía superficial. Para computar esta precipitación en función de los datos de lluvia acumulada, cobertura y uso del suelo y condiciones antecedentes de humedad, se

utiliza el Método de Número de Curva (CN), desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS). Los valores resultantes de CN indican el grado de escurrimiento directo, obtenidos de forma empírica por el SCS (Lavao y Corredor, 2014).

De este modo, se puede entender la cobertura del suelo como el elemento tangible que se encuentra sobre la superficie del planeta, tal como la cobertura vegetal. Este tipo de cobertura comprende la vegetación existente en la zona de estudio y se puede comparar a través del tiempo. El tipo de cobertura difiere del uso del suelo en que, según la (FAO/PNUMA, 1999), este último se trata de “el total de acuerdos, actividades e insumos que las personas realizan en un cierto tipo de cobertura de la tierra”. Entre los distintos usos del suelo se incluyen cultivos, pastoreo, vías, entre otros.

La teoría del Número de Curva (CN) considera que $P_e \leq P_i$, donde P_e corresponde a la precipitación efectiva (escorrentía directa) y P_i a la precipitación total. De igual manera, después de que se produce escorrentía, $F_a \leq S$, es decir, que la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca (F_a) es menor o igual a la retención potencial máxima (S). En la abstracción inicial antes del encharcamiento (I_a) no ocurre escorrentía, después de esto, la escorrentía potencial es $P - I_a$. Este método fue propuesto inicialmente por Monsalve (1995), quien dijo que con él se podría evaluar la precipitación neta producida por una tormenta, en base al volumen de precipitación antecedente en un periodo de 5 a 30 días, con el propósito de establecer el escurrimiento directo que ocurre como respuesta a una precipitación específica (Lavao y Corredor, 2014).

Según este método, tal como explican Lavao y Corredor (2014), el escurrimiento directo (Q) se calcula relacionando a la precipitación considerada (P) con la diferencia potencial máxima entre P y Q al inicio de la tormenta (S), la cual representa la pérdida de volumen por infiltración, interceptación y almacenamiento superficial. Esta relación se detalla en la Ecuación 17, donde P , Q y S son expresadas en mm, para $P > 0.2S$.

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad \text{Ec. 17}$$

Para hallar el valor de S , por otra parte, el SCS (1972) desarrolló experimentos empíricos en los que se determinó que S puede ser relacionado con el factor de Número de Curva (ver Ecuación

18), el cual está tabulado en tablas con valores entre 0 y 100, como se muestra en la Tabla 8, con S dado en mm y bajo contexto de AMC II.

$$S = 25.4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad \text{Ec. 18}$$

Las Condiciones de Humedad Antecedentes (AMC) se agrupan en 3 condiciones básicas: I. Condiciones secas, II. Condiciones normales y III. Condiciones húmedas, cuyos rangos están distribuidos como se observa en la Tabla 8.

Tabla 8. Rangos para la clasificación de las Condiciones Antecedentes de Humedad (AMC).

Grupo AMC	Lluvia antecedente total de 5 días (pulg)	
	Estación inactiva (seca)	Estación activa (de crecimiento)
I	< 0.5	< 1.4
II	0.5 a 1.1	1.4 a 2.1
III	Sobre 1.1	Sobre 2.1

Fuente: Chow, 1984 en Lavao y Corredor, 2014.

La Tabla 9 muestra los CN para AMC II, por lo que la relación de esta con las condiciones I y III se muestran en las Ecuaciones 19 y 20, respectivamente, ambas citadas en Lavao y Corredor (2014).

Tabla 9. Valores del Número de Curva de escorrentía para complejos hidrológicos de uso agronómico.

Uso de la tierra	Cobertura, tratamiento o práctica	Condición Hidrológica	Grupo de suelos			
			A	B	C	D
			Número de Curva			
1. Rastrojo	Hileras rectas	---	77	86	91	94
2. Cultivos en hilera	Hileras rectas	Mala	71	81	88	91
	Hileras rectas	Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
	Curvas de nivel	Buena	65	75	82	86
	Cur/Niv y Terrazas	Mala	66	74	80	82
	Cur/Niv y Terrazas	Buena	62	71	78	81
3. Cultivos en hileras estrechas	Hileras rectas	Mala	65	76	84	86
	Hileras rectas	Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Mala	63	74	82	85
	Curvas de nivel	Buena	61	73	81	84
	Cur/Niv y Terrazas	Mala	61	72	79	82
	Cur/Niv y Terrazas	Buena	59	70	78	81

4. Leguminosas en hileras estrechas o forraje en rotación	Hileras rectas	Mala	66	77	85	89
	Hileras rectas	Buena	58	72	81	85
	Curvas de nivel	Mala	64	75	83	85
	Curvas de nivel	Buena	55	69	78	83
	Cur/Niv y Terrazas	Mala	63	73	80	83
	Cur/Niv y Terrazas	Buena	51	67	76	80
5. Pastos de pastoreo		Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	Curvas de nivel	Mala	47	87	81	88
	Curvas de nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas de nivel	Buena	6	35	70	79
6. Pastos de corte		Buena	30	58	71	78
7. Bosque		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
8. Patios		---	59	74	82	86
9. Caminos de tierra		---	72	82	87	89
10. Pavimentos		---	74	84	90	92

Fuente: Res. 0865, 2004.

$$CN(I) = \frac{4.2 CN(II)}{10 - 0.058 CN(II)} \quad Ec. 19$$

$$CN(III) = \frac{23 CN(II)}{0.13 CN(II)} \quad Ec. 20$$

El tipo de suelo se determina mediante granulometría, que se entiende como la distribución de tamaños de las partículas de una muestra del mismo. Esta se evalúa mediante tamizado de la muestra de material y pesando la fracción que pasa un tamiz pero es retenida en el siguiente, más pequeño en tamaño. Este tamaño se refiere a la dimensión del diámetro, el cual se asume una forma de partícula esférica o elipsoidal (Suarez, 2016). El método también tiene en cuenta el tipo de suelo y el uso de la tierra, según los cuales el SCS (1972) clasifica los suelos en 4 grupos:

Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento y limos agregados.

Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento y marga arenosa.

Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.

Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Chow (1994) también agrega que para cuencas con diferentes tipos de suelos, se debe computar un CN compuesto, es decir, el promedio ponderado.

❖ *Calidad de agua*

Los cauces de agua son los receptores de multitud de vertimientos provenientes de las actividades antrópicas, los cuales muchas veces no tienen previo tratamiento y contienen cantidades alarmantes de contaminantes físicos, químicos o microbiológicos, además de sedimentos derivados de procesos erosivos de origen natural o por acción humana. Para poder sostenerse, los cuerpos de agua deben contar con una cantidad mínima de caudal con el cual ser capaces de recuperar significativamente sus características y funcionalidad antecedentes, es decir, ejercer su capacidad de resiliencia. La variación en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos exterioriza los problemas relacionados con la calidad del líquido.

Por lo anterior, se debe hacer una reducción de la oferta hídrica neta disponible por calidad del agua, correspondiente al 25% del caudal total del cauce, según la Res. 0865 (2004). Para ello, la evaluación de la calidad del recurso se hace por medio de los indicadores de calidad, los cuales expresan cuantitativamente los índices de contaminantes presentes en el agua.

✓ *Índice de Calidad de Agua (ICA)*

Según el IDEAM (2011), el ICA se define como “el valor numérico que califica en una de cinco categorías la calidad del agua de una corriente superficial, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de cinco o seis variables, registradas en una estación de monitoreo j en el tiempo t ”. El ICA se obtiene a partir de 5 o 6 variables fisicoquímicas las cuales son sometidas a una sumatoria aritmética equiponderada y el resultado es comparado con los establecidos en tablas de interpretación, como la Tabla 10, que se muestra a continuación. Este indicador toma valores de 0 a 1. Su principal desventaja es que no permite conocer cuáles son las fuentes potenciales de contaminación, pese a que muestra cuál es el estado de la calidad del agua en corrientes superficiales.

Tabla 10. Calificación de la calidad del agua según el ICA.

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0.00 – 0.25	Muy mala	Rojo
0.26 – 0.50	Mala	Naranja
0.51 – 0.70	Regular	Amarillo
0.71 – 0.90	Aceptable	Verde
0.91 – 1.00	Buena	Azul

Fuente: IDEAM, 2011.

En Colombia, el ICA se calcula con 5 variables desde 2005 (OD, SST, DQO, C.E. y pH total). A partir del 2009, también puede hallarse adicionando la relación Nitrógeno Total/Fósforo Total (NT/PT) a las variables anteriores. Este indicador se computa una vez cada trimestre con la Ecuación 21, según el IDEAM (2011).

$$ICA_{njt} = \left(\sum_{i=1}^n W_i * I_{ikjt} \right) \quad Ec. 21$$

Donde, ICA_{njt} es el Índice de calidad del agua de una determinada corriente superficial en la estación de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t, evaluado con base en n variables; W_i es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i; I_{ikjt} es el valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación de monitoreo j, registrado durante la medición realizada en el trimestre k, del período de tiempo t; n es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; n es igual a 5, o 6 dependiendo de la medición del ICA que se seleccione (IDEAM, 2011). De esta manera, W_i toma los valores mostrados en las Tablas 11 y 12, de acuerdo con el número de variables seleccionadas.

Tabla 11. Variables y ponderaciones para el caso de 5 variables.

Variable	Unidad de medida	Ponderación
Oxígeno disuelto (OD)	% saturación	0.2
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/l	0.2
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	0.2
Conductividad eléctrica (C.E.)	µS/cm	0.2
pH	Unidades de pH	0.2

Fuente: IDEAM, 2011.

Tabla 12. Variables y ponderaciones para el caso de 6 variables.

Variable	Unidad de medida	Ponderación
Oxígeno disuelto (OD)	% saturación	0.17

Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/l	0.17
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	0.17
NT/PT	-	0.17
Conductividad eléctrica (C.E.)	μS/cm	0.17
pH	Unidades de pH	0.15

Fuente: IDEAM, 2011.

Por otra parte, para el cálculo de I_{ikjt} correspondiente a cada una de las variables, se procesa de acuerdo con la siguiente metodología:

- *Oxígeno Disuelto (OD)*: Su influencia tiene que ver con la posible presencia o ausencia de especies acuáticas. Según el IDEAM (2011), en primer lugar se determina el porcentaje de saturación de OD, de acuerdo con la Ecuación 22:

$$PS_{OD} = \frac{Ox \cdot 100}{C_p} \quad Ec. 22$$

Donde Ox es el oxígeno disuelto medido en campo (mg/l) asociado a la elevación, caudal y capacidad de reoxigenación, C_p es la concentración de equilibrio de oxígeno (mg/l), a la presión no estándar, es decir, oxígeno de saturación. Por otra parte, la Ecuación 23 describe el cálculo del subíndice I_{OD} , según el IDEAM (2011).

$$I_{OD} = 1 - (1 - 0.01 * PS_{OD}) \quad Ec. 23$$

Cuando $PS_{OD} > 100\%$ entonces $I_{OD} = 1 - (0.01 * PS_{OD} - 1)$

- *Sólidos Suspendidos Totales (SST)*: Su presencia en corrientes superficiales puede indicar un cambio en el estado de la misma y tiene relación directa con la turbiedad. Además, puede estar relacionada con procesos erosivos o extracción de materiales, entre otros (IDEAM, 2011). Se puede computar como se muestra en la Ecuación 24.

$$I_{SST} = 1 - (-0.02 + 0.003 * SST) \quad Ec. 24$$

Si $SST \leq 4.5$, entonces $I_{SST} = 1$; por otra parte, si $SST \geq 320$, entonces $I_{SST} = 0$.

- *Demanda Química de Oxígeno (DQO)*: Indica la presencia de sustancias o compuestos capaces de ser degradados por reacciones químicas bajo condiciones de alta temperatura y

gran acidez. La Universitat Politècnica de Catalunya propuso un método para su determinación, el cual fue adaptado por el IDEAM para Colombia, y se obtuvieron las siguientes escenarios:

$$\text{Si } DQO \leq 20, \text{ entonces } I_{DQO} = 0.91$$

$$\text{Si } 20 < DQO \leq 25, \text{ entonces } I_{DQO} = 0.71$$

$$\text{Si } 25 < DQO \leq 40, \text{ entonces } I_{DQO} = 0.51$$

$$\text{Si } 40 < DQO \leq 80, \text{ entonces } I_{DQO} = 0.26$$

$$\text{Si } DQO > 80, \text{ entonces } I_{DQO} = 0.125$$

- *Conductividad Eléctrica (C.E.):* Esta variable refleja la mineralización de una corriente. El IDEAM (2011) propone la Ecuación 25 en base a Ramírez y Viña (1998).

$$I_{C.E.} = 1 - 10^{(-3.26 + 1.34 * \log_{10} C.E.)} \quad \text{Ec. 25}$$

Cuando $I_{C.E.} < 0$, entonces $I_{C.E.} = 0$.

- *pH Total:* Esta variable revela la concentración de iones de hidrógeno presentes en determinadas disoluciones, es decir, es una medida de la acidez o alcalinidad de las mimas. En el caso de cauces superficiales, un pH muy alto o muy bajo puede afectar la fauna y la flora de la zona (IDEAM, 2011). El subíndice I_{pH} puede interpretarse así:

$$\text{Si } pH < 4, \text{ entonces } I_{pH} = 0.1$$

$$\text{Si } 4 \leq pH \leq 7, \text{ entonces } I_{pH} = 0.02628419 * e^{(pH * 0.520025)}$$

$$\text{Si } 7 < pH \leq 8, \text{ entonces } I_{pH} = 1$$

$$\text{Si } 8 < pH \leq 11, \text{ entonces } I_{pH} = 1 * e^{[(pH - 8) - 0.5187742]}$$

$$\text{Si } pH > 11, \text{ entonces } I_{pH} = 0.1$$

- *Nitrógeno Total/Fósforo Total (NT/PT):* Muestra la degradación del medio por intervención de tipo antropogénica, e indica la capacidad de la fuente de asimilar carga orgánica (IDEAM, 2011). El subíndice de calidad NT/PT se explica de la siguiente forma, de acuerdo con el IDEAM:

$$\text{Si } 15 \leq NT/PT \leq 20, \text{ entonces } I_{NT/PT} = 0.8$$

$$\text{Si } 10 < \frac{NT}{PT} < 15, \text{ entonces } I_{NT/PT} = 0.6$$

$$\text{Si } 5 < NT/PT \leq 10, \text{ entonces } I_{NT/PT} = 0.35$$

Si $NT/PT \leq 5$ o $NT/PT > 20$, entonces $I_{NT/PT} = 0.15$

✓ **Índice de Contaminación por Mineralización (ICOMI)**

Los Índices de Contaminación (ICO) propuestos por Ramírez y otros (1997) y posteriormente adoptados por el IDEAM (2011), se pueden evaluar de acuerdo con la siguiente tabla.

Tabla 13. Grado de contaminación de acuerdo con los ICO.

ICO	Caracterización	Contaminación	Color
0.0 – 0.2	Aguas puras y quizá con aportes biogénicos	Ninguna	Azul
> 0.2 – 0.4	Con leve incidencia antrópica	Baja	Verde
> 0.4 – 0.6	Notable actividad antrópica	Media	Amarillo
> 0.6 – 0.8	Incidencia importante de contaminación	Alta	Naranja
> 0.8 – 1.0	Áreas muy contaminadas	Muy alta	Rojo

Fuente: Ramírez y otros, 1997.

El ICOMI, al igual que otros índices, toma valores de 0 a 1, donde los valores más altos reflejan altos niveles de contaminación. Su determinación se lleva a cabo con la Ecuación 26, que relaciona conductividad, dureza y alcalinidad de una fuente hídrica (Ramírez, Restrepo y Viña, 1997).

$$ICOMI = \frac{1}{3}(I_{C.E.} + I_{Dureza} + I_{Alcalinidad}) \quad Ec. 26$$

- *Conductividad Eléctrica (C.E.):* De igual manera, Ramírez y otros (1997), manejan la variable C.E. en unidades de $\mu S/cm$ para el cálculo de este subíndice con la Ecuación 27.

$$\log_{10} I_{C.E.} = -3.26 + 1.34 * \log_{10} C.E. \rightarrow I_{C.E.} = 10^{\log_{10} I_{C.E.}} \quad Ec. 27$$

Si $C.E. > 270 \mu S/cm$, entonces $I_{C.E.} = 1$

- *Dureza:* En el caso de la Ecuación 28, la dureza se expresa en g/m^3 , según Ramírez y otros (1997).

$$\log_{10} I_{Dureza} = -9.09 + 4.40 * \log_{10} Dureza \rightarrow I_{Dureza} = 10^{\log_{10} I_{Dureza}} \quad Ec. 28$$

Si $Dureza > 110 g/m^3$, entonces $I_{Dureza} = 1$

Si $Dureza < 30 g/m^3$, entonces $I_{Dureza} = 0$

- *Alcalinidad*: Este parámetro se tiene en cuenta en unidades de g/m^3 , según Ramírez y otros (1997) de acuerdo con la Ecuación 29.

$$I_{Alcalinidad} = -0.25 + 0.005 * Alcalinidad \quad Ec. 29$$

$$\text{Si } Alcalinidad > 250g/m^3, \text{ entonces } I_{Alcalinidad} = 1$$

$$\text{Si } Alcalinidad < 50g/m^3, \text{ entonces } I_{Alcalinidad} = 0$$

✓ Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO)

Este índice permite evaluar la contaminación de una fuente hídrica superficial relacionada con la Materia Orgánica presente en la misma, por lo que sólo indica este tipo de polución por fuentes agropecuarias o domésticas, por ejemplo (Osorio y Duque, 2014). Es adimensional y toma valores de 0 a 1, donde los valores más bajos indican baja contaminación, de acuerdo con la Ecuación 30 propuesta también por Ramírez y otros (1997).

$$ICOMO = \frac{1}{3}(I_{DBO} + I_{CFT} + I_{Oxígeno\%}) \quad Ec. 30$$

- *Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)*: Para su cálculo con la Ecuación 31 se considera la DBO en g/m^3 , según Ramírez y otros (1997).

$$I_{DBO} = -0.05 + 0.70 * \log_{10} DBO \quad Ec. 31$$

$$\text{Si } DBO > 30g/m^3, \text{ entonces } I_{DBO} = 1$$

$$\text{Si } DBO < 2g/m^3, \text{ entonces } I_{DBO} = 0$$

- *Coliformes Totales (CFT)*: Para su cálculo se consideran los CFT en NMP/100cm³, de acuerdo con sus autores (Ver Ecuación 32).

$$I_{CFT} = -1.44 + 0.56 * \log_{10} CFT \quad Ec. 32$$

$$\text{Si } CFT > 20000, \text{ entonces } I_{CFT} = 1$$

$$\text{Si } CFT < 500, \text{ entonces } I_{CFT} = 0$$

- *Porcentaje de Saturación de Oxígeno Disuelto (Oxígeno%)*: En este caso Ramírez y otros (1997) consideran la variable *Oxígeno%* en unidades de % en la Ecuación 33.

$$I_{Oxígeno\%} = 1 - 0.01 * Oxígeno\% \quad Ec. 33$$

Si $Oxígeno\% > 100\%$, entonces $I_{Oxígeno\%} = 0$

✓ *Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (ICOSUS)*

Este indicador permite evaluar la contaminación de un cuerpo de agua en relación al grado de contaminación por Sólidos Suspendidos Totales, producto de procesos como la erosión del suelo, por ejemplo (Osorio y Duque, 2014). También toma valores de 0 a 1 como otros indicadores de contaminación, en los que valores cercanos a 0 señalan baja contaminación, tal como lo proponen Ramírez y otros (1997) con la Ecuación 34.

$$ICOSUS = -0.02 + 0.003 * SST \quad Ec. 34$$

Si $SST > 340g/m^3$, entonces $ICOSUS = 1$

Si $SST < 10g/m^3$, entonces $ICOSUS = 0$

✓ *Índice de Contaminación Trófico (ICOTRO)*

El ICOTRO, a diferencia de los otros indicadores que toman valores entre 0 y 1, se clasifica directamente con la concentración de Fósforo Total (PT) en g/m^3 de la siguiente forma:

Si $PT < 0.01$, entonces el ICOTRO es oligotrófico.

Si $0.01 \leq PT < 0.02$, entonces el ICOTRO es mesotrófico.

Si $0.02 \leq PT \leq 1$, entonces el ICOTRO es eutrófico.

Si $PT > 1$, entonces el ICOTRO es hipereutrófico.

❖ *Caudal ecológico*

Según el WWF (2010), el caudal ecológico “es un instrumento de gestión que establece la calidad, cantidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad”.

De este modo, en Colombia la Resolución 0865 (2004) indica que la reducción de la oferta hídrica neta por caudal ecológico atañe a la diferencia del caudal de la cuenca en el periodo de estudio, menos el caudal que permanece el 95% del tiempo (Q95) según la CDC obtenida de las mediciones de campo para la quebrada.

➤ *Demanda hídrica (Dh)*

Según el IDEAM, “la demanda de agua estimada corresponde a la cantidad o volumen de agua usado por los sectores económicos y la población. Considera el volumen de agua extraído o que se almacena de los sistemas hídricos y que limita otros usos; contempla el volumen utilizado como materia prima, como insumo y el retornado a los sistemas hídricos”. En otras palabras, es el conjunto del líquido, necesario para el desarrollo de las actividades humanas, incluyendo el consumo. Esta demanda debe ser regulada para que su explotación no sea en exceso y el ciclo hidrológico no se vea alterado.

Además, la Resolución 0865 (2004) describe textualmente que “la demanda de agua en general, representa el volumen de agua, expresado en millones de m³, utilizado por las actividades socioeconómicas en un espacio y tiempo determinado y corresponde a la sumatoria de las demandas sectoriales”. Así lo describe la Ecuación 35 presentada a continuación:

$$DT = DUD + DUI + DUS + DUA + DUP \quad Ec. 35$$

Donde, DT es la Demanda Total de agua; DUD corresponde a la Demanda de Agua para Uso Doméstico; DUI es la Demanda de Agua para uso Industrial; DUS indica la Demanda de Agua para el Sector Servicios; DUA es la Demanda de agua para el Sector Agrícola y DUP corresponde a la Demanda de agua para Uso Pecuario, todas expresadas en millones de m³.

Esta misma norma describe los escenarios en que sí exista, exista pero no sea suficiente y no exista información respectiva para su debido cálculo.

➤ **Índice de Escasez (*Ie*)**

Para el caso de nuestro país, la manera de controlar el uso del recurso hídrico para el consumo humano y demás actividades es por medio del Índice de escasez, que representa la relación demanda/oferta de aguas superficiales de una cuenca según la Resolución 0865 de 2004, en la cual se adopta la metodología propuesta para su cálculo. Esta resolución nos indica que el índice de escasez también tiene en cuenta una reducción por caudal ecológico y por calidad del agua. Estos dos valores se refieren al caudal necesario para el sostén del ecosistema de la cuenca y el factor que restringe la disponibilidad del recurso hídrico para su utilización, respectivamente.

Para su cálculo, la resolución en cuestión expresa el *Ie* en función de las variables involucradas en la Ecuación 36.

$$Ie = Dh/Oh * Fr * 100 \qquad Ec. 36$$

Donde *Ie* es el índice de escasez en porcentaje, *Dh* es la demanda hídrica en metros cúbicos, *Oh* es la oferta hídrica superficial neta en metros cúbicos y *Fr* es el factor de reducción por la calidad del agua y el caudal ecológico.

El *Ie* puede calificarse como: Alto si $Ie > 40\%$; Medio si $20\% < Ie \leq 40\%$; Moderado si $10 \leq Ie \leq 20\%$ y Bajo si el $Ie < 10\%$, según lo planteado en Osorio y Duque (2014).

En caso de que la demanda supere a la oferta, el caudal necesario para abastecer el acueducto de una ciudad no se puede respaldar, por lo cual se debe preparar un plan de contingencia, que consiste en una serie de alternativas a considerar cuando este tipo de escenarios se presentan. Estos planes deben abarcar tanto escenarios de deficiencia como de exceso de caudal, con el fin de prever y manejar adecuadamente las situaciones antes descritas y garantizar la prestación y calidad del servicio.

6.4.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG) en Hidrología

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen una herramienta valiosa para gestionar y analizar la información espacial y temporal. Entre muchas aplicaciones, representan un instrumento muy útil en la integración de la información necesaria para el manejo y procesamiento de datos hidrológicos, el estudio de inundaciones, y la estimación de calidad del agua superficial o subterránea de una cuenca o región, entre otros.

6.4.2.1. Programa Copérnico

Copérnico es el más reciente nombre del programa para la Vigilancia Mundial del Medio Ambiente y la Seguridad, antes conocido como GMES. La Comisión Europea (CE), en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA) lideran la resolución de este programa de observación de la Tierra, planteado para proveer información precisa, renovada y de fácil acceso para optimizar la gestión del medio ambiente, entender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad poblacional (ESA, 2012).

Imagen 6. Logo del programa Copérnico.



Fuente: ESA, 2012.

➤ Misión SENTINEL-2

Los satélites SENTINEL son un grupo de estas herramientas espaciales de tipo óptico, diseñadas específicamente para la obtención de datos e imágenes de la superficie terrestre con el fin de fortalecer la información manejada por el programa Copérnico, de la ESA. Dentro de este grupo, se encuentran los Sentinel-2, los cuales se diferencian de sus antecesores en que cuentan con una cámara multiespectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales y un campo de visión de 290 Km de anchura, lo cual no solo mejora la resolución de las imágenes captadas (10, 20 y 60 m), sino también la continuidad de monitoreo del globo terrestre, ya que la misión consiste en dos satélites semejantes en la misma órbita, espaciados 180°, para lograr una cobertura óptima. Además, cada cinco días estos cubren la totalidad de la superficie terrestre (ESA, 2012).

De las 13 bandas que componen las imágenes captadas, las bandas 2, 3 y 4 corresponden a las longitudes de onda central 490nm (Azul), 560nm (Verde) y 665nm (Rojo), respectivamente y cada una cuenta con una resolución de 10m, como se describe en la Tabla 14.

Tabla 14. Bandas espectrales de los satélites Sentinel-2.

Nombre de banda	Resolución (m)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Propósito
B01	60	443	20	Detección de aerosol
B02	10	490	65	Azul
B03	10	560	35	Verde
B04	10	665	30	Rojo
B05	20	705	15	Clasificación de vegetación
B06	20	740	15	Clasificación de vegetación
B07	20	783	20	Clasificación de vegetación
B08	10	842	115	Infrarrojo cercano
B08A	20	865	20	Clasificación de vegetación
B09	60	945	20	Vapor de agua
B10	60	1375	30	Cirros
B11	20	1610	90	Nieve/hielo/discriminación de nubes
B12	20	2190	180	Nieve/hielo/discriminación de nubes

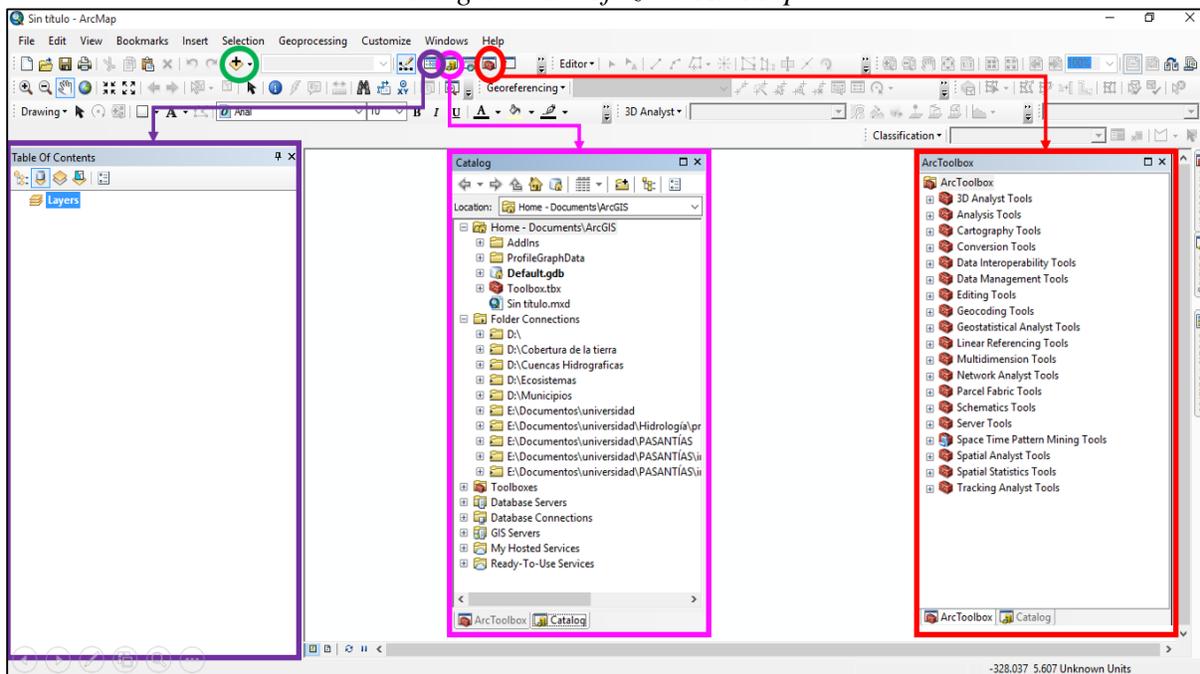
Fuente: GDAL, 2019.

Los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B fueron lanzados al espacio el 23 de Junio de 2015 y el 7 de Marzo de 2017, correspondientemente.

