

APLICACIÓN DEL MODELO SOIL WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) PARA
ESTIMAR LA PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA QUEBRADA
LA MARÍA, SAN JOSE DEL GUAVIARE

RUDY TATIANA ACOSTA SANCHEZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA 2017

APLICACIÓN DEL MODELO SOIL WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) PARA
ESTIMAR LA PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA QUEBRADA
LA MARÍA, SAN JOSE DEL GUAVIARE.

RUDY TATIANA ACOSTA SANCHEZ

1094275144

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero
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

INGENIERÍA AMBIENTAL

PAMPLONA, 2017

Dedicatoria

A Dios, quien me regala los dones de la sabiduría y el entendimiento, por darme la fortaleza de culminar este trabajo de investigación, a pesar de los múltiples obstáculos que se presentaron durante la realización de este.

A mis padres Luis y Esperanza por todo el amor, cariño, sacrificio y apoyo que me han brindado día a día, lo que ha contribuido para formar la persona que soy, así como la dedicación, motivación y sobre todo los valores que solo ellos podrían enseñarme, los cuales me han ayudado para cumplir con cada una de mis metas. Gracias, gracias por sus inquebrantables esfuerzos, por mantenerme en el camino de la educación y a mis hermanas porque siempre han estado apoyándome.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad, por darme sabiduría en los tiempos difíciles y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo de felicidad.

También doy gracias a mi familia por su apoyo incondicional e impulsarme a crecer profesionalmente, especialmente a mi padre y a mi madre, pilares fundamentales de mi vida, que con su dedicación y ejemplo han sido la luz que ilumina mi camino, haciendo de mí una mejor persona.

A mí amado Darwin y su familia por brindarme todo su apoyo, motivación y amor durante este proceso.

A mis directores de tesis María Esther Rivera y Jesús Ramón Delgado por permitirme realizar este proyecto de investigación con ellos, por orientarme en el desarrollo del trabajo, por su gran paciencia y generosidad al compartir sus conocimientos conmigo.

A mi padre Luis Acosta principalmente por la ayuda incondicional en la realización de este estudio. Al señor Reynaldo Pulido y Alejandro Hernández por su colaboración en la toma de datos. A todas aquellas personas que dieron su aporte indirecto y/o directo para lograr culminar el desarrollo de este proyecto profesional.

Al Laboratorio de Mecánica de Suelos y Laboratorio Centro de Investigación en Sanidad Vegetal y Bioinsumos (CISVEB) de la Universidad de Pamplona y por la colaboración prestada durante el análisis de las muestras de suelos.

A la empresa Empoagua ESP por el otorgamiento de su información de caudales medidos en Caño Arenales.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
3. JUSTIFICACIÓN	17
4. OBJETIVOS	18
4.1. OBJETIVO GENERAL	18
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	18
5. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	19
5.1. ALCANCES.....	19
5.2. LIMITACIONES.....	19
6. MARCO REFERENCIAL	20
6.1. MARCO CONTEXTUAL.....	20
6.2. ANTECEDENTES.....	21
6.3. MARCO TEÓRICO	21
7. METODOLOGÍA.....	45
8. RESULTADOS y DISCUSION.....	69
CONCLUSIONES.....	118
RECOMENDACIONES.....	121
BIBLIOGRAFÍA.....	122
ANEXOS.....	127

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa de ubicación del proyecto	20
Figura 2. Ciclo Hidrológico.....	26
Figura 3. Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión.....	28
Figura 4. Esquema de la formación de la escorrentía	31
Figura 5. Modelo general de la metodología Corine Land Cover (CLC)	34
Figura 6. Proceso de producción, transporte y sedimentación en cuencas	35
Figura 7. Mecanismos de erosión hídrica	36
Figura 8. Sistema fluvial idealizado	36
Figura 9. Diagrama de Hjulstrom.....	37
Figura 10. Tipo de transporte de sedimentos en relación al tipo de cauce.....	38
Figura 11. Fase terrestre y de transporte de agua en SWAT	41
Figura 12. Movimiento del agua en SWAT	42
Figura 13. Procesos de corriente modelados por SWAT.....	44
Figura 14. Mapa de ubicación de puntos de muestreo	47
Figura 15. Modelo Digital del Terreno (MDT) de la microcuenca La María	52
Figura 16. Clasificación inicial del Mapa de cobertura de la tierra	57
Figura 17. Muestra de corrección de “Suelos desnudos” a “Zona de extracción minera”	58
Figura 18. Muestra de corrección de “Suelos desnudos” a “Herbazal denso”	59
Figura 19. Muestra de corrección de “Pastizales” a “Vegetación en transición”	59
Figura 20. Situación de absorción de arbustos.....	60
Figura 21. Mapa de tipo de suelos en la microcuenca La María	61
Figura 22. Metodología para estimar la producción de sedimentos mediante SWAT	65
Figura 24. Mapa de pendientes	70
Figura 25. Unidades geo litológicas del municipio de San José del Guaviare	73
Figura 26. Mapa de Geomorfología de la microcuenca La María	77
Figura 27. Muestra de modificación de la sección hidráulica del Rio Guaviare por meandro abandonado.....	79
Figura 28. Mapa de Cobertura en la microcuenca La María.....	93
Figura 29. Mapa de uso actual del suelo en la microcuenca La María	97
Figura 30. Distribución de las muestras en el triángulo textural	100
Figura 31. Mapa de textura de los suelos en la microcuenca La María.....	101
Figura 32. Mapas de distribución de arcillas, arenas y limos.....	103
Figura 33. Significancia de parámetros en SWAT-CUP	109
Figura 34. Mapa de sedimentación en la microcuenca La María (2015)	110
Figura 35. Sedimentos, coberturas y pendientes	111
Figura 36. Mapa de coberturas del 2002	113

Figura 37. Mapa de sedimentación en la microcuenca La María (2002)116

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la pendiente media	28
Tabla 2. Ecuaciones para determinar tiempo de concentración	30
Tabla 3. Localización de es estaciones climatológicas.....	53
Tabla 4. Estaciones meteorológicas para la clasificación de Holdridge (1977)	62
Tabla 5. Usos del suelo y coberturas de la microcuenca La María-Año 2017	66
Tabla 6. Entrada de datos de suelos para el SWAT	67
Tabla 8. Características morfométricas Microcuenca La María	69
Tabla 9. Tiempos de concentración.....	72
Tabla 10. Localización y descripción de puntos de aforo y nivel	81
Tabla 11. Datos para la clasificación según Holdridge	99
Tabla 12. Parámetros usados en la calibración de modelo	107
Tabla 13. Estadísticos a nivel mensual entre caudales medidos y caudales simulados	108
Tabla 14. Usos del suelo y coberturas de la microcuenca La María-Año 2002.....	115

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curva hipsométrica e Histograma de altitudes Microcuenca La María	71
Gráfico 2. Perfil longitudinal del cauce principal	72
Gráfico 3. Precipitaciones totales diarias.....	80
Gráfico 4. Curvas de Duración de Caudales para los puntos de aforo	81
Gráfico 5. Caudales medios diarios para los puntos de aforo	83
Gráfico 6. Curvas Gasto para los puntos de aforo.....	83
Gráfico 7. Curvas IDF para la estación SAN JOSE DEL GUAVIARE-CÓD 32105070...	85
Gráfico 8. Hietogramas de la microcuenca La María para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años	86
Gráfico 9. Granulometría de sedimentos del punto 1	88
Gráfico 10. Granulometría de sedimentos del punto 2	88
Gráfico 11 Granulometría de sedimentos del punto 3	89
Gráfico 12. Granulometría de sedimentos del punto 4	89
Gráfico 13. Comparación de curvas granulométricas en los cuatro puntos.....	90
Gráfico 14. Curvas granulométricas de sedimentos en laderas	92
Gráfico 15. Estadísticas a nivel general de la interpretación de coberturas	94
Gráfico 16. Estadística general de “Territorios Agrícolas”	95
Gráfico 17. Estadística general de “Bosques y áreas seminaturales”.....	96
Gráfico 18. Estadísticas de la interpretación de usos del suelo para el año 2017	98
Gráfico 19. Comparación de precipitación real vs precipitación simulada	104
Gráfico 20. Comparación de caudales real vs caudales simulados de Caño Arenales	105
Gráfico 21. Regresión lineal de la precipitación total anual de la estación San José y la precipitación total anual simulada en SWAT- serie 2002-2015	105
Gráfico 22. Regresión lineal de caudales mensuales observados para la subcuenca de Caño Arenales y caudales mensuales simulados en SWAT- serie 2013-2015	106
Gráfico 23. Caudales medios mensuales-fase de calibración y validación.....	108
Gráfico 24. Promedio de la sedimentación anual 2002-2015	112
Gráfico 25. Coberturas en la microcuenca La María –año 2002	114
Gráfico 26. Comparativo de coberturas 2017 y 2002	115

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Caño Lajas (izquierda). Algas rojas presentes en Caño Lajas (Derecha) .	45
Fotografía 2. Bloques transportados aguas debajo de Caño Lajas	46
Fotografía 3. Zona de extracción de materiales para construcción.	46
Fotografía 4. Puntos de muestreo	48
Fotografía 5. Muestreo de sedimento superficial inicial	49
Fotografía 6. Instalación y funcionamiento de trampas Bunte en funcionamiento	49
Fotografía 7. Recolección de sedimentos en las trampas Bunte.	50
Fotografía 8. Sedimentos recolectados en trampas de ladera	50
Fotografía 9. Laboratorio de granulometría de sedimentos	50
Fotografía 10. Regla limnimétrica.	55
Fotografía 11. Revisión en campo de coberturas	57
Fotografía 12. Recolección de muestra de suelo	63
Fotografía 13. Procedimiento de método de Bouyucos	64
Fotografía 14. Rocas de la formación Araracuara	74
Fotografía 15. a) Arenisca arcillosa. b) Limolitas	75
Fotografía 16. Conglomerados en la parte alta de la microcuenca	76
Fotografía 17 Cerros en Serranía de La Lindosa, Guaviare	78
Fotografía 18. Procesos de erosión en lomas y colinas	78
Fotografía 19. Laguna María Grande	78
Fotografía 20. Punto de observación No. 11	101

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Coeficiente de compacidad.....	27
Ecuación 2. Factor Forma	27
Ecuación 3. Índice de Alargamiento	27
Ecuación 4. Coeficiente de masividad.....	28
Ecuación 5. Índice Hipsometrico.....	28
Ecuación 6. Pendiente media	29
Ecuación 7. USLE.....	40
Ecuación 8. Equilibrio del agua en SWAT.....	41
Ecuación 9. Producción de sedimentos en WAT.....	43
Ecuación 10. Intensidad max.....	53
Ecuación 11. Metodo logaritmico- Curva de calibración.....	55
Ecuación 12. Determinacion de coeficientes para curva de calibracion	56

ANEXOS

Anexo 1. Regresión lineal para caudales por logarítmico.....	127
Anexo 2. Clasificación supervisada de imagen satelital Landsat 8.....	128
Anexo 3. Geodatabase para Mapa de coberturas	128
Anexo 4. Puntos de muestreo de suelos	129
Anexo 5. Revisión en campo de suelos y geología	130
Anexo 6. Histogramas y desviación estándar de la interpolación con Kriking para %Arena, %Arcilla y %Limo.....	130
Anexo 7. Tabla WGEN_Estaciones para el modelamiento en SWAT	131
Anexo 8. Mapa de drenajes de la microcuenca La María.....	132

RESUMEN

La microcuenca La María nace en la zona de preservación de La Serranía de La Lindosa, sin embargo, se ha visto afectada por la deforestación para el desarrollo de actividades agropecuarias, facilitando los procesos de erosión. Considerando este contexto, se hace necesario caracterizar la cuenca y conocer las posibles causas que inciden en la producción de sedimentos. Este estudio tiene como objetivo Aplicar el modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT) para estimar la producción, transporte y depositación de sedimentos en la microcuenca La María, del Municipio de San José de Guaviare. A partir de este punto, se realizó la recopilación de la información necesaria para la modelación en el software como mapa de coberturas, mapa de suelos y procesamiento de la información climatológica, posteriormente se realizó la calibración y validación del SWAT permitiendo conocer los parámetros más sensibles a la producción de sedimentos, más aun, se generó la simulación de sedimentos para el mapa de coberturas del año 2002. Por otro lado, se realizó la caracterización de sedimentos mediante la instalación de trampas en el lecho del cauce y en ladera, caracterización de la microcuenca, medición de nivel y caudal y análisis hidrológico y climatológico a partir de la construcción hietogramas, de curvas IDF, curva gasto y curva de duración de caudales. Como resultados del análisis morfométrico se determinó que el área de la microcuenca es de 40.02 Km^2 , presenta bajas probabilidades de experimentar frecuentes crecidas, predominan terrenos planos y corresponde a una cuenca sedimentaria con fuertes procesos de erosión debido al tránsito de las escorrentías superficiales. Los sedimentos retenidos en las trampas se clasificaron como arenas sin finos, mal gradadas (SP) y uniformes. Con respecto a las curvas IDF se identifica que a mayor duración tengan las precipitaciones se dará una mayor intensidad, así mismo, los hietogramas muestran que las precipitaciones alcanzan su descarga máxima en el minuto 90 de la tormenta. Los caudales tomados en las estaciones están directamente relacionados con las precipitaciones. En cuanto a las coberturas se encuentra que la mayor extensión corresponde a los denominados “Bosques y áreas seminaturales” con el 74.52, seguido por “Territorios agrícolas” con 22.84%. El mapa de suelos revela que en la parte alta predominan texturas gruesas y en la parte baja texturas finas. El ajuste del modelo se logró satisfactoriamente obteniéndose el $NSE = 0,67$ y $R^2 = 0,79$ en la fase de validación. Los parámetros más sensibles al modelos corresponde a CANMX (Almacenamiento máximo del dosel), USLE_P (Factor referente a las practicas (P) en la ecuación USLE) y ESCO (factor de compensación por evaporación en el suelo). La modelación en el SWAT permitió conocer la cantidad de sedimentos generados y su distribución espacial en la microcuenca. Se determina que la zonas de mayor recarga de sedimentos corresponde a las pendientes más bajas de la microcuenca o llanura, representando un foco de contaminación de sedimentos para el Rio Guaviare. De igual modo, los valores de producción de sedimentos predichos por el SWAT aumentan en relación a la pendiente y la dinámica de la escorrentía en relación a las coberturas y usos del suelo.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de actividades económicas para el sustento diario del ser humano como las actividades agrícolas y agropecuarias, traen consigo una alarmante preocupación debido a la fuerte deforestación que se presenta a nivel mundial; el principal impacto ecológico que se tiene presente es la pérdida irreversible del hábitat al remover bosques primarios para incorporar y adaptar tierras nuevas para la ganadería. Así mismo, la acelerada actividad minera de kilómetros de galerías cavadas, afectan la calidad y disponibilidad recurso hídrico por los aportes constantes de cantidades importantes de sedimentos, nutrientes, agentes patógenos y plaguicidas a través de erosión hídrica.

La quebrada La María nace en la zona de preservación de la Serranía de La Lindosa, creada mediante Acuerdo 31 del 5 de mayo de 1987 del Inderena y aprobada por Resolución ejecutiva No 128 del 24 de Julio de 1987 del Ministerio de Agricultura (C.D.A, 2013) presenta asentamientos humanos, que se dedican principalmente al cultivo de yuca, plátano y la ganadería extensiva desarrollada en praderas de pastos introducidos.

Del mismo modo, la CDA (2013) afirma que estas actividades han ejercido una gran presión e intervención humana que han tenido como consecuencias la pérdida de especies de flora y fauna, disminución de calidad y cantidad de agua proveniente de la serranía y la contaminación de las fuentes hídricas, entre las cuales se encuentra Caño Arenales que es la principal y única fuente abastecimiento de agua al acueducto municipal de San José del Guaviare, viéndose afectada por el transporte de sedimentos, productos de la erosión como cantos rodados de grava, arena, limo y arcillas.

Hasta el momento no se han realizado estudios ni tomado medidas eficaces para combatir la erosión del suelo y la sedimentación en la microcuenca en estudio. Ante este escenario, se requiere una amplia comprensión de los procesos hidrológicos en la cuenca, así como también el conocimiento del comportamiento y estado de los sedimentos vistos y entendidos en toda su evolución, desde su producción natural hasta convertirse en posibles riesgos. Todo esto, como pre requisito para el éxito de la gestión del agua y la restauración del medio ambiente. Para ayudar a resolver esta situación, se utilizan sistemas computacionales o modelos matemáticos de análisis geoespacial y simulación hidrológica; el modelado de los procesos hidrológicos de una cuenca es a menudo el primer paso en el desarrollo de sistemas de decisión espacial para identificar zonas de producción de sedimentos y por consiguiente las zonas vulnerables a la sedimentación.

En este estudio, el modelo de producción de sedimentos que se utiliza es el Soil Water Assessment Tool (SWAT) desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el United States Department of Agriculture (USDA), con la finalidad de obtener la carga y distribución espacial de los sedimentos resultantes de los cambios de uso de cobertura de suelo en

toda la microcuenca La María, por lo tanto se hace necesario realizar: (i) la caracterización hidro-morfológica de la cuenca; (ii) caracterización de los sedimentos transportados y colmatados; (iii) levantamiento cartográfico de información de tipo de suelos; (iv) Cartografía de usos del suelo y cobertura vegetal; (v) calibrar y validar el modelo para generar un set de parámetros que ajuste razonablemente los valores simulados y medidos de caudales; y (vi) Generar escenarios de usos del suelo y cobertura vegetal para su respectivo análisis en la producción de sedimentos.

Las herramientas de modelado finalmente ayudarán a hacer una planificación adecuada y oportuna decisión que en última instancia ayuda a salvar la calidad física y química de los recursos de agua y suelo en el área aferente a la microcuenca La María, aplicándose y extendiéndose hacia otras cuencas. Además, los productos cartográficos obtenidos del presente estudio permiten constatar y justificar la acumulación de depósitos de arenas en las áreas depresivas de los sistemas de Laguna Grande y Laguna Chiquita La María y la consecuente modificación de la forma original que atenta contra la estabilidad de la biota acuática y terrestre que depende de esas lagunas permanentes.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Por ser el municipio de San José del Guaviare una región de tierras infértiles, durante los últimos años las áreas paisajísticas de la microcuenca La María se han visto afectadas, especialmente el recurso hídrico, a causa de malas prácticas y el inadecuado uso del suelo, como actividades ganaderas, eliminación del bosque protector y la extracción de material para construcción; acciones que no solamente afectan la disponibilidad del recurso hídrico, sino que también modifican la respuesta hidrológica de la cuenca frente a un determinado evento. Adicionalmente, los problemas asociados con el flujo de escorrentía, principalmente el arrastre de sedimentos, que llegan hasta la red de drenaje, pueden ocasionar impactos de tipo erosivo en la estabilidad de la corriente, perturbaciones en la dinámica natural de las aguas y la disminución de la capacidad hidráulica, agravando aún más los problemas de flujo superficial y afectando en gran medida el capital natural que abarca la microcuenca.

Por otra parte, el incremento de sólidos suspendidos y de material de arrastre en el cauce, produce alteraciones en algunas variables físicas, químicas y biológicas que impactan el ecosistema y la calidad del agua, teniendo en cuenta que Caño Arenales, uno de los principales afluentes de la microcuenca, abastece de agua al sistema de acueducto del municipio de San José del Guaviare, haciendo necesaria la aplicación de productos químicos para poder cumplir con los estándares de calidad del agua para el consumo humano, exigidos por la Norma Colombiana.

Cabe señalar, que los altos niveles de sedimentación dan lugar a la perturbación física de las características hidráulicas del cauce; estos cambios permiten evidenciar incrementos considerables en los caudales y en las velocidades del flujo hacia aguas abajo, lo que incrementa los volúmenes de escorrentía, los caudales máximos y disminuye el tiempo de concentración, causando problemas de colmatación y al mismo tiempo de inundación en la zona de recepción aguas abajo o llanura aluvial donde se encuentra la laguna Chiquita y Laguna María Grande.

De lo anteriormente mencionado, se formula la siguiente pregunta: ¿Será posible evidenciar con el desarrollo de este proyecto, la variabilidad espacial de los sedimentos en la microcuenca La María?

3. JUSTIFICACIÓN

En vista a la problemática anteriormente mostrada y considerando la dificultad para medir el impacto de las actividades antrópicas, se requiere desarrollar estudios que permitan evaluar los procesos de erosión, transporte y acumulación de los sedimentos en las cuencas y en los cauces, con el fin de evaluar el nivel de impacto que se produce.

En el departamento del Guaviare poco se conoce sobre la ejecución de estudios sobre la estimación de carga y transporte de sedimentos; y la quebrada La María no es ajena a esta situación. La parte alta de la microcuenca La María, presenta características que hacen a esta susceptible al transporte de cantidades importantes de sedimento, que se presentan en distintas formas. En este sentido, toma importancia la realización de este proyecto de investigación, que conlleva a estimar la producción y transporte de sedimentos que se genera en la microcuenca, y así poder generar acciones para reducir su producción dentro de un proyecto de restauración hidrológica forestal. Del mismo modo, para estudios futuros se proporciona una base práctica y teórica para desarrollar investigaciones que tengan en cuenta la producción y transporte de sedimentos en la microcuenca La María.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

- Aplicar el modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT) para estimar la producción, transporte y depositación de sedimentos en la microcuenca La María, del Municipio de San José de Guaviare.

4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Reconocer, localizar y representar en un mapa el tipo de suelos aferente a la microcuenca La María.
- Delimitar, localizar y representar espacialmente dentro de un mapa las diferentes coberturas y usos del suelo presentes en la microcuenca.
- Procesar estadísticamente y gráficamente los diferentes datos históricos pluviométricos y de temperatura, para el modelamiento Hidrológico de la microcuenca.
- Determinar las variables con mayor influencia en la producción de sedimento mediante un análisis de sensibilidad.
- Determinar la producción de sedimentos en las microcuenca La María mediante la aplicación del modelo SWAT.
- Realizar simulaciones de escenarios para evaluar los impactos de los cambios de uso del suelo y la tierra.

5. ALCANCES Y LIMITACIONES

5.1. ALCANCES

El presente estudio de investigación tiene como alcance estimar la producción y el transporte de sedimentos en las Microcuenca La María y las subcuencas que la conforman, mediante un modelo lluvia- escorrentía, en base física, semidistribuido, determinístico y continuo (SWAT); atendiendo al cumplimiento de las actividades preliminares para su desarrollo como el procesamiento de datos climáticos y el levantamiento de información de base física: tipos de suelos, uso del suelo y cobertura vegetal y la red de drenaje.

5.2. LIMITACIONES

Ante la carencia de equipos de alta precisión para la medición de caudales, se utilizó el método de flotadores, teniendo en cuenta que el grado de error que se puede tener en la toma de datos es elevado.

En área de la microcuenca La María no se poseen estaciones de tipo climatológicas ni hidroclimatológicas que permitan calibrar y comparar la información obtenida en campo con respecto a nivel y aforo, por tanto se utilizaron estaciones climáticas cercanas al área de estudio para el respectivo modelamiento en el software.

La disponibilidad de laboratorios de suelos en el departamento y el tiempo limitado de ejecución del proyecto al igual que los recursos económicos, condicionaron el muestreo y caracterización de los sedimentos en la quebrada La María y sus principales afluentes.

De acuerdo con las creencias, políticas y leyes del resguardo indígena La María, ubicado en la parte baja de la microcuenca, dificultó un análisis más extensivo y detallado en esta zona, debido al acceso restringido por parte de los indígenas, por consiguiente los datos e información en esta parte de la microcuenca con respecto a nivel, caudal y caracterización de sedimentos, son desconocidos en este estudio.

La densificación de bosques y matorrales en el área de la microcuenca dificultaron el acceso a las rondas de la quebrada, permitiendo la ubicación de cuatro (4) puntos estratégicos para el muestreo instalados a lo largo de la zona de estudio.

Los Paisajes presentes en esta zona son principalmente formaciones rocosas, llanuras inundables y meandros abandonados del Río Guaviare, así mismo, la residencia de Laguna María Grande y Laguna Chiquita.

6.2. ANTECEDENTES

El manejo inadecuado y sobre explotación de tierras agrícolas, con el tiempo ha causado la degradación del suelo generando grandes cantidades de sedimentos aportadas a las aguas fluviales, por ello es común que se presenten fenómenos de erosión y sedimentación en las cuencas. El movimiento de los sedimentos en las corrientes y ríos se presenta de manera suspendida o arrastre de fondo afectando consecutivamente la capacidad de transporte de agua en las cuencas hidrográficas y del mismo modo pueden causar cambios significativos en las propiedades de resistencia del agua. De acuerdo con Borrero & Carmona Jimenez (2015), en su estudio “Evaluación hidrológica de una corriente peri-urbana y su impacto en el potencial de servicios de los ecosistemas”, consideran que las zonas con mayor erosión corresponden a áreas de cambio de uso de la tierra, donde los elementos tales como la urbanización, la agricultura y turismo están presentes.

El transporte de sedimentos por las corrientes, su erosión y sedimentación son elementos fundamentales para entender y predecir la evolución de los ríos. En muchos casos el análisis hidráulico de erosión y sedimentación es una parte importante para el control de inundaciones, la protección frente a avenidas, el diseño de sistemas específicos de control y protección y su resistencia frente a la erosión general. En el campo de estudios sobre el tema de erosión; el transporte de sedimentos se engloba dentro de la hidráulica fluvial, un campo de la hidráulica mucho más amplio, cuyo interés se ha despertado desde los inicios de la humanidad. La complejidad para determinar, cuantificar y describir la descarga de sedimentos en una corriente determinada ha sido siempre un problema de gran importancia en múltiples aplicaciones de ingeniería. Por consiguiente, muchos grupos de investigación han creado diferentes modelos a partir de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), como una herramienta eficiente capaz de simular la cantidad de material erosionado y depositado en las cuencas

Existe una gran diversidad de modelos matemáticos para estimar la producción de sedimentos. Los más conocidos son: métodos de agrupación de variables, modelos estocásticos y los métodos de simulación de procesos físicos. De entre los modelos de simulación hidrológica y de sedimentos, el SWAT (Soil and Water Assessment Tool) se destaca actualmente por ser un software libre y de fácil aplicación para el modelado integral de grandes cuencas. El modelo SWAT fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold de la Universidad de Texas para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Americanos (USDA) a mediados de los años noventa, y ha tenido gran influencia en el campo de la hidrología, en vista de que ha sido utilizado a nivel nacional e internacional

para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas.

Así, por ejemplo, Cuello Espinosa (2003) aplicó el modelo SWAT en la cuenca alta del Río Yaqué del Norte y del Río Guanajuma, República Dominicana. La simulación de la producción y transporte de sedimentos fue determinada bajo dos condiciones de uso de la tierra. Para la calibración del SWAT se utilizó el modelo de regresión en ambas cuencas, observando que el escurrimiento simulado durante un período de cinco años consecutivos se compara satisfactoriamente con los datos observados. Se apreció que al sustituir el sobreuso (16%) por bosque y así pasar de una condición existente a un escenario propuesto el régimen del escurrimiento baja ligeramente bajo la condición propuesta, mientras que los niveles más altos de producción de sedimentos se presentan bajo la condición existente o de sobreuso, reduciéndose un 30% al cambiar a una cobertura de bosque, la tasa de sedimentos cambia de baja a muy baja en el orden de 9.07 a 5.44 Ton/ha/año.

Por otra parte, Francés & Bussi (2014), aplicó el modelo distribuido del ciclo hidrológico y de sedimentos TETIS en la cuenca del río Ésera (España) con el objetivo de analizar el efecto del cambio climático sobre la dinámica de los sedimentos en la cuenca y en el aterramiento del embalse de Barasona que la drena. Para analizar los efectos del cambio climático los autores usaron como entrada del modelo las series de precipitación y temperatura del proyecto PRUDENCE para los escenarios climáticos actual y futuro. De las simulaciones con TETIS concluyeron que las aportaciones de caudal tenderán a disminuir en el futuro, como consecuencia directa de la disminución de la precipitación, una mayor evapotranspiración potencial y una menor humedad del suelo en la cuenca. A pesar de la tendencia a una mayor torrencialidad de la precipitación, los resultados del modelo indican que las crecidas también tienden a disminuir, de forma más pronunciada para el escenario actual que para el escenario futuro. Por otra parte, el transporte de sedimentos tiende a aumentar con el paso del tiempo.

Cabe resaltar el estudio “Simulación y modelación de la producción de sedimentos en dos escenarios dominantes de ocupación de suelo en la cuenca hidrográfica del río Coello” por Ramírez C. & Rodríguez A. (2015). La investigación se realizó con el objetivo de analizar el comportamiento de la cuenca hidrográfica del río Coello bajo condiciones únicas de ocupación de suelo. Se crearon 2 escenarios de cobertura de suelo, las cuales fueron modificadas formando para el estudio 10 unidades de uso de suelo, que se distribuyeron por las 16 subcuencas. Al escenario uno Es 1, se le asignó el 91,76 % para pastos naturales, y al escenario dos Es 2, el 91,76 % del área para bosques. Esta información se llevó al modelo de simulación hidrológica SWAT, en donde se simularon los datos para el periodo 1988 -2007, obteniendo como resultado, que aunque los dos escenarios presentan valores por debajo de la línea base, es el 2 con un 63% más

eficiente que el 1, en cuanto a la retención de suelo. Las 16 subcuencas fueron modeladas determinando la susceptibilidad a los procesos de sedimentación, donde los bosques presentaron la mayor regulación de los sedimentos.

Otro estudio desarrollado en Mexico, fue elaborado por Leon (2009), donde estimó la producción de sedimentos en cuencas, que combina el método de Kothyari et al. (1996) y el concepto de eficiencia de atrapamiento. La metodología fue probada en el Sureste de México, en el estado de Puebla, dentro de la cuenca del Río Apulco y sus subcuencas, contando cada cuenca con un embalse. La producción de sedimentos calculada fue comparada con los sedimentos depositados y registrados en cada embalse. El autor recomienda seguir probando el método a fin de definir sus límites, ventajas y desventajas.

Un caso semejante ocurre para la península de Hicacos, Matanzas, Cuba; con el fin de evaluar los modelos de CERC, Kamphuis y Bijker por los investigadores Cordova Lopez & Torres Hugues (2011) en las playas del caribe. Estos han sido comparados con cubicaciones de levantamientos batimétricos realizados en el área y posteriormente comparados con los resultados obtenidos mediante el software UNIBEST.

En cuanto a nivel nacional, también se ha venido incrementado las investigaciones en este campo; considerándose los estudios recientes realizados por Álvarez & Velez (2015), exponiendo un modelo agregado para estimar tasas medias de producción de sedimento en cuencas tropicales de montaña con información escasa, calibrado para Antioquia-Colombia; basado en la ecuación de transporte de Engelund-Hansen. Los autores consideran dos enfoques complementarios para el análisis de 23 cuencas: (1) modelo de cauce aluvial, según el caudal, la pendiente y geometría hidráulica y (2) modelo de ladera, según caudal menos flujo base, pendiente, densidad de drenaje y grado de convergencia del flujo. Ambos modelos cierran con una regresión para el parámetro de Shields en función del rendimiento sólido ($T/\text{km}^2/\text{año}$) y un factor geológico.

Por otra parte, Suarez (2016), estudió el comportamiento del transporte de sedimentos en el río La Plata, Municipio de Mutiscua, Norte de Santander a partir de la modelación en Hec-Ras v 5.0, mediante el levantamiento de secciones transversales y medición de caudales. Entre los resultados más relevantes de la modelación determinó e identificó las zonas más vulnerables y de igual manera las zonas de riesgo de inundación. Así mismo, menciona que la zona de estudio presenta mayor tendencia a ser socavada o erosionada siendo las estructuras hidráulicas las afectadas directamente, presentándose zonas de sedimentación en menor proporción. Además, con la granulometría de los sedimentos transportados halló que predominan las gravas arenosas y las arenas medias.