➤ *ArcGIS*

Para el procesamiento de los insumos procedentes de la misión Sentinel-2 existen diversos software que permiten el análisis de estos datos. En nuestro caso se hará uso del software ArcGIS, el cual es un SIG integrado que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica (ESRI, 2019). La aplicación central utilizada en ArcGIS se denomina ArcMap, que no es otra cosa que la interfaz en la cual se pueden desarrollar muchas de las tareas habituales como visualizar y explorar, crear o editar los datasets SIG, entre otras funciones (ESRI, 2016).

Imagen 7. Interfaz del ArcMap.



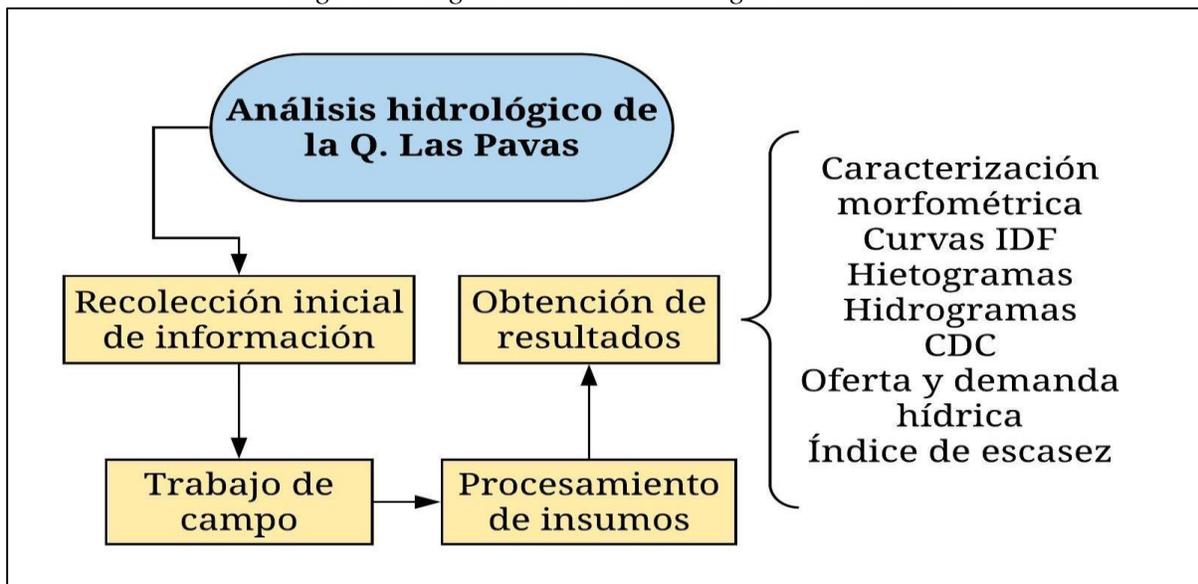
Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

En la Imagen 7 se pueden observar los principales componentes de la interfaz de ArcMap, tales como la Tabla de contenidos (en Violeta) la cual muestra las diferentes capas o archivos que se están trabajando; el Catálogo (en Fucsia), que permite visualizar las carpetas de origen y archivos a trabajar; la Caja de Herramientas (en Rojo) en la cual se pueden encontrar todas las herramientas que contribuyen al procesamiento y análisis de los archivos involucrados, como las de conversión, manejo de datos y análisis espacial, entre otras; y el Add Data (en Verde) que permite adicionar nuevas capas o archivos al programa.

7. METODOLOGÍA

La metodología se desarrolló en 4 fases principales, las cuales se muestran en la Imagen 8.

Imagen 8. Diagrama de la metodología desarrollada.



Fuente: Delgado R., 2019.

7.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para esta fase, se solicitó a la alcaldía municipal la información existente de la zona de estudio, la cual es poca y poco detallada. Dentro de los datos relevantes para la investigación, se encuentran los expuestos en el Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua municipal (PUEAA, 2017), la concesión de aguas del acueducto municipal (2017) y el plan de emergencia y contingencias para el manejo de desastres y emergencias asociados a la prestación de servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo en el caso urbano del municipio de Mutiscua – Norte de Santander (2017). Por otra parte, se realizaron visitas a las fincas para el registro de usuarios del recurso hídrico en la zona rural de la Quebrada Las Pavas no incluidos en la base de datos del acueducto municipal y para ello se hizo una entrevista (ver Anexo 1) a un total de 6 usuarios, ubicados en la parte baja de la microcuenca. Al momento de hacer las entrevistas, a dos de ellos no fue posible encontrarlos.

De igual manera, se obtuvo la información pluviométrica de la estación CALDERA LA [Cód. 16020110] del IDEAM, que se encuentra dentro de la jurisdicción del municipio de Mutiscua y contiene datos de precipitaciones del periodo comprendido entre los años 1976 y 2016.

Se descargaron imágenes satelitales del programa Copérnico, (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), correspondientes a los meses de Mayo y Octubre (época de lluvias) y Enero y Diciembre (temporada seca). De estas imágenes, se descartaron aquellas cuya excesiva nubosidad dificultaba su procesamiento.

7.2. CARACTERIZACIÓN HIDROMORFOMÉTRICA

Con ayuda de plataformas SIG, se procesaron las imágenes satelitales correspondientes al presente año, de las cuales se seleccionó la de Enero para la caracterización morfométrica debido a la poca nubosidad que presentaba. Para este procesamiento se seleccionaron las bandas 2, 3 y 4 de las imágenes Sentinel-2 descargadas, que corresponden a las longitudes de onda Azul, Verde y Rojo, con una resolución de 10 m cada una de acuerdo con el propósito del proyecto.

Posteriormente, se usaron las opciones de la ArcToolBox que tiene el programa, tales como las herramientas de gestión de datos, las de análisis espacial, las de conversión, las de edición, entre otras. Para esta caracterización se manejó el sistema de coordenadas MAGNA SIRGAS (MAGNA Colombia Bogotá), según lo recomendado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Las imágenes captadas por los satélites Sentinel-2 operan en el sistema de coordenadas geográficas World Geodetic System 1984 (WGS84), por lo que fue necesaria su conversión al sistema anteriormente mencionado una vez fueron unidas las bandas 2, 3 y 4.

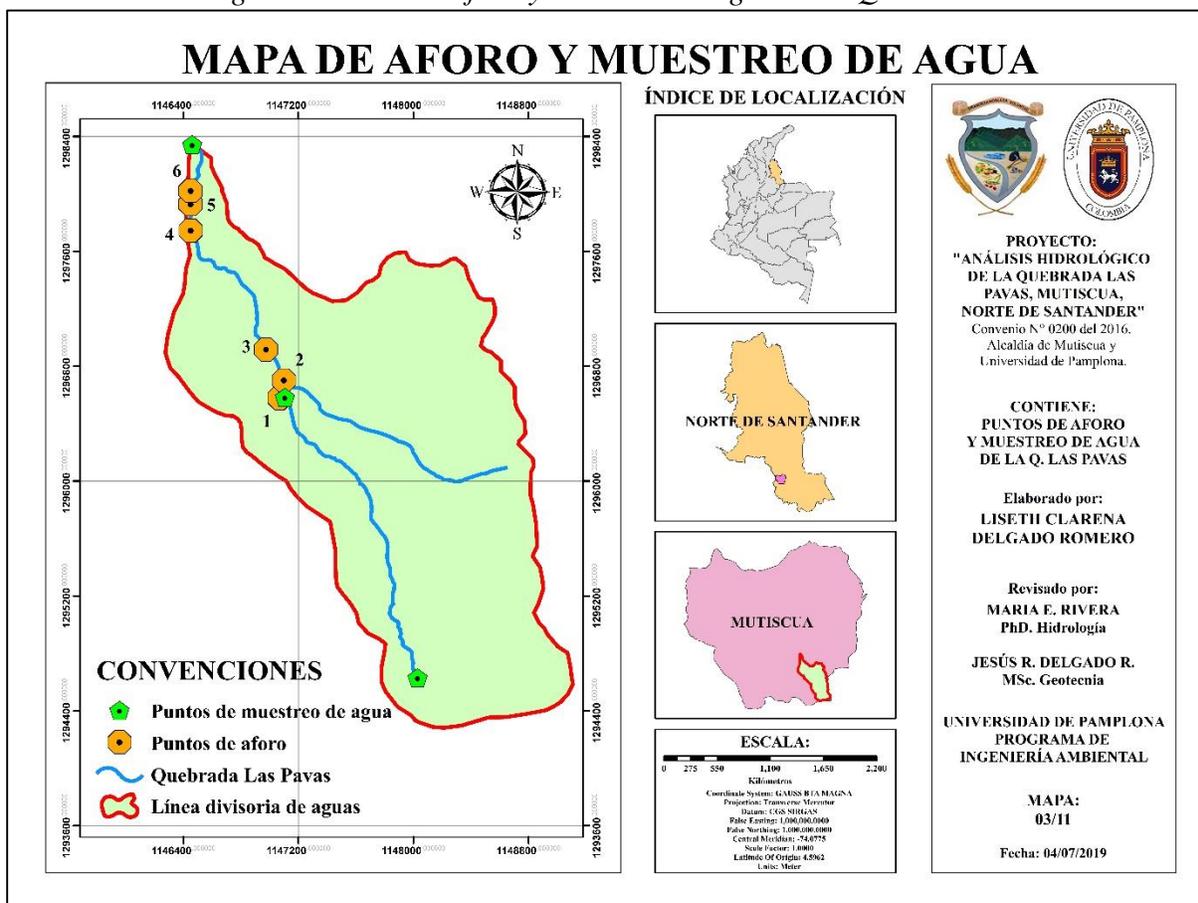
Para la generación de la línea divisoria de aguas de la microcuenca fue necesario rellenar sumideros, establecer dirección y acumulación de flujo, condicionar la red hídrica, crear el desagüe de la misma y finalmente delimitar la cuenca, por medio de la opción Hidrología de las Herramientas de Análisis Espacial. Para su verificación se utilizó la plancha 110IIIB del IGAC, la cual se presenta a escala 1:25000 y contiene shapefiles de drenajes sencillos, curvas de nivel, puntos de control terrestre, entre otros. De igual forma, con el software se determinaron parámetros

como área, perímetro, longitudes de la red de drenaje, pendientes, centroide de la cuenca y cotas, los cuales se procesaron con ayuda de Excel para la estipulación de los demás parámetros mostrados en la sección de resultados.

7.3. SELECCIÓN DE PUNTOS DE AFORO Y MUESTREO DE AGUA

Se identificaron 6 puntos aptos para el aforo, los cuales se muestran en la Imagen 9 y en la Fotografía 3, numerados según su ubicación en dirección aguas abajo, de acuerdo con lo recomendado por el IDEAM en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua (2007), en el numeral 2.2.3.6. *Aforo con flotadores*.

Imagen 9. Puntos de aforo y muestreo de agua de la Q. Las Pavas.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Fotografía 3. Puntos de aforo de la Q. Las Pavas.



Fuente: Delgado R., 2019.

El aforo de caudales se hizo mediante el método de flotador únicamente, porque la topografía, especialmente las pendientes muy pronunciadas de la zona, dificultó la aplicación del método volumétrico e indistintamente la Alcaldía municipal no cuenta con molinete para la medición. Del mismo modo, esta misma topografía y accesibilidad a la zona impidió establecer más puntos de control. La georreferenciación de puntos se llevó a cabo con un GPS Garmin eTrex 30x (ver Fotografía 4) propiedad de la Alcaldía municipal.

Fotografía 4. GPS Garmin eTrex 30x.



Fuente: Delgado R., 2019.

De igual forma, el muestreo de agua para determinación de indicadores de calidad y reducción de la oferta hídrica, se llevó a cabo en tres puntos como se puede observar en la Fotografía 5 (a) nacimiento, b) cuenca media y c) desembocadura) según lo recomendado por Barreto (2009) en el documento “PROCEDIMIENTO DE MUESTREO DE AGUA SUPERFICIAL”, numeral 7.3.2. *Selección de Puntos para la Recolección de las Muestras.*

Fotografía 5. Muestreo de agua de la Q. Las Pavas.



Fuente: Delgado R., 2019.

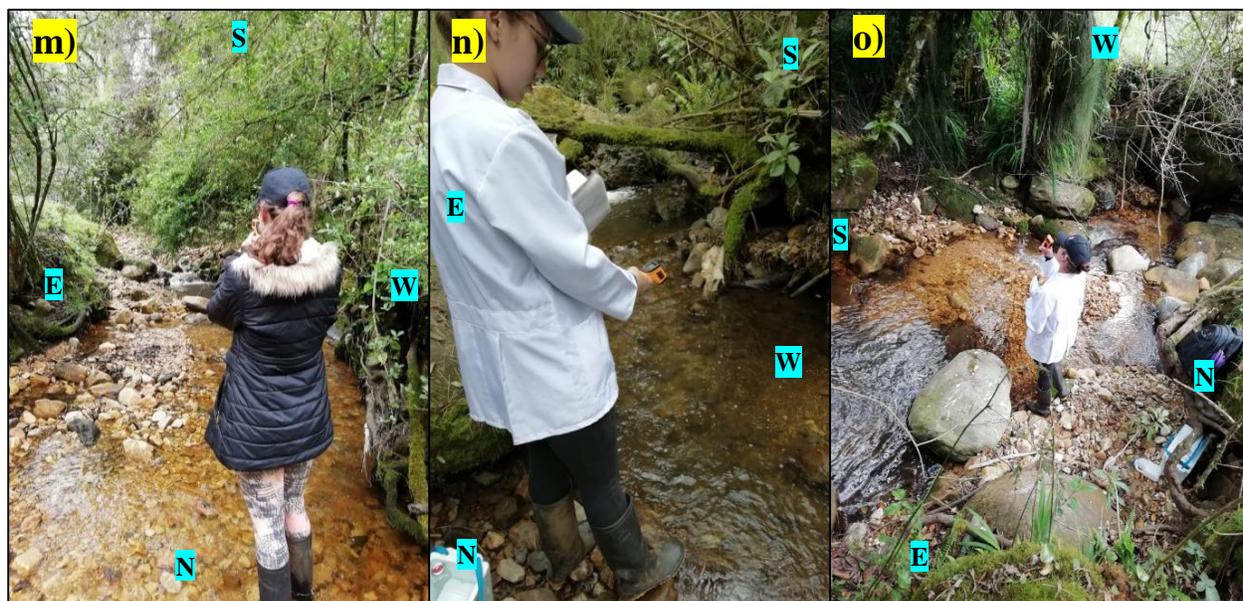
7.4.MEDICIONES Y TRABAJO DE CAMPO

El monitoreo de caudales se realizó tomando los datos diariamente en el periodo comprendido entre el 01 de Mayo y el 05 de Julio del presente año (ver Fotografía 6) el cual incluyó parte de la época de estiaje y parte de la temporada de lluvias en la zona. Para ello se creó un Formato de Monitoreo de Niveles y Caudales basado en los criterios del IDEAM (ver Anexo 2). Las lluvias dificultaron las mediciones debido a la torrencialidad y aumento del nivel del agua que sufría la quebrada (ver Fotografía 7), lo que ponía en riesgo la integridad del personal.

Fotografía 6. Mediciones diarias de caudal y temperatura.







Fuente: Delgado R., 2019.

En la Fotografía 6 se muestran: a), b), c), d) corresponden a la aplicación del método del flotador para determinación de la velocidad de la corriente, e), f), g), h), i), j), k) levantamiento del área mojada de las secciones transversales y l), m), n), o) atañen a la medición de temperatura.

En este orden de ideas, la Fotografía 7 contiene la comparación del comportamiento de la lámina de agua bajo condiciones de estiaje (columna izquierda) y cuando empezó la temporada de lluvias (columna derecha) en diferentes puntos de la quebrada, resaltando que dicha lámina puede aumentar hasta más del triple de lo expuesto, según los pobladores de la zona.

Fotografía 7. Aumento de velocidad y caudal en la Q. Las Pavas por época de lluvias.





Fuente: Delgado R., 2019.

Por otra parte, la recolección de muestras de agua de la cuenca media y la desembocadura se hizo el 22 de Mayo de 2019, el muestreo del nacimiento de la quebrada se llevó a cabo el día 4 de Julio. Posteriormente se realizó un segundo muestreo para determinación de Calcio en el agua, debido a la alta presencia de rocas calizas a lo largo del cauce de la quebrada. Además, las temperaturas fueron tomadas con un Termómetro Infrarrojo Digital Industrial Laser que se muestra en la Fotografía 8.

Fotografía 8. Termómetro Infrarrojo Digital Industrial Laser Xueliee GM 320.



Fuente: Delgado R., 2019.

7.5. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE LA ZONA

Esta etapa se llevó a cabo mediante salidas de campo, se hizo reconocimiento de la geología de la zona de estudio utilizando mapas geológicos del Servicio Geológico Colombiano (SGC) a escala 1:100000 para constatar la veracidad de dichos mapas y así determinar las formaciones presentes en la región. Se realizó una descripción y se analizó la litología de cada zona de la microcuenca y estableció a qué unidad litológica pertenecía. Posteriormente se elaboró un mapa en ArcGIS teniendo en cuenta la litología de la microcuenca (ver Imagen 12).

7.6. PROCESAMIENTO DE INSUMOS PARA LA OBTENCIÓN DE CURVAS IDF, HIETOGRAMAS, HIDROGRAMAS UNITARIOS SINTÉTICOS Y CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES

En primer lugar se organizaron los datos de precipitaciones máximas en 24 horas de la serie histórica 1976-2016 de la estación CALDERA LA [Cód. 16020110] suministrados por el IDEAM, la cual contenía 11 datos faltantes y su estimación se realizó por el método de proporciones normales con la misma estación.

A los valores de precipitación máxima mensual multianual suministrados por el IDEAM, se les aplicó un análisis descriptivo, luego se aplicó probabilidades de Gumbel para el cálculo de las precipitaciones diarias máximas probables (mm) para diferentes tiempos de duración de lluvias, para para distintos periodos de retorno (T), y se aplicó coeficientes de corrección propuestos por Campos (1978). Así mismo, se calcularon las intensidades máximas de lluvia (mm/h) para los diferentes T y tiempos de duración. Finalmente, se obtuvieron por regresiones potenciales la constante de regresión (K) igual a 227.1298 y los coeficientes de regresión (m y n) iguales a -0.6188 y 0.2576, respectivamente.

El comportamiento de los caudales depende en gran medida de las precipitaciones caídas dentro de la zona, así como las características que esta posea. A su vez, la influencia de estas precipitaciones depende de la duración de los eventos de lluvias. Por esto, los hietogramas fueron

desarrollados para eventos de duración de 60 min, en intervalos de 5 min, relacionando información básica de la cuenca (longitud y pendiente), teniendo en cuenta el tiempo de concentración y la ecuación obtenida de las curvas IDF para cada tiempo de retorno. Para estos casos, se determinó la precipitación acumulada (mm), precipitación diferida (mm), intensidad parcial (mm/h), precipitación alternada (mm) y la intensidad parcial alternada (mm/h), aplicando así el método de bloques alternos mencionado por Sánchez (2004) para la elaboración de los hietogramas y las gráficas de distribución de intensidades de precipitación.

Para la generación de la Curva de Duración de Caudales medios diarios de toda la microcuenca para el periodo comprendido del 01 de Mayo al 05 de Julio de 2019, los datos faltantes dentro del registro de aforo diario fueron imputados por el método de medias condicionadas propuesto por Acock y Demo (1994) citado en Medina y Galván (2007). Posteriormente, se aplicó un análisis estadístico descriptivo, pruebas de bondad de ajuste Chi-Cuadrado y Kolmogorov-Smirnov, distribución de probabilidad y análisis de frecuencia según California, Hazen, Weibull, Chegodayev, Blom Tukey y Gringorten citados en Chereque (1989) y en Villón (2006). Finalmente, se graficaron todas las probabilidades de excedencia y se obtuvieron los T de cada caudal medido.

Los hidrogramas unitarios sintéticos del SCS para distintos periodos de retorno (T) fueron obtenidos mediante la utilización del software HEC-HMS 4.3, el cual es gratuito. Se creó el modelo de la cuenca en el programa y se introdujeron componentes de modelo meteorológico, información de series de tiempo y especificaciones de control, con las cuales se limita el periodo de la simulación. Para el flujo base se utilizó el método de constante mensual y se involucró el valor medio de caudal base obtenido para el periodo de estudio. Se aplicaron los métodos de pérdidas y transformación, el del Número de Curva del SCS y el hidrograma unitario del SCS, respectivamente. Para las simulaciones se utilizó un valor estimativo de 60 para el porcentaje de permeabilidad requerido por la presencia de depósitos fluviotorrenciales cuya textura aumenta la permeabilidad de la microcuenca. El tiempo de retardo ($t_r \approx 0.6 * t_c$) para este caso fue de 29.568 min.

Se llevaron a cabo simulaciones del comportamiento de la escorrentía directa del hidrograma para cada uno de los casos en cuestión (T=2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años) en los que se analizaron los datos de caudal máximo de escorrentía y duración de la misma.

7.7. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA (CN)

Haciendo uso de ArcGIS, se realizó el procesamiento de las imágenes satelitales del proyecto Copérnico. En primer lugar, para la identificación del tipo de suelo, se analizó el “Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Norte De Santander” del IGAC, del que se obtuvieron las unidades de suelo de la zona de estudio (ver Imagen 14), las cuales se interpretaron con base a lo descrito en el capítulo III del “ESTUDIO GENERAL DE SUELOS Y ZONIFICACIÓN DE TIERRAS DEL DEPARTAMENTO DE NORTE DE SANTANDER – TOMO I” (IGAC, 2004), obteniendo los grupos hidrológicos del suelo de la microcuenca (ver Imagen 15).

Se analizó la capa “Cobertura de la tierra 2010 – 2012” del IDEAM que permite visualizar la cobertura de la tierra nacional, según la metodología Corine Land Cover (CLC) a escala 1:100.000, en coordenadas Magna Sirgas Colombia West Zone. Se estableció que la condición antecedente de humedad para el año en estudio fue la II, según lo expresado por el Boletín informativo sobre el monitoreo de los Fenómenos de "El Niño" y "La Niña" del IDEAM para el mes de Junio de 2019, el cual afirma que “las precipitaciones que se presentaron durante mayo en el territorio nacional se ubicaron entre lo normal y sobre los promedios típicos del mes”, por lo que no fue necesaria la conversión de AMC para el Número de Curva.

Se halló el CN ponderado, teniendo en cuenta la relación de los factores de cobertura vegetal, grupo hidrológico del suelo y condición antecedente de humedad propios de la zona en el periodo de estudio, como lo propone la Resolución 0865 de 2004. A cada tipo de cobertura del suelo se le asignó un valor de CN de la Tabla 9, la cual se procesó juntos a los grupos hidrológicos en ArcGIS, obteniendo un total de 12 polígonos con atributos diferentes, mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15. Atributos de los polígonos del mapa de Número de Curva.

Tipo de cobertura	Grupo Hidrológico	Número de Curva
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	D	79
Mosaico de pastos con espacios naturales	B	61
	C	74
	D	80
Bosque denso	B	55

	C	70
	D	77
Herbazal	B	48
	C	65
Arbustal	B	83
	D	90
Vegetación secundaria o en transición	B	58

Fuente: Delgado R., 2019

7.8. CALIDAD DE AGUA

Una vez obtenidos los resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del laboratorio de Control de Calidad y Diagnóstico de la Universidad de Pamplona (ver Anexo 3), se aplicó la metodología del IDEAM (2011) descrita en el apartado 6.4.1.3., de la cual se obtuvieron los índices de calidad de agua.

7.9. CAUDAL ECOLÓGICO

Ya obtenida la CDC, se empleó el método del Q95 citado por CORQUINDÍO y Universidad del Quindío (2011); Consuegra (2013); Cabra y Corradine (2014); Pantoja (2017), para la determinación del caudal ecológico medio diario de la microcuenca Las Pavas.

7.10. DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA (Oh)

En la Ecuación 17 se debe introducir el valor de precipitación anual de la cuenca, el cual se halló con los datos de precipitación máxima en 24h mensual multianual de la estación pluviométrica CALDERA LA [Cód. 16020110] proporcionados por el IDEAM.

El CN obtenido en el numeral 7.7 fue introducido en la Ecuación 18, que a su vez arrojó el valor a computar en la Ecuación 17, obteniéndose la esorrentía directa (Q) en mm/año para la quebrada Las Pavas. Este valor se convirtió a unidades de caudal de metros cúbicos por año.

Teniendo en cuenta la Resolución 0865 (2004), se aplicaron factores de reducción del 25% por calidad de agua y por caudal ecológico, resultando así en un factor de reducción final del 50% ($Fr=0.5$).

7.11. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA (Dh)

Al inicio del proyecto se realizó una visita a las viviendas colindantes al cauce principal, con el fin de conocer y entrevistar los usuarios del recurso hídrico que no hacen parte de la población beneficiada por el acueducto (Ver Anexo 1), los caudales captados y el tipo de aprovechamiento que se les da. No se tuvo acceso a algunos datos. Se determinó el caudal transportado por la red de aducción del acueducto municipal según lo descrito en la Resolución 0449 del 24 de Octubre de 2017, por la cual “se otorga una concesión de aguas superficiales y se adoptan otras determinaciones” para el municipio de Mutiscua.

La DUD se relacionó con el caudal captado por el acueducto municipal. La DUI corresponde a los volúmenes de agua captados por las piscícolas. La DUA y DUP atañen a las cantidades recogidas por los usuarios rurales, quienes las destinan a tales usos.

7.12. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ESCASEZ (Ie)

Una vez conseguidos los valores de oferta neta y demanda hídrica de la microcuenca, el Ie se calculó con la Ecuación 36, en la cual $Fr = 0.5$.

8. RESULTADOS

8.1. CARACTERIZACIÓN HIDROMORFOMÉTRICA

De acuerdo con la información recolectada, se establecieron las características de la red de drenaje tal como se muestra en la Tabla 16. Dichos parámetros señalan que la Quebrada Las Pavas es una corriente de tipo exorreica perenne que desemboca en el Río La Plata. Está compuesta por dos drenajes de orden 1 y uno de orden 2 (ver Imagen 10), resultando una relación de bifurcación de 2, lo que sugiere una red bien drenada con vulnerabilidad media a posibles crecientes torrenciales. La temperatura media del agua es de 12.1°C, según lo medido en campo.

Tabla 16. Características morfométricas de la microcuenca Las Pavas (Mutiscua).

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
PARÁMETROS DE SUPERFICIE			
Área	A	5.55	Km ²
Perímetro	P	12.13	Km
Longitud axial	La	9.14	Km
Longitud del cauce principal	L	4.55	Km
Longitud total de drenaje	Lc	6.39	Km
Ancho Promedio	Ap	0.61	Km
Ancho máximo	Amax	1.98	Km
<i>Cotas</i>			
Máxima	-	3750	msnm
Mínima	-	2698	msnm
<i>Centroide</i>			
X centroide	-	1147744.49	m
Y centroide	-	1296244.51	m
Z centroide	-	3256	msnm
<i>Altitud</i>			
Altitud media	-	3256	msnm
Altitud más frecuente	-	3125	msnm
Altitud de frecuencia media	-	3259	msnm
PARÁMETROS DE FORMA			
Índice de compacidad	Kc	1.45	-
Factor de forma	Rf	0.27	-
Razón de elongación	Re	0.58	-
Índice de alargamiento	Ia	4.62	-

PARÁMETROS DE RELIEVE

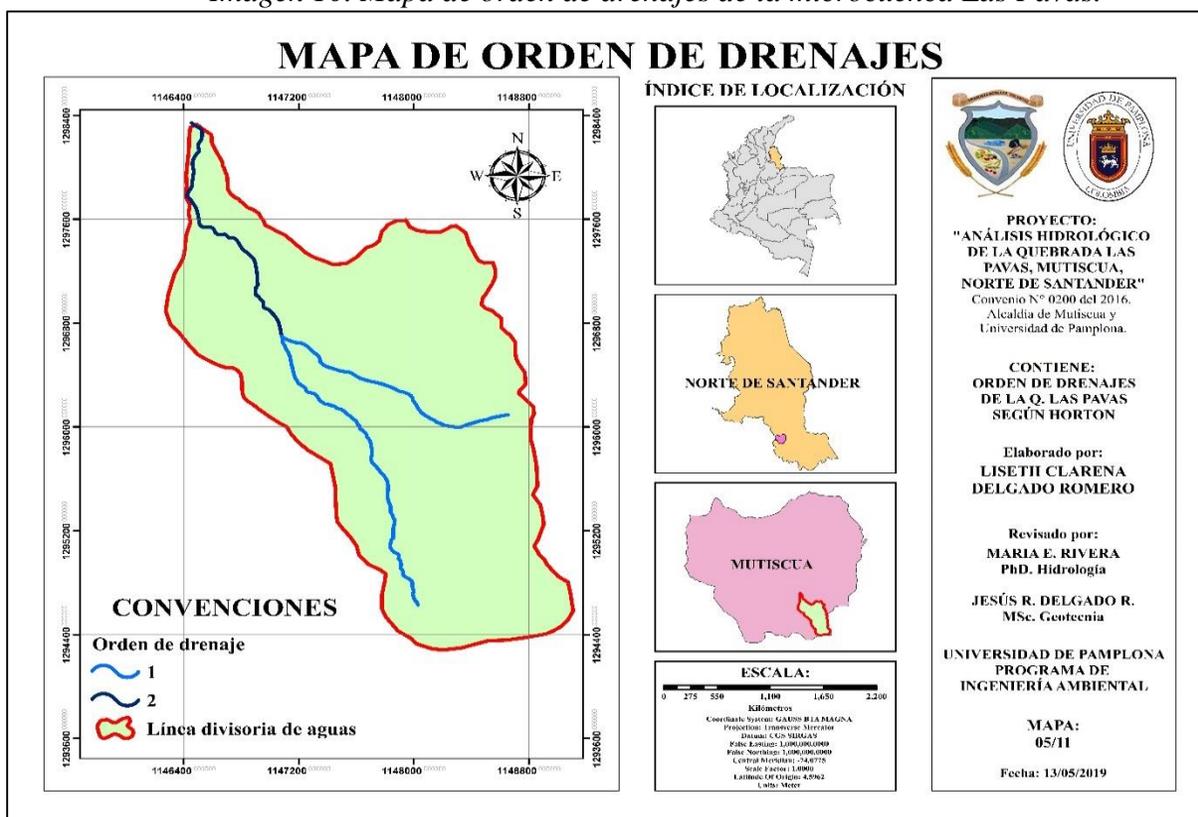
Pendiente media de la cuenca	-	0.22	m/m
		21.53	%
Pendiente media de la red hídrica	-	0.06	m/m
		5.68	%
Pendiente media del cauce	Sc	0.17	m/m
		16.54	%
Elevación media	Em	2748	msnm
Curva hipsométrica	-	Curva A	-

PARÁMETROS DE DRENAJE

Orden de la red de drenaje	-	2	-
Relación de bifurcación	Rb	2	Km/Km ²
Densidad de drenaje	Dd	1.15	-
Patrón de drenaje	-	Subdendrítico	-

Fuente: Delgado R., 2019.