La hidráulica de sedimentos también tiene una importante aplicación en el problema de sedimentación de presas y embalses. El material que se deposita en el fondo del embalse

está sujeto a una compactación al transcurrir del tiempo, efecto que se refleja en el cambio de los niveles y por lo tanto en el cambio de volumen, reduciendo su vida útil antes de lo previsto. Por consiguiente, se presenta el caso de estudio por Londoño & Zapata (2013) en el embalse La Fe ubicado en Medellín (Colombia), construido por las Empresas Públicas de Medellín (EPM) para suministrar agua potable a gran parte de la población ubicada en el Área Metropolitana. De acuerdo con las batimetrías realizadas en el embalse, algunos bancos de sedimentos superan el metro de espesor en las confluencias de las quebradas Espíritu Santo y Las Palmas por la cola del embalse, y en la quebrada Potreritos que desemboca por el costado occidental justo en dirección a la torre de captación, zona intermedia del embalse. Para contribuir con la solución del problema los investigadores estimaron el potencial erosivo en la cuenca del embalse por medio del modelo SWAT. Determinaron para la zona de estudio que las intervenciones del hombre son la principal causa de producción de sedimentos; seguidas por las altas pendientes y los altos regímenes de lluvias.

A nivel departamental se destaca el estudio realizado por INGEOMINAS (2011), que decidió llevar a cabo un proyecto para el levantamiento de la cartografía, basado en la exploración geológica de la Plancha 350 San José del Guaviare (según nomenclatura del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC), que cubre la parte sur del Departamento del Meta y norte del Departamento del Guaviare. El estudio tiene como objetivo principal la cartografía geológica y la exploración geoquímica de las diferentes unidades geológicas aflorantes en el área de estudio, con énfasis en su composición, rasgos estructurales y la relación entre las unidades, de tal manera que puedan ser enmarcados dentro del ambiente geodinámico y de evolución del cratón amazónico para determinar la potencialidad económica de la región.

También se consideran los estudios realizados por Lopez Urrutia (2016) a nivel regional como el “Estudio Hidrológico De Caño Arenales Afluente De La Microcuenca La María De San José Del Guaviare”, el cual abastece el Embalse “La María” jurisdicción de la planta de tratamiento de agua potable de San José del Guaviare (EMPOAGUAS E.S.P). Se determinó y evaluó las características físicas y geomorfológicas, se analizó la información meteorológica existente, se realizaron mediciones de caudales; todo con el fin de encontrar el funcionamiento hidrológico del Caño y determinar el balance hídrico. Para tal efecto se utilizaron los softwares Innersoft ISBH para el balance hídrico, ArcGis v. 10.3 para mapas hidrológico y el software HEC-RAS v.4.1 para la modelación de las secciones transversales. Según el autor, el descenso de los caudales y la evaporación de las precipitaciones de la microcuenca son los efectos de mayor afectación en temporada seca, por lo tanto sugiere que se debe tener en cuenta el buen aprovechamiento del embalse con respecto al volumen útil, ya que las buenas condiciones de este, permitirán afrontar mejor la temporada seca. Por otra parte,

recomienda a adquisición de predios que permitan proteger los nacedores y el área de la fuente hídrica abastecedora a la empresa.

Con respecto a la diversidad vegetal y los macroinvertebrados acuáticos de la microcuenca La María, García & Galindez (2011) examinaron mediante el muestreo en dos parcelas del bosque protector de la microcuenca y cuatro estaciones para reconocer la calidad del agua a través de macroinvertebrados bioindicadores. Como resultado se obtuvieron valores permitieron determinar un agua de buena calidad para uso potable de la comunidad de San José del Guaviare.

De igual modo, se presenta el estudio “Flora de las formaciones rocosas de la Serranía de La Lindosa” por el SINCHI (2008). Asegura la entidad que es una herramienta importante y fundamental para adelantar programas de restauración de las áreas degradadas y un valioso insumo para los programas ecoturísticos que se desarrollan en la región, así como un aporte significativo al conocimiento de la flora de la Amazonía colombiana. La publicación presenta los aspectos geológicos de la Serranía y la composición faunística de la formación rocosa con un catálogo de las plantas encontradas y complementadas con una serie de fotografías que dan cuenta de la belleza de la Serranía de La Lindosa. Hay que mencionar, además el Plan de Manejo Ambiental de La Microcuenca La María realizado por la CDA (2012) a través del proyecto SIGAE, donde se presenta la caracterización y el diagnóstico con los cuales se constituye una síntesis ambiental para la microcuenca.

Considerando la información anterior, se evidencia claramente la necesidad de realizar una investigación acerca de la producción y arrastre de sedimentos en la microcuenca La María para determinar su potencial erosivo y las posibles consecuencias sobre el fenómeno de sedimentación que atribuye a Quebrada La María.

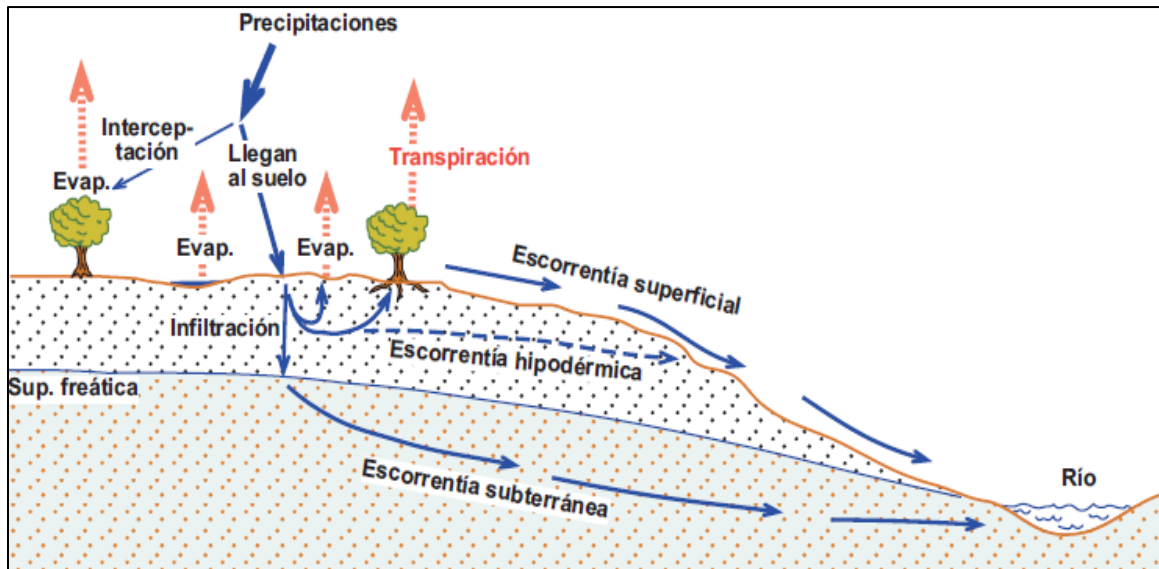
6.3. MARCO TEÓRICO

Aparicio Mijares (1992) considera que la hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos. El agua es la sustancia más abundante en el planeta, además, es un factor clave en la climatización de nuestro planeta para la existencia humana y en la influencia en el progreso de la civilización, (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Chow *et al* (1994), además expresa, que el ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología; el ciclo hidrológico es un proceso continuo mediante el cual el agua es transportada desde los océanos a la atmósfera (Figura 2), de esta a la tierra y posteriormente regresada al mar, teniendo lugar durante el proceso múltiples sub ciclos, tales como la evaporación del agua desde la parte continental y su precipitación

subsecuente sobre la tierra para regresar a los océanos, (Ortiz Mendoza, 2005). Como se trata de un ciclo podríamos considerar todas sus fases empezando desde cualquier punto, pero lo más preciso sería comenzar en la precipitación y suponer que recorrido puede seguir el agua que cae sobre los continentes.

Figura 2. Ciclo Hidrológico



Fuente: Ramon (2011)

Así como el ciclo hidrológico es el concepto primordial de la hidrología, la cuenca hidrográfica es su componente básico de estudio; Según Aparicio (1992) una cuenca hidrográfica es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. Una cuenca hidrográfica es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas, (Barbudo C., Ochoa D., & Verbel A., 2016).

6.3.1. Morfología de Cuencas Hidrográficas

Las características morfométricas de una cuenca hidrográfica permiten determinar las condiciones hidrológicas para entender su funcionamiento y realizar su respectivo manejo; además, tienen gran importancia sobre la respuesta hidrológica que puede generar la cuenca frente a determinados eventos.

La morfología de la cuenca queda definida por tres tipos de parámetros: (a) parámetros de forma, (b) parámetros de relieve y (c) los parámetros relativos a la red de drenaje.

Los principales parámetros que definen la forma de la cuenca son:

- **Índice de compacidad o de Gravelius.** Se define así el valor resultante de dividir el perímetro de la cuenca por el perímetro de un círculo de igual área que la de la cuenca, expresada por la ecuación 1.

$$Kc = * \frac{P}{2*\sqrt{\pi}*A} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde, Kc –Índice de compacidad, P –Perímetro, A –área.

- **Factor forma.** Este es un indicador que nos permite aproximar la forma de la cuenca a una forma geométrica, a fin de poder determinar la velocidad con la que el agua llega al río principal de la cuenca (Fierro & Jiménez, 2011; en López, 2015). Se expresa como la relación que existe entre el ancho promedio y la longitud axial de la cuenca (Ecuación 2).

$$Ff = \frac{Ap}{Lax} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde, Ff –Factor forma, Ap –Ancho promedio, Lax –Longitud axial de la cuenca.

- **Índice de Alargamiento.** Muestra el comportamiento de la cuenca en la longitud máxima encontrada de la cuenca, medida en el sentido del río principal y el ancho máximo de ella medido perpendicularmente, se calcula de acuerdo a la fórmula siguiente:

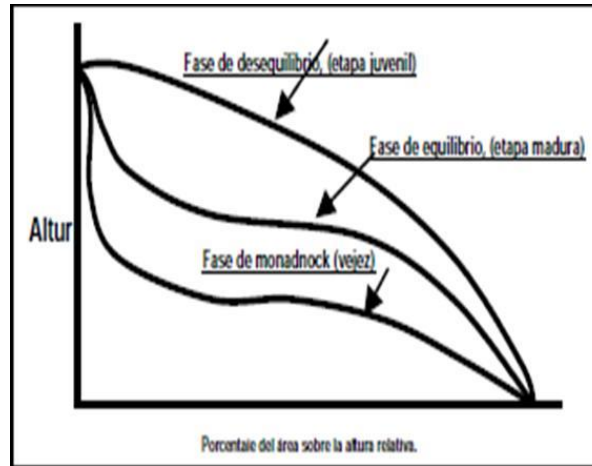
$$Ia = \frac{L}{l} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde, Ia –Índice de alargamiento, L –Longitud máxima de la cuenca, l –Ancho máximo de la cuenca.

La topografía o relieve de una cuenca puede tener más afluencia sobre la respuesta hidrológica que la forma de la misma (Vich, 1996; en Farfan, Fabio, Urbina, Ferreira, & Brandan, 2010). Los parámetros que definen el relieve de la cuenca son:

- **Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes,** permite conocer la distribución de masa en la cuenca según la altitud de la misma representada en una gráfica con el área acumulada expresada en porcentaje (km²) en las abscisas y en las ordenadas la altitudes de cada una de las fajas altitudinales. En el 50% del área acumulada se encuentra la altitud media. La curva hipsométrica se clasifica mediante la figura 3, propuesta por Senciales y Ferre (1999).

Figura 3. Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión.



Fuente: Campero Sanchez (2016)

- **Coefficiente de masividad** es la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie (Ecuación 4).

$$Cm = \frac{Amed}{A} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde, Cm –Coeficiente de masividad, $Amed$ –Altitud media, A –Área.

- **Índice Hipsométrico** se obtiene a partir de la Ecuación 5.

$$IH: \frac{(Emedia - Emin)}{(Emax - Emin)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde, $Emedia$ -Elevación media, $Emax$ -Elevación máxima, $Emin$ -Elevación mínima.

Willgoose y Hancock (1998); en Minguez M., Garcia M., Martin Alfageme, Martin S., & Rodriguez G., (2014), establecieron una clasificación en la que valores superiores a 0,50 de IH dominarían los procesos de ladera (madurez), cuencas con valores inferiores a 0,50 dominaría la erosión fluvial (juventud) y las cuencas con valores próximos a 0,50 se encontrarían en equilibrio.

- **Pendiente media de la cuenca** es la variación de la inclinación de una cuenca y es importante para definir la susceptibilidad de la cuenca a procesos erosivos y al arrastre de materiales. La pendiente media se clasifica de acuerdo a la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de la pendiente media

Pendientes medias %	Relieve
0--3	Plano
3--7	Suave

7--12	Mediano
12--20	Accidentado
20--35	Fuerte
35--50	Muy Fuerte
50--75	Escarpado
> 75	Muy Escarpado

Fuente: Henao (1998)

Los parámetros que definen la red hidrográfica se presentan a continuación:

- **Numero de orden del cauce.** Según Horton (1945), es una medida de la ramificación del cauce principal. Mientras mayor sea el grado de corriente, mayor será la red y su estructura más definida.
- **Pendiente del cauce principal.** De acuerdo con la literatura, la pendiente del cauce se relaciona con la velocidad del agua para transportar sedimentos dependiendo de la variación de inclinación del terreno, influyendo en el comportamiento de la creciente de un cauce según la cantidad de lluvia que se deposite y se puede calcular por medio del método de elevaciones extremas (Ecuación 6).

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} * 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde, S – Pendiente del cauce principal, H_{max} – Elevación máxima, H_{min} – Elevación mínima, L – Longitud del cauce principal.

➤ **Clasificación del destino final de las aguas**

Según Henao (1998), las cuencas hidrográficas se pueden clasificar según el destino final de sus aguas como: (a) **Exorreica:** Cuando las aguas de la cuenca llegan al mar; (b) **Endorreica:** Las aguas drenan hacia un lago y se pierden por evaporación y (c) **Arreica:** cuando la cuenca que no desemboca ni en el mar ni en un depósito interior, sino que sus aguas se pierden en el camino por evaporación o infiltración, sin que en este último caso se conviertan en corrientes subterráneas.

Por otra parte, el tiempo de concentración según distintos autores se define como el tiempo que demora en viajar una partícula de agua desde el punto más remoto hasta cuando llegue a la salida de la misma y durante el cual todos los puntos de la cuenca portan al caudal. Chow *et al* (1994), para la estimación del tiempo de concentración recomienda emplear varias ecuaciones empíricas disponibles en la literatura científica, se considera apropiado incluir al menos cinco estimaciones diferentes. En la tabla 2 se presentan distintas ecuaciones para el cálculo del tiempo de concentración por distintos autores.