Imagen 10. Mapa de orden de drenajes de la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

De acuerdo a la tabla anterior, la microcuenca tiene un perímetro de 12.13 Km y un área de 5.55 Km² aproximadamente, lo cual la clasifica como microcuenca según el Centro Iberoamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Suelos en Carrión (2014). Sus parámetros

concuerdan con la forma alargada que propone Jimenez (2017) y con el índice de compacidad de Gravelius, el cual indica una forma oval redonda a oval oblonga.

Adicionalmente, los parámetros de relieve indican que esta es una microcuenca con pendientes que varían de accidentadas o pronunciadas a muy fuertes, haciéndola muy susceptible a la erosión, las avenidas torrenciales y el aumento repentino de caudal, lo cual puede ocasionar daños a estructuras de la zona, tales como la bocatoma o las viviendas, y fenómenos de remoción en masa, como los que se exponen en la Fotografía 9.

Fotografía 9. Fenómenos de remoción en masa en la parte media y alta de la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R., 2019.

Por la disposición de drenaje regional, que se encuentra en un sector donde hay control estructural, se determinó que la red de drenaje tiene un patrón subdendrítico, el cual consiste generalmente en la subdivisión de tributarios que andan en todas las direcciones y llegan a un río principal, en este caso el Río La Plata, formando ángulos generalmente menores a 90° .

De acuerdo con los métodos descritos en la Tabla 5 para la determinación del tiempo de concentración de la cuenca, se obtuvo un valor promedio de 49.28 minutos (ver Tabla 17), el cual es un periodo relativamente moderado para el escurrimiento, ya que la distancia recorrida es de casi 5 Km. De igual manera, Vélez y Botero (2010) en Leal (2016) recomiendan la aplicación de diferentes metodologías para el cálculo de este parámetro, con el fin de obtener una mejor aproximación. La ecuación propuesta por Ventura-Heras no se tuvo en cuenta, ya que la variable de alejamiento medio (a) no cumplió la condición dada por los autores.

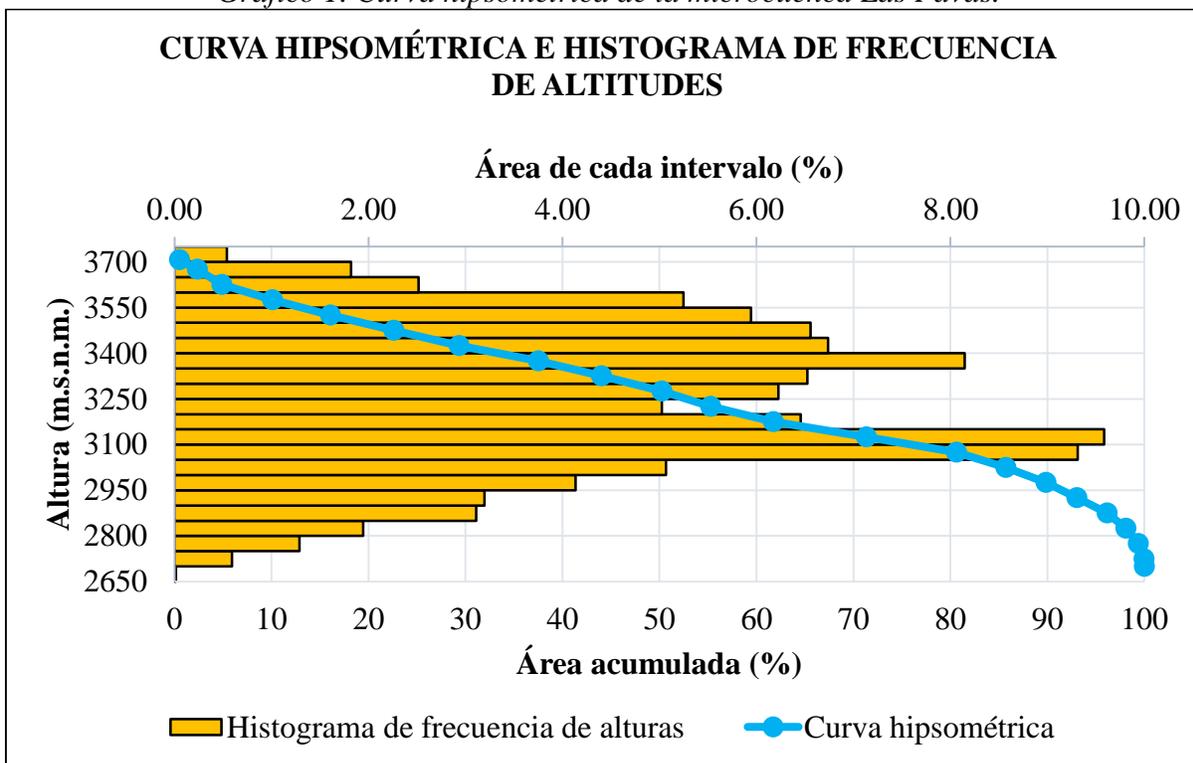
Tabla 17. Tiempos de concentración de la microcuenca Las Pavas según diferentes autores.

Parámetro	Método	Valor	Unidades
Tiempo de concentración (tc)	Bransby-Williams	31.91	min
	Kirpich	26.18	min
	Passini	46.68	min
	Giandotti	44.37	min
	Temez	78.50	min
	California Culvert Practice	22.75	min
	Clark	94.60	min
	PROMEDIO	49.28	min

Fuente: Delgado R., 2019.

La curva hipsométrica (Gráfico 1) muestra que la microcuenca en estudio presenta una fase de juventud (curva A) (descrita en el apartado 6.4.1.1.), es decir, es una cuenca que ostenta un gran potencial erosivo que incide en un mayor grado, comparado con los procesos sedimentológicos. Esto ratifica lo sugerido por los parámetros de forma, relieve y drenaje, mencionados anteriormente. El histograma de frecuencias representa el porcentaje de área que se encuentra entre curvas de nivel, en el cual el mayor valor es 9.59% del área total, que se ubica entre las cotas 3100 y 3150 m.s.n.m.

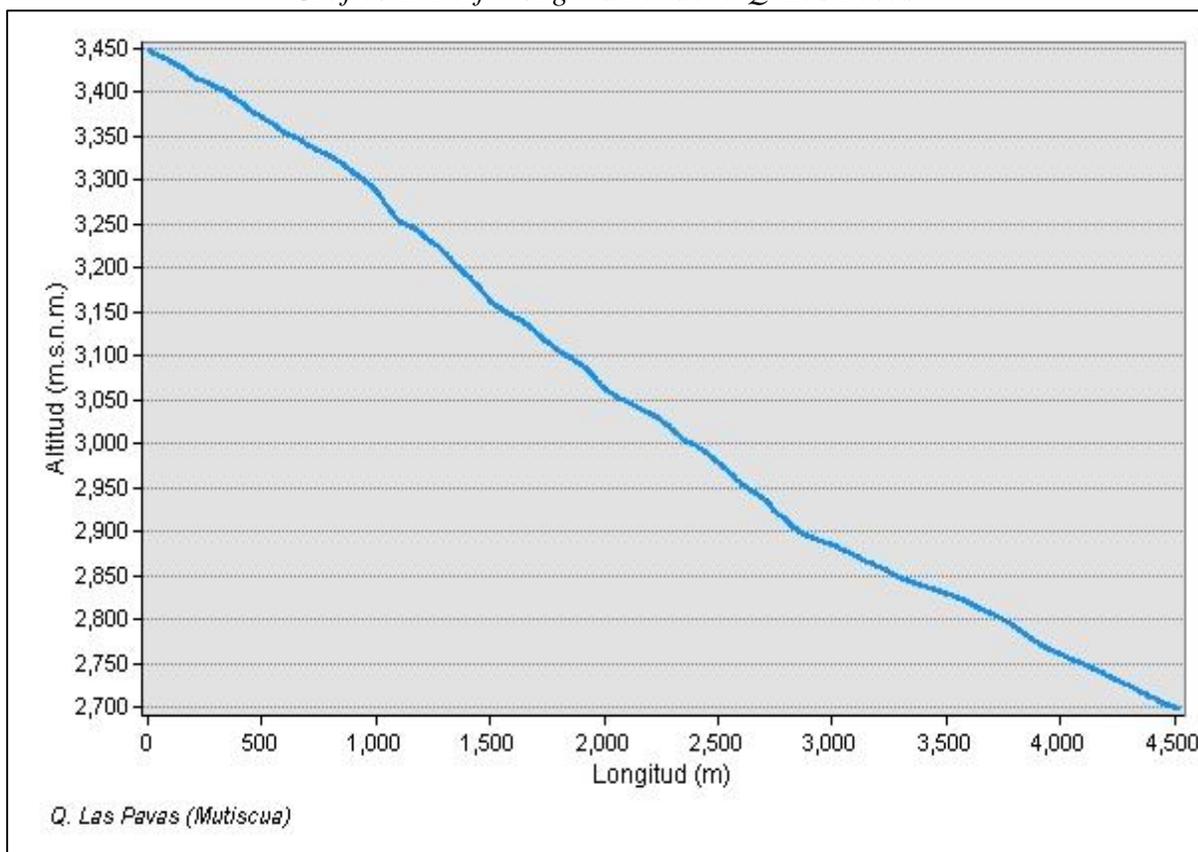
Gráfico 1. Curva hipsométrica de la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R., 2019.

El perfil longitudinal del territorio (ver Gráfico 2) muestra que presenta una etapa juvenil con tres segmentos que cambian de pendiente, en los que una mayor pendiente indica una mayor cantidad de bloques clastosoportados. La variación de la inclinación del terreno podría estar relacionada con cambios de la granulometría de los depósitos

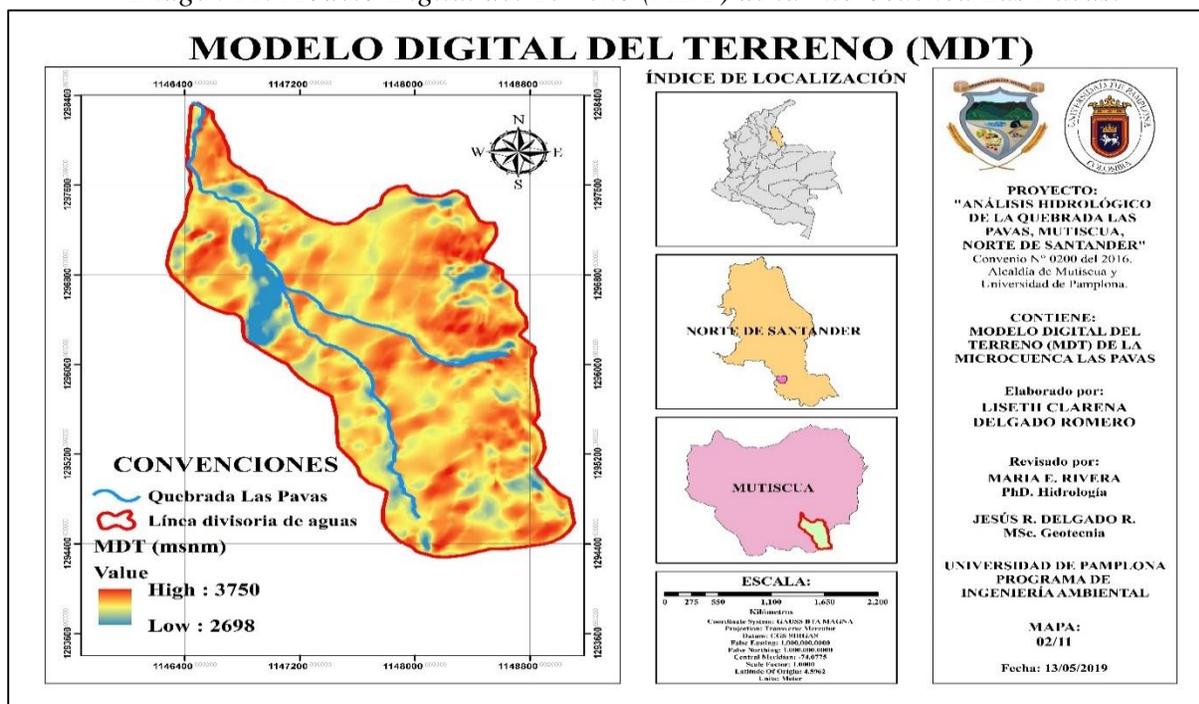
Gráfico 2. Perfil longitudinal de la Q. Las Pavas.



Fuente: Delgado R., 2019.

Así mismo, la diferencia entre cota máxima y mínima de la línea divisoria de aguas arroja un valor de 1052 m (ver Imagen 11), mientras que se presenta una variación de altura de alrededor de 754 m entre el nacimiento y la desembocadura del cauce principal, cuya pendiente media es de 16.54%.

Imagen 11. Modelo Digital del Terreno (MDT) de la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Finalmente, la densidad de drenaje de la microcuenca tiene un valor de 1.15 Km/Km², correspondiente a un valor moderado, que señala posibles materiales geológicos disgregables y suelos relativamente impermeables según lo propuesto por Flores y otros (2016). Sin embargo, por observaciones hechas en campo, la presencia de depósitos fluviotorrenciales señala suelos relativamente permeables. Es importante mencionar que la cobertura vegetal de la zona de estudio es bastante densa en la parte alta, disminuyendo gradualmente a medida que el cauce principal se acerca a la vía nacional en la parte media-baja de la microcuenca, donde existe notable intervención antrópica.

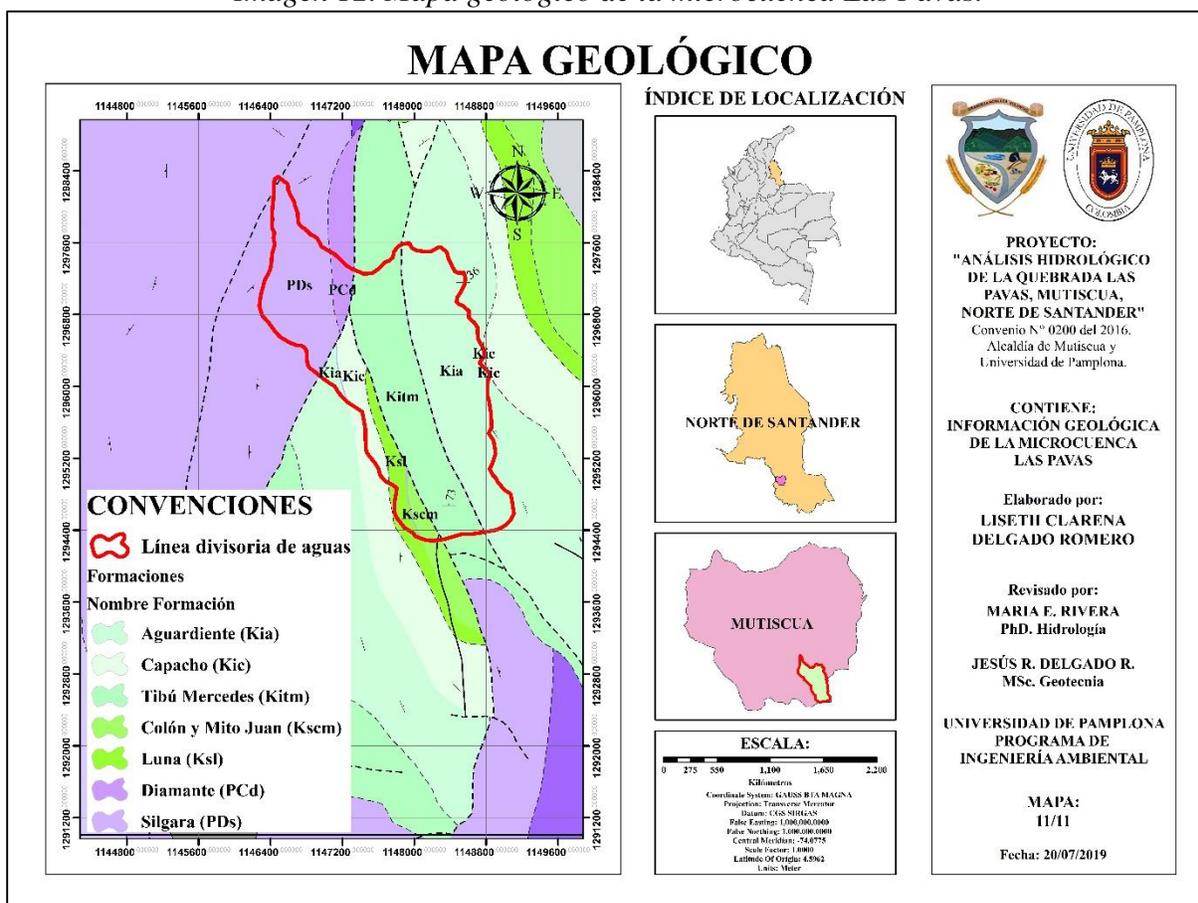
8.2. GEOLOGÍA

8.2.1. Geología regional

La microcuenca presenta siete unidades litológicas (ver Imagen 12) según la plancha 110 del mapa geológico nacional del SGC (2010): las formaciones Aguardiente (Kia), Capacho (Kic), Tibú

Mercedes (Kitm), Colón y Mito Juan (Kscm), Luna (Ksl), Diamante (PCd) y Silgara (PDs). La falla de Socotá atraviesa la microcuenca, además de sufrir incidencias de las fallas Pamplona y Mutiscua que pasan muy cerca. Por lo general, en estas zonas de falla existen fracturamientos de la roca por donde puede aflorar el agua, lo cual reafirma la existencia de una zona de recarga hídrica en la parte alta de la microcuenca. Además se identificaron depósitos fluviotorrenciales (Qft) y coluviales (Qc) que no están contemplados en el mapa.

Imagen 12. Mapa geológico de la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

8.2.2. Geología local

Algunas unidades litológicas que se encontraron en campo no están referenciadas en el mapa geológico general del SGC. En lo que se tiene cartografiado como formación Aguardiente, sureste del cauce, en campo se encontró un cuerpo conformado por rocas ígneas de grano grueso a medio

cuarzo feldespáticas (Qzfk) color ocre superficial por reacciones de los óxidos de hierro que contiene y moteado verde, blanco y rosado, que se podría clasificar como un granito sienítico (ver Fotografía 10).

Fotografía 10. Rocas ígneas graníticas presentes en la microcuenca Las Pavas.

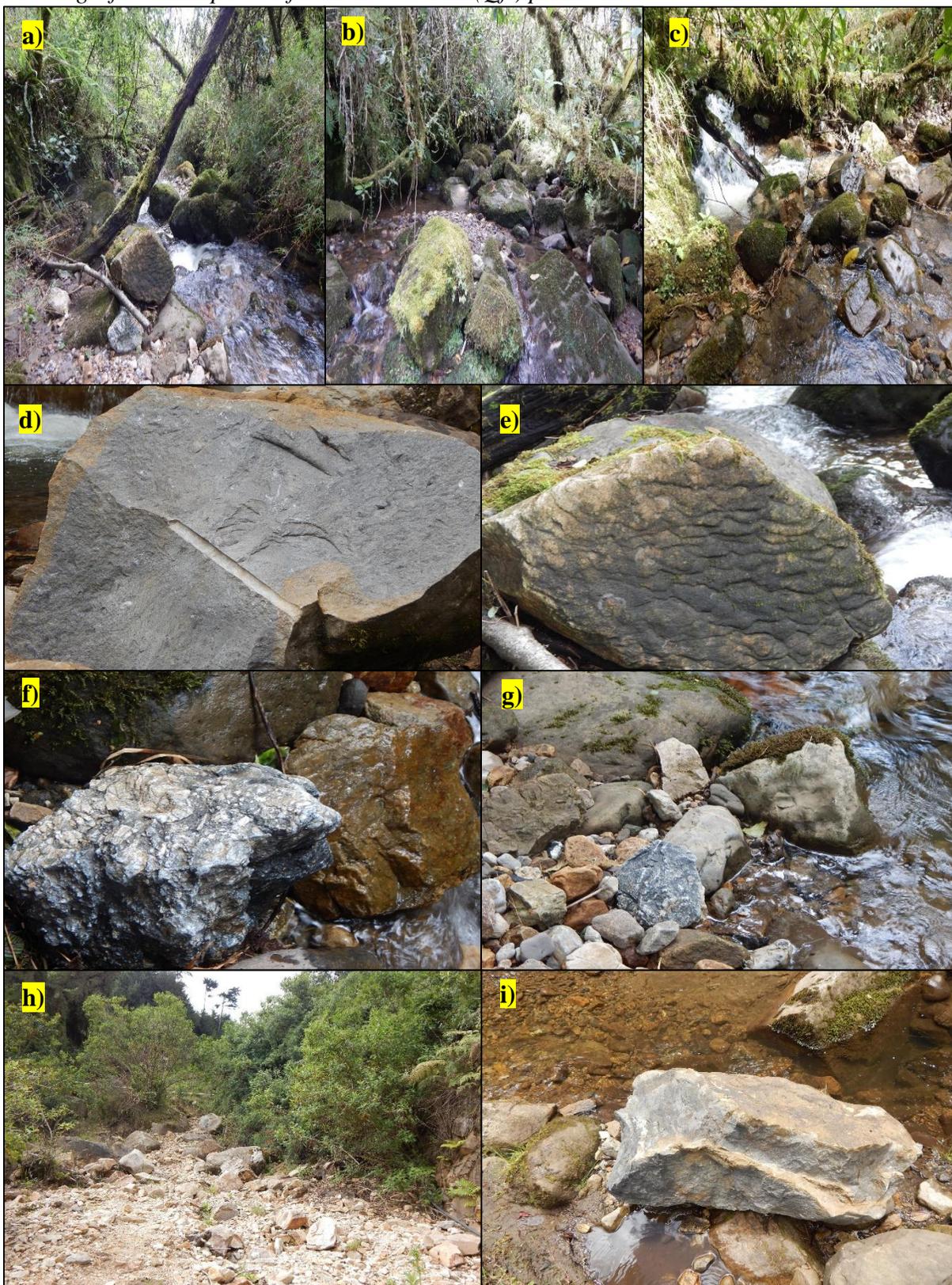


Fuente: Delgado R., 2019.

En la microcuenca también se presentan depósitos fluviotorrenciales con bloques de hasta 3m de diámetro de caliza lumaquélica gris, micrítica, algunas con fragmentos de conchillas, areniscas crema y oxidadas, lodolitas y bloques de brechas color gris. La presencia de brechas es típica de zonas de falla, tal como la zona de estudio, y el color gris es indicativo de carbonatos y lodolitas orgánicas.

En la Fotografía 11 se muestran estos casos: a), b) y c) Depósitos fluviotorrenciales (Qft) en la cuenca media, d) caliza gris micrítica, e) arenisca con evidencias de ripple marks, f) brecha sedimentaria, g) conjunto de calizas y areniscas, h) areniscas color ocre a crema, i) fragmento de caliza micrítica con venas de calcita, j) caliza lumaquélica, k) caliza gris micrítica con fragmentos de conchillas.

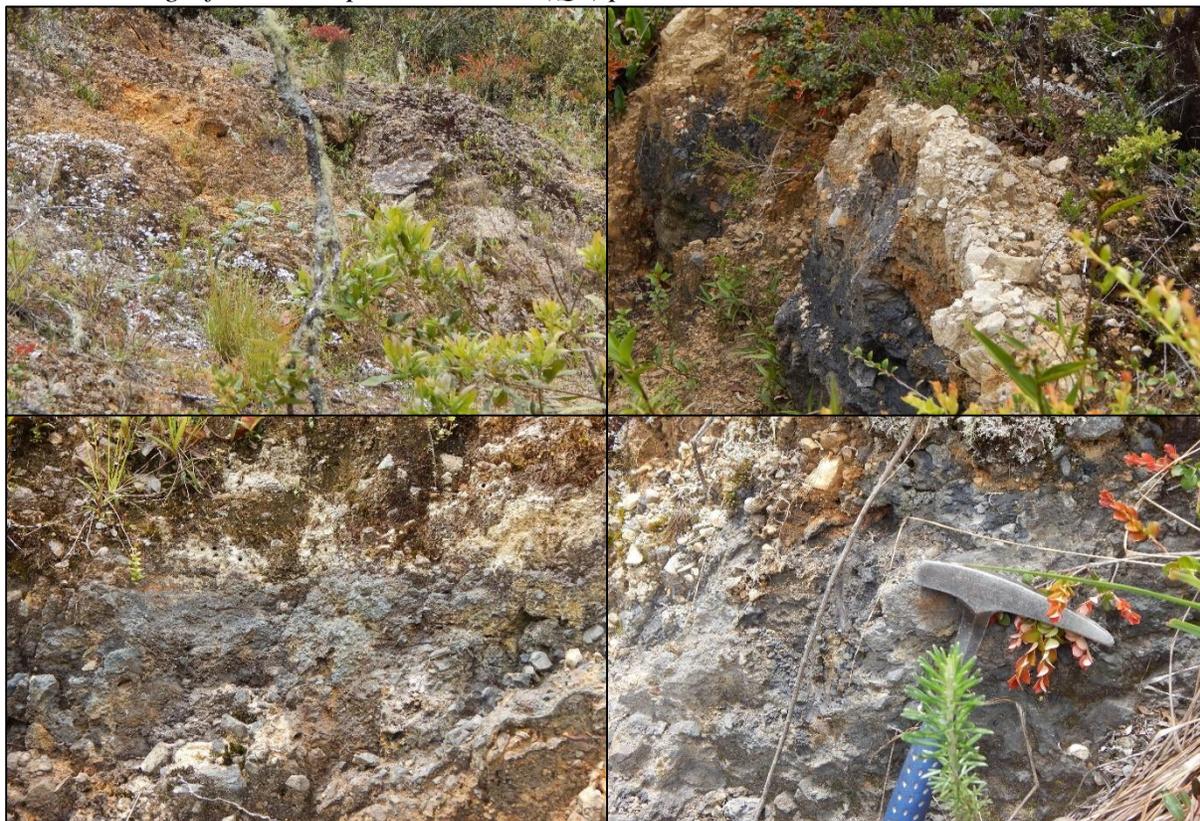
Fotografía 11. Depósitos fluviotorrenciales (Qft) presentes en la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R., 2019.

De igual manera, hay depósitos coluviales asociado a un antiguo deslizamiento (coordenadas N01295844, E01146885 y Z2999), con bloques de arenisca ocre a crema muy triturada, bloques brechados de lodolitas orgánicas y rocas muy carbonosas, como se puede observar en la Fotografía 12.

Fotografía 12. Despósito coluvial (Qc) presente en la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R., 2019.

8.3. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

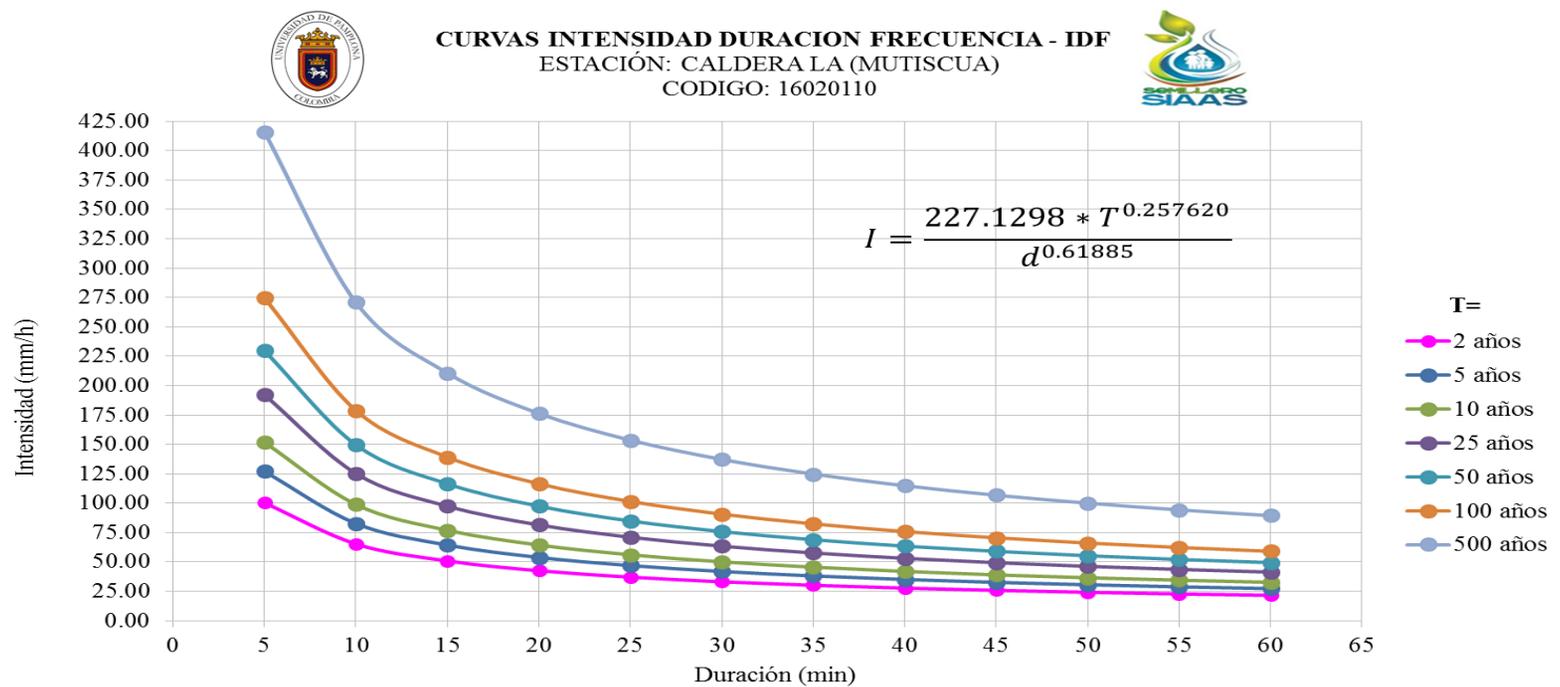
8.3.1. *Curvas IDF, hietogramas e hidrogramas unitarios*

Según lo descrito en la metodología, se obtuvieron las curvas IDF de la estación pluviométrica CALDERA LA [Cód. 16020110] para la serie 1976-2016, que se encuentra dentro de la

jurisdicción del municipio, trabajando los datos correspondientes a la precipitación máxima en 24 horas suministrados por el IDEAM, tal como se muestra en el Gráfico 3. Es así como se obtuvo el término constante de regresión (K) igual a 227.1298 y los coeficientes de regresión (m y n) tomaron valores de -0.61885 y 0.25762 , respectivamente, para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. Además, se puede corroborar que las curvas muestran un comportamiento típico de tormenta como lo sostienen Chow y otros (1994) y Aparicio (1997) en lo citado por Suarez (2016).

De esta información obtenida, se determinó que la intensidad varía de 100.29 mm/h en 5 min a 21.55 mm/h en los 60 min más lluviosos, para periodos de retorno de 2 años, pudiéndose presentar una precipitación máxima de 56.8358 mm en 24 horas. Igualmente, la máxima lluvia que puede caer en 24h en la zona para periodos de retorno de 100 y 500 años es de 198.7341 y 252.8122 mm, proporcionalmente. También, se determinó que en un periodo de 60 min pueden caer 17.0507 mm y 75.8437 mm para un T igual a 2 y 500 años, respectivamente.

Gráfico 3. Curvas IDF – Estación CALDERA LA [Cód. 16020110] (Mutiscua)



Datos Técnicos

Ventana de información: 1976 a 2016
 # Años empleados: 41
 Datos de intensidades ajustados a: Distribución de probabilidad Gumbel
 Parámetros estimados con el método de: L-Momentos
 Fecha de Actualización: Junio de 2019

Abreviaturas y Unidades

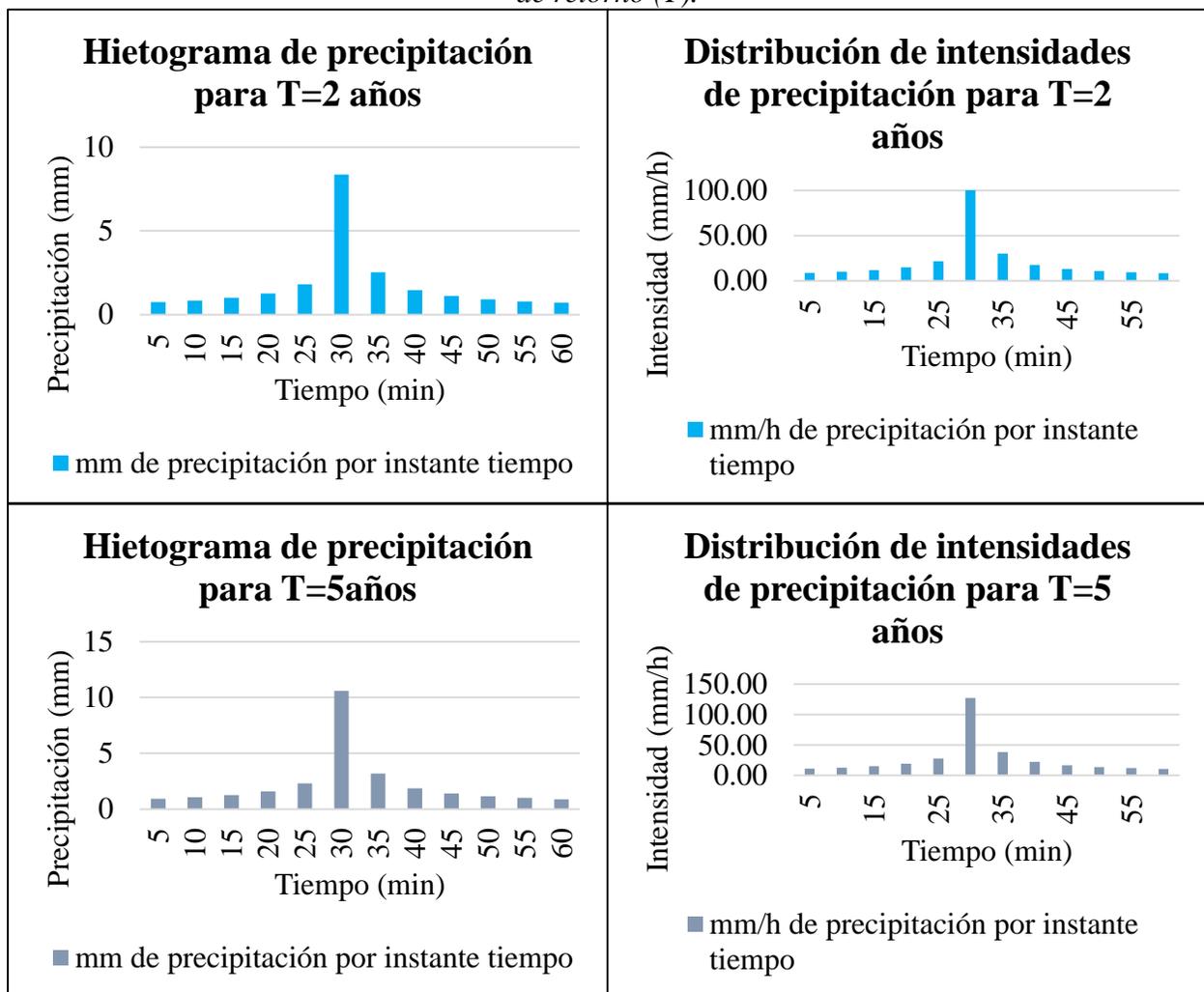
T: Periodo de retorno (años)
 d: Duración (minutos)
 I: Intensidad de Precipitación (mm/h)

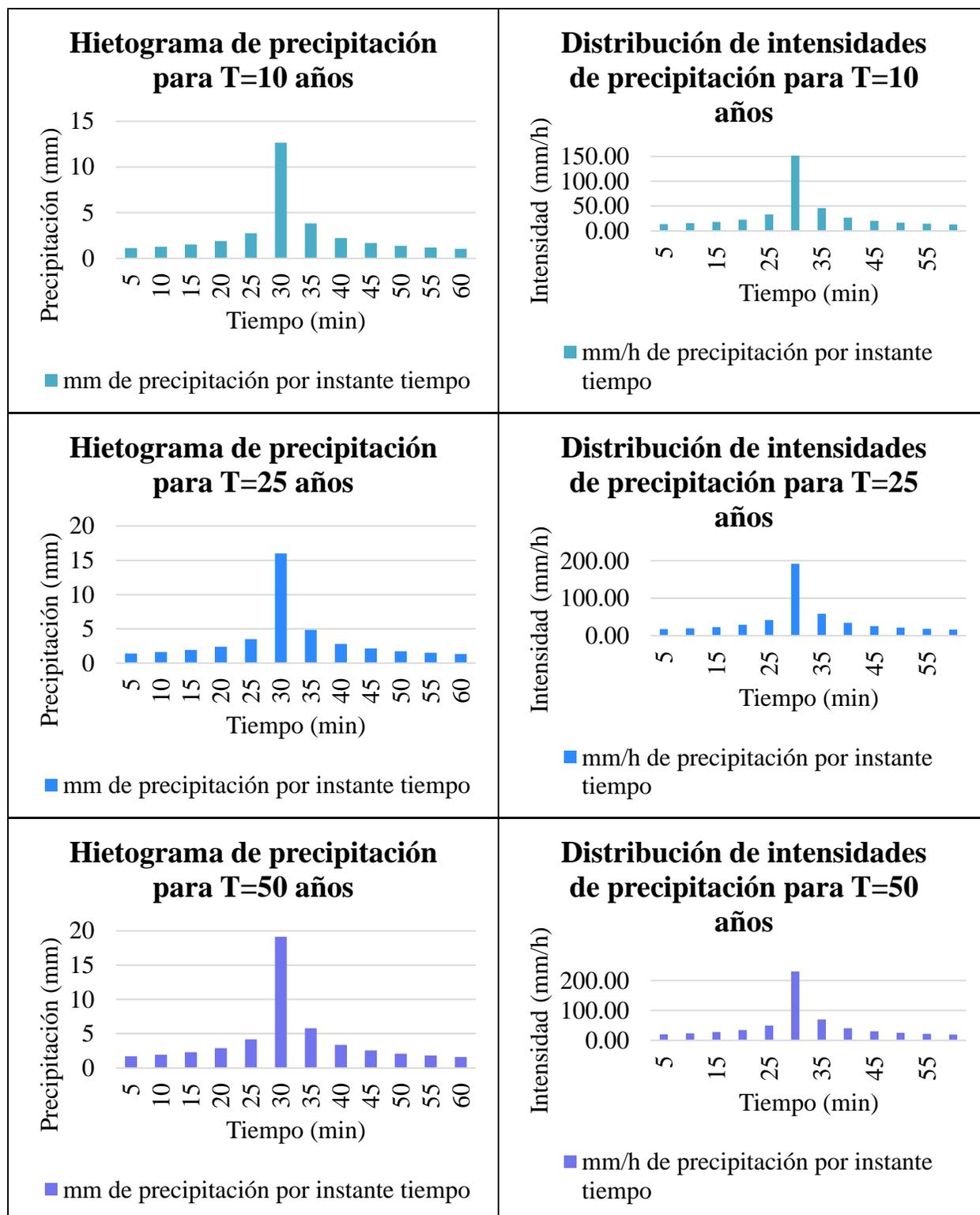
Actualizado por: Liseth Clarena Delgado Romero, Facultad de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad de Pamplona.
 Fecha de reporte: Julio de 2019

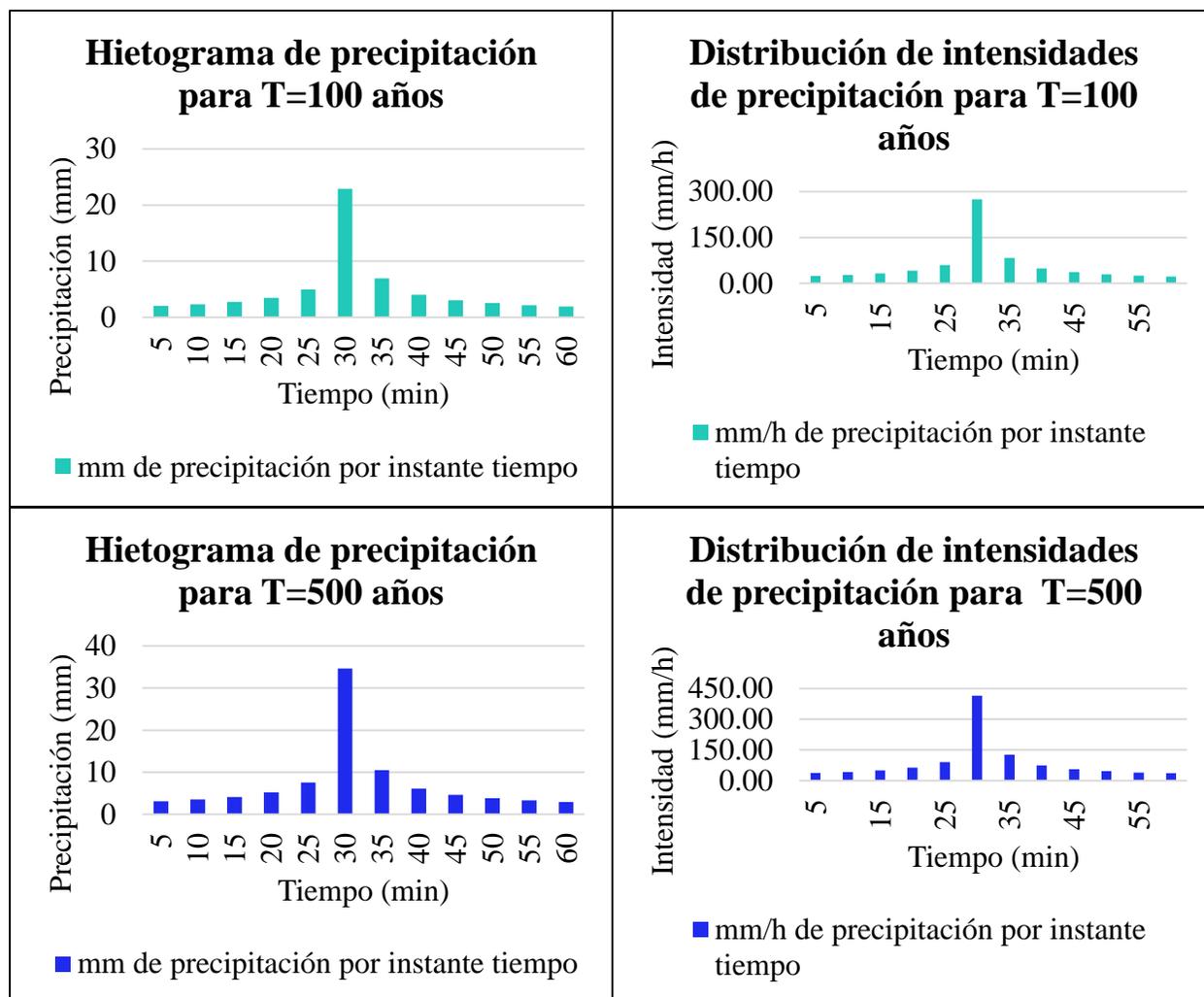
d (min)	I _{T=2}	I _{T=5}	I _{T=10}	I _{T=25}	I _{T=50}	I _{T=100}	I _{T=500}
5	100.29	126.99	151.82	192.24	229.83	274.76	415.93
10	65.31	82.70	98.87	125.19	149.66	178.92	270.85
15	50.82	64.35	76.93	97.41	116.45	139.22	210.75
20	42.53	53.85	64.38	81.52	97.46	116.51	176.38
25	37.04	46.91	56.08	71.01	84.89	101.48	153.63
30	33.09	41.90	50.09	63.43	75.83	90.66	137.24
35	30.08	38.09	45.54	57.66	68.93	82.41	124.75
40	27.69	35.07	41.92	53.09	63.46	75.87	114.85
45	25.75	32.60	38.98	49.35	59.00	70.54	106.78
50	24.12	30.54	36.52	46.24	55.28	66.09	100.04
55	22.74	28.80	34.42	43.59	52.11	62.30	94.31
60	21.55	27.29	32.62	41.31	49.38	59.03	89.37

Con base en estas curvas IDF, se obtuvieron los hietogramas para cada uno de los diferentes periodos de retorno (ver columna izquierda del Gráfico 4). En función del tiempo de concentración y sus variables, se analizaron dichos hietogramas, los cuales arrojaron valores de precipitación máxima de 8.36, 10.58, 12.65, 16.02, 19.15, 22.90 y 34.66 mm para cada T en su orden, siendo en todos los casos el intervalo de 30 min el más lluvioso, seguido por el de 35 min y en tercer lugar el de 25 min, continuando este comportamiento hasta completar los 60 min de tormenta, de acuerdo con lo propuesto por Chow y otros (1994).

Gráfico 4. Hietogramas y distribución de intensidades de precipitación para diferentes periodos de retorno (T).





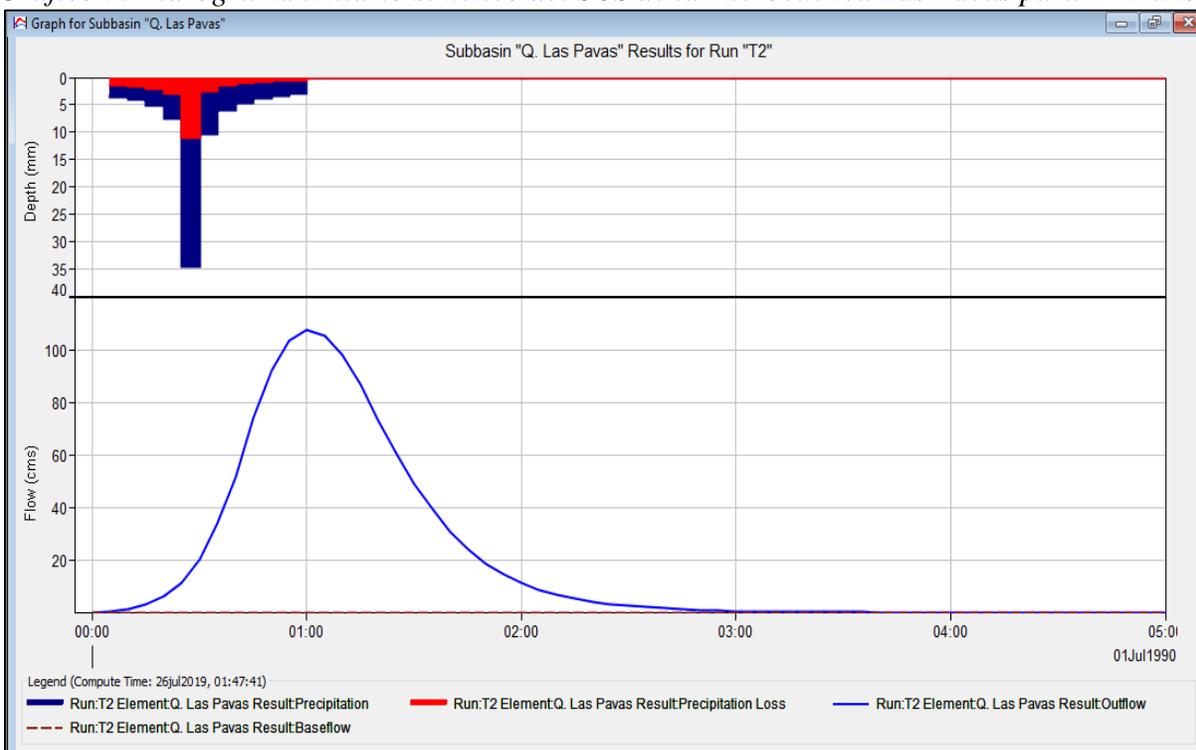


Fuente: Delgado R. modificado de Hidrojing, 2019.

Análogamente, en la columna derecha del Gráfico 4 también se muestra la distribución de intensidades de precipitación para los mismos intervalos de tiempo, manifestando la misma conducta que los hietogramas, con valores de 100.29, 126.99, 151.82, 192.24, 229.83, 274.76 y 415.93 mm/h para los periodos de retorno manejados anteriormente.

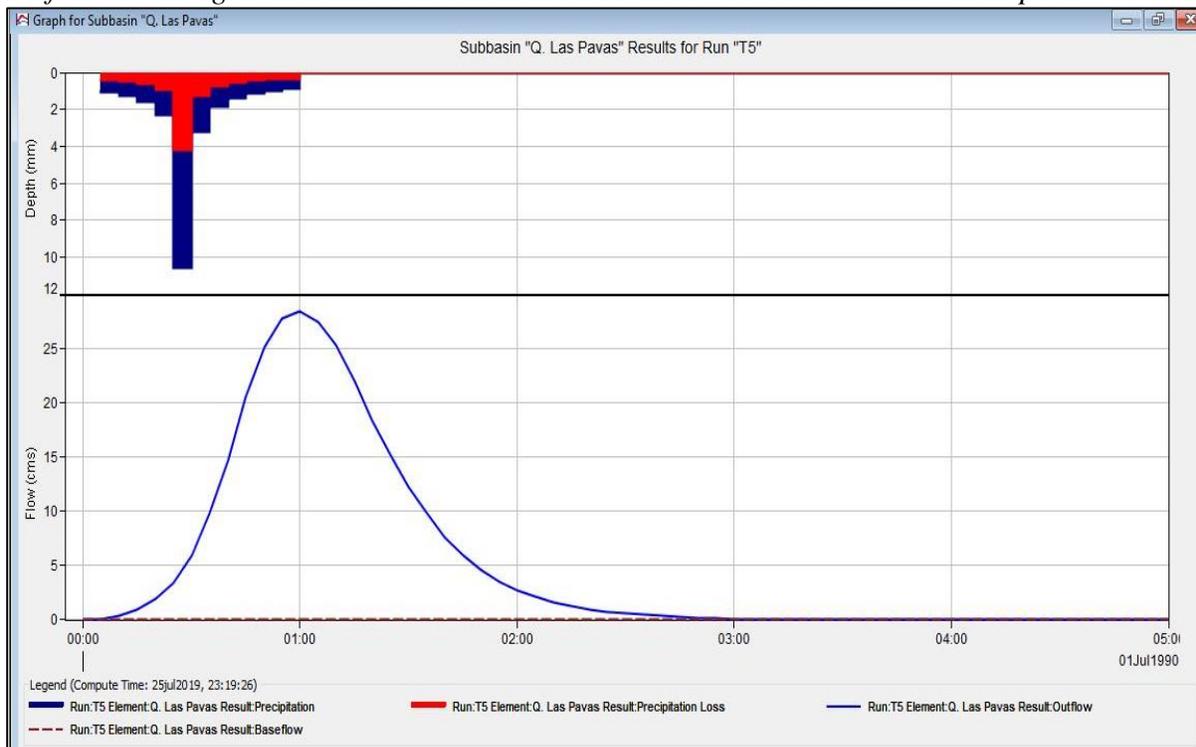
En los Gráficos 5 a 11 se distinguen los siguientes elementos: en la parte superior se muestran los hietogramas de precipitación para cada periodo de retorno en los cuales el color azul representa la pluviosidad neta y el rojo a la parte infiltrada y en la parte inferior la línea azul simboliza el hidrograma resultante.

Gráfico 5. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para $T=2$ años.



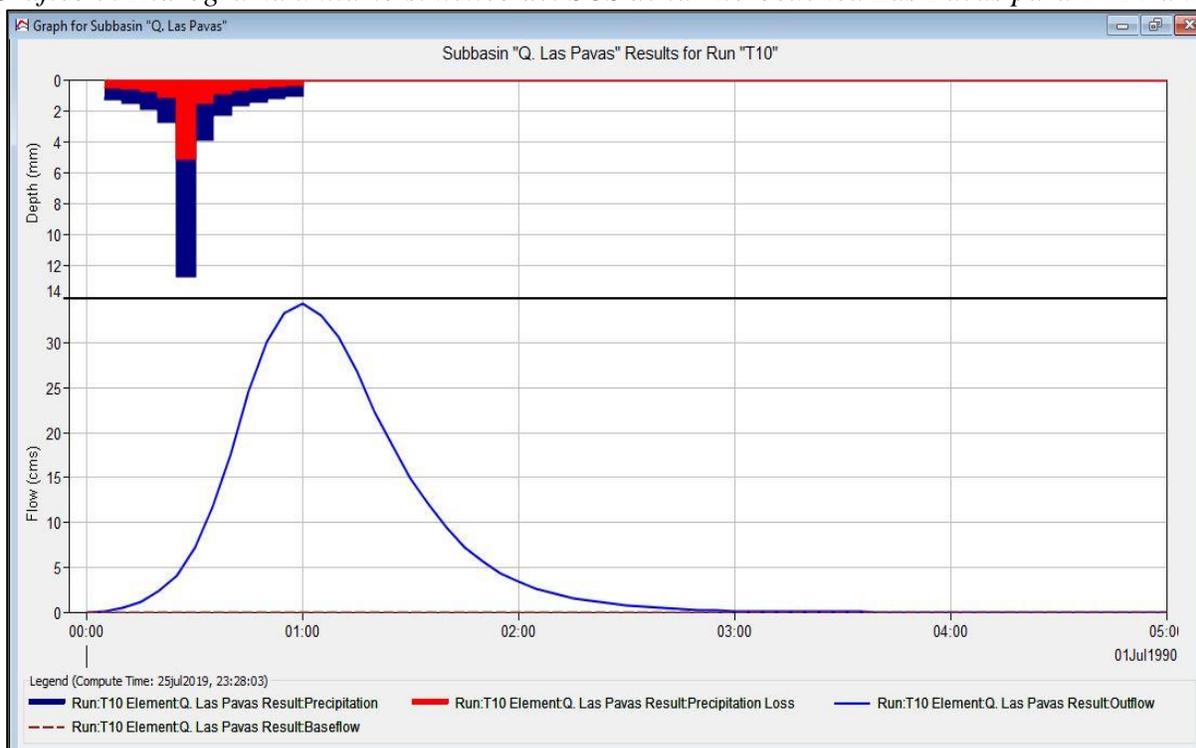
Fuente: Delgado R., 2019.

Gráfico 6. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para $T=5$ años.



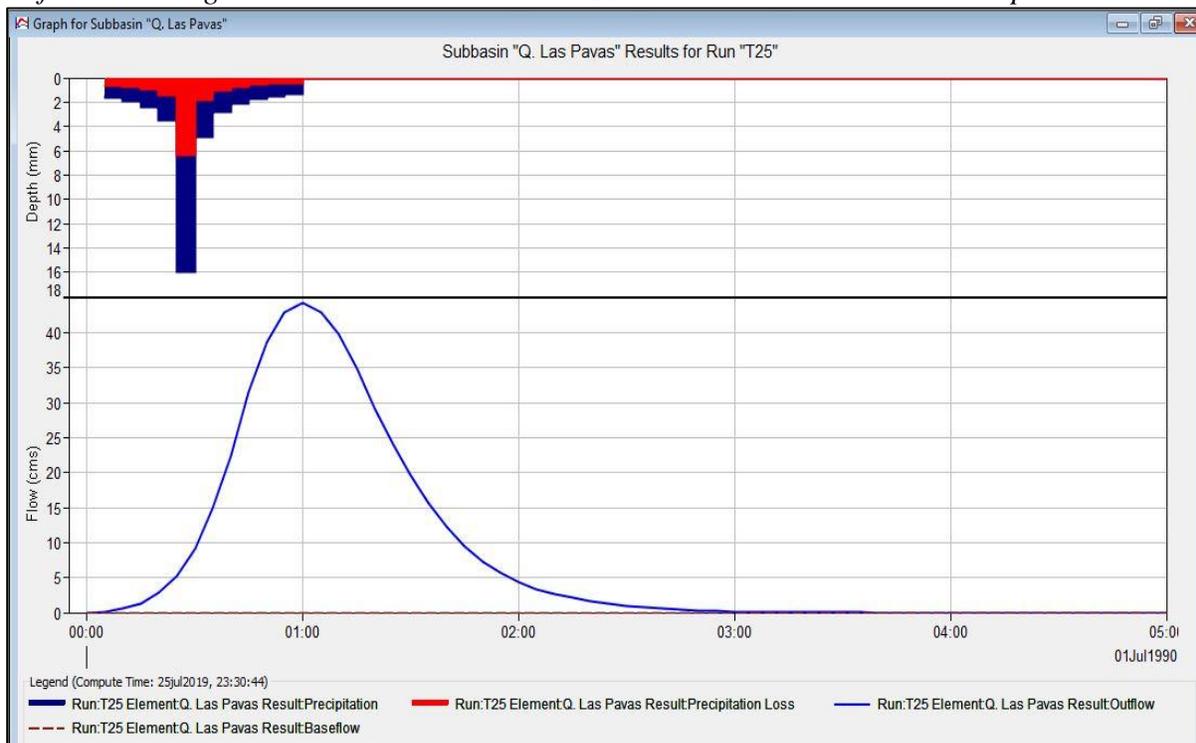
Fuente: Delgado R., 2019.

Gráfico 7. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para $T=10$ años.