Tabla 2. Ecuaciones para determinar tiempo de concentración

MÉTODO	ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN
Kirpich:	$T_c = 0.06626 * \left(\frac{L^2}{S_m}\right)^{0.385}$	<i>T_c</i> : Tiempo de concentración (minutos) <i>L_{cp}</i> : Longitud del cauce principal <i>A</i> : Área de la cuenca (<i>Km</i> ²) <i>S_m</i> : Pendiente promedio del cauce principal (m/m)
Giandotti:	$T_c = \frac{4 * \sqrt{A} + 1.5 * L_{cp}}{25.3 * \sqrt{L_{cp} * S_m}}$	<i>T_c</i> : Tiempo de concentración (Horas) <i>S_m</i> : Pendiente promedio del cauce principal (m/m) <i>L_{cp}</i> : Longitud del cauce principal <i>A</i> : Área de la cuenca (<i>Km</i> ²) Siempre que $L/3.600 \leq t_c \leq (L/3.600 + 1,5)$
Témez:	$T_c = 0.3 * \left(\frac{L_c}{S_m^{0.25}}\right)^{0.76}$	<i>T_c</i> : Tiempo de concentración (Horas) <i>S_m</i> : Pendiente promedio del cauce principal (m/m) <i>L_{cp}</i> : Longitud del cauce principal
Ventura-Heras:	$T_c = \alpha * \frac{A^{0.5}}{S_m}$	<i>T_c</i> : Tiempo de concentración (Horas) <i>S_m</i> : Pendiente promedio del cauce principal (m/m) <i>L_{cp}</i> : Longitud del cauce principal <i>A</i> : Área de la cuenca (<i>Km</i> ²) <i>a</i> : Alejamiento medio, $a = L/A^{0.5}$; Siendo $0,05 \leq a \leq 0,5$
Passini:	$T_c = 0.108 * \frac{(A * L_{cp})^{1/3}}{\sqrt{S}}$ $\alpha = L/\sqrt{A}$	<i>T_c</i> : Tiempo de concentración (Horas) <i>S_m</i> : Pendiente promedio del cauce principal (m/m) <i>L_{cp}</i> : Longitud del cauce principal <i>A</i> : Área de la cuenca (<i>Km</i> ²) Siendo $0,04 \leq a \leq 0,13$ <i>a</i> = alejamiento medio
Bransby – Williams:	$T_c = 14.6 * L * A^{-0.1} * S^{-0.2}$	<i>T_c</i> : Tiempo de concentración (Horas) <i>S_m</i> : Pendiente promedio del cauce principal (m/m) <i>L_{cp}</i> : Longitud del cauce principal <i>A</i> : Área de la cuenca (<i>Km</i> ²)

Fuente: Acosta S. (2017)

Los bosques son testigos de la erosión del suelo; la vegetación en su conjunto juega un papel fundamental en el ciclo hidrológico; así, por ejemplo, en las selvas y bosques la presencia de la vegetación reduce la energía de la precipitación, lo cual favorece no solo en el proceso de infiltración sino que también regula la cantidad de agua de escorrentía. De igual manera, el proceso de evapotranspiración también está condicionado por la vegetación e interviene de manera positiva en el ciclo hidrológico. La pérdida del bosque protector puede tener consecuencias nefastas en el ciclo del agua aumentando la erosión del suelo y alterando la disponibilidad del recurso en época seca. De acuerdo con el reporte del IGAC, el país afronta un serio conflicto sobre el uso del suelo, que se evidencia en el hecho de que en buena parte de la jurisdicción nacional a la tierra no se le está dando el uso que debería, lo que, literalmente, la está agotando (TIEMPO, 2017).

El proceso de erosión del suelo está intrínsecamente relacionado con muchos de los mismos factores que determinan las vías de flujo en una cuenca y que pueden verse afectados de manera similar por alteraciones del paisaje. Lal (1990); en Oestreicher (2008), divide los factores que impulsan la erosión en las fuerzas activas y pasivas; las fuerzas pasivas son el clima, las propiedades del suelo, las características hidrológicas y accidentes geográficos. Las fuerzas activas son las que se refieren a cambios de uso del suelo y pérdida de la cobertura vegetal hechas por los seres humanos, que serán el foco de la discusión siguiente. De forma general, en una cuenca hidrográfica, los procesos erosivos están condicionados principalmente por factores como la precipitación, vegetación y además las características de los suelos.

En definitiva, la erosión natural puede ser acelerada con la conversión del suelo y las malas prácticas, perturbando considerablemente la superficie del suelo y la vegetación de protección, que a menudo deriva grandes cantidades de producción de sedimentos en las cuencas. Pese a lo expuesto anteriormente, la realidad actual hace que las características de las concentraciones de sedimento en los ríos dependan, casi exclusivamente, de las actividades humanas (uso de la tierra) a nivel de cuencas hidrográficas (García-Chevesich, 2008). El uso de la tierra es el factor más importante dentro del conjunto de los factores que afectan la erosión y la sedimentación.

6.3.3. Cobertura y Uso del suelo

El suelo es un componente esencial de la Tierra y Ecosistemas; ambos son conceptos amplios que abarcan la vegetación, el agua y el clima en el caso de la tierra y además abarca las consideraciones sociales y económicas en el caso de los ecosistemas (FAO, 2017). Por ser el concepto de suelo tan amplio, las posibilidades de utilización del mismo son muy variadas. La tierra comprende todos los elementos que se encuentran sobre la superficie del suelo ya sean naturales o creados por el hombre, es decir tanto la vegetación natural, como todo tipo de construcción o edificación destinada al desarrollo de las actividades humanas. De acuerdo Maza C., (2009) el término uso del suelo se

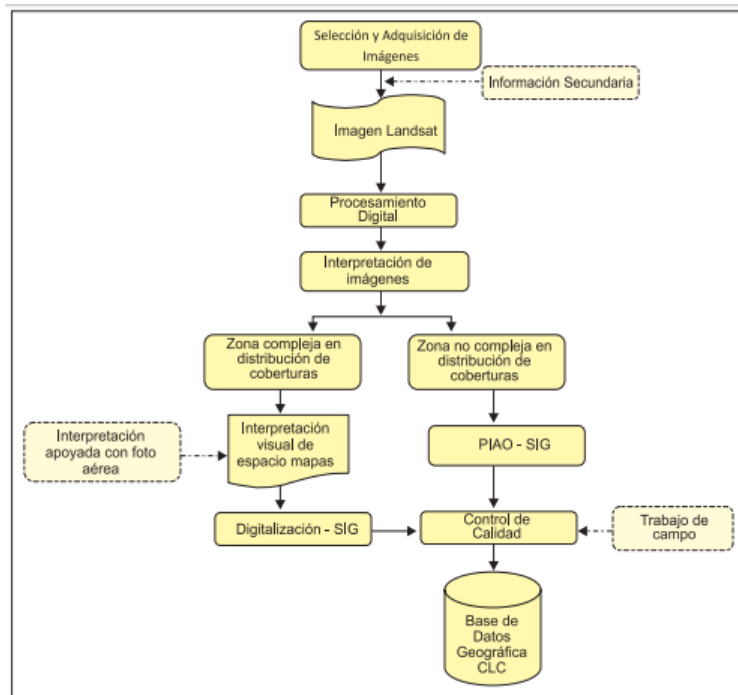
aplica a los diferentes tipos de cobertura que el hombre crea para satisfacer sus necesidades materiales o espirituales. A la cobertura vegetal se la puede definir como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre. También se incluyen las coberturas vegetales inducidas que son el resultado de la acción humana como serían las áreas de cultivos (Bennett 1999; en Maza C., 2009).

Espinosa C. (2003) afirma que en vista de que el uso de la tierra está en función de sus limitantes, potencialidades y según las posibilidades y costumbres de los habitantes del territorio, se termina evaluándose y clasificándose en una serie de categorías. En concordancia con distintos autores, la clasificación de la cobertura y uso de la tierra constituye uno de los aspectos más importantes dentro del análisis físico biótico para el ordenamiento territorial y manejo de cuencas por ser indispensable no sólo en la caracterización y espacialización de las unidades de paisaje, sino también, por su influencia en la formación y evolución de los suelos. Por otro lado, determinar el uso actual del suelo e identificar sus principales coberturas vegetales, nos permite establecer los grados de intervención del hombre en ecosistemas de interés, cuál es su estado de conservación, además de identificar los principales conflictos socio ambientales existentes y establecer las responsabilidades sociales en el deterioro y las estrategias de ordenamiento y restauración.

Para generar la espacialización de las coberturas y usos del suelo es necesario acudir a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar mapas temáticos; de acuerdo a lo mencionado por Sendra (1992); en Maza (2009), los SIG ofrecen numerosas ventajas respecto a la cartografía convencional, puesto que de forma automática permiten manejar datos espaciales internamente referenciados, producir mapas temáticos y realizar procesos de información de tipo digital. Uno de los sistemas de información geográfica (SIG) de referencia sobre ocupación del suelo en Colombia es CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover (CLC), promovido por la Agencia Europea de Medio Ambiente para la creación de mapas temáticos sobre cobertura y uso del suelo.

Dentro del programa CORINE (Coordination of information on the environment) promovido por la Comisión de la Comunidad Europea fue desarrollado el proyecto de cobertura de la tierra "CORINE Land Cover" 1990 (CLC90), el cual definió una metodología específica para realizar el inventario de la cobertura de la tierra. La base de datos de Corine Land Cover Colombia (CLC) permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas. El esquema metodológico Corine Land Cover contempla una metodología específica para realizar el inventario de la cobertura de la tierra (Figura 5).

Figura 5. Modelo general de la metodología Corine Land Cover (CLC)



Fuente: Melo y Camacho (2005)

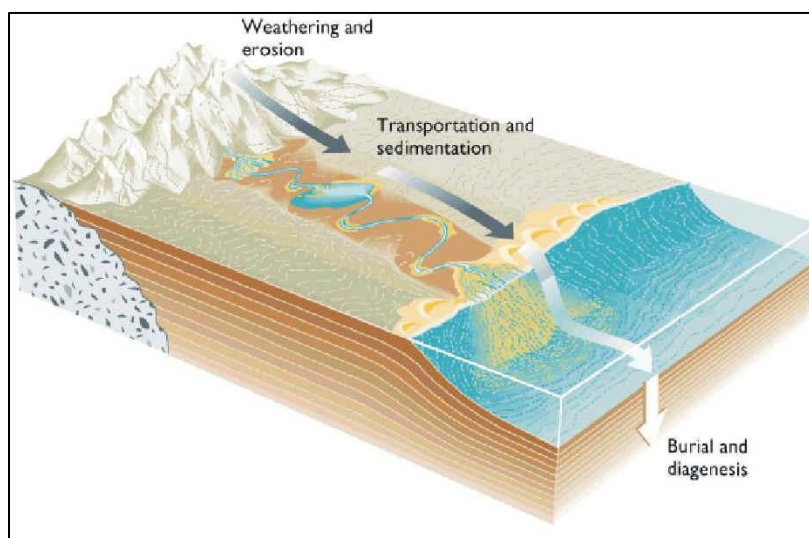
6.3.4. Sedimentos y flujo de sedimentos

De acuerdo con Yehayis E. (2010), la evaluación de los impactos del uso de la tierra sobre el recurso hídrico no tiene en cuenta los aspectos de distribución espacial y temporal. Las consideraciones de escala, sin embargo, son de una importancia fundamental a la hora de evaluar estos impactos ya que indican si un uso de la tierra aguas arriba puede afectar al uso del agua aguas abajo. Además, afirma que la escala espacial, es decir, el tamaño de la cuenca del río, el impacto del uso del suelo puede llegar a ser menos importante debido a los efectos de desplazamiento, tales como de-sincronización (por ejemplo, en el caso de inundaciones), la capacidad de almacenamiento del lecho del río (sedimentación) o la capacidad de auto-limpieza del río (contaminación orgánica). La Escala temporal es otro aspecto importante de los impactos del uso de la tierra, ya que determina la percepción del impacto, así como el coste económico asociado a él (Yehayis E., 2010).

Según la publicación en el 2010 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), los sitios en construcción representan la actividad humana más devastadora, en términos erosivos, debido a la agresividad espacial y temporal asociada a éstos.

Para analizar la variabilidad espacial de la producción de sedimentos en la cuenca y su relación con la sedimentación, es necesario adoptar una visión global del sistema y comprender cada uno de los procesos a los que se ve sometido el sedimento: producción, transporte y finalmente depositación, como se ve en la Figura 6, causados por impacto de la lluvia y el agua que fluye. Ibáñez (2008), señala que el material procedente de la erosión llega a las corrientes a través de tributarios menores, por la capacidad que tiene la corriente de agua para transportar sólidos, también por movimientos en masa, o sea, desprendimientos, deslizamientos y otros.

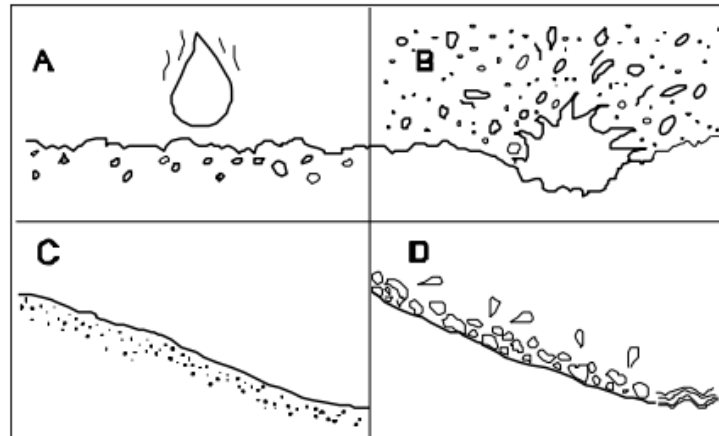
Figura 6. Proceso de producción, transporte y sedimentación en cuencas



Fuente: Ibáñez (2008)

Acorde con Ibáñez (2008), los sedimentos son partículas procedentes de las rocas o suelos, que son transportadas por el agua y por el viento; todas estas partículas, son finalmente depositadas a lo largo del cauce, en lagos o lagunas, en el mar o en las partes bajas de la cuenca, principalmente en zonas planas. Por otra parte, Hermelin M. & Restrepo J. (2006), sostienen que la producción de sedimentos es la carga de sedimentos normalizada para el área de drenaje y es el resultado neto de los procesos de erosión y deposición dentro de una cuenca. Nájera (2015), describe que el proceso de erosión en cuencas hidrográficas se inicia con la precipitación, como se observa en la Figura 7; las gotas de lluvia generan un impacto sobre el suelo causando que (A), sus agregados sean desintegrados en partículas minúsculas (B), se tapen los poros formando una selladura superficial (C) y provocando el escurrimiento superficial del agua lluvia (D).

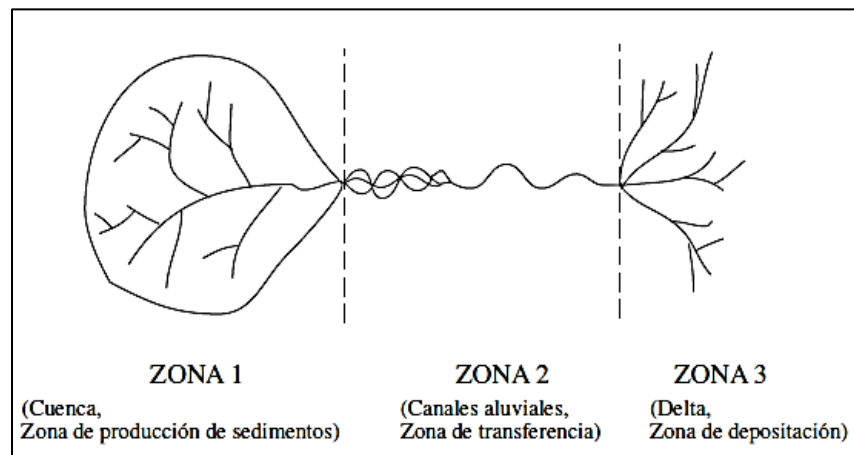
Figura 7. Mecanismos de erosión hídrica



Fuente: Derpsch (2000)

Ahora, una vez que se han generado los sedimentos, éstos a dónde van? La respuesta a esta pregunta conduce a considerar el concepto del proceso de transporte de sedimento, que se refiere al traslado de materiales erosionados de un lugar a otro, motivados por agentes naturales, como el viento o el agua en sus formas de escorrentía o cursos de agua superficiales para finalmente ser sedimentados. Los sedimentos son transportados aguas abajo como lo expresa Niño (2004), en un sistema fluvial idealizado (Figura 8), el cual incluye las Zonas 1, 2 y 3. El autor describe que la zona de más aguas arriba (Zona 1), corresponde a la cuenca hidrográfica, es decir, la zona en la que los sedimentos son generados. La Zona 2 es la zona de transferencia o traslado del material sólido, y dónde para un cauce estable, la tasa de entrada de sedimentos iguala a la tasa de salida de ellos. La Zona 3 es eventualmente la de deposición de los sedimentos. Por tanto, el agua y el sedimento procedentes de la Zona 1 son los que alimentan al resto del sistema fluvial.