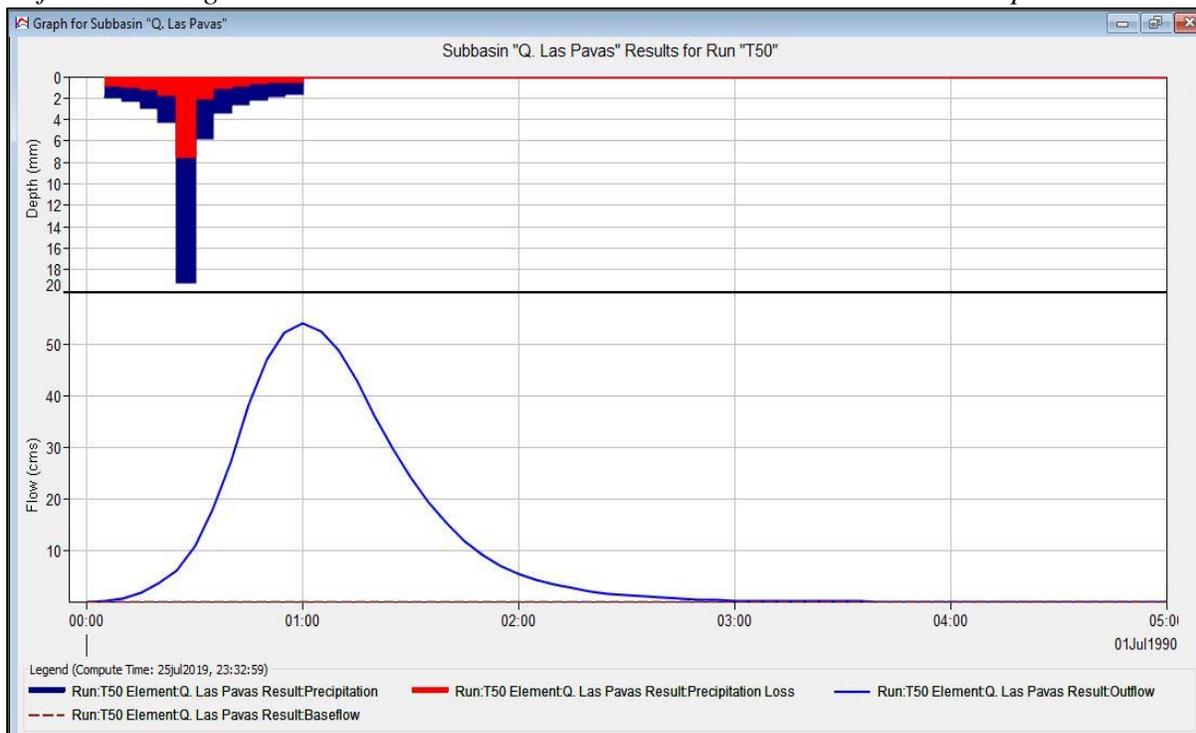
Fuente: Delgado R., 2019.

Gráfico 8. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para $T=25$ años.



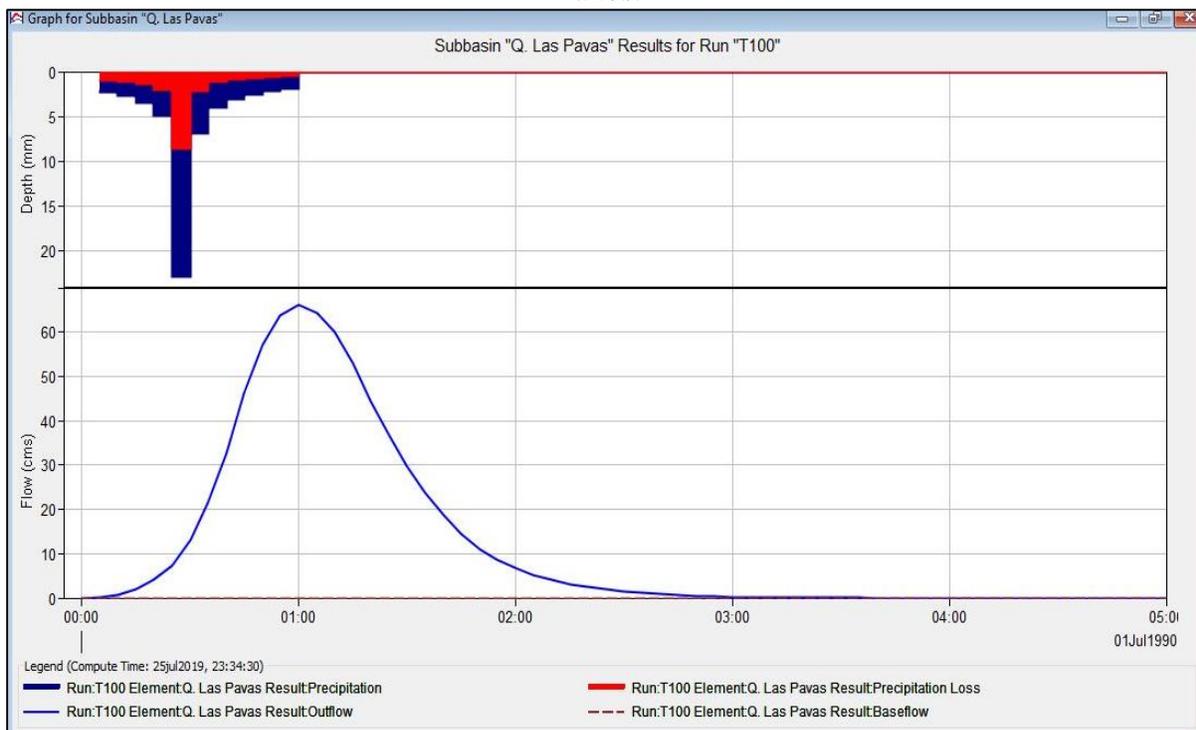
Fuente: Delgado R., 2019.

Gráfico 9. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para $T=50$ años.



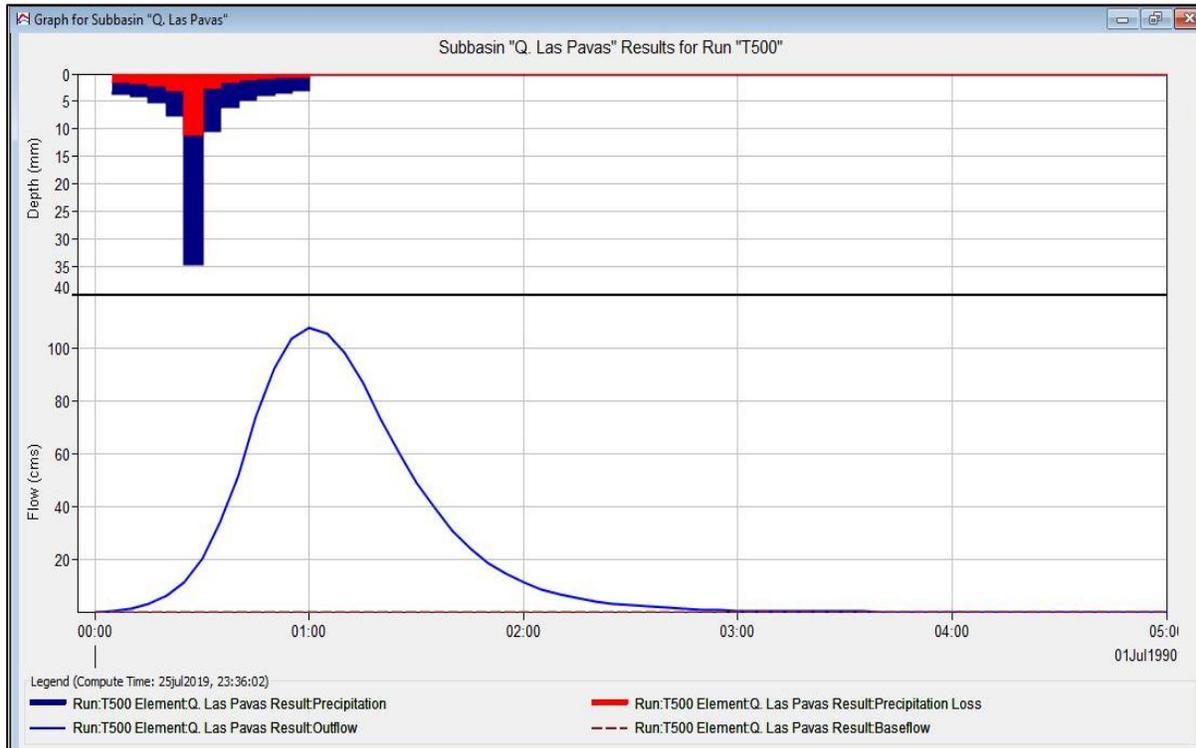
Fuente: Delgado R., 2019.

Gráfico 10. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para $T=100$ años.



Fuente: Delgado R., 2019.

Gráfico 11. Hidrograma unitario sintético del SCS de la microcuenca Las Pavas para $T=500$ años.



Fuente: Delgado R., 2019.

En todos los casos el hidrograma presentó una distribución normal. Los caudales máximos fueron 22.5, 28.5, 34.3, 44.3, 54.0, 66.2 y 107.6 m^3/s para cada tiempo de retorno respectivamente. El volumen máximo de escorrentía directa para un periodo de retorno de 500 años es de 62.11 mm, mientras que para un $T=2$ años el volumen de escurrimiento toma un valor de 12.93 mm. El pico de descarga para cada caso ocurre aproximadamente media hora después del intervalo más lluvioso. Una vez ocurrido el pico de descarga, se seguirá produciendo escorrentía superficial durante poco más de dos horas hasta que el flujo recupere su caudal base. A causa de las características propias de la microcuenca, los excesos de precipitación tienden siempre a ser mayores que las pérdidas, lo que resulta en un mayor volumen escurrido durante estos eventos.

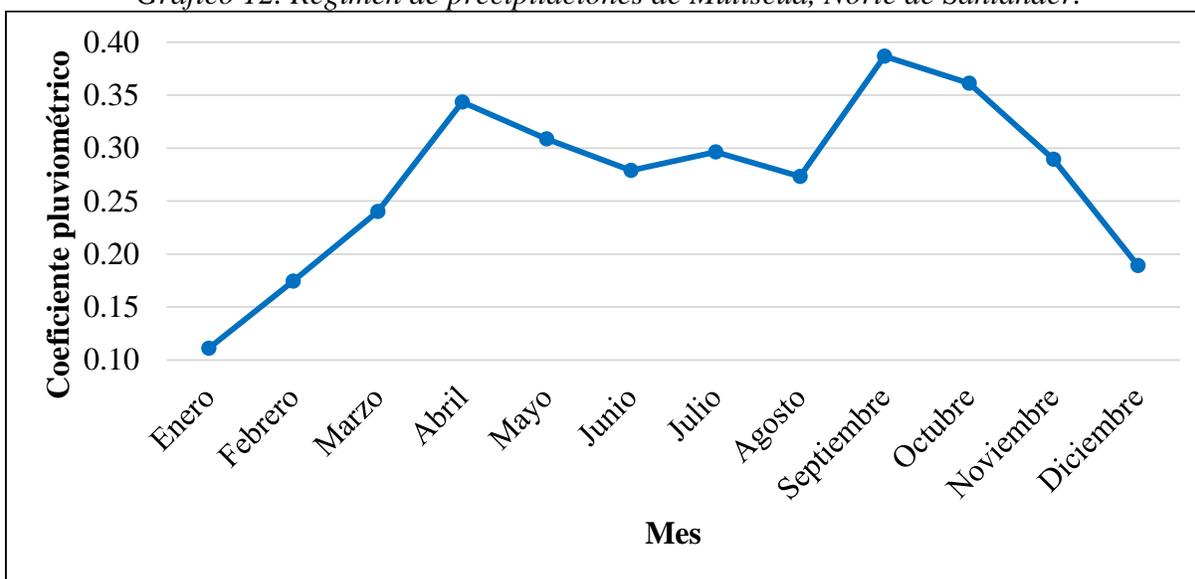
Las particularidades que se presentan en la microcuenca, como su composición geológica, su ubicación en zona de fallas, las propiedades del suelo, el relieve y las condiciones pluviométricas propias de la región de estudio, contribuyen a que la quebrada Las Pavas tenga respuestas hidrológicas rápidas y repentinas frente a eventos de lluvia con intensidades moderadas a fuertes,

las cuales se ven influenciadas por las pendientes del terreno y las condiciones hidrológicas del suelo, facilitando el rápido drenaje.

8.3.2. Curva de duración de caudales

Mutiscua se encuentra ubicado sobre la cordillera oriental de los Andes colombianos, hecho que sustenta el comportamiento bimodal que tienen las precipitaciones a lo largo del año bajo condiciones típicas a causa de la orografía, es decir, se presentan dos picos de precipitación máxima y periodos de transición entre humedad-sequía y sequía-humedad, tal como se observa en el Gráfico 12. Las temporadas de lluvias pico normalmente se presentan en los meses de Abril-Mayo y Septiembre-Octubre, siendo esta última más intensa.

Gráfico 12. Régimen de precipitaciones de Mutiscua, Norte de Santander.



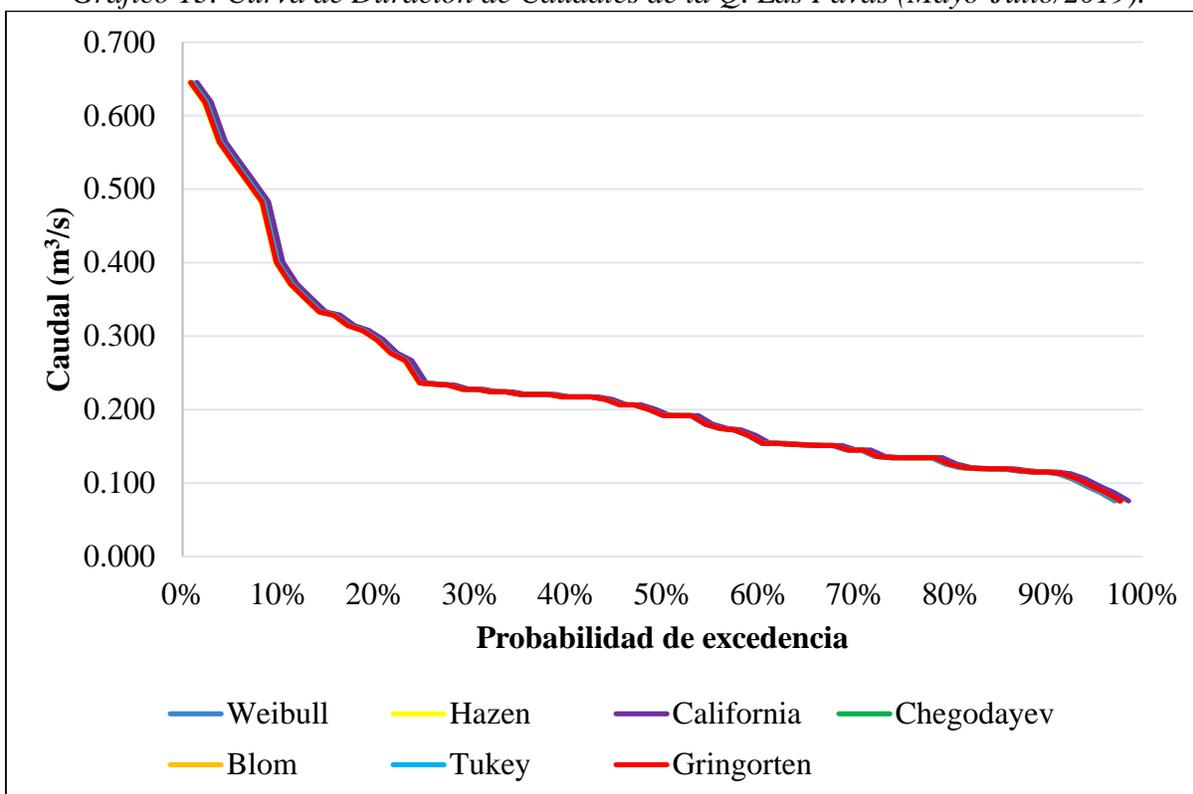
Fuente: Delgado R., 2019.

La cantidad de precipitación caída está directamente relacionada con la esorrentía producida en la zona en la que cae, por lo cual los caudales de una microcuenca varían dependiendo de las pluviosidades dentro de ella. En esto se basa la metodología lluvia- esorrentía. Los datos de aforo recolectados diariamente en la Q. Las Pavas durante el periodo de estudio corroboraron este comportamiento.

Las CDC obtenidas mediante las probabilidades de excedencia de Weibull, Hazen, California, Chegodayev, Blom, Tukey y Gringorten para toda la microcuenca se muestran en el Gráfico 13, en las cuales se observa coincidencia significativa al momento de utilizar cualquiera de los métodos antes mencionados, lo cual da una mayor confiabilidad a la información obtenida en campo. Estas también muestran un comportamiento típico de una cuenca de montaña, en las que existe una pendiente pronunciada en el tramo inicial, lo cual supone que los caudales mayores se presentan durante lapsos de tiempo muy cortos e indican en su mayoría un aporte de escurrimiento directo.

Los caudales igualados o superados el 85% (Q85), 90% (Q90) y 95% (Q95) del tiempo corresponden a 0.132, 0.128 y 0.125 m³/s, respectivamente. Este último valor corresponde al caudal ecológico, según el método del mismo nombre (Q95) citado en CORQUINDÍO y Universidad del Quindío (2011); Consuegra (2013); Cabra y Corradine (2014) y Pantoja (2017).

Gráfico 13. Curva de Duración de Caudales de la Q. Las Pavas (Mayo-Julio/2019).



Fuente: Delgado R., 2019.

El caudal base para el tiempo de estudio se determinó en 0.251 m³/s, según el análisis descriptivo de los datos medidos en campo.

8.3.3. Calidad del agua

De acuerdo con la normativa existente, particularmente la Resolución 2115 (2007), Capítulos II y III, los cuales reglamentan los valores máximos aceptables de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua apta para consumo humano, el agua de la Q. Las Pavas **NO es apta** para este propósito sin previo tratamiento, debido a su alto contenido de fosfatos y coliformes totales y fecales (ver Tabla 18).

Tabla 18. Comparación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la Q. Las Pavas (nacimiento, cuenca media y desembocadura) vs. Res. 2115 (2007).

Parámetro	Unidades	Nacimiento	Cuenca media	Desembocadura	Res. 2115 (2007)
Color aparente	UPC	19	22	34	15
Olor y sabor	-	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Turbidez	UNT	2.34	4.77	3.13	2
Conductividad	μS/cm	134.7	173.6	161.5	1000
pH	Unidades de pH	7.42	7.18	7.43	6.5-9.0
Nitritos	mg/l NO ₂ ⁻	0.001	0.004	0.021	0.1
Calcio	mg/l Ca	29	28	31	60
Alcalinidad	mg/l CaCO ₃	112	60	96	200
Cloruros	mg/l Cl ⁻	N.A.	18.9	19.9	250
Dureza	mg/l CaCO ₃	10	108	96	300
Sulfatos	mg/l SO ₄ ²⁻	8	12	13	250
Fosfatos	mg/l PO ₄ ³⁻	3.9	4.1	4.3	0.5
Coliformes Totales	UFC/100cm ³	1100	1600	500	0
E. coli	UFC/100cm ³	43	1100	500	0

(N.A.: No Aplica)

Fuente: Delgado R., 2019.

La cantidad de coliformes totales y fecales está muy por encima del valor máximo permitido por la Resolución en cuestión, esto puede ser producto de las excretas de la fauna nativa que son arrastradas por la escorrentía superficial hacia la zona de drenaje, ya que la ausencia de actividad antrópica en la parte alta de la microcuenca descarta que el origen sea humano. A medida que el cauce avanza, la concentración de esas especies bacterianas aumenta, por las descargas que recibe en su recorrido de aguas utilizadas para actividades agropecuarias y piscícolas y finalmente

disminuyen su concentración en la zona de la desembocadura al diluirse con las aguas provenientes de los tributarios.

La turbiedad de los tres puntos de muestreo supera el umbral permitido por la normativa, incluso en el nacimiento de la fuente hídrica, cuyo valor (2.34) excede por poco el valor máximo permitido. La variación de la turbidez en la parte media de la microcuenca se debe principalmente a las pendientes fuertes de la zona, lo que ocasiona el arrastre de sedimentos y materiales en suspensión, que posteriormente se depositan al disminuir la inclinación del terreno, ocasionando que en la parte baja disminuya el valor de este parámetro. Cabe resaltar que en eventos de lluvia este factor se ve disparado drásticamente, como se compara en la Fotografía 13, donde se muestra la turbiedad normal en la parte izquierda y su crecimiento cuando llueve en la derecha.

Fotografía 13. Aumento de turbiedad en la Q. Las Pavas.



Fuente: Delgado R., 2019.

Con respecto al color aparente, en ninguno de los tres puntos se cumple la norma en cuestión, esto se debe a factores biológicos (algas) o material en suspensión. En la visita de campo al nacimiento de la quebrada, se pudo observar que hay presencia de algas verdes filamentosas, las cuales son arrastradas corriente abajo y son un claro indicador de un moderado nivel de fósforo en la cuenca según Zouiten (2012), hecho que se constató con las pruebas fisicoquímicas hechas al

agua, las cuales arrojaron valores de 3.9, 4.1 y 4.3 mg/l en prueba de Fosfatos y 1.1, 1.3 y 1.4 mg/l en Fósforo Total, para el nacimiento, la cuenca media y la desembocadura, respectivamente. Este exceso de fósforo contribuye a la formación de espuma a lo largo del cauce según la AELS (2017) (ver Fotografía 14).

Fotografía 14. Formación de espuma en la Q. Las Pavas.



Fuente: Delgado R., 2019.

En épocas de estiaje, las algas proliferan en el fondo de la corriente formando filamentos (ver Fotografía 15). El origen de esta contaminación se estableció como de tipo natural, ya que aguas arriba de la bocatoma no existen viviendas o actividad antrópica aparente. La presencia de depósitos coluviales con bloques de calizas y lodolitas orgánicas, pueden facilitar la ocurrencia de reacciones con el agua que llevan a liberar carbonatos, fósforo y materia orgánica que entra en solución y en suspensión, fluyendo en el cauce. Esto explica la presencia significativa carbonatos asociados a rocas calizas, cuya dilución aporta considerables concentraciones de calcio al agua de la quebrada, aunque en cantidades inferiores a los umbrales establecidos en la norma.

Fotografía 15. Contaminación por algas verdes filamentosas en época de estiaje en la Q. Las Pavas.



Fuente: Delgado R., 2019.

De manera general, el pH de los puntos analizados cumple con el rango permitido, pero las características establecidas por el análisis microbiológico por la presencia de Coliformes Totales y *E. coli* conllevan a determinar un puntaje de riesgo de 15 y 25 para estos parámetros respectivamente, constituyendo una amenaza directa para la salud, según las consideraciones descritas en la Resolución 2115 de 2007. Sin embargo, el Decreto 1594 (1984) indica que por sus características esta fuente hídrica requiere sólo tratamiento convencional para su potabilización y considera que es apta para el riego de hortalizas de tallo corto, como las cultivadas en la zona.

Para el análisis de la calidad de agua también se tuvieron en cuenta otros parámetros, como los que se presentan en la Tabla 19, que consideran el aspecto orgánico de la corriente y contribuyeron a la determinación de los indicadores de calidad.

Tabla 19. Parámetros fisicoquímicos adicionales de la Q. Las Pavas.

Parámetros	Unidades	Nacimiento	Cuenca media	Desembocadura
OD	mg/l	4.88	6.41	6.45
SST	mg/l	92.0	196.6	130.0
DBO ₅	mg/l	6.8	9.3	34.0
DQO	mg/l	11	15	55
PT	mg/l P	1.1	1.3	1.4

Fuente: Delgado R., 2019.

Los resultados obtenidos de los índices de calidad de agua manejados para este proyecto se plasman en las Tablas 20, 21 y 22, para cada uno de los puntos de muestreo de la quebrada. El índice ICOTRO ratifica que la presencia moderada de fósforo en el agua incide notablemente en la calidad del agua, observándose una coincidencia en que en la parte media de la cuenca hay una mayor afectación, lo cual es concordante con una mayor intervención antrópica. Por lo anterior, todos los indicadores de esa zona proyectan alerta amarilla que se interpreta como un grado medio de contaminación. Esto último toma sentido al observar que los asentamientos humanos se encuentran en esa sección de la microcuenca.

Tabla 20. Índices de calidad de agua para el nacimiento de la Q. Las Pavas.

Índice	Valor	Interpretación	Señal de alerta
ICA	0.73	Calidad regular	
ICOMI	0.23	Contaminación baja	
ICOMO	0.46	Contaminación media	
ICOSUS	0.26	Contaminación baja	
ICOTRO	1.1	Hipereutrófico	

Fuente: Delgado R., 2019.

Tabla 21. Índices de calidad de agua para la cuenca media de la Q. Las Pavas.

Índice	Valor	Interpretación	Señal de alerta
ICA	0.58	Calidad regular	
ICOMI	0.44	Contaminación media	
ICOMO	0.46	Contaminación media	
ICOSUS	0.57	Contaminación media	
ICOTRO	1.3	Hipereutrófico	

Fuente: Delgado R., 2019.

Tabla 22. Índices de calidad de agua para la desembocadura de la Q. Las Pavas.

Índice	Valor	Interpretación	Señal de alerta
ICA	0.60	Calidad regular	
ICOMI	0.39	Contaminación baja	
ICOMO	0.48	Contaminación media	

ICOSUS	0.37	Contaminación baja	
ICOTRO	1.4	Hipereutrófico	

Fuente: Delgado R., 2019.

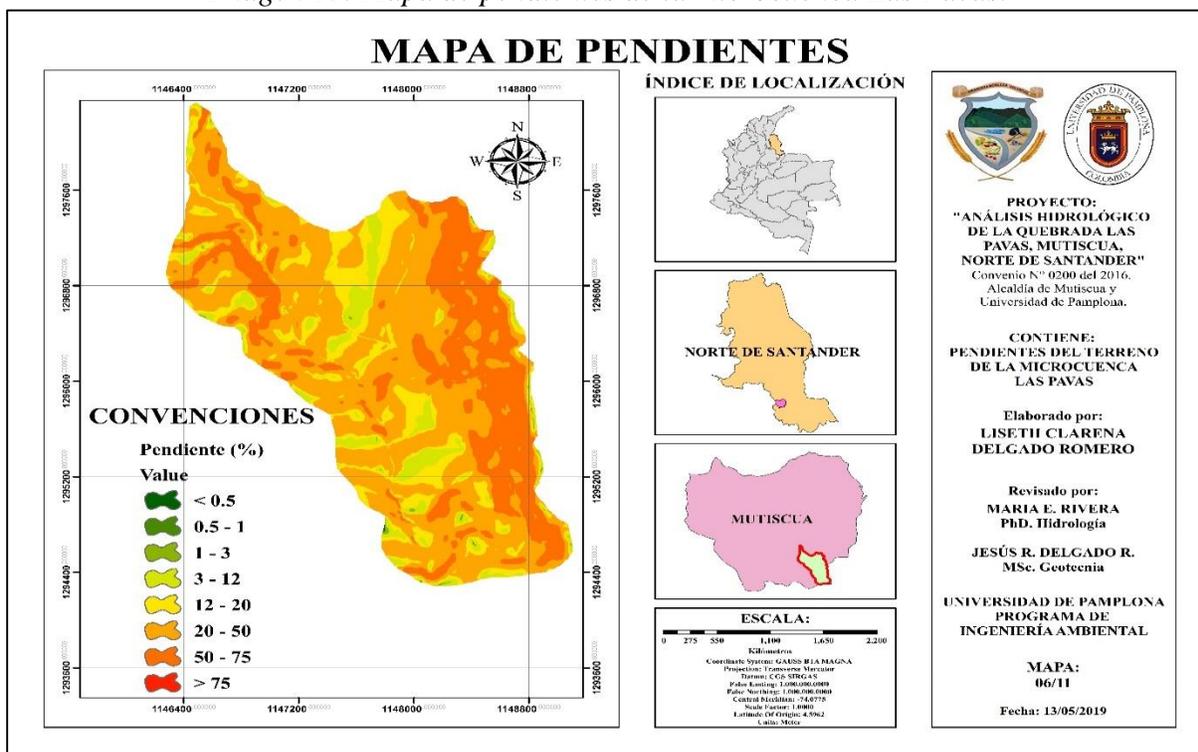
La Resolución 0865 (2004) propone cuatro fuentes principales de contaminación de las aguas superficiales, en este caso las aguas lluvias por arrastre de compuestos presentes en la atmósfera y el escurrimiento de aguas en zonas de producción agrícola y ganadera serían el origen de esta contaminación, primariamente.

8.3.4. Número de curva

La microcuenca Las Pavas está constituida por 6 unidades de suelo según lo publicado por el IGAC en su portal web. Todos ellos hacen parte de los suelos característicos del paisaje de montaña, los cuales están asociados a diferentes tipos de relieve denominados: espinazos, crestas homoclinales abruptas, crestones homoclinales, filas-vigas, lomas, glacís, vallecitos, todos ellos representados por fuertes pendientes, generalmente mayores del 75%. Los factores determinantes en la formación de estos suelos son básicamente el material parental, el clima y el relieve. En las geoformas de relieve quebrado y muy escarpado que tienden a ser dominantes en los pisos térmicos frío y medio, se han establecido pastos y la vegetación arbórea densa sólo se conserva donde la pluviosidad es muy alta. El modelado de estos relieves se ha originado por procesos erosivos de escurrimiento (IGAC, 2004).

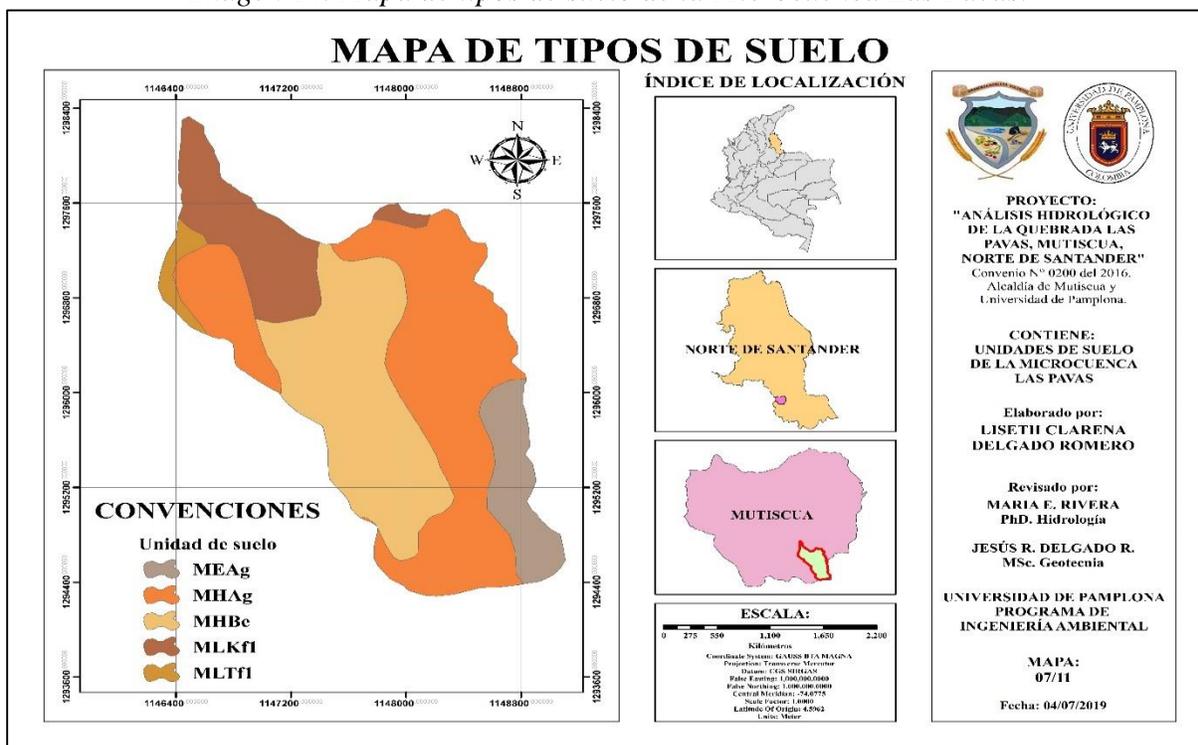
En el caso particular de la microcuenca Las Pavas, predominan las pendientes entre 20 y 75%, las cuales corresponden a inclinaciones muy fuertes a escarpadas según la clasificación planteada por la FAO (2009) y las observaciones realizadas en campo (ver Imagen 13), y concuerdan con relieves de paisaje de montaña formados a partir de rocas sedimentarias en su mayoría con afloramientos rocosos y suelos superficiales principalmente, descritos por el IGAC con base en el sistema taxonómico americano (Soil Survey Staff, 1996) para la zona de la cordillera oriental. Así mismo, las unidades de suelo contenidas en su extensión corresponden a: MEAg, MHAg, MHBe, MLKf1 y MLTf1 (ver Imagen 14), las cuales se explican a continuación con base en lo descrito por el IGAC (2004).

Imagen 13. Mapa de pendientes de la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Imagen 14. Mapa de tipos de suelo de la Microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

La zona más alta de la microcuenca (MEAg) corresponde a una unidad de suelo que se ubica en un clima extremadamente frío, húmedo a muy húmedo, es decir, alturas por encima de los 3600 msnm donde la temperatura media es inferior a los 8°C y la precipitación media anual oscila entre 1000 y 2000 mm. La litología de estos suelos está compuesta por areniscas, calizas y esquistos, principalmente, con procesos geomorfológicos de gelifracción y desprendimiento de roca, donde el relieve de cumbres alpinas prevalece. Son suelos poco fértiles, muy superficiales y bien drenados por su limitación de roca. Su clase textural es franco arcillosa, por lo que el grupo hidrológico asignado fue C.

La unidad con mayor extensión en la microcuenca es la MHAg, la cual comprende suelos que se localizan en regiones conocidas como páramo bajo en alturas que varían de los 3000 a los 3600 msnm. En este caso se encuentran relieves de crestas homoclinales abruptas con pendientes muy escarpadas (>75%), suelos de bien a excesivamente drenados, de muy superficiales a moderadamente profundos, conformados por rocas sedimentarias en su mayoría. Su fertilidad es baja. Su textura puede variar de franco a franco arcillosa, clasificada como parte del grupo hidrológico B por su moderada capacidad de infiltración.

El siguiente elemento es la asociación Lithic Dystropepts-Lithic Fulvudands (MHBe), localizada entre los 3000 y 3600 msnm, dentro del clima muy frío húmedo, cuya temperatura media es de 10°C y su relieve característico son lomas con topografía fuertemente ondulada. Los suelos tienen baja fertilidad por tener poca profundidad efectiva y son bien drenados, gracias a su textura franco arenosa (grupo hidrológico B).

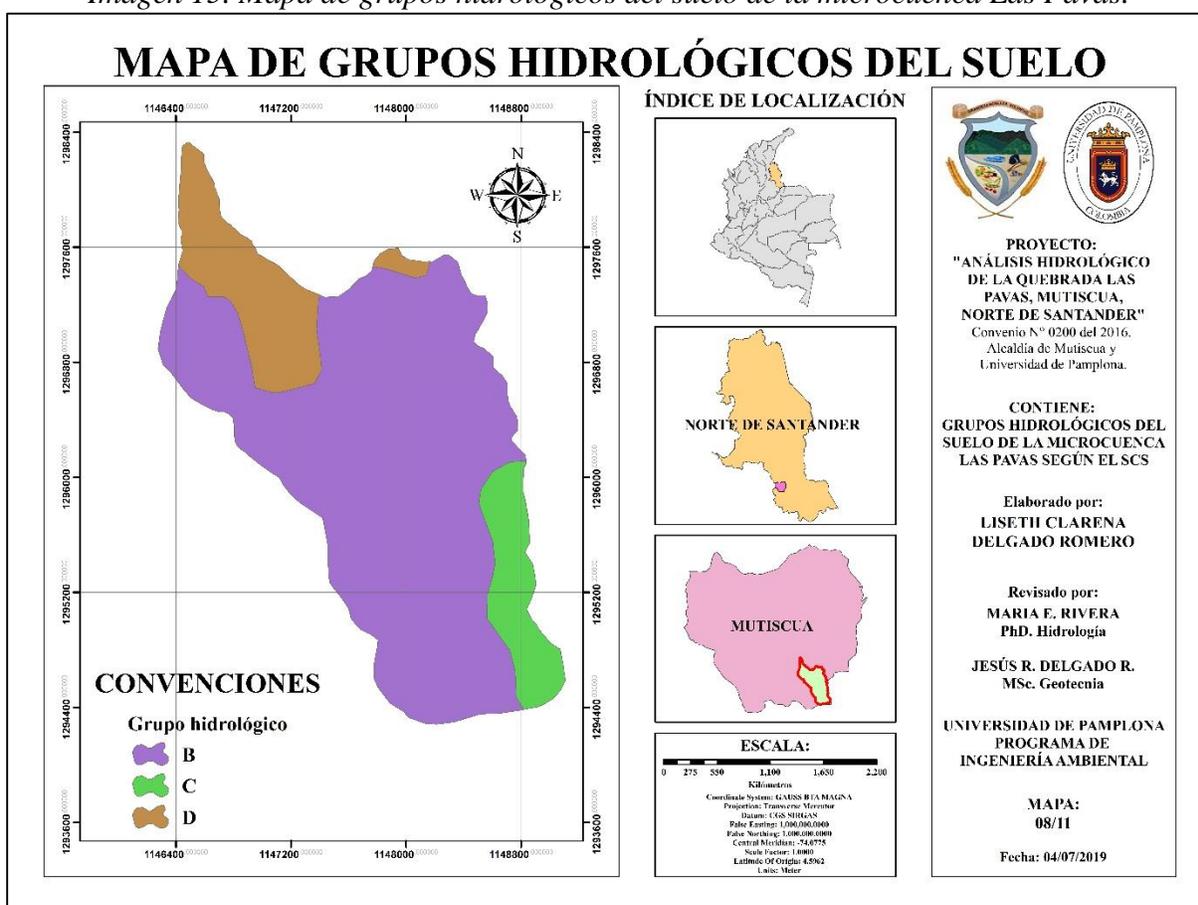
Finalmente, encontramos las unidades de suelo MLKf1 y MLTf1, que se pueden encontrar en altitudes entre los 2000 y 3000 msnm, con temperatura que varían entre los 12 y 18 °C. Para el caso de la consociación Typic Humitropepts (MLKf1), el relieve dominante son los crestones homoclinales que en su mayoría se han originado en rocas sedimentarias, con pendientes mayores del 50%, que están sujetas a movimientos en masa. Son suelos moderadamente profundos con texturas arcillosas en su mayoría (grupo hidrológico D). Estos suelos son altamente ácidos, con altos contenidos de carbón orgánico y calcio, haciendo que su fertilidad sea baja.

La unidad MLTf1 se desarrolló a partir de rocas metamórficas formando relieve de filas y vigas, con inclusiones de rocas ígneas y sedimentarias. Su topografía está compuesta por

pendientes mayores al 50%, con suelos profundos y bien drenados, baja fertilidad y texturas francas a franco arcillo arenosas que la incluyen dentro del grupo hidrológico B. Su composición química se basa en altos contenidos de carbón orgánico y alta saturación de aluminio. Además, tiene alta susceptibilidad a la erosión.

En la Imagen 15 se presentan los grupos hidrológicos asignados a cada unidad de suelo, según su clase textural, de acuerdo con lo establecido por el SCS (1972). Según su potencial hidrológico, la cuenca se compone de suelos tipo B en un 76.77%, suelos tipo C en un 8.91% y los tipo D ocupan un 14.32% del área total.

Imagen 15. Mapa de grupos hidrológicos del suelo de la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

En la microcuenca Las Pavas predominan los suelos tipo B, los cuales se caracterizan por ser medianamente profundos y drenados, con agregados de clase textural moderada a muy fina y capacidad de infiltración moderada. Gómez-Sanz y Roldan (2013) señalan que este tipo de suelos

presentan una profundidad efectiva superior a 1 m y buena porosidad estructural resultante del elevado contenido de materia orgánica en los horizontes superficiales.

La zona con mayor potencial para generar escorrentía según sus propiedades hidráulicas se encuentra en la parte baja de la microcuenca, compuesta por texturas en su mayoría arcillosas correspondientes a suelos tipo D. La infiltración en esta clase de suelo se dificulta por la reducida macroporosidad en su horizonte más superficial o por su poca profundidad efectiva (< 25cm). Gómez-Sanz y Roldan (2013) describen los rasgos propios de los suelos tipo C, presentes en menor medida dentro de la zona de estudio, los cuales tienen potencial medio de producir escorrentía y tasa de infiltración baja por su reducido contenido de compuestos orgánicos o por la presencia de materiales litológicos de textura fina.

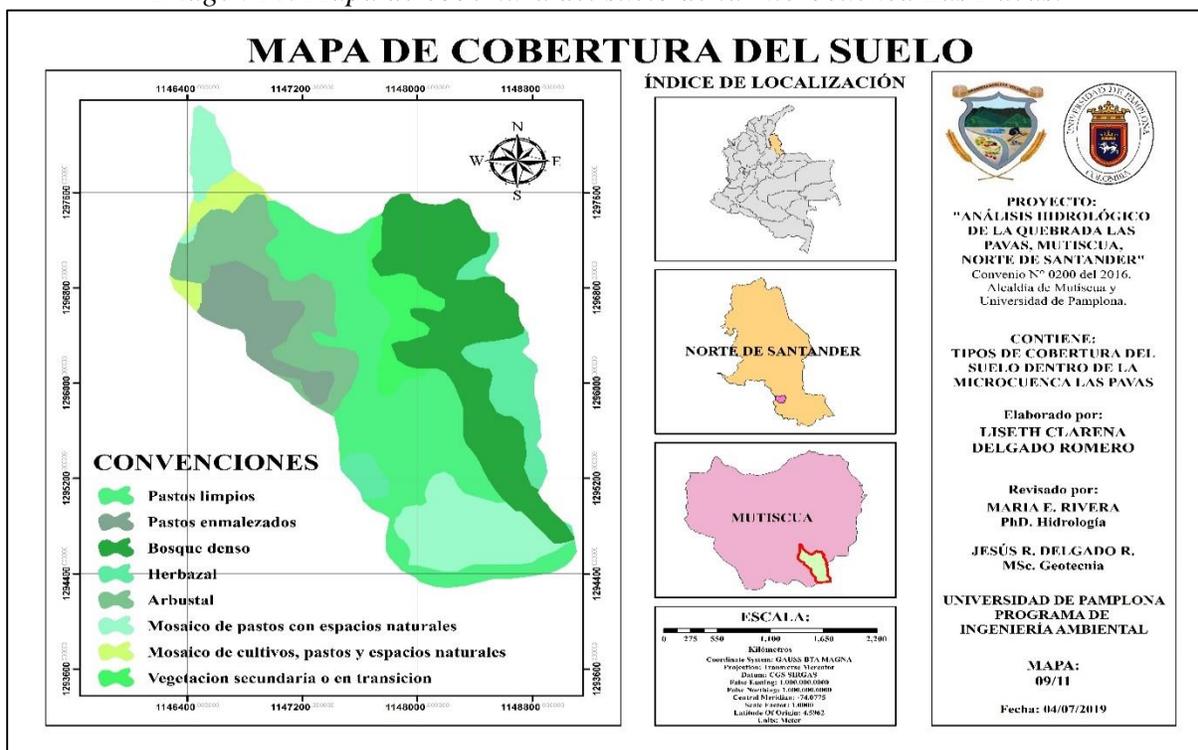
Es importante añadir que uno de los factores más incidentes para la generación de escorrentía dentro de la microcuenca son las pendientes, que como se mencionó anteriormente, varían de muy fuertes a escarpadas, hecho que incrementa la susceptibilidad de la quebrada a las crecientes repentinas bajo condiciones de lluvia intensa. Además, el factor de cobertura del suelo también juega un papel significativo en el escurrimiento.

El mapa de coberturas (ver Imagen 16) muestra que aproximadamente el 44% de la superficie total de la microcuenca está cubierta por mosaicos de pastos y espacios naturales con algunas áreas de cultivos y diferentes tipos de vegetación no intervenidas o poco transformadas. El 23% son bosques naturales bastante densos, los cuales son predominantes en la zona oriental de la parte media y alta de la microcuenca. El 33% restante está compuesto por elementos arbustivos, vegetación secundaria o en transición y herbazales, típicas de zonas con poca o ninguna intervención antrópica de algún tipo.

Los cultivos en la parte baja de la microcuenca, representados en su mayoría por plantaciones de hortalizas, corresponden al área con mayor intervención antrópica ya que allí se encuentran los pobladores rurales dedicados a las actividades agropecuarias. En el mapa de coberturas, estos se ubican dentro de las zonas conformadas por mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales que se encuentran relativamente cerca a la desembocadura de la quebrada.

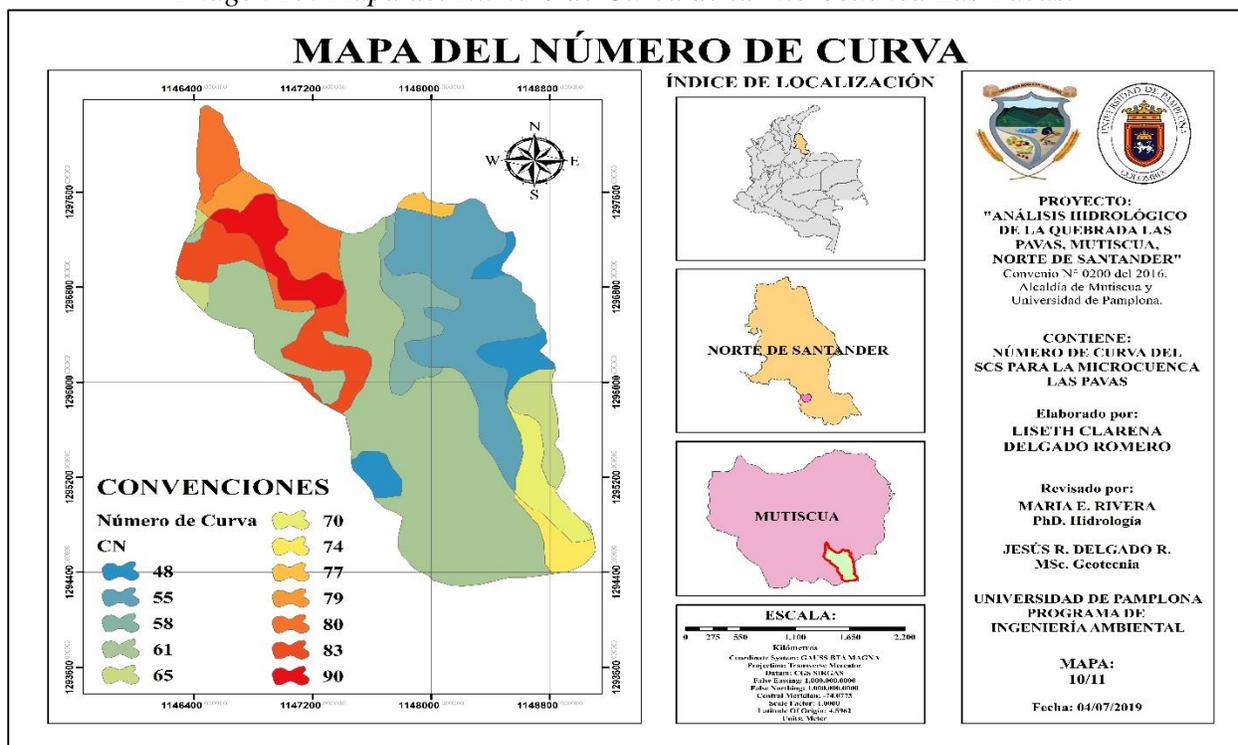
De acuerdo con la metodología aplicada, se obtuvieron los CN mostrados en la Imagen 17, de los cuales se obtuvo un CN ponderado para toda la microcuenca.

Imagen 16. Mapa de cobertura del suelo de la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Imagen 17. Mapa del Número de Curva de la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

El Número de Curva (CN) promedio calculado para la zona de estudio es 64.71, el cual indica un potencial moderado de escurrimiento dentro de la cuenca, teniendo en cuenta que allí prevalecen los suelos tipo B, dentro de los que se pueden encontrar texturas franco-arcillosas-limosas a franco limosas que tienen una infiltración moderada cuando están muy húmedos. De igual manera, los suelos C y D tienen un mayor escurrimiento debido a su menor permeabilidad. La diferencia máxima potencial (S) tomó un valor de 138.51 mm.

De acuerdo con los valores medios mensuales multianuales obtenidos de la estación CALDERA LA del IDEAM, se calculó un valor de precipitación anual para la microcuenca de 1247.30 mm, el cual corresponde a P en la Ecuación 17 citada en el apartado 6.4.1.3, obteniéndose el cálculo de la esorrentía directa (Q) para la microcuenca Las Pavas, cuyo valor fue de 1095.21 mm/año, que en unidades de caudal equivalen a 0.1927 m³/s o a 6.07844183 millones de m³/año.

8.3.5. Oferta hídrica

El valor conseguido anteriormente corresponde a la oferta hídrica total de la microcuenca en estudio, la cual, según la Res. 0865 (2004), debe ser sometida a dos reducciones: por calidad de agua y por caudal ecológico. Se adoptó normativamente un factor de 25% de disminución de la oferta total para cada factor mencionado, lo que resulta en una disminución del 50%. Entonces la oferta hídrica neta sería de 3.09914481 millones de m³/año, la cual es menor comparada con la oferta presentada para esta zona en el PUEAA municipal (2017). Esto puede deberse a la época del año en que fueron tomados los datos.

8.3.6. Demanda hídrica

El caudal captado de la quebrada por parte del acueducto municipal corresponde a 0.003 m³/s. Por otra parte, los usuarios rurales realizan las captaciones por medio de mangueras ubicadas sobre el cauce principal (ver Fotografía 16 e Imagen 18) recogiendo un total de 2.54.E-04 m³/s (6”), tal como se muestra en el Gráfico 8. Para efectos de esta investigación se considera un factor

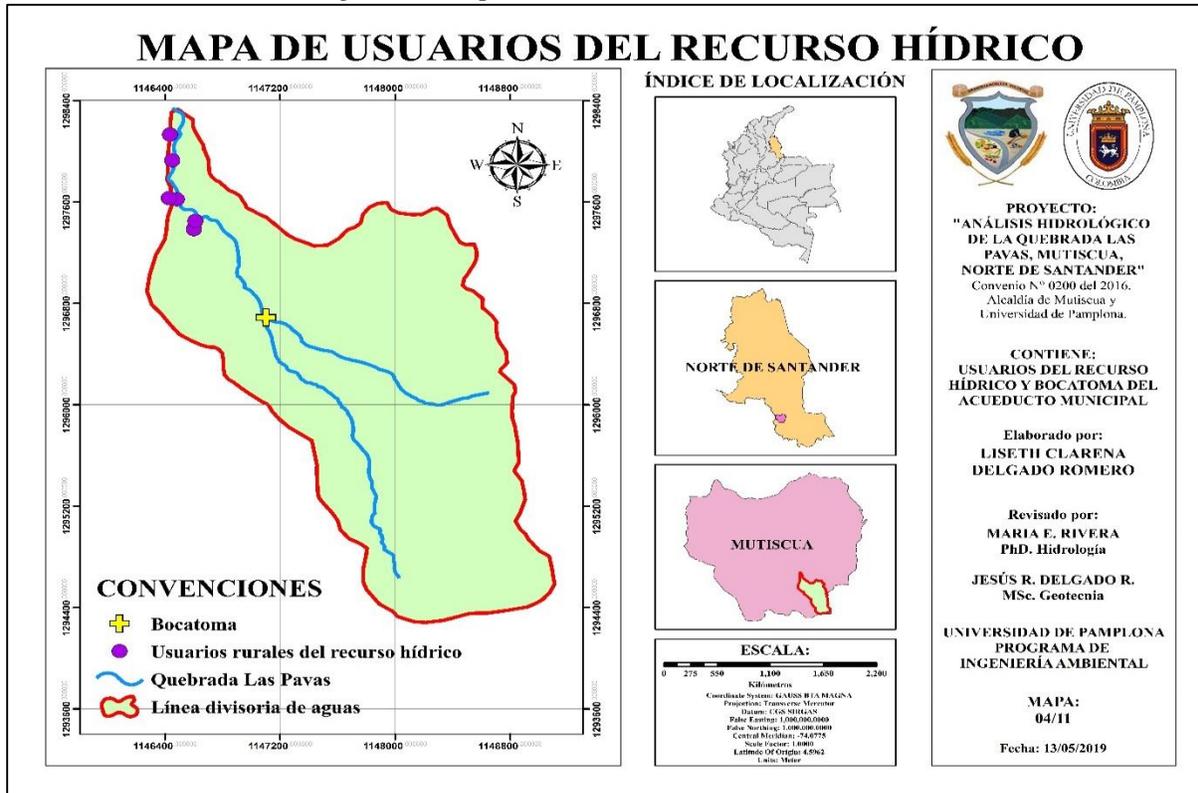
multiplicador de 1.3 de acuerdo con el literal B.2.8.2 del RAS para demanda de agua por suscriptores. De acuerdo a los datos recopilados en las entrevistas con los usuarios, la utilización dada al recurso es principalmente para riego y luego para actividades piscícolas y pecuarias.

Fotografía 16. Captaciones de agua de la Q. Las Pavas.



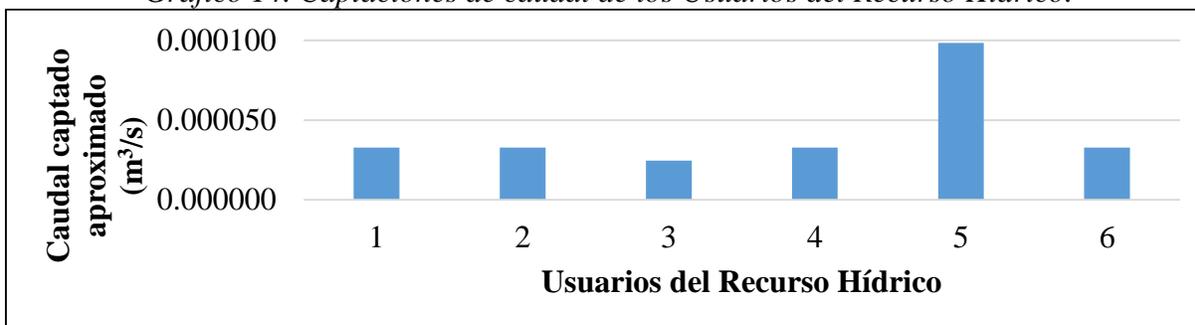
Fuente: Delgado R., 2019.

Imagen 18. Mapa de usuarios del recurso hídrico.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Gráfico 14. Captaciones de caudal de los Usuarios del Recurso Hídrico.



Fuente: Delgado R., 2019.

Los caudales captados varían de 0.025 a 0.098 l/s, de los cuales el mayor valor corresponde a la Alevinera ubicada sobre el margen de la quebrada. Así pues la demanda hídrica de la zona se establece en 0.105021167 millones de m³/año.

8.4. ÍNDICE DE ESCASEZ

El resultado obtenido para el índice de escasez fue de $Ie = 3.46\%$, el cual se clasifica como bajo, de acuerdo con la metodología planteada en Osorio y Duque (2014). Esto quiere decir que la presión antrópica ejercida sobre el recurso hídrico en la microcuenca no tiene mayores repercusiones en el ecosistema de la zona y su manejo y regulación es relativamente bueno. Al hallar el Índice del Uso del Agua (IUA) manejado por el IDEAM en el ENA (2014) para el análisis del recurso hídrico por presiones antrópicas, este resulta como categoría baja, ratificando que la presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible ($IUA = 4.41\%$).

CONCLUSIONES

La microcuenca Las Pavas presenta características propias de cuencas de alta montaña, en las cuales la respuesta hidrológica tiende a ser rápida y repentina bajo condiciones de altas precipitaciones, debido a factores como pendientes del terreno, condición hidrológica del suelo cuya permeabilidad es moderada, composición geológica del mismo y comportamiento pluviométrico de la zona. De acuerdo con sus rasgos físicos y morfométricos, es altamente susceptible a las avenidas torrenciales por su forma alargada según Strahler (1957) y relieve accidentado predominante. Se considera que posee una buena cobertura del suelo en toda su extensión, aunque en la parte media-baja existen zonas deforestadas.

De igual manera, en temporada de lluvias el cauce se ve afectado por el arrastre de sedimentos, aumentando los niveles de turbiedad, transportando grandes bloques y modificando algunas secciones del cauce, socavación lateral y de fondo que terminan ocasionando fenómenos de remoción en masa en ciertas zonas de la microcuenca.

Por otra parte, la presencia de depósitos fluviotorrenciales y coluviales con bloques de calizas y lodolitas orgánicas que reaccionan con el agua y aportan concentraciones de carbonatos y óxidos de hierro altera la calidad del recurso. El flujo contiene concentraciones importantes de calcio y fósforo que demandan un tratamiento apropiado para su eliminación. Además, en época de estiaje también es necesario considerar el tratamiento adecuado para controlar la población de algas verdes filamentosas.

La presión ejercida sobre el recurso hídrico es baja, ya que la demanda es muy poca comparada con la oferta ofrecida. Además, la poca intervención antropogénica en la parte alta de la microcuenca contribuye a la conservación de la misma. El escaso caudal captado a lo largo de su cauce permite que las condiciones ecológicas mantengan su equilibrio natural. La reducción del 25% de la oferta por calidad de agua es generalizada, puesto que la metodología no considera la condición particular de la calidad del agua de la zona.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta las limitaciones en el desarrollo de esta investigación y pensando en la importancia de la conservación de esta fuente hídrica para garantizar el bienestar de la comunidad, se recomienda:

- ❖ A la alcaldía municipal como máxima autoridad, reforzar los programas de limpieza, reforestación y conservación de rondas hídricas, de uso eficiente y ahorro del agua y de educación ambiental planteados en el PUEAA (2017). Esto con el propósito de mantener e incluso mejorar las condiciones ambientales de la zona de estudio y de impulsar la cultura del agua en el municipio. Así mismo, para prevenir situaciones indeseables como escasez, contaminación del recurso, entre otros.
- ❖ A la Unidad de Servicios Públicos Domiciliarios, ampliar la cantidad y frecuencia de los muestreos y los parámetros tenidos en cuenta, con el fin de profundizar el conocimiento acerca de los compuestos y microorganismos presentes en el agua y así optimizar su tratamiento, para mejorar la calidad con que el recurso llega a los hogares.
- ❖ A la autoridad competente estudios más minuciosos que también contemplen el recurso hídrico subterráneo y abarquen el aspecto agrícola para un mejor manejo del líquido vital. Así mismo, ahondar en criterios como cobertura vegetal y geología, que contengan la zona local y detalladamente.
- ❖ A los futuros investigadores, la revisión cuidadosa de las características y procesos de erosión, socavación y transporte de sedimentos en cuencas de alta montaña, en la que estos tienen gran incidencia.

En cuanto a los datos recopilados en esta investigación son significativos para el periodo de estudio y representan un acercamiento al comportamiento de la zona de estudio en condiciones reales, pero estas pueden variar de un lapso de tiempo a otro.