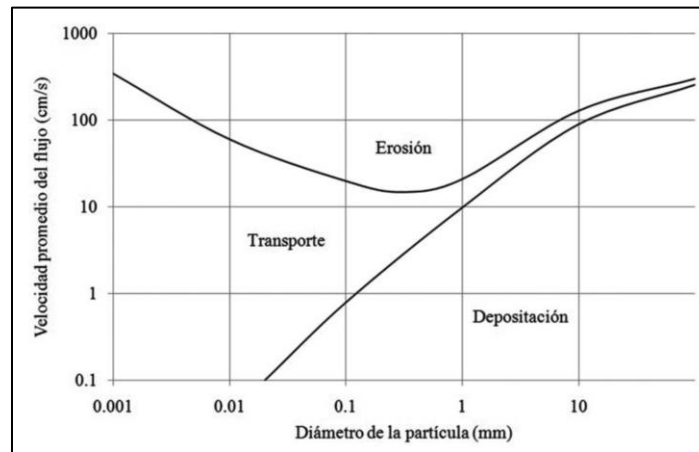
Figura 8. Sistema fluvial idealizado



Fuente: Niño (2004)

En la figura 9, se observa el diagrama de Hjulstrom, el cual indica la velocidad mínima requerida para desprender, transportar o depositar partículas de suelo, según su diámetro, para flujos de agua. Merrit *et al* (2003); citado por Nájera (2015), afirma que una vez se inicia el escurrimiento, dicho flujo causa un esfuerzo cortante sobre la superficie del suelo, el que de exceder la fuerza cohesiva del mismo, denominado esfuerzo crítico, causará el desprendimiento del suelo. La tasa de erosión en un lugar determinado dependerá de diferentes factores entre los que se pueden contar la intensidad de las precipitaciones y su duración, el grado de inclinación de la pendiente de las laderas, su longitud, la erodabilidad propia del suelo y la cobertura del terreno tanto en altura como en superficie, siendo el factor climático el más influyente ya que determina el volumen de escorrentía.

Figura 9. Diagrama de Hjulstrom.

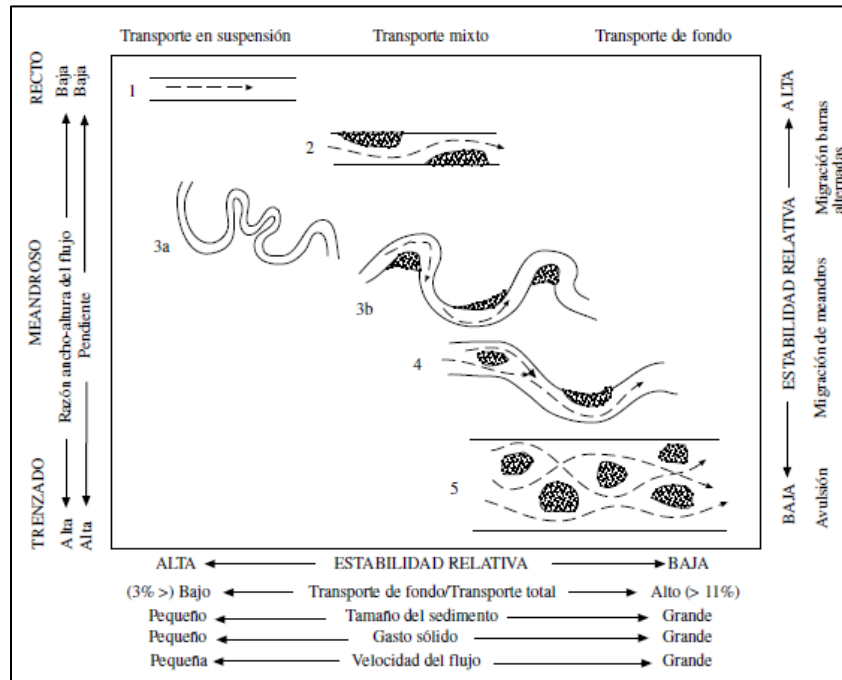


Fuente: UNESCO (2010)

El movimiento de los sedimentos en las corrientes y ríos presenta dos formas: sedimentos en suspensión y sedimentos de fondo; Ambos modos de transporte, de fondo y suspensión, generalmente coexisten en cauces naturales Niño (2004). No obstante, Schumm y Meyer (1979); en Niño (2004), de acuerdo con la forma propia o modificada del cauce, se tendrán distintas formas en el movimiento de los sedimentos, como se observa en la Figura 10. Los sedimentos en suspensión están constituidos por las partículas más finas mantenidas en suspensión por los remolinos de la corriente y sólo se asientan cuando la velocidad de la corriente disminuye, o cuando el lecho se hace más liso o la corriente descarga en un pozo o lago. Las partículas sólidas de mayor tamaño son arrastradas a lo largo del lecho de la corriente y se designan con el nombre de arrastre de fondo. Existe un tipo intermedio de movimiento en el que las partículas se mueven aguas abajo dando rebotes o saltos, a veces tocando el fondo y a veces avanzando en suspensión hasta que vuelven a caer al fondo. A este movimiento se le denomina saltación y es una parte muy importante del proceso de transporte por el viento; en la

corriente líquida la altura de los saltos es tan reducida que no se distinguen realmente del arrastre de fondo.

Figura 10. Tipo de transporte de sedimentos en relación al tipo de cauce



Fuente: Schumm y Meyer (1979); en Niño (2004)

Todos los tipos de movimiento que tienen las partículas se inician cuando las fuerzas de arrastre son mayores que las fuerzas estabilizantes; de acuerdo con el diagrama de Hjulstrom (Figura 9), para generar el transporte de sedimentos, el diámetro de estos debe ser relativamente pequeño, alcanzado diámetros inferiores a 0,03 mm, de igual modo las velocidades, entre más grande sea el sedimento la velocidad requerida para generar el movimiento será mayor; ahora bien si se produce una disminución en la velocidad de la corriente, facilitara la decantación de los sedimentos en los embalses; simultáneamente, Linsley (1986); en Ramirez C. & Rodriguez A., (2015), afirman que las velocidades del flujo superficial son también mayor en taludes muy inclinados. El sedimento que llega al embalse, se deposita formando un delta de sedimento. Típicamente, las partículas más gruesas, que se depositan inmediatamente, llegan al embalse. Las partículas más finas, siguen una corriente de densidad, formando una turbidez para luego depositarse (García Sánchez, 2000; en Londoño G., *et al*, (2013).

6.3.5. Modelación hidrológica y de sedimentos

Se han formulado diversas ecuaciones que determinan la cantidad de material que es erodado, transportado y depositado a lo largo de la cuenca, no obstante muchas de ellas

presentan limitaciones para la aplicabilidad en diferentes zonas de estudios ya que son relaciones empíricas y estadísticas que no representan el proceso físico que se está desarrollando y están sujetas a las condiciones bajo las cuales fueron definidas. Según Salvany *et al* (1996); en Tavera P., (2015), la conceptualización del transporte de sedimentos en las cuencas requiere de la definición y determinación de muchas variables que están involucradas tales como la intensidad y duración de la lluvia, tipo de suelo, cobertura vegetal, usos del suelo e infiltración del suelo. En la actualidad los investigadores han hecho esfuerzos para crear formulaciones y modelos que permitan evaluar dichos sucesos con el fin de buscar una estandarización y aplicación general de estos métodos como representativos de los procesos físicos en las cuencas, con el abandono de expresiones empíricas provenientes de análisis estadísticos.

De acuerdo con Londoño G., *et al* (2013), los modelos de erosión se clasifican en tres grupos dependiendo de la forma matemática como estén expresados los fenómenos físicos:

- **Modelos empíricos:** Se basan en el análisis estadístico de datos obtenidos mediante observación. Son generalmente los más sencillos de aplicar.
- **Modelos conceptuales:** Representan la erosión partiendo de una serie de almacenamientos entre los que se establecen relaciones matemáticas simplificadas.
- **Modelos de base física:** Basados en leyes físicas que controlan las relaciones entre los parámetros y los procesos observados.

Estos modelos han sido ampliamente utilizados y los resultados obtenidos con su aplicación son buenos. Casi todos estos están basados en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), la cual ha tenido diversas modificaciones, que han surgido de la necesidad de muchos autores de acercarse más a la realidad. Esta ecuación o modelo base, además de haber sido modificada, ha sido computarizada en modelos que permiten calcular automáticamente la producción de sedimentos con todo el proceso hidrológico y con la capacidad de modelar escenarios con el fin de estimar la respuesta de una cuenca ante posibles eventos (Londoño G., *et al*, 2013). El SWAT es uno de los modelos más utilizados para la estimación de sedimentos en una cuenca grande y es el modelo a utilizar para desarrollar el presente estudio.

6.3.6. Descripción del modelo SWAT

Tamayo G. (2017), describe al modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT), como un modelo lluvia- escorrentía, en base física, semidistribuido en función de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), determinístico y continuo, que opera en base de información climática diaria, que es eficiente computacionalmente, y capaz de simular

largos periodos de tiempo. López (2012), sostiene que el modelo utiliza datos de entrada que se pueden conseguir fácilmente y resulta computacionalmente eficiente para simulaciones a larga escala, especialmente en la determinación de prácticas de uso de suelo. Mediante su aplicación se pretende determinar los valores más adecuados y ajustados al comportamiento real de la cuenca en cuanto al transporte de sedimentos. Neitsch *et al* (2011); en Tamayo G., (2017), sostiene que el SWAT es un modelo que incluye varios submodelos/componentes como: clima, hidrología, propiedades del suelo, crecimiento de las plantas, nutrientes y pesticida, patógenos y bacterias y prácticas de manejo del suelo. Donde el balance hídrico constituye la fuerza impulsora detrás de todo o que pasa dentro de la cuenca.

El SWAT al analizar la producción de sedimentos lo hace aplicando los principios de la fórmula conocida como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, cuya sigla en inglés es (USLE). Esta ecuación predice el promedio a largo plazo de la tasa anual de erosión en una pendiente del terreno basado en el patrón de lluvia, tipo de suelo, topografía, cultivos y prácticas de manejo (Ecuación 7). La fórmula consiste en la relación de cinco factores que inciden en la cantidad generada de sedimentos en las cuencas.

$$A = R * K * L * S * C * P$$

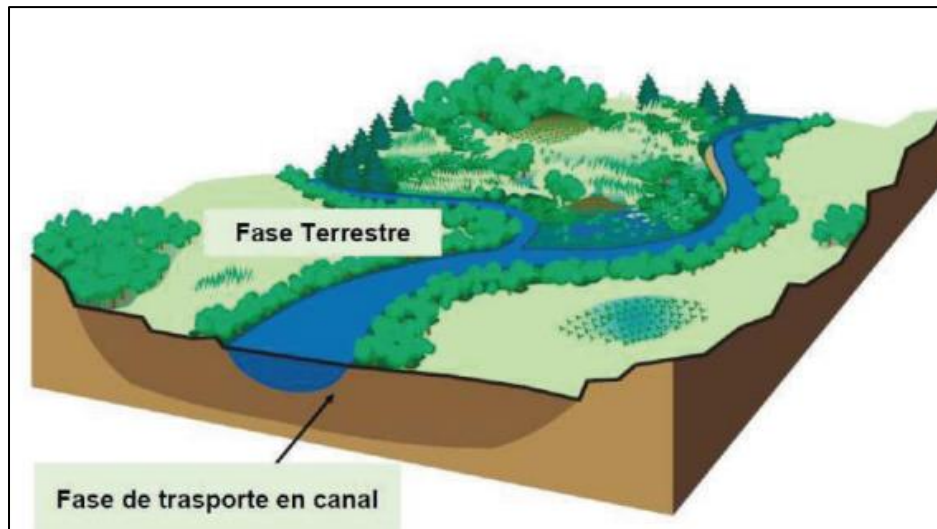
Ecuación 7

Donde; Fuerza erosiva de la lluvia o factor (R) relacionada con la intensidad de la lluvia, Tipo de suelo o factor (K), Uso de la tierra y manejo de cultivo o factor (C), Prácticas agrícolas o factor (P) y Características topográficas o factor (LS)

Para propósitos de la simulación, la cuenca hidrográfica será dividida en un número de subvertientes o sub-cuencas. El uso de sub-vertientes en la simulación es muy útil, particularmente, cuando hay diversas áreas de la misma cuenca, que se ven afectadas por el uso de suelos o suelos bastante desiguales de tal forma, que impactan grandemente la hidrología del sector (Uribe, 2010). La división en subcuencas, permite que los cálculos que se realicen se obtengan con la mayor exactitud posible.

La simulación hidrológica de la cuenca puede ser separada en dos divisiones mayores. La primera división es la Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico, esta fase controla la cantidad de agua, sedimentos, las cargas de alimento nutritivo y de pesticida al canal principal de cada subcuenca. La Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico, la cual define el movimiento del agua, sedimentos, nutrientes, pesticidas, a través de la red de ríos de la cuenca hidrográfica, (Figura 11). La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varias cosechas y suelos. Las escorrentías son predichas separadamente para cada HRU (Unidades de respuesta hidrológica) y dirigidas para obtener las escorrentías totales para las cuencas. Esto aumenta la certeza y da una mejor descripción física del equilibrio del agua (Barbudo C. *et al*, 2016).

Figura 11. Fase terrestre y de transporte de agua en SWAT



Fuente: Van Griensven et al (2008) en Tamayo G. (2017)

6.3.6.1. Fase terrestre del ciclo hidrológico

Esta fase controla la cantidad de agua, sedimentos, las cargas de alimento nutritivo y de pesticida al canal principal de cada sub cuenca. El ciclo hidrológico es simulado por SWAT basado en la ecuación 8 de equilibrio de agua (Uribe, 2010).

$$SW_t = SW_o + \sum(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde; SW_t –Es el contenido final de agua en el suelo (mm H₂O), SW_o –Contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm), R_{day} –Cantidad de precipitación en un día i (mm), Q_{surf} –Cantidad de escorrentía en la superficie en un día i (mm), E_a – Cantidad de evapotranspiración en un día i (Mm H₂O), W_{seep} –Cantidad de agua que percola en el suelo en un día i (mm H₂O), Q_{gw} –Cantidad de flujo de retorno en un día i (mm H₂O).

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varias cosechas y suelos. Las escorrentías son predichas separadamente para cada HRU (Unidades de respuesta hidrológica) y dirigidas para obtener las escorrentías totales para las cuencas. Esto aumenta la certeza y da una mejor descripción física del equilibrio del agua. (Barbudo C. *et al*, 2016). De acuerdo con el Manual del SWAT, por Uribe (2010), las diferentes entradas y procesos implicados en esta fase del ciclo hidrológico, son resumidos en las secciones siguientes:

➤ **Clima:**

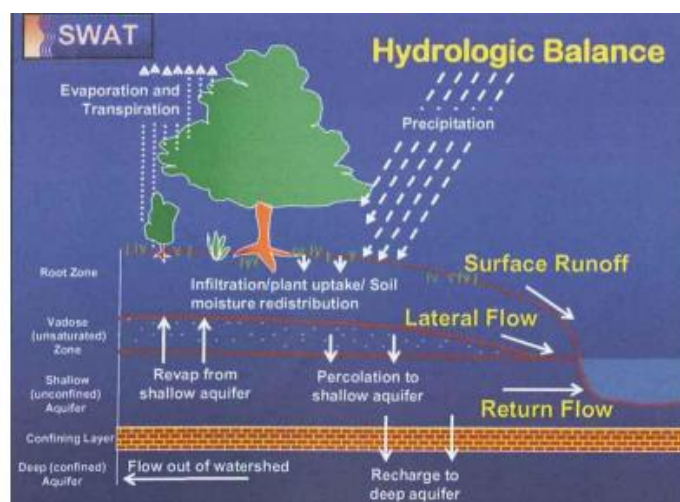
El clima de una cuenca proporciona las entradas de humedad y energía, que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Las variables climáticas para el SWAT consisten en precipitación diaria, temperatura ambiente (máxima y mínima), radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa.

El SWAT utiliza un modelo desarrollado por Nicks (1974) para generar precipitación diaria para simulaciones que no lean datos medidos. Este modelo de precipitación también es utilizado para llenar los datos faltantes en los registros medidos. El generador de la precipitación utiliza un modelo de cadena de primer orden de Markov para definir un día como húmedo o seco comparando un número al azar (0.0-1.0) generado por el modelo a probabilidades húmedo-secas mensuales ingresadas.