BIBLIOGRAFÍA

- AELS. (2017). *ESPUMAS ENDÓGENAS*. Recuperado el 25 de Julio de 2019, de La formación de espumas en lagos naturales: <https://aulaestudiolagosanabria.info/espumas-endogenas/>
- Aguilar Martínez, A. A. (2007). *MANUAL BASICO PARA EL ANALISIS DE UNA CUENCA HIDROGRAFICA*. Recuperado el 13 de Marzo de 2019, de https://n2t1.files.wordpress.com/2007/10/manual_basico_analisis_cuenca.pdf
- Alcaldía Municipal de Mutiscua. (2002). *Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT)*. Recuperado el 5 de Marzo de 2019, de Sistema de Información Subregional Norte de Santander: <http://www.sisubregionalns.gov.co:8080/sis/index.php/pot-s-5/eot-mutiscua>
- Alcaldía Municipal de Mutiscua. (2012). *Plan de Desarrollo Municipal de Mutiscua 2012-2015*. Recuperado el 5 de Marzo de 2019, de <http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/mutiscuanortedesantanderpd20122015.pdf>
- Alcaldía Municipal de Mutiscua. (2015). *Plan de Acción Territorial Municipal*. Recuperado el 5 de Marzo de 2019, de <http://cdim.esap.edu.co/bancomedios/documentos%20pdf/mutiscuanortedesantanderplandeacciondesplazados2012-2015.pdf>
- Barbero García, I. (Julio de 2014). *Estudio del comportamiento hidrológico de una pequeña cuenca forestal*. Recuperado el 4 de Junio de 2019, de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/49260/TFG_INES_BARBERO.pdf?sequence=1
- Barreto Sáenz, P. (2 de Diciembre de 2009). *PROCEDIMIENTO DE MUESTREO DE AGUA SUPERFICIAL*. (F. D. MAYOLO”, Ed.) Recuperado el 13 de Marzo de 2019, de https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/protocols/PROCEDIMIENTO_DE_MUESTREO_DE_AGUA_SUPERFICIAL.pdf

Bravo Guzmán , R., García Luna, N., Morales Alejandro , V. M., & Ramírez Granados , A. (30 de Mayo de 2012). *Análisis granulométrico*.

CABRA SOTO, A., & CORRADINE MOYANO , M. F. (2014). *ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO POR LOS MÉTODOS 7Q10, Q 95% Y LOS FACTORES DE REDUCCIÓN DEL 25% EN EL RÍO OCOA, A PARTIR DE LA GENERACIÓN DE CAUDALES DIARIOS UTILIZANDO EL MODELO AGREGADO DE TANQUES* . Recuperado el 19 de Julio de 2019, de https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2100/1/Estimaci%C3%B3n_de_caudal%20ecol%C3%B3gico.pdf

Cardona Martínez, G., Gaviria Arango, A. F., Piedrahíta De Salazar, G. A., & Salazar Piedrahíta, A. M. (2016). Servicios Públicos Domiciliarios. *Revista de la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas*, 0(103), 73 - 124. Recuperado el 24 de Febrero de 2019, de <https://revistas.upb.edu.co/index.php/derecho/article/view/6701/6165>

Carvajal Escobar, Y., Reyes Trujillo, A., & Barroso, F. U. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas* (Primera ed.). Programa Editorial Universidad del Valle.

Castillo Vega, C. I. (2005). *Análisis de caudales máximos en cuencas experimentales para distintas condiciones de cobertura arbórea, Décima Región, Chile*. Recuperado el 8 de Marzo de 2019, de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/fifc352a/doc/fifc352a.pdf>

Chereque Morán, W. (1989). *Hidrología : para estudiantes de ingeniería civil*. Recuperado el 17 de Julio de 2019, de http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28689/hidrologia_cap10.pdf?sequence=31&isAllowed=y

Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada* (Primera ed.). (M. E. Suárez R., Ed., & J. G. Saldarriaga, Trad.) Santa Fe de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill. Recuperado el 13 de Marzo de 2019

Confederación Hidrográfica del Segura. (Diciembre de 2013). *PLAN HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL SEGURA 2009/2015*. Recuperado el 9 de Marzo de 2019, de

IMPLANTACIÓN DEL RÉGIMEN DE CAUDALES AMBIENTALES:
https://www.chsegura.es/export/descargas/planificacionydma/planificacion/docsdescarga/Anejo_05_Regimen_Caudales_Ambientales.pdf

Consuegra Martínez, C. (2013). *SÍNTESIS METODOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS (Q_e), RESULTADOS Y POSIBLES CONSECUENCIAS*. Recuperado el 19 de Julio de 2019, de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/75/1/Consuegra%20Mart%C3%ADnez%20Claudio%20S.%20M%20-%202013.pdf>

CORQUINDÍO-UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO. (2011). *ESTIMACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS MEDIANTE MÉTODOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS EN LA UMC RÍO QUINDÍO*. Recuperado el 19 de Julio de 2019, de https://www.crq.gov.co/Documentos/Estimacion_Caudales_Ecologicos_UMC_Rio_Quindio.pdf

Cruz San Julián, J., & Tames Urdiain, P. (1983). Análisis Cuantitativo de la Red de Drenaje de la Cuenca del Río Deba. *Lurralde*(6), 95-117.

Díaz Carvajal, Á., & Mercado Fernández, T. (21 de Marzo de 2017). *Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG*. Recuperado el 13 de Junio de 2019, de <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v35n2/2145-9371-inde-35-02-00452.pdf>

Díaz Suescún, L. L., & Alarcon Africano, J. G. (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*. Recuperado el 9 de Marzo de 2019, de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15989/1/Proyecto%20Final.pdf>

DNP. (2019). *TerriData*. Recuperado el 5 de Marzo de 2019, de Mutiscua, Norte de Santander: <https://terridata.dnp.gov.co/#/perfiles/54480>

Duque Escobar, G., & Escobar Potes, C. E. (2002). *Mecánica de los suelos*.

- ESA. (2012). *EL PROGRAMA COPÉRNICO*. Recuperado el 29 de Mayo de 2019, de https://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/El_programa_Copernico
- ESA. (2012). *SENTINEL 2*. Recuperado el 29 de Mayo de 2019, de https://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/SENTINEL_2
- ESRI. (2016). *¿Qué es ArcMap?* Recuperado el 29 de Mayo de 2019, de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/main/map/what-is-arcmap-.htm>
- ESRI. (2019). *Introducción a ArcGIS*. (ESRI) Recuperado el 29 de Mayo de 2019, de ArcGIS Resources: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- FAO. (2009). *Guía para la Descripción de Suelos*. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN, Roma.
- FAO/PNUMA. (1999). *Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura*. Recuperado el Marzo 6 de 2019, de Capítulo 2. Implicaciones de diferentes definiciones y problemas genéricos: http://www.grida.no/climate/ipcc/land_use/045.htm
- Flores Cabanillas, G. V., Flores Cabanillas, M. I., & Lopez Huachhua, Z. (2016). “*MÉTODO DE ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA RED DE DRENAJE DE CUENCAS*”. Recuperado el 26 de Abril de 2019, de <https://es.slideshare.net/zulylopezhuachhua/analisis-morfometrico-de-una-cuenca-2>
- Franquet Bernis, J. M. (2019). *EL CAUDAL MÍNIMO MEDIOAMBIENTAL DEL TRAMO INFERIOR DEL RÍO EBRO*. Recuperado el 9 de Junio de 2019, de Método del correntómetro o molinete: <http://www.eumed.net/libros-gratis/2009b/564/Metodo%20del%20correntometro%20o%20molinete.htm>
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G. A., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (5 de Enero de 2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, 143-158. Recuperado el 13 de Marzo de 2019, de <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/476>

Gómez-Sanz, V., & Roldan Soriano, M. (Junio de 2013). *Asignación de grupo hidrológico del suelo a partir de clasificaciones edáficas de base morfométrica*. Recuperado el 13 de Julio de 2019, de http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/view/14541/14384

Gonzalez Espinosa , F. M., & Ortegon Carreño, J. D. (2016). *CÁLCULO DEL CAUDAL DE LA CUENCA HIDROLÓGICA DE LA QUEBRADA GUAGUAQUI, DEL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ, POR EL MÉTODO RACIONAL*. Recuperado el 9 de Marzo de 2019, de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3184/2/C%3%81LCULO%20DEL%20CAUDAL%20DE%20LA%20CUENCA%20HIDROL%3%93GICA%20DE%20LA%20QUEBRADA%20GUAGUAQUI%2C%20DEL%20DEPARTAMENTO%20DE%20BOYAC%3%81%2C%20POR%20EL%20M%3%89TODO%20RACIONAL.pdf>

IDEAM. (2011). *Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00)*. Recuperado el 29 de Mayo de 2019, de Índice de calidad del agua en corrientes superficiales (ICA): http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_FI.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031

IDEAM. (2012). *CAMBIO CLIMÁTICO MÁS PROBABLE PARA COLOMBIA A LO LARGO DEL SIGLO XXI RESPECTO AL CLIMA PRESENTE*. Subdirección de Meteorología – IDEAM, Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático, Bogotá D.C. Recuperado el 6 de Marzo de 2019, de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Escenarios+Cambio+Climatico+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango+y+Dorado%29.pdf/fe5d64fb-3a82-4909-a861-7b783d0691cb>

IDEAM. (2014). *AGUAS SUPERFICIALES*. Recuperado el 19 de Junio de 2019, de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/aguas-superficiales>

IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua - ENA*. Bogotá D.C. Recuperado el 29 de Abril de 2019, de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf

- IDEAM. (2018). *Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua ENA 2018*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Bogotá D.C. Recuperado el 14 de Marzo de 2019
- IGAC. (2004). *ESTUDIO GENERAL DE SUELOS Y ZONIFICACIÓN DE TIERRAS DEPARTAMENTO DE NORTE DE SANTANDER*. Bogotá D.C. Recuperado el 19 de Mayo de 2019
- Jaramillo, A., & Chaves, B. (Enero de 2000). DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA ANALIZADA MEDIANTE CONGLOMERACIÓN ESTADÍSTICA. *Cenicafé*, 54(2), 102-113. Recuperado el 6 de Marzo de 2019, de <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc051%2802%29102-113.pdf>
- Jimenez Cortes, C. J. (2017). *CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA Y DIAGNÓSTICO DEL RECURSO HÍDRICO DEL RIO LINDO EN EL MUNICIPIO DE VIOTÁ, CUNDINAMARCA*. Recuperado el 13 de Marzo de 2019, de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16440/JimenezCortesCarolJasmin.2017.pdf;jsessionid=BD42ABAA7F5A7FC0716AE825A8133A39?sequence=1>
- Lavao Pastrana, S. A., & Corredor Rivera, J. L. (Julio de 2014). *APLICACIÓN DE LA TEORÍA DEL NÚMERO DE CURVA (CN) A UNA CUENCA DE MONTAÑA. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO MURCA, MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*. Recuperado el 9 de Marzo de 2019, de DIPLOMADO EN SIG Y SENSORES REMOTOS APLICADOS A RECURSOS HÍDRICOS: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13331/Trabajo%20de%20Grado%20Sergio%20Lavao.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Leal Rojas, J. J. (2016). *MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL BOBO: MODELAMIENTO HIDROLÓGICO Y OPCIONES DE MANEJO USANDO EL SOFTWARE MIKE*. UNIVERSIDAD DE PAMPLONA, Pamplona. Recuperado el 5 de Julio de 2019
- Lux Cardona, B. (6 de Mayo de 2016). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*. Recuperado el 13 de Marzo de 2019, de

<http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20Cuencas%20Hidrogr%C3%A1ficas.pdf>

Marín Uribe , G. (Octubre de 2002). *1.4.3 Patrones de drenaje y pendientes*. (Escuela Colombiana de Ingeniería. Centro de Estudios Hidráulicos y Ambientales.)

Medina, F., & Galván, M. (Julio de 2007). *Serie estudios estadísticos y prospectivos*. Recuperado el 18 de Julio de 2019, de Imputación de datos: teoría y práctica: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/4755/S0700590_es.pdf

Moreno Grande, F. A., & Esquivel Jimenez, J. R. (2015). *ESTUDIO MORFOMETRICO DE LA CUENCA DEL RIO AZUL, AFLUENTE DEL RIO CALIMA, DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA*.

Muñoz Carpena, R. (16 de Febrero de 2014). *Hidrología Agrícola*. Recuperado el 22 de Abril de 2019, de PARTE I: INTRODUCCION A LA HIDROLOGÍA: http://roa.ult.edu.cu/bitstream/123456789/2280/1/parte_1.pdf

OMM. (2011). *Guía de Prácticas Hidrológicas*. Recuperado el 28 de Mayo de 2019, de http://www.whycos.org/hwrrp/guide/index_es.php

Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). *¿Qué es una cuenca hidrológica?* Recuperado el 6 de Marzo de 2019, de Cartilla Técnica Aguas Subterráneas-Acuíferos: https://www.academia.edu/10327433/QU%C3%89_ES_CUENCA_HIDR%C3%93LOGICA_QU%C3%89_ES_CUENCA_HIDR%C3%93LOGICA

Osorio Zuluaga, G. A., & Duque Méndez, N. D. (2014). *DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES DE LINEA BASE AMBIENTAL DE CALDAS*. Recuperado el 2 de Mayo de 2019, de HOJAS METODOLÓGICAS: <http://bdigital.unal.edu.co/43049/18/9789587619980.anexo.pdf>

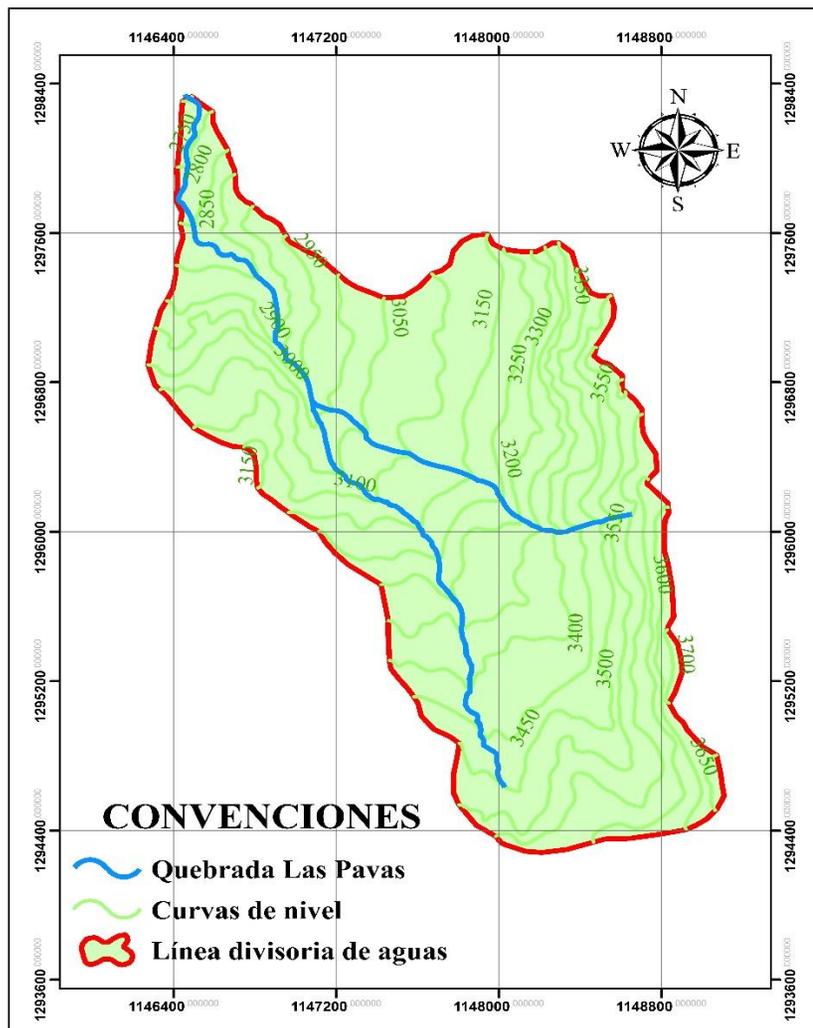
Pantoja Valencia, N. (2017). *Estimación de caudal ecológico mediante método hidrológicos, hidráulicos y ecológicos en la quebrada El Conejo (Mocoa-Putumayo)*. Recuperado el 19 de Julio de 2019, de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/21157?locale-attribute=es>

- Peña Urrea, C. C. (2015). *Estudio Morfométrico y Estimación de caudal de creciente de la quebrada La Caya hasta la desembocadura en río San Pablín del municipio de Guicán-Boyacá utilizando el método racional*. Recuperado el 13 de Marzo de 2019, de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/8331/1/Pe%C3%B1aUrreaCristianCamilo2015.pdf>
- Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (Diciembre de 1997). CUATRO ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN PARA CARACTERIZACIÓN DE AGUAS CONTINENTALES. FORMULACIONES Y APLICACIÓN. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, I(3), 135-153. Recuperado el 2 de Mayo de 2019, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831997000100009&lng=en&tlng=es
- Salazar Carmona, D. A. (25 de Noviembre de 2016). *Procedimiento para calcular la oferta hídrica superficial por método relación lluvia-escorrentía, caso de estudio cuenca de la quebrada Apauta para el año 2015*. Recuperado el 15 de Junio de 2019, de <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/15513>
- Salazar Oliveros, J. C. (2016). *UNA METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES (CDC) EN CUENCAS NO INSTRUMENTADAS. CASO DE APLICACIÓN PARA COLOMBIA EN LOS DEPARTAMENTOS DE SANTANDER Y NORTE DE SANTANDER*. Recuperado el 14 de Marzo de 2019, de <http://bdigital.unal.edu.co/56437/20/JuanC.SalazarOliveros.2016.pdf>
- Sánchez San Román, F. J. (2004). *Precipitaciones*. Recuperado el 14 de Marzo de 2019, de <http://hidrologia.usal.es/temas/Precipitaciones.pdf>
- Secretaría de agua Potable y Saneamiento Básico. (2014). *Informe Diagnóstico del Municipio de Mutiscua*. Gobernación de Norte de Santander, Mutiscua. Recuperado el 21 de Febrero de 2019, de https://www.pdanortedesantander.com/wp-content/uploads/lineabase2014/dg-PT-14-INFORME_DIAGNOSTICO_MUTISCUA.pdf
- Secretaría de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2016). *ACTUALIZACIÓN DEL DIAGNÓSTICO DE LÍNEA BASE E INDICADORES DEL SECTOR DE AGUA POTABLE*

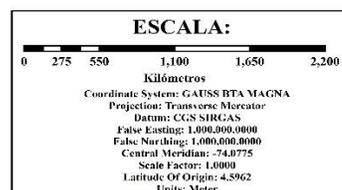
- Y SANEAMIENTO BÁSICO DEL SECTOR URBANO Y RURAL PARA LOS 40 MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE NORTE DE SANTANDER. INFORME DIAGNÓSTICO - MUNICIPIO DE MUTISCUA.* Gobernación de Norte de Santander, Mutiscua. Recuperado el 9 de Mayo de 2019, de https://www.pdanortedesantander.com/wp-content/uploads/lineabase2015/dg-PT-24-INFORME_MUTISCUA.pdf
- Suarez Gamboa, N. Y. (2016). *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL RÍO LA PLATA, MUTISCUA, NORTE DE SANTANDER – ZONA DE INFLUENCIA DE LA CABECERA MUNICIPAL.* UNIVERSIDAD DE PAMPLONA, Pamplona. Recuperado el 13 de Marzo de 2019
- Vásquez Rangel, C. A., Herrera Lopez, D. M., & Gutierrez Rey, Y. P. (2014). *CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA TATAMACO, DEL MUNICIPIO VILLAVIEJA DEL DEPARTAMENTO DEL HUILA, MEDIANTE EL USO DE LA HERRAMIENTA HEC-GEOHMS .* Recuperado el 13 de Marzo de 2019, de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1719/2/DOCUMENTO%20FINAL%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Vélez Upegui, J. J., & Botero Gutiérrez, A. (2011). ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y TIEMPO DE REZAGO EN LA CUENCA EXPERIMENTAL URBANA DE LA QUEBRADA SAN LUIS, MANIZALES. *DYNA*, 78(165), 58-71. Recuperado el 13 de Marzo de 2019, de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25640/39138>
- Villón Béjar, M. (2006). *Hidrología Estadística.* (E. Villón, Ed.) Recuperado el 17 de Julio de 2019, de <http://infocivilweb.blogspot.com/2019/01/hidrologia-estadistica-maximo-villon.html>
- Zouiten, H. (2012). *Análisis Mediante Modelado Avanzado de Procesos de Eutrofización en Lagunas Litorales: Aplicación a Masas de Agua Atlánticas y Mediterráneas.* Recuperado el 19 de Julio de 2019, de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/96870/TesisHZ.pdf?sequence=1>

Anexo 4. Ubicación geográfica de la zona de estudio

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO



ÍNDICE DE LOCALIZACIÓN



PROYECTO:
"ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA QUEBRADA LAS PAVAS, MUTISCUA, NORTE DE SANTANDER"
 Convenio N° 0200 del 2016.
 Alcaldía de Mutiscua y Universidad de Pamplona.

CONTIENE:
UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA QUEBRADA LAS PAVAS (MUTISCUA)

Elaborado por:
LISETH CLARENA DELGADO ROMERO

Revisado por:
MARIA E. RIVERA Ph.D. Hidrología

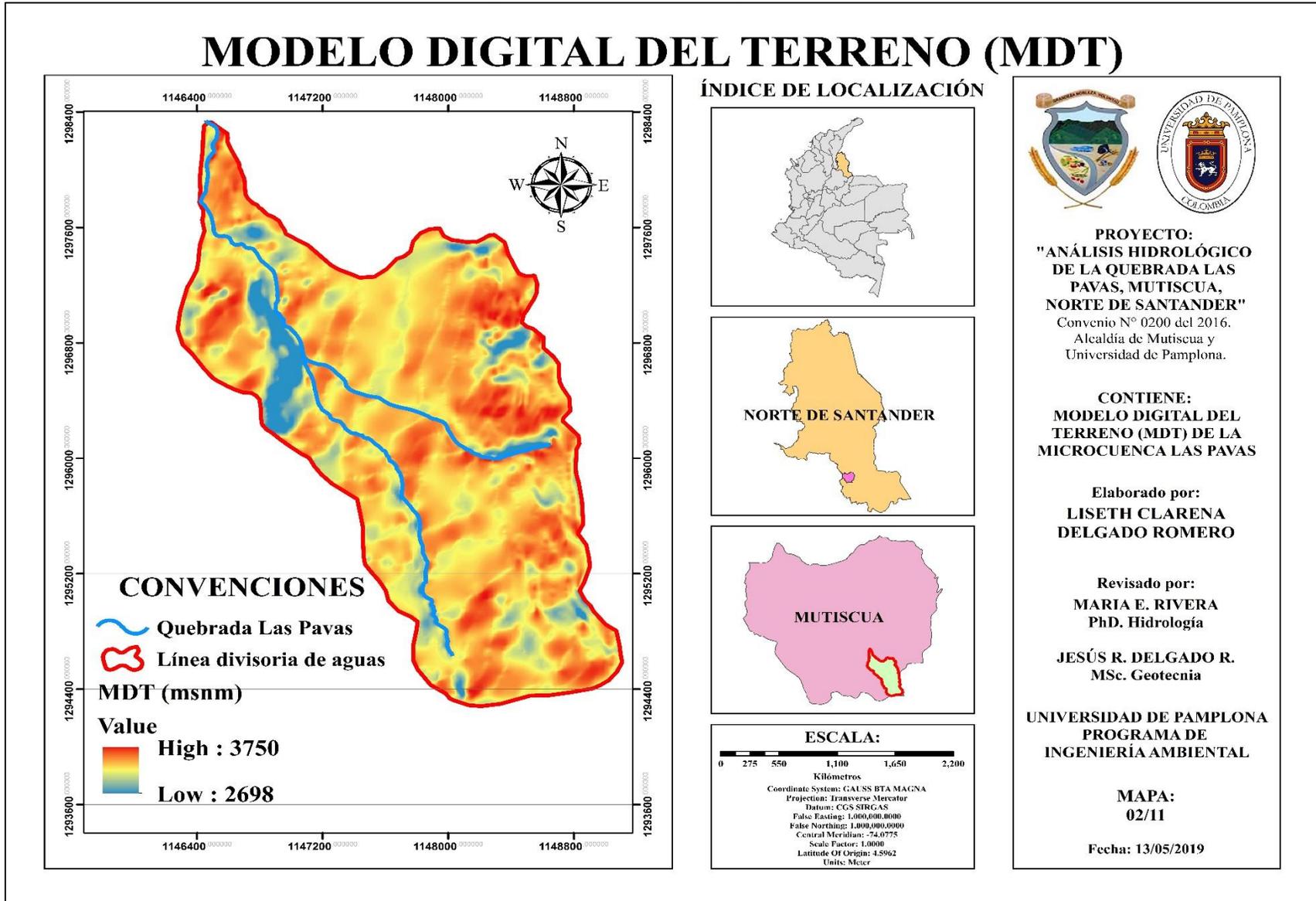
JESÚS R. DELGADO R. MSc. Geotecnia

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

MAPA: 01/11

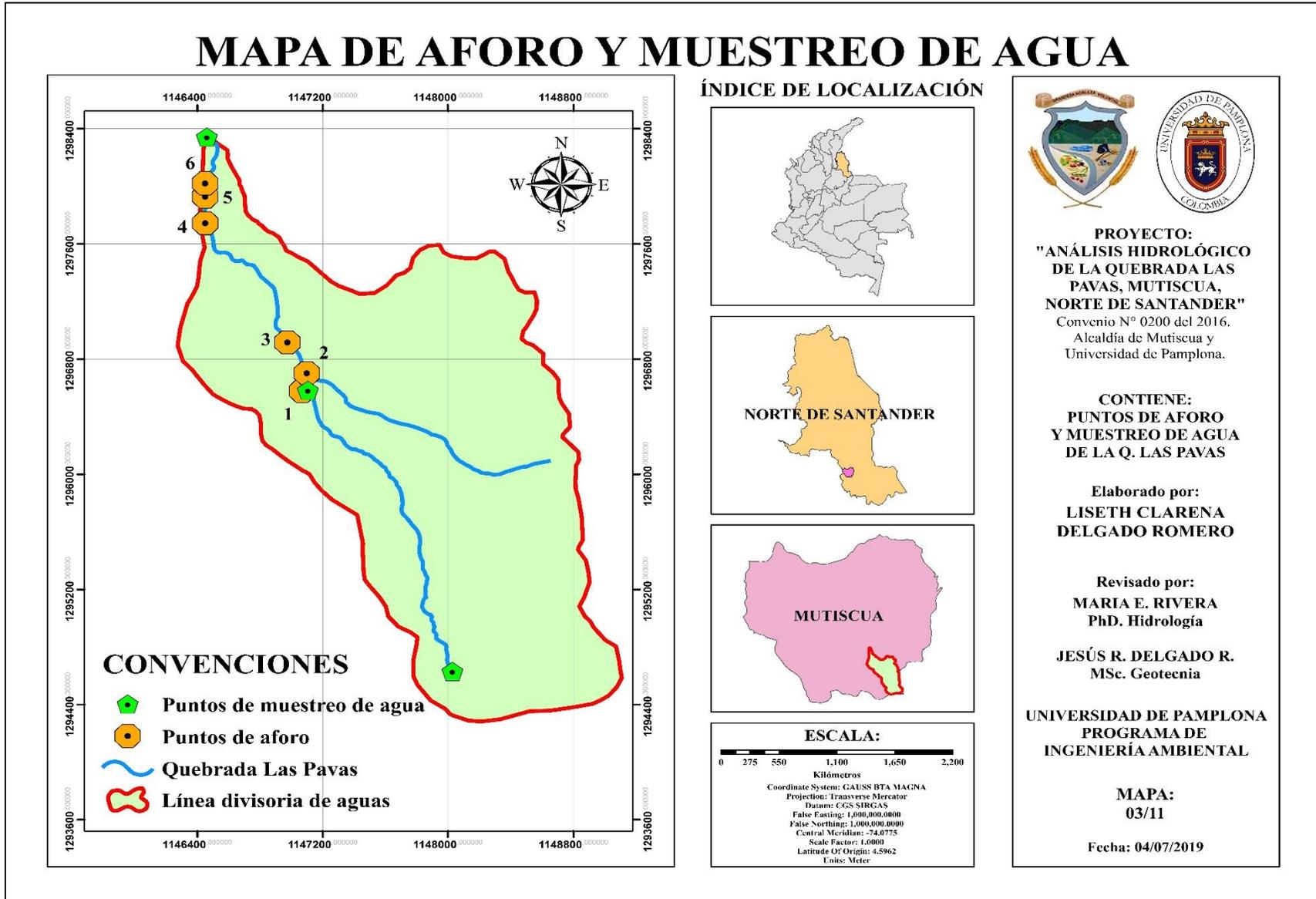
Fecha: 13/05/2019

Anexo 5. Modelo de Digital del Terreno (MDT) para la Microcuenca Las Pavas.