➤ Hidrología:

Cuando la precipitación desciende puede ser interceptada y puede ser contenida en el dosel de la vegetación o cae a la superficie del suelo. El agua de la superficie de suelo se infiltrará en el perfil de la tierra o fluirá sobre el terreno como escorrentía. El agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar lentamente al sistema de agua-superficie a través de pasos subterráneos. El SWAT simula volúmenes de escorrentía a lo largo de una superficie inclinada para cada HRU, utilizando una modificación del método de curva numérica del Servicio de conservación de suelos del USDA, o el método de infiltración de Green & Ampt. Los conductos potenciales del movimiento de agua simulados por SWAT se ilustran en la figura 12.

Figura 12. Movimiento del agua en SWAT



Fuente: Uribe (2010)

➤ Cobertura de tierra/crecimiento de la planta

El SWAT utiliza un solo modelo de crecimiento de plantas para simular toda clase de coberturas de tierra. El modelo puede diferenciar entre plantas anuales y perennes. El modelo de crecimiento de la planta es utilizado para valorar la eliminación de agua y nutrientes de la zona de la raíz, transpiración y la producción de biomasa.

➤ Erosión

La producción de erosión y de sedimento se estima para cada HRU con la ecuación modificada de pérdida universal de suelo (MUSLE) por William, 1975. Mientras que la USLE utiliza la lluvia como un indicador de energía erosiva, MUSLE utiliza la cantidad de pérdidas para simular la producción de erosión y sedimentos (Ecuación 9).

$$Sed = 11.8 * (Q_{surf} * q_{peak} * AREA_{hru})^{0.56} * K_{USLE} * C_{USLE} * P_{USLE} * LS_{USLE} * CFRG \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde; Sed –Producción de sedimentos en un día dado (Toneladas métricas), Q_{surf} –Volumen de superficie de escorrentía (m^3), q_{peak} –Escorrentía máxima, $AREA_{hru}$ –Área de HRU, K_{USLE} –Factor de erodabilidad del suelo, C_{USLE} –Factor de cobertura y gestión de USLE, P_{USLE} –Factor de prácticas y conservación de USLE, LS_{USLE} –Factor topográfico, $CFRG$ –Factor fragmento macro.

➤ Nutrientes

El SWAT rastrea el movimiento y la transformación de diversas formas de nitrógeno y fósforo en las cuencas. En el suelo la transformación de nitrógeno de una forma u otra es regida por el ciclo del nitrógeno, de igual modo, sucede con las transformaciones para el fósforo. Los nutrientes pueden ser introducidos a los canales principales y transportados ríos abajo por la escorrentía y flujo superficial o subterráneo lateral.

➤ Pesticidas

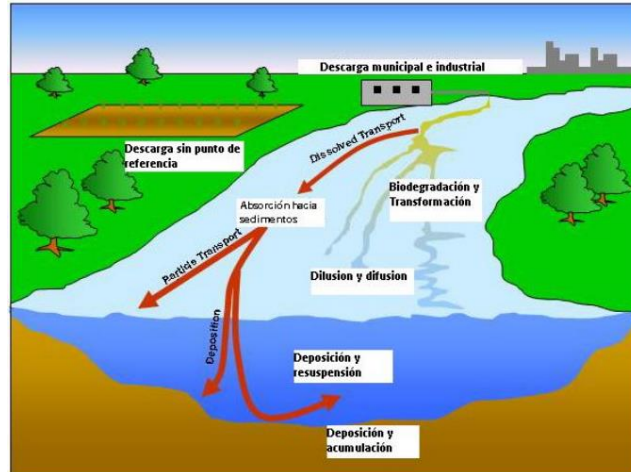
SWAT simula el movimiento de los pesticidas en la red de corrientes a través de la escorrentía de superficie (en solución y adsorción al sedimento transportado por las escorrentías) hacia el perfil de suelo y acuífero por filtración. Las ecuaciones utilizadas para modelar el movimiento del pesticida en la fase de suelo del ciclo hidrológico fueron adoptadas por GLEAMS. El movimiento del pesticida es controlado por la solubilidad, degradación media-vida y coeficiente de absorción de carbono orgánico en el suelo.

6.3.6.2. Fase de enrutamiento del ciclo hidrológico

Uribe (2010), considera que una vez que el modelo SWAT determina las cargas de agua y sedimento hacia el canal principal, las cargas son dirigidas por la red de corriente de la cuenca usando una estructura de orden semejante a la HYMO. El enrutamiento en el canal principal puede ser dividido en cuatro componentes: agua, sedimento, nutrientes y

sustancias químicas orgánicas (Figura 13). A continuación explicaremos el componente de agua y sedimento, de acuerdo con Uribe (2010), los cuales son los temas principales de interés en el presente estudio.

Figura 13. Procesos de corriente modelados por SWAT



Fuente: Uribe (2010)

➤ **Enrutamiento del flujo**

Cuando el agua fluye río abajo, una porción puede perderse debido a la evaporación y transmisión por la capa del canal. Otra pérdida potencial es la eliminación del agua del canal para el uso agrícola o humano. El flujo puede ser suplementado por la lluvia directamente en el canal y/o adicionado de descargas de agua del punto de la fuente. El flujo es dirigido por el canal que utiliza un método variable de coeficiente de almacenamiento desarrollado por William (1969) o el método de enrutamiento de Muskingum.

➤ **Enrutamiento del sedimento**

La afluencia del sedimento puede originarse del transporte a través de los alcances río arriba o de escorrentías de superficie dentro de la subcuenca. La concentración del sedimento en el depósito es estimada utilizando una ecuación sencilla de continuidad basada en el volumen y la concentración de la afluencia y del agua retenida en el depósito. El transporte del sedimento hacia el cauce principal es controlado por la operación simultánea de los procesos de degradación y depositación. El asentamiento del sedimento en el depósito es regido por la concentración del sedimento de equilibrio y la media del tamaño de la partícula del sedimento. La cantidad de sedimento en el desagüe de los depósitos es el producto del volumen de fluidez del agua fuera del depósito y la concentración suspendida del sedimento en el depósito en el momento de la liberación.

7. METODOLOGÍA

➤ RECONOCIMIENTO DE LA ZONA Y SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE AFORO, NIVEL DE AGUA Y MUESTREO DE SEDIMENTOS

Se ejecutaron visitas a campo en el periodo de una semana realizando recorridos a lo largo de la quebrada La María y sus principales afluentes; Caño Arenales y Caño Lajas, con el fin de determinar y establecer las estaciones de aforo y nivel de agua, incluyendo de igual manera el muestreo de sedimentos en cada punto seleccionado. De acuerdo con la Guía de Practicas Hidrológicas del Programa Hidrológico Internacional de la OMM (2011) para América Latina y el Caribe en su documento técnico N° 168, se adoptaron los criterios en el proceso de selección como: fácil acceso a la zona, sedimentos colmatados y representativos del área, sitio conveniente para alojar la escala limnimétrica evitando posibles daños por los escombros llevados por las aguas durante las crecidas del rio, longitud del tramo suficiente para medir caudal, entre otros.

Durante el paso por sitio se pudo tener una idea de la distribución de la cuenca dentro de La Serranía De La Lindosa. Se recorrieron los alrededores de la microcuenca La María, y se pudo observar no solamente la gran diversidad natural compuesta por paisajes de excepcional belleza, compuesta por variedad de formas en sus afloramientos rocosos, sino también la riqueza hídrica incluyendo Caño Lajas, uno de los principales afluentes de la Quebrada La María, cuyo lecho son lozas de roca que conforman microambientes muy especiales con la presencia de algas rojas (Fotografía 1), constituyendo la zona objeto principal de conservación.

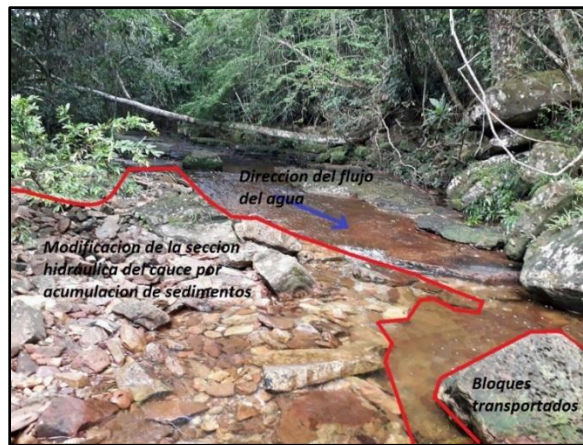
Fotografía 1. Caño Lajas (izquierda). Algas rojas presentes en Caño Lajas (Derecha)



Fuente: Acosta S. (2017)

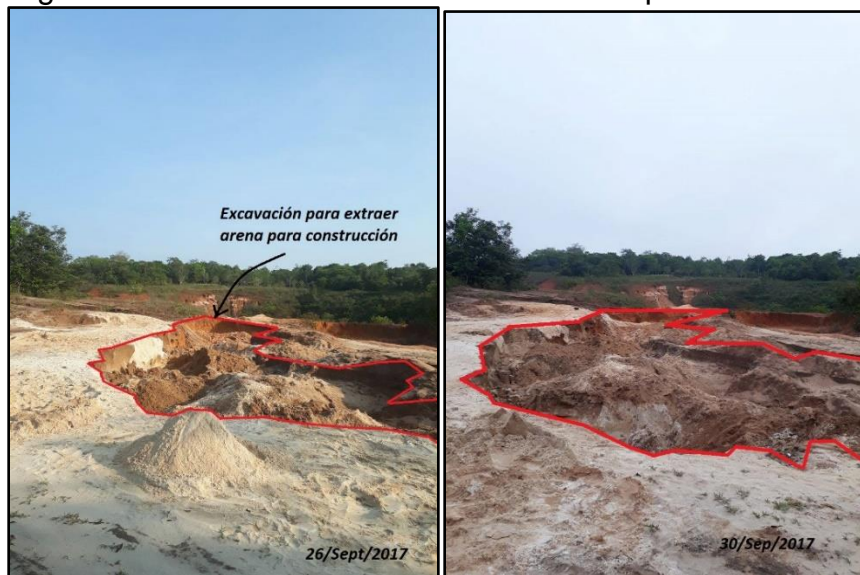
Al mismo tiempo se evidenció la presencia de actividades antrópicas que pueden ser causa importante en la producción de sedimentos reflejados en la colmatación y depositación de arenas y bloques transportados por la corriente durante avenidas torrenciales provenientes de la parte alta de la microcuenca (Fotografía 2). Paralelamente se encontró en la parte media de la microcuenca la existencia de varias zonas ilegales de extracción de materiales para construcción (Fotografía 3) y extensas propiedades con fines agropecuarios como las actividades ganaderas que contribuyen con los procesos erosivos. Con respecto a lo anterior se optó por establecer 4 puntos (Fotografía 4) estratégicos de muestreo que se ubicaron espacialmente (Figura 14) con la ayuda de un GPS marca Garmin y el software ArcGIS versión 10.4.

Fotografía 2. Bloques transportados aguas abajo de Caño Lajas



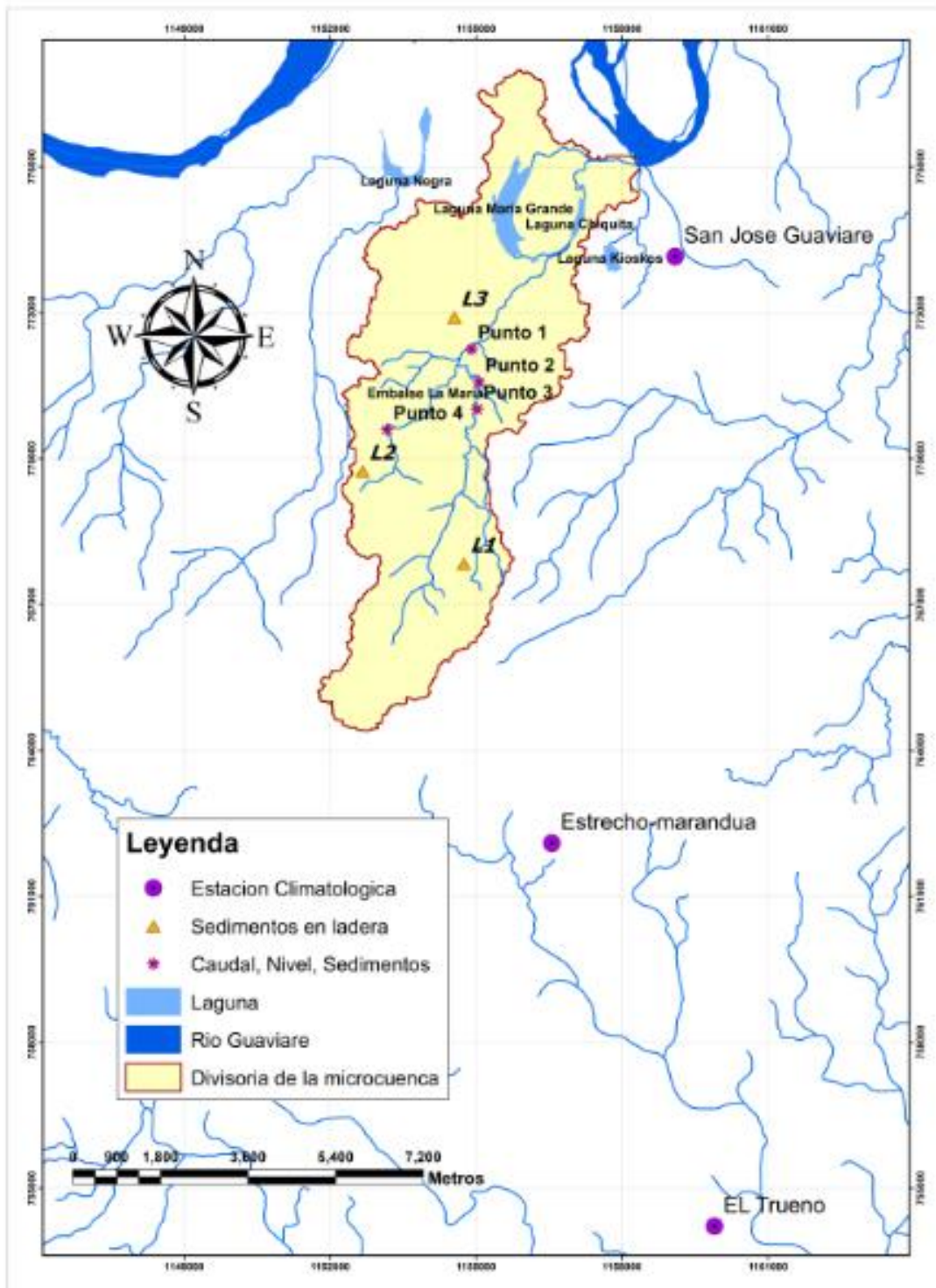
Fuente: Acosta S. (2017)

Fotografía 3. Zona de extracción de materiales para construcción.



Fuente: Acosta S. (2017)

Figura 14. Mapa de ubicación de puntos de muestreo



Fuente: Acosta S. (2017), modificado de Gobernación del Guaviare (2015)

Fotografía 4. Puntos de muestreo



Fuente: Acosta S. (2017)

➤ **DISEÑO DE MUESTREADORES DE SEDIMENTOS Y CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE SEDIMENTOS EN LOS PUNTOS DE MUESTREO**

Para llevar a cabo el monitoreo de la erosión fluvial, se evaluó en campo las condiciones del sitio para realizar la toma de muestras de sólidos y posteriormente su caracterización granulométrica. Como se observa en la fotografía 5, inicialmente se realizó el muestreo superficial o de área en cada sección escogida. El arrastre de fondo en la corriente fue medido por medio de un muestreador tipo trampa Bunte ubicado en el lecho del cauce en cada punto seleccionado (Fotografía 6). Las trampas Bunte se diseñaron y construyeron siguiendo las directrices de Bunte, Swingle & ABT (2007), además señalando la disposición de materiales disponibles en el mercado, y modificando parte del diseño de Bunte para adaptarlos a los requerimientos específicos de la zona, teniendo en cuenta que la microcuenca La María conserva velocidades relativamente bajas con transporte de sedimentos gruesos (arenas).

Fotografía 5. Muestreo de sedimento superficial inicial



Fuente: Acosta S. (2017)

Fotografía 6. Instalación y funcionamiento de trampas Bunte en funcionamiento



Fuente: Acosta S. (2017)

Cada trampa consiste en un marco de madera con dimensiones de 30x20x20 cm, dos estacas o varillas de acero sólido y un saco en tela para poder retener sedimentos. Las trampas estuvieron operativas desde 1/09/2017 a las 13:20:00 hasta el 09/11/2017 a las 15:00:00; dividiendo este tiempo en 5 periodos. Se pesó el material retenido, se realizó el cuarteo en campo y se obtuvo la muestra representativa para el análisis en laboratorio (Fotografía 7). Adicionalmente, se colocaron 3 trampas en laderas ubicadas estratégicamente y espacialmente como se observa en la figura 13, nombradas L1, L2 y L3; con el fin de retener el material erodado, transportado y depositado por los torres

de agua lluvia. Las trampas fueron tipo cuadradas con dimensiones de 90x60 cm en material de lona y ajustadas en las esquinas por varillas (Fotografía 8).

Fotografía 7. Recolección de sedimentos en las trampas Bunte.



Fuente: Acosta S. (2017)

Fotografía 8. Sedimentos recolectados en trampas de ladera

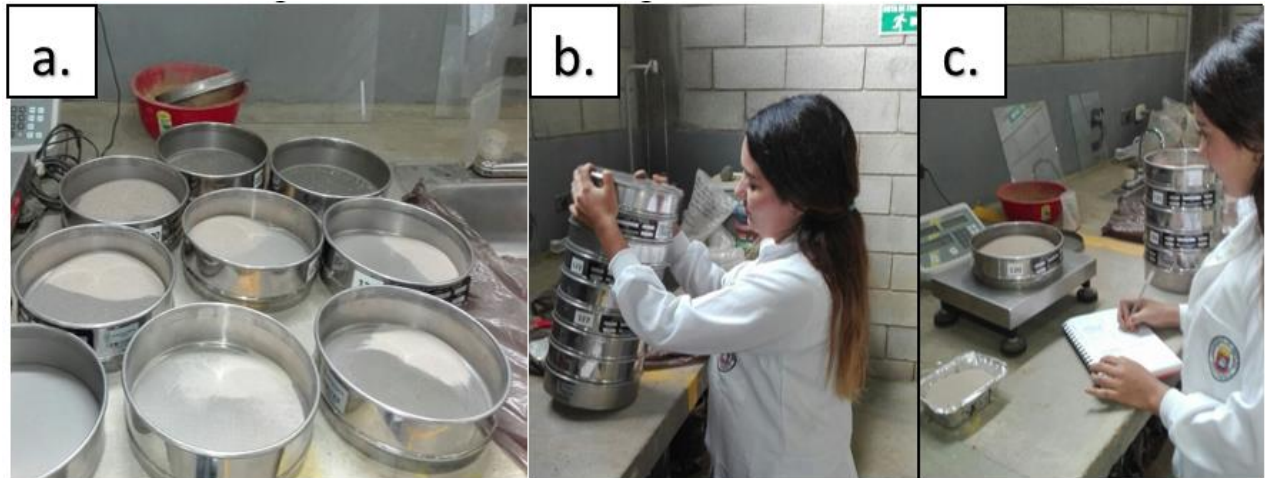


Fuente: Acosta S. (2017)

Se recolecto un total de 20 muestras de las trampas Bunte y 3 de las trampas en laderas, las cuales fueron llevadas al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad de

Pamplona. Allí se realizó la granulometría a cada muestra mediante el tamizado empleando la serie de tamices 4, 16, 20, 40, 50, 60, 80, 100, 140, y 200 (Fotografía 9a y 9b), se pesó cada tamiz con la muestra retenida para calcular el porcentaje de muestra que pasa (Fotografía 9c) y seguidamente se clasificó de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS), para describir la textura y el tamaño de las partículas de los sedimentos.

Fotografía 9. Laboratorio de granulometría de sedimentos



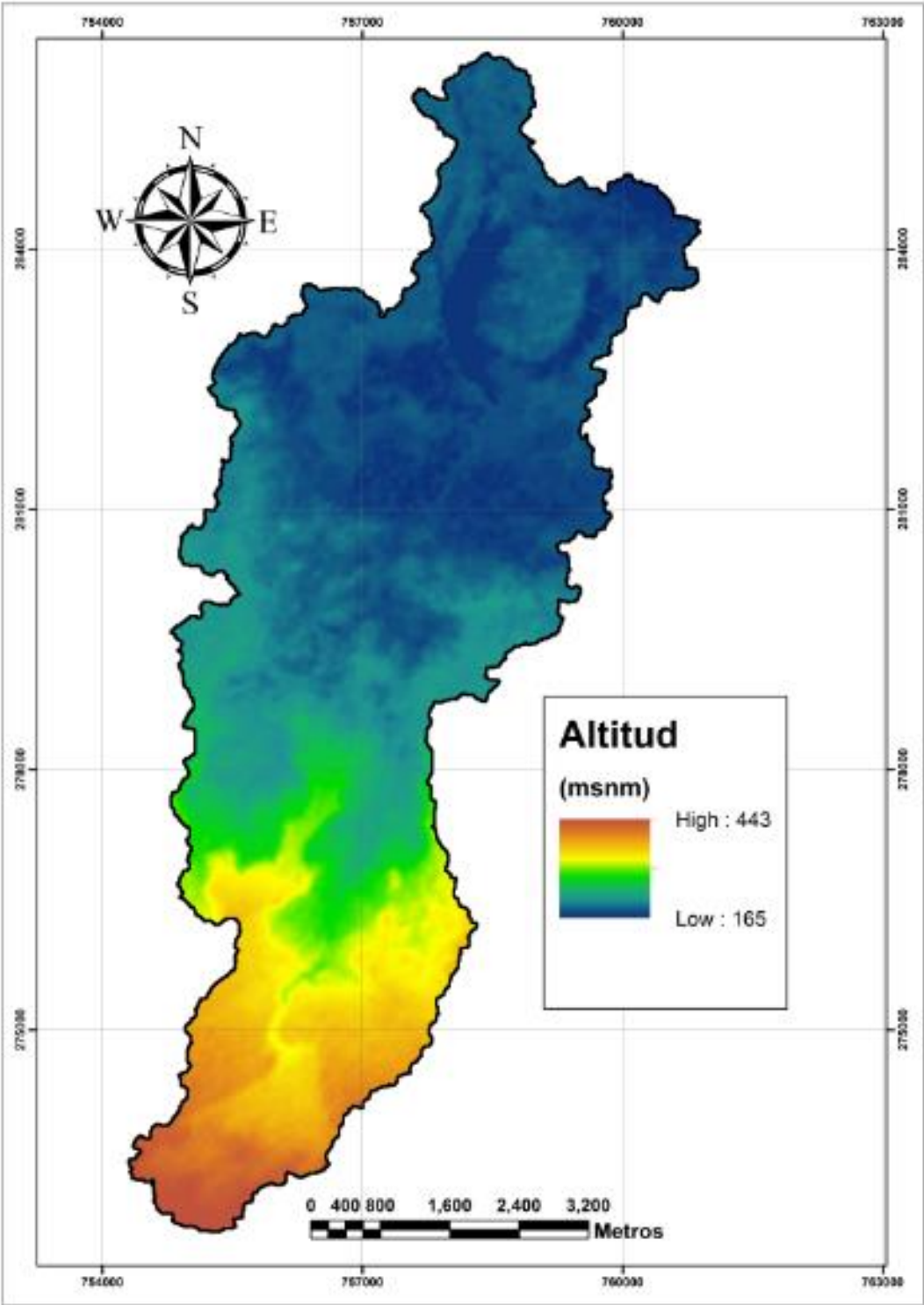
Fuente: Acosta S. (2017)

➤ CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA CUENCA

Inicialmente se seleccionó y compiló como fuente primaria de información, la cartografía base existente para el área, fotografías aéreas e imágenes satelitales. Para el análisis del área se confeccionó un mapa geomorfológico existente a escala departamental, que fue cortado con los límites de la microcuenca con el fin de determinar las principales unidades morfológicas que afloran en la región. El mapa geomorfológico, fue revisado en campo mediante observaciones con evidencias fotográficas de las geoformas presentes en la microcuenca La María con la finalidad de relacionarlo con los parámetros morfométricos posteriormente calculados.

Como primera medida en la obtención de los parámetros morfométricos de la microcuenca La María, se realizó el procesamiento geográfico con el software ArcGIS en su versión 10.4. Se descargó el MDT de la plataforma ALASKA SATELLITE FACILITY, radar ALOS PALSAR con resolución de 12.5 metros y sistema de referencia WGS84 que posteriormente fue proyectado a coordenadas Colombia Magna Bogotá (Figura 15). El ráster fue cortado de acuerdo a los límites de divisoria de la microcuenca y seguidamente se realizó el mapa de pendientes.

Figura 15. Modelo Digital del Terreno (MDT) de la microcuenca La María



Fuente: Acosta S. (2017)

Los parámetros morfométricos fueron divididos en parámetros básicos tales como área (A), perímetro (P), longitud axial (Lax), orden de la cuenca, pendiente media (Sm), altura máxima y mínima (H, h) obtenidos mediante ArcGIS; y parámetros derivados, obtenidos a partir las fórmulas descritas en el numeral 6.3.1.

➤ ANALISIS CLIMATOLÓGICO E HIDROLÓGICO

La información climatológica fue solicitada y obtenida por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), a partir de las estaciones convencionales existentes en la zona de estudio, con series de datos diarios de 30 años en el periodo de 1983 a 2015 para la simulación hidrosedimentológica. La información general de cada una de las estaciones se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Localización de es estaciones climatológicas.

Estación	Código	Latitud	Longitud	Elevación	Registro
San José Guaviare	32105070	02 33 N	72 38 W	165 m.s.n.m	1983-2017
E Trueno	31015010	02 22 N	72 38 W	150 m.s.n.m	MAY-1982

Fuente. IDEAM (2017); Elaborado por Acosta S. (2017)

Se solicitó los registros diarios de las variables climáticas que exige el modelo SWAT como precipitación total, temperaturas máximas y mínimas ($^{\circ}C$), humedad relativa (%), radiación solar (MJ/m^2) y velocidad media del viento (m/s). Además, datos de precipitaciones máximas mensuales (mm) para la elaboración de las curvas IDF.

- Curvas IDF y Hietogramas

Se recolectó la información necesaria, disponible y útil del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Para la construcción de las curvas IDF se seleccionó la estación SAN JOSE GUAVIARE con código 32105070 debido a que cuenta con un registro más completo. Posteriormente se depuró la información existente descartando los registros de aquellos años en los cuales hacían falta más del 10% de datos de lluvia, con el fin de que fuera un registro continuo y consistente. El registro de datos histórico seleccionado fue desde el año 1985 hasta el 2015. Después del proceso de depuración de la información, se calcularon los datos faltantes por el método de proporciones normales. Como resultado se obtuvo registros completos de precipitaciones máximas mensuales (mm) y los meses de mayor precipitación.

Para el desarrollo de la curvas IDF se aplicó la formula analítica propuesta por Aparicio (1997), relacionando la intensidad, la duración y el periodo de retorno (Ecuación 10). Los datos sistematizados fueron analizados por medio de distribuciones de probabilidad, con

el fin de relacionar la magnitud y la frecuencia de eventos extremos. De modo que fue necesario asignar a cada duración de lluvia seleccionada un período de retorno, para luego ajustar dichos valores a la Función de Distribución de Probabilidad de valor extremo tipo I como la función Gumbel.

$$I = \frac{CT^a}{t^B} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde; a, B, C –Constantes por determinar, T –Periodo de retorno (años), t –Duración (min)

Posteriormente, se realizó la prueba de bondad de ajuste para determinar si la muestra o los datos se ajustan a la distribución de probabilidad que se está utilizando. Con la función de distribución ajustada a los datos observados, se construyeron familias de curvas, en las cuales se estimaron las intensidades máximas para diferentes duraciones y diferentes periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

Debido a la importancia de la duración de la tormenta y la distribución de las precipitaciones en el transporte de sedimentos, se realizaron los hietogramas de diseño para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. Se calcularon a partir las intensidades máximas determinadas por las IDF, duración de la tormenta y tiempo de concentración, luego se determinaron las precipitaciones acumuladas (mm), intensidad parcial (mm/h), precipitación alternada y finalmente la intensidad parcial alternada (mm) para obtener las gráficas de barras de la distribución de las precipitaciones y distribución de las intensidades.

- **Medición De Caudal y Nivel**

Dado que la microcuenca La María carece de una estación hidrométrica para adquirir registros de dicha información, se midieron los caudales en los puntos de aforo seleccionados (Figura 14), mediante la metodología que funciona bajo la modalidad de flotador con una frecuencia de registro de 6 horas (día). Del mismo modo se tomaron los niveles de agua, por medio de reglas limnimétricas construidas e instaladas bajos los parámetros y criterios de La Organización Mundial de meteorología (2011) (Fotografía 10), para así determinar la variación temporal de caudales y niveles de la quebrada y por consiguiente realizar una curva de ajuste o calibración y la curva de duración de caudales para cada punto de medición.

Fotografía 10. Regla limnimétrica.



Fuente: Acosta S. (2017)

- **Curva Gasto y curva de duración de caudales**

Teniendo en cuenta que en las épocas de avenida es casi imposible aforar ya sea por no contar con equipos especializados o por no poner en peligro la vida de los aforadores; en este periodo los caudales se pueden estimar a partir de la interpolación de los niveles alcanzados por las aguas en el punto o zona de medición. Por lo tanto, se construyeron las curvas de calibración o gasto para los distintos puntos de aforo en la microcuenca La María con los datos de nivel y caudal registrados en el periodo de estudio (18 Agosto – 8 Noviembre de 2017).

Se empleó el método logarítmico, considerando que la sección de los puntos de aforo en la microcuenca puede aproximarse a una figura geométrica conocida. El método Logarítmico se basa en la experiencia demostrada de que la Curva de Calibración queda representada por una parábola de orden superior, cuya expresión se relaciona en la ecuación 11.

$$Q = k(H - H_o)^n \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde, Q – Caudal en m^3/s para en nivel H , k y n – Constantes por determinar, H_o -Lectura de la mira para una descarga nula.

En primer lugar se asumieron valores de H_o y se determinaron los valores de $\text{Log}(H - H_o)$ y $\text{Log}(C)$, y posteriormente se calcula los coeficientes n y k de la ecuación 12. Seguidamente se remplazó las constantes determinadas en la ecuación 11 para los

diferentes niveles obteniéndose de esta manera la los caudales estimados. Las correlaciones obtenidas por este método se muestran en el anexo 1.

$$\text{Log}(Q) = n\text{Log}(H - H_0) + \text{Log}(k) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde, N- número de aforos.

Por otra parte, la curva de duración de caudales se realizó de igual modo para los cuatro puntos de monitoreo de caudales y niveles, resultando del análisis de frecuencias de la serie de caudales medios diarios de cada punto.