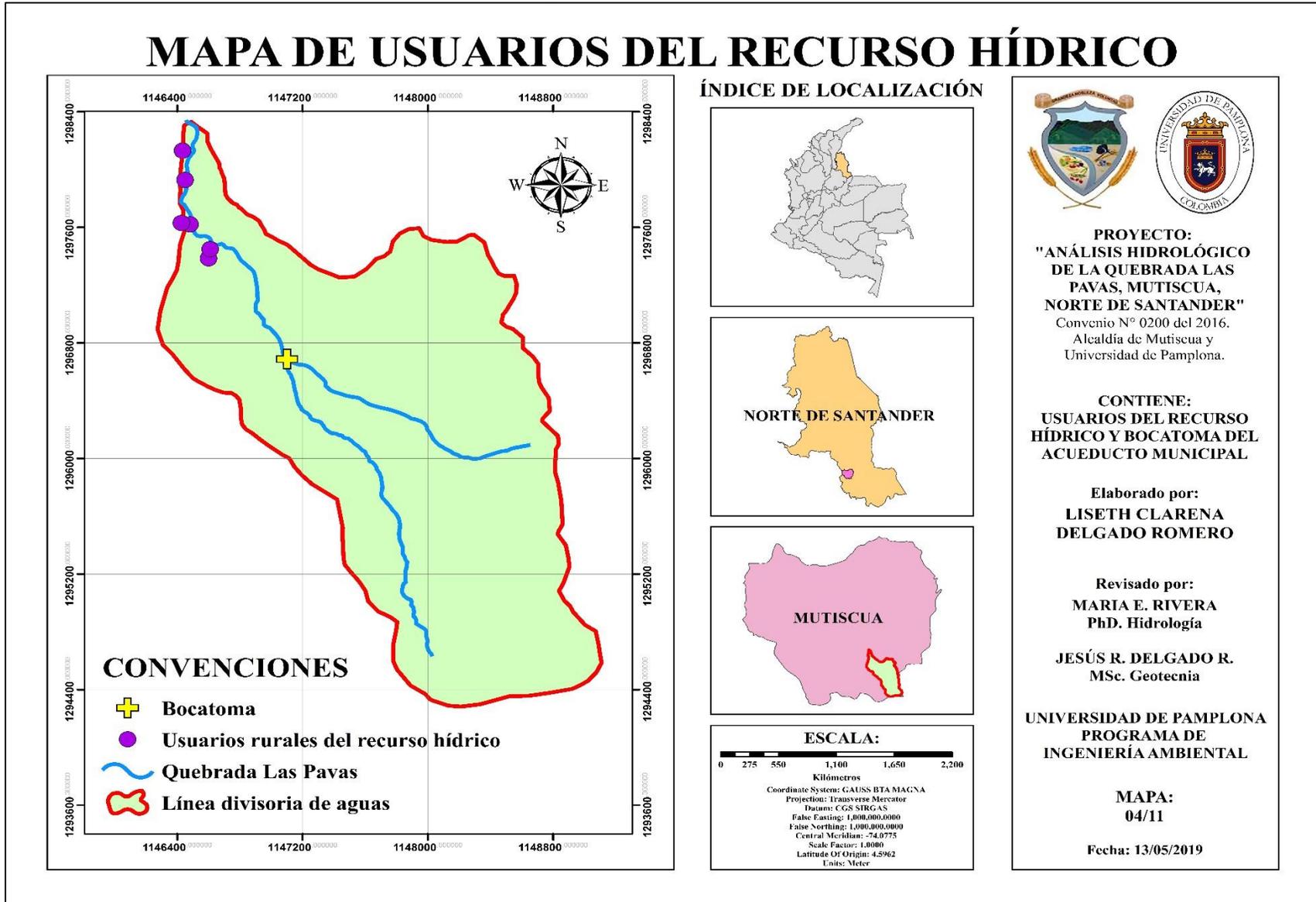
Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Anexo 6. Mapa de puntos de aforo y muestreo de agua.



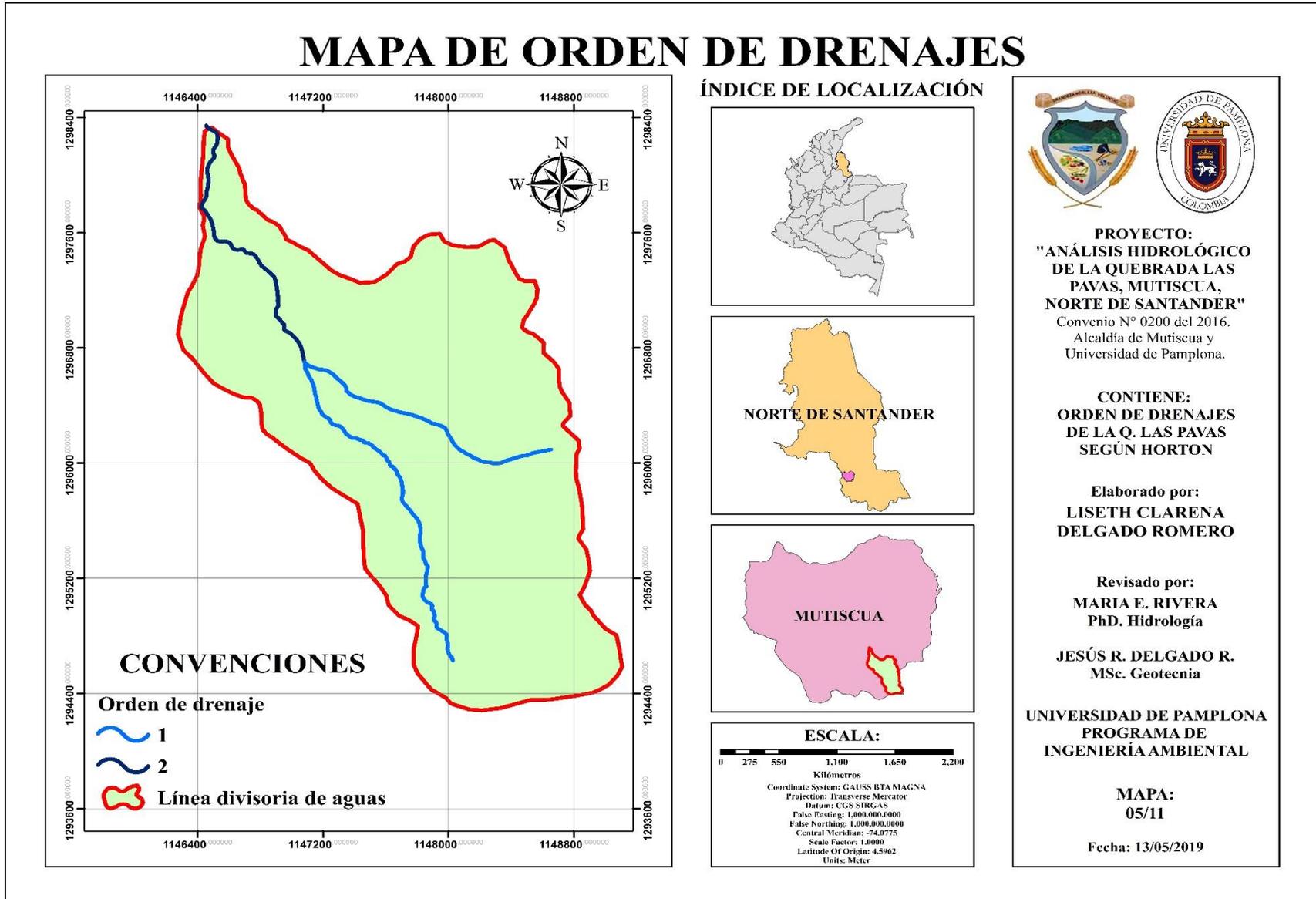
Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Anexo 7. Mapa de usuarios del recurso hídrico.



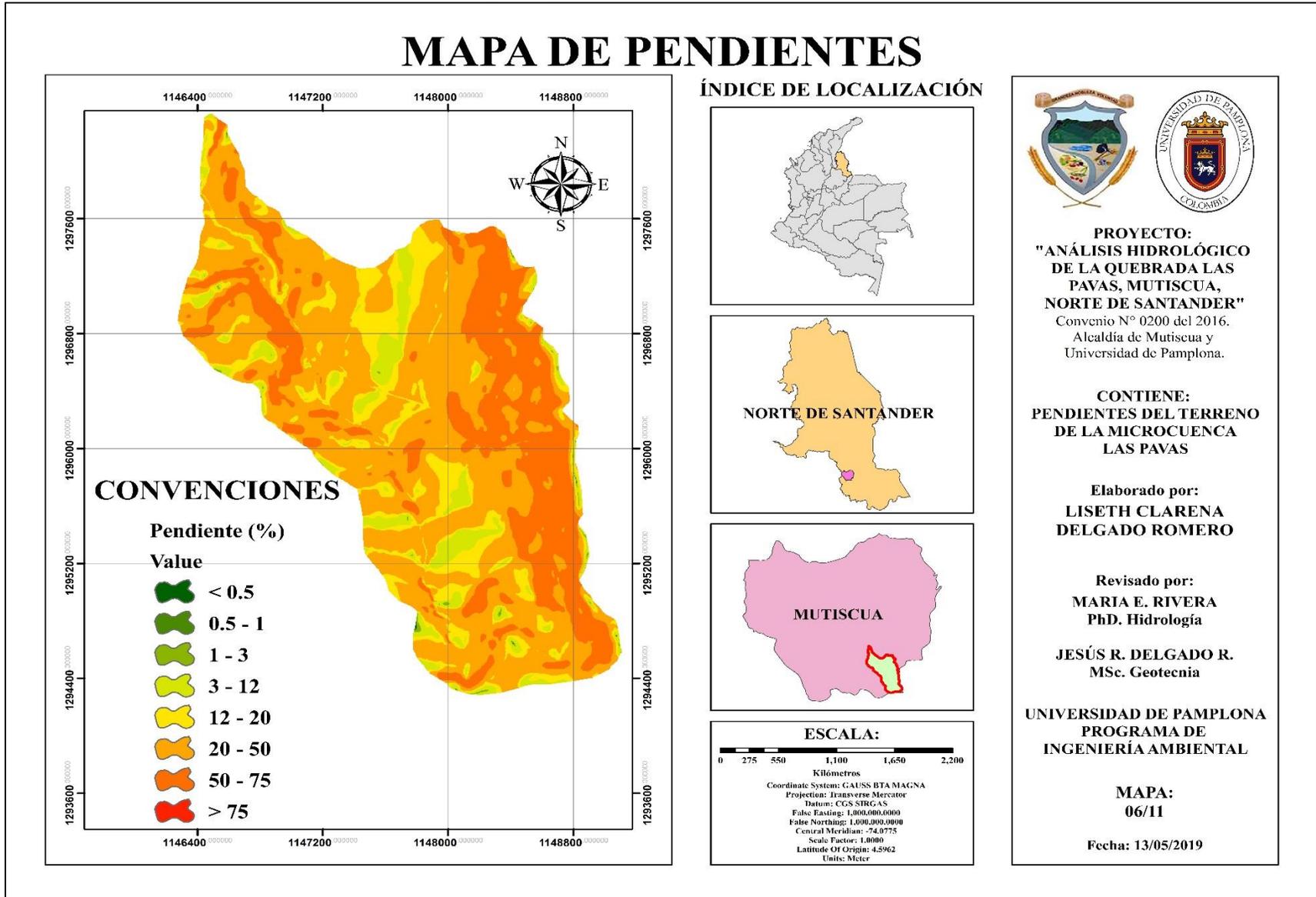
Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Anexo 8. Mapa de orden de drenajes de la Q. Las Pavas.



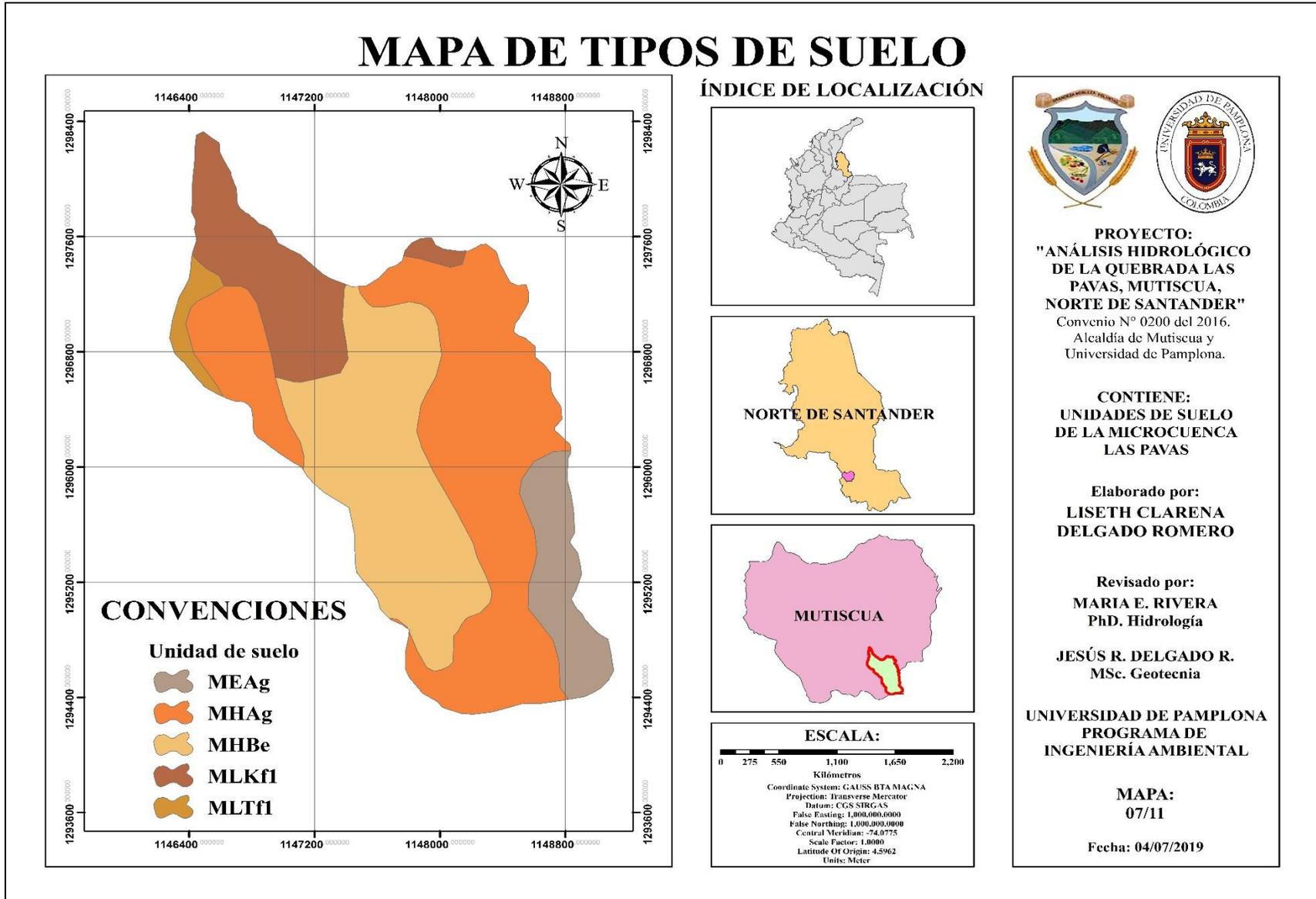
Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Anexo 9. Mapa de pendientes de la microcuenca Las Pavas.



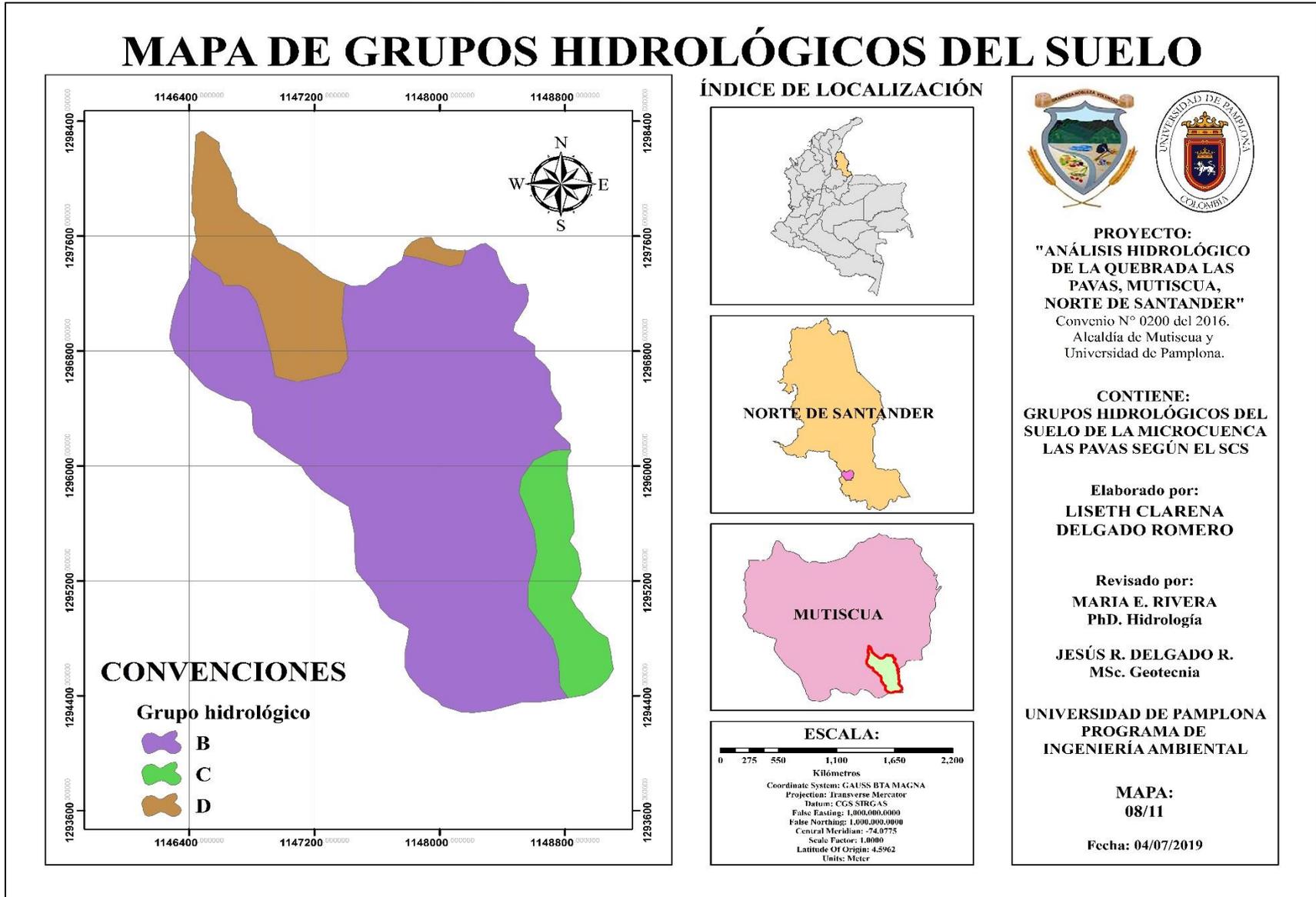
Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Anexo 10. Mapa de tipos de suelo de la microcuenca Las Pavas



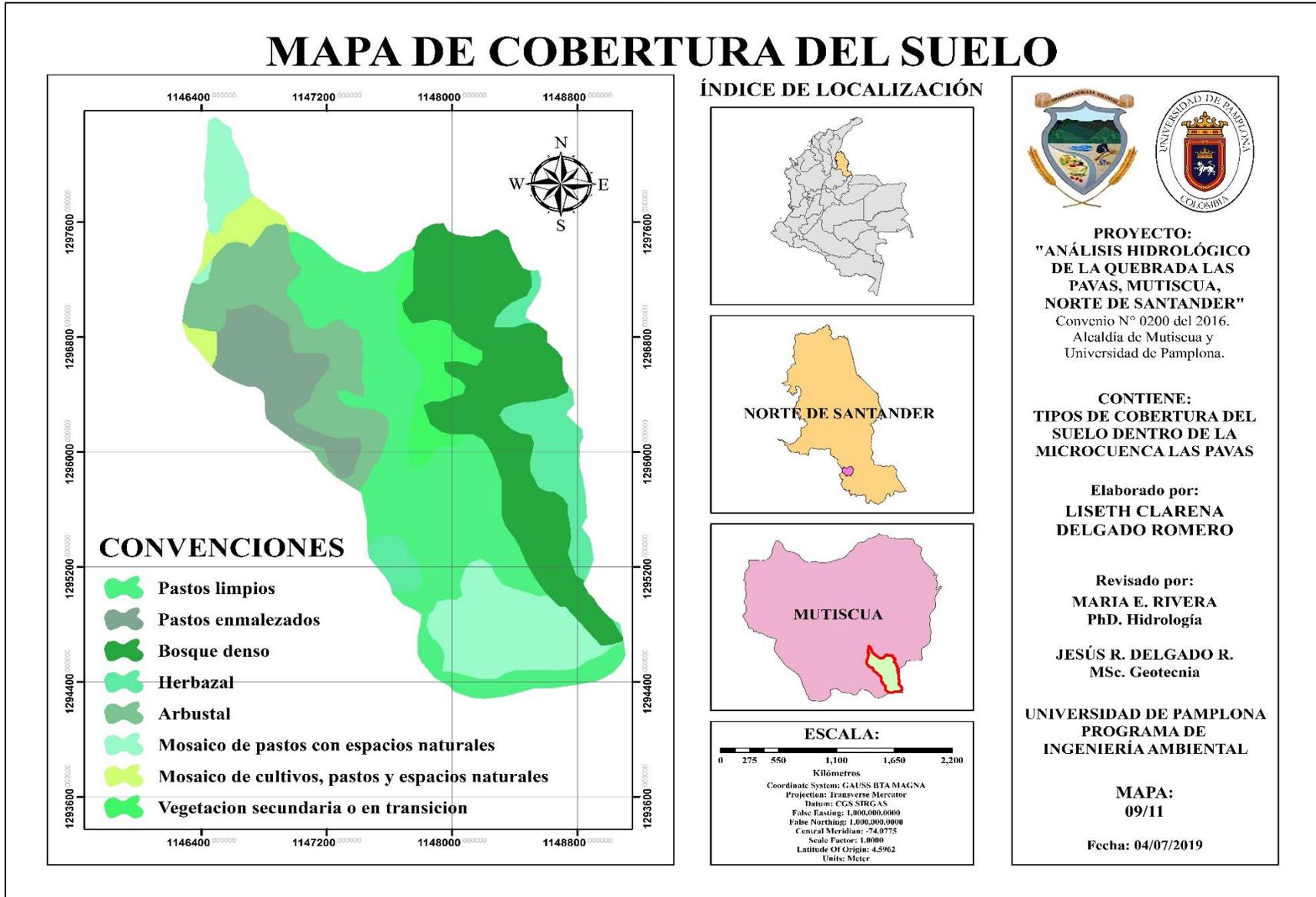
Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Anexo 11. Mapa de grupos hidrológicos del suelo de la microcuenca Las Pavas.



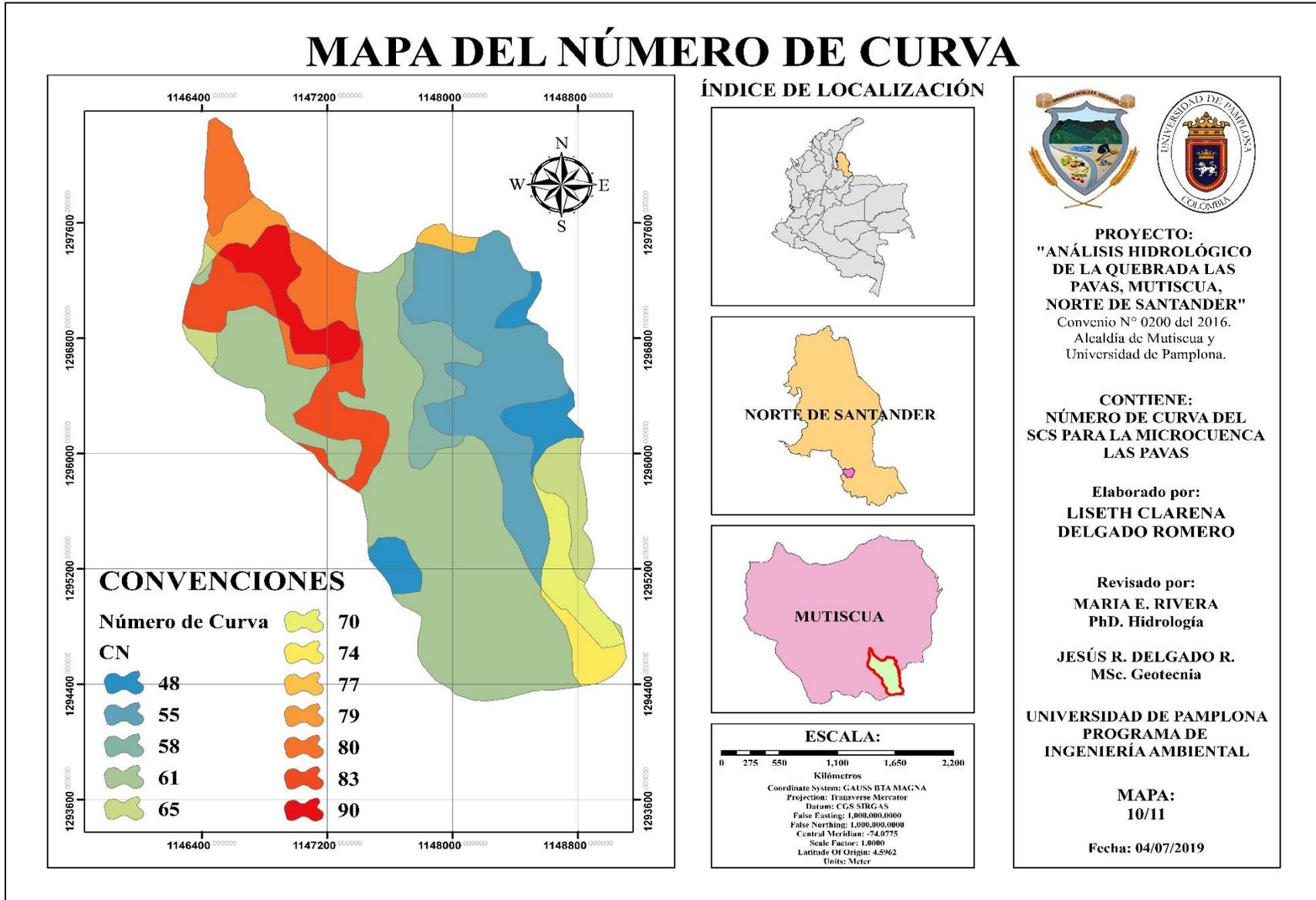
Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Anexo 12. Mapa de cobertura vegetal de la microcuenca Las Pavas.



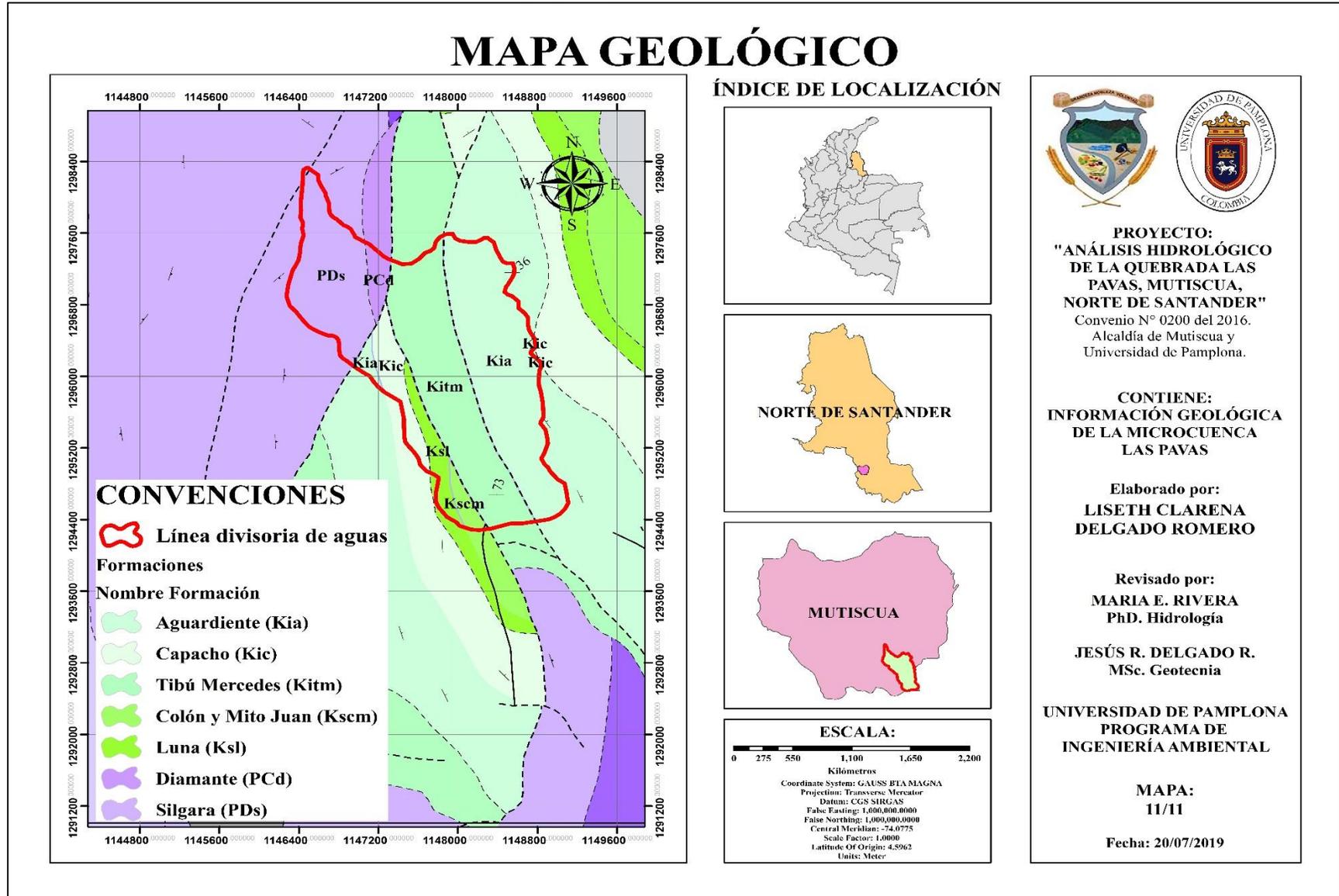
Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Anexo 13. Mapa del Número de Curva de la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.

Anexo 14. Mapa geológico de la microcuenca Las Pavas.



Fuente: Delgado R, 2019 modificado de ArcGIS, 2016.