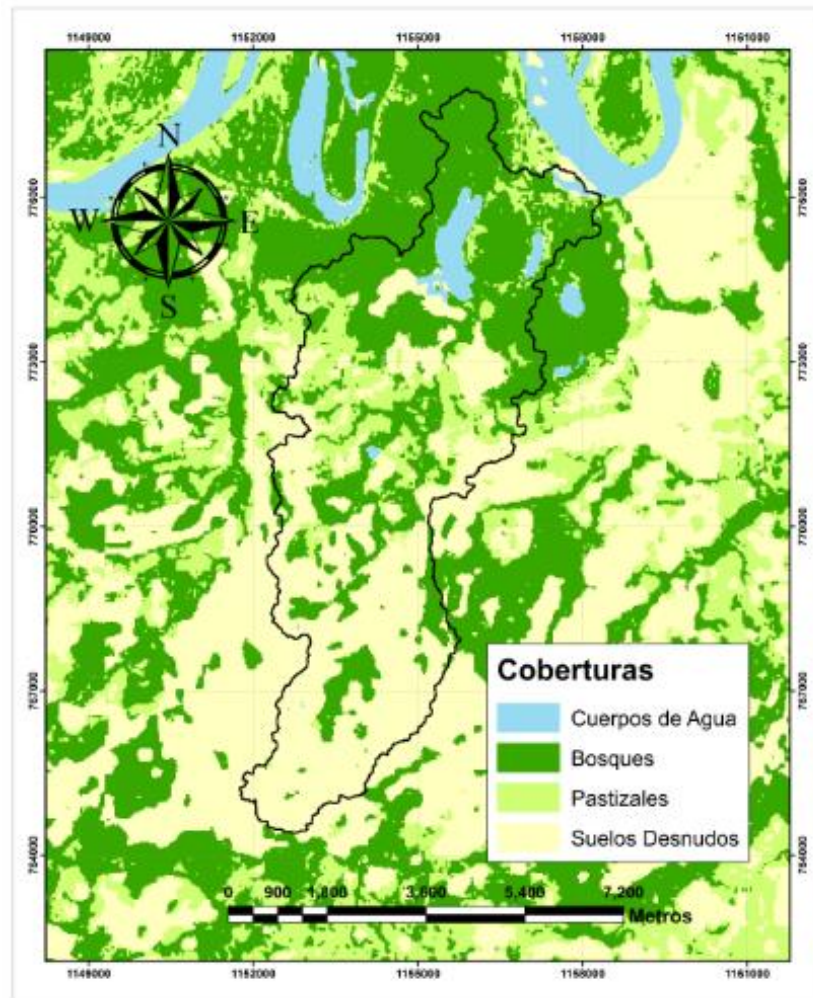
➤ **CARTOGRAFÍA DE COBERTURA Y USO ACTUAL DEL SUELO**

Para el desarrollo de esta actividad se hizo necesaria la utilización de imágenes satelitales LANDSAT 8 de la plataforma Glovis del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para realizar posteriormente el procesamiento en el software especializado a nivel cartográfico como ArcGIS de ESRI. Por otra parte, se adoptó el sistema jerarquizado de clasificación de coberturas a nivel nacional como es el sistema de clasificación Coordination of Information on the Environment (Corine Land Cover) adaptado a las condiciones del país (CLC-Colombia).

En la selección de la imagen de satélite se consideró que en la zona de interés no presentara nubes o de existir su presencia no tuviera un porcentaje mayor al 10% sobre el área de estudio, esto permitió ahorrar tiempo en tratamientos correctivos. La imagen elegida tiene fecha del 11 de marzo del 2017 con resolución a 20 m. No se aplicó una metodología estricta en el proceso de clasificación digital de la imagen, se utilizó el algoritmo de clasificación supervisada mediante la tipificación de píxeles en grupos espectralmente similares de la imagen de satélite Landsat 8 previamente descargada (Anexo 2). Además, se emplearon diferentes herramientas sobre la imagen con la extensión Landsat 8 Image Service de ESRI, con el fin de mejorar la imagen, facilitar la interpretación y determinar patrones de formas y colores, asignados inicialmente a una pequeña lista de clases a cada patrón observado. Durante la interpretación visual, las categorías asignadas fueron: Bosques, Suelos desnudos, Cuerpos de agua y Pastizales.

A continuación se observa en la figura 16 la clasificación inicial.

Figura 16. Clasificación inicial del Mapa de cobertura de la tierra



Fuente: Acosta S. (2017)

Usando estos resultados, se revisaron y verificación en campo a partir la imagen impresa en papel bond a escala de 1:100.000, con los límites de los polígonos y tomando como referencia la respectiva grilla para realizar el reconocimiento. Se seleccionaron puntos en campo y con base en la Leyenda de Corine Land Cover, se identificaron coberturas que permitirán tener un conocimiento previo sobre las coberturas presentes en el área de estudio. Los recorridos de campo permitieron conseguir 52 puntos de reconocimiento teniendo en cuenta la toma representativa de diferentes sectores y, además, contando con buenas posibilidades de acceso y garantizando la seguridad del intérprete y acompañantes para el control de campo. Así mismo, se realizó un registro fotográfico detallado como evidencia y respaldo del desarrollo de esta actividad. De esta manera se realizó la corrección preliminar en campo sobre el mapa en físico con marcadores (Fotografía 11).

Fotografía 11. Revisión en campo de coberturas



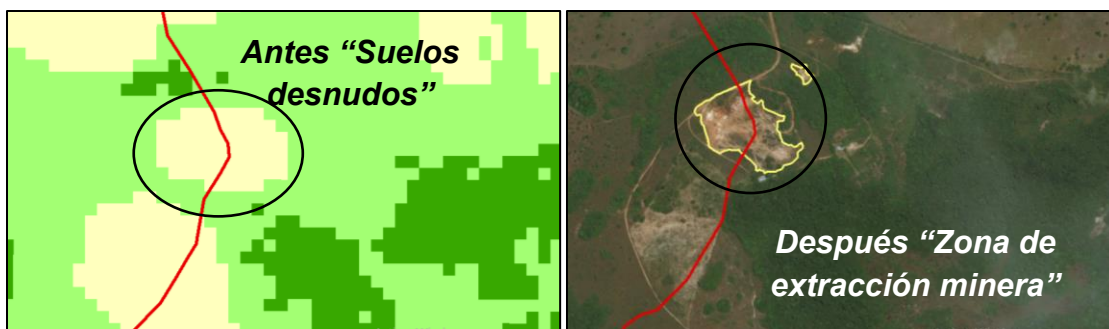
Fuente: Acosta S. (2017)

Con el trabajo de verificación de campo se logró la aclaración de dudas en el proceso de interpretación de coberturas que se realizó en computador y la adaptación de la nomenclatura Corine Land Cover en la zona de estudio.

En esta cuarta fase se creó una Geodatabase (.mdb) en ArcCatalogo con todos los archivos ráster y vector generados durante el proyecto, al igual que los utilizados para el análisis (Anexo 3). Se elaboró una capa de información de puntos (en formato shape), conteniendo los comentarios y observaciones a la interpretación, así como los ajustes que se consideraron requeridos para las unidades incorrectamente interpretadas. Se procedió a digitalizar sobre la pantalla, sobrepuesta a la imagen de Google Earth para hacer las respectivas correcciones observadas en campo.

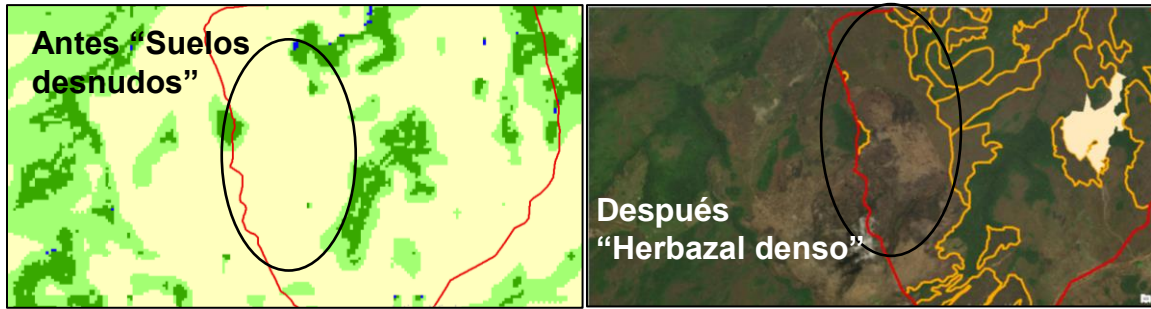
La clasificación digital fue corregida visualmente (Figura 17,18 y 19), tomando como elementos de referencia para la interpretación visual y el trabajo de campo.

Figura 17. Muestra de corrección de “Suelos desnudos” a “Zona de extracción minera”



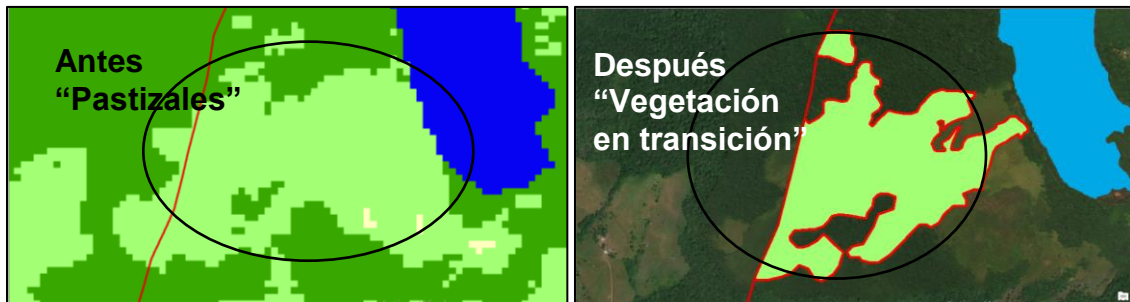
Fuente: Acosta S. (2017)

Figura 18. Muestra de corrección de “Suelos desnudos” a “Herbazal denso”



Fuente: Acosta S. (2017)

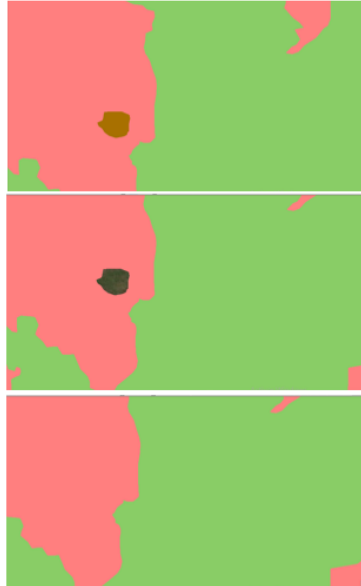
Figura 19. Muestra de corrección de “Pastizales” a “Vegetación en transición”



Fuente: Acosta S. (2017)

Para el control de calidad geométrica en la digitalización de las unidades identificadas en la fase de verificación en campo, se realizó la absorción de unidades menores a la unidad mínima cartografiable (Figura 20), de acuerdo con las reglas básicas de generalización adaptadas Sistema Corine Land Cover, descritas en Melo y Camacho (2005), que permitieron decidir sobre polígonos que no cumplían el criterio de área mínima cartografiable, es decir, mayor o igual a 25 hectáreas (categorías 2 a 5 del nivel 1 de la nomenclatura), mayor o igual a 5 hectáreas (categoría 1 del nivel 1 de la nomenclatura) y ancho mayor a 50 metros.

Figura 20. Situación de absorción de arbustos



Fuente: Acosta, (2017)

➤ **CARTOGRAFÍA DE TEXTURA DE SUELOS**

Para realizar la clasificación de suelo en la microcuenca La María se hizo a partir del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Se manejó una escala mediana de 1:50.000, por lo tanto su levantamiento se hizo de manera semidetallada y con baja a media densidad de observaciones como lo establece Velazquez , Ochoa, Oballos, Manrique, & Santiago (2004).

Se utilizó un sistema de posicionamiento global (GPS) para georreferenciar la información de los datos recogidos en campo, se anotaron datos de altura y localización (coordenadas), se tomaron muestras de suelos de cada calicata y además, se utilizó una cámara fotográfica con la que se tomaron evidencias de los perfiles de suelo. Por otro lado se empleó el paquete informático de información geográfica ArcGIS 10.4 de ESRI para el procesamiento de los datos tomados en campo. El levantamiento de suelos se llevó a cabo en varias etapas, como se describe a continuación.

- **Etapas preliminares de oficina**

En esta etapa se realizó una extensiva revisión de la literatura donde se recopiló información y antecedentes del área de estudio relacionados con estudios de suelos y material cartográfico, como lo es el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras 1:100.000 del departamento del Guaviare. Se efectuó el corte digital del mapa en ArcGIS para el área de la microcuenca La María (Figura 21).

Por otra parte, se determinó las zonas de vida existentes en la zona según el “diagrama para la clasificación de zonas de vida o formaciones vegetales en el mundo” propuesto por Holdridge (1977), con el fin de deducir el significado que tienen los elementos representados en ellas para relacionarlos con la distribución de los suelos. Las zonas de vida fueron definidas mediante los parámetros de temperatura media mensual y precipitación total promedio anual, registrados en las estaciones meteorológicas El Trueno y San José Guaviare, los cuales fueron suministrados por el IDEAM (Tabla 4).

Tabla 4. Estaciones meteorológicas para la clasificación de Holdridge (1977)

Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Serie Histórica
SAN JOSE GUAVIARE	02 33 N	72 38 W	165 m.s.n.m	1985-2015
EL TRUENO	02 22 S	72 40 W	150 m.s.n.m	1983-2016

Fuente: IDEAM (2017); elaborado por Acosta S. (2017)

- Programación del trabajo de campo

En esta fase se definieron las áreas a trabajar con mayor intensidad en campo, puntualizar las dudas que se deban resolver en el sitio y confirmar que los materiales y equipos necesarios están completos y funcionando correctamente.

Para el muestreo en campo se seleccionaron sitios teniendo en cuenta el Estudio General De Suelos y Zonificación de tierras a escala 1: 100.000 Del Departamento del Guaviare, estudios realizados por el IGAC. Así mismo, se estableció el sistema de mapeo libre para ubicar las observaciones de suelos requeridas, abarcando la totalidad de la microcuenca, con distancias entre 0.5 y 1 kilómetro entre punto y punto, con el fin de determinar el contenido en porcentaje (%) de arcilla, limo y arena de cada uno de los perfiles de suelo.

Es necesario aclarar que en la selección del punto de muestreo se tuvo en cuenta los requerimientos de acceso a la zona. Los materiales fundamentales para el estudio fueron: cinta métrica, pala, saca tierra, cámara fotográfica, GPS, bolsas plásticas para recolección de muestras, marcadores, costal y una libreta para anotar observaciones de cada perfil.

- Etapa de campo

Durante la fase de campo, se obtuvieron 36 puntos de muestreo de suelo ubicados espacialmente (Anexo 4). En cada punto se realizó una calicata de profundidad máxima de 80 cm y otras de menor profundidad limitadas por el nivel freático y roca madre, sin embargo otras de mayor profundidad por la presencia de barrancos o excavaciones existentes (Anexo 5). Se anotó in situ para cada perfil las coordenadas, altitud,

profundidad de las raíces y profundidad máxima; además, se tomó 1 kg de muestra de suelo obtenida de la homogenización y cuarteo del suelo previamente extraído, se almacenaron las muestras en bolsas plásticas y rotuladas (Fotografía 12). Posteriormente fueron llevadas al laboratorio del Centro de Investigación en Sanidad Vegetal y Bioinsumos (CISVEB) de la Universidad de Pamplona.

Fotografía 12. Recolección de muestra de suelo



Fuente: Acosta S. (2017)

La determinación de las clases texturales se llevó a cabo mediante el manual de textura de maser por el método de Bouyucos. El procedimiento inicial fue el tamizado de la muestra de suelo, previamente secado y molido a través del tamiz No. 10 cuya abertura es de 2mm (Fotografía 13a). Se pesaron 50 g de suelo si correspondía a textura fina o 100 g para la textura arenosa o gruesa. Se llevó a una copa de dispersión y se agregó 20 ml de solución dispersante preparada con: 35.77 gramos de Hexametáfosfato de Sodio ($(\text{NaPO}_3)_6$) en 1 L de agua destilada (Fotografía 13b y 13c). Se adiciono agua destilada hasta la mitad se llevó a la maquina dispersadora durante 15 minutos (Fotografía 13d). Seguidamente se trasladó el material de la copa de dispersión a un cilindro graduado de 1000 ml y se completó el volumen con agua destilada. Inmediatamente se tomó la primera lectura de la temperatura y del hidrómetro (Fotografía 13e y 13f). Se dejaron en reposo las muestras durante dos horas para luego hacer la segunda lectura del hidrómetro y la temperatura (Fotografía 13g). Finalmente se utilizó el triángulo textural del sistema USDA y así obtener una mayor diferenciación de los distintos tipos de suelo.

Fotografía 13. Procedimiento de método de Bouyucos



Fuente: Acosta S. (2017)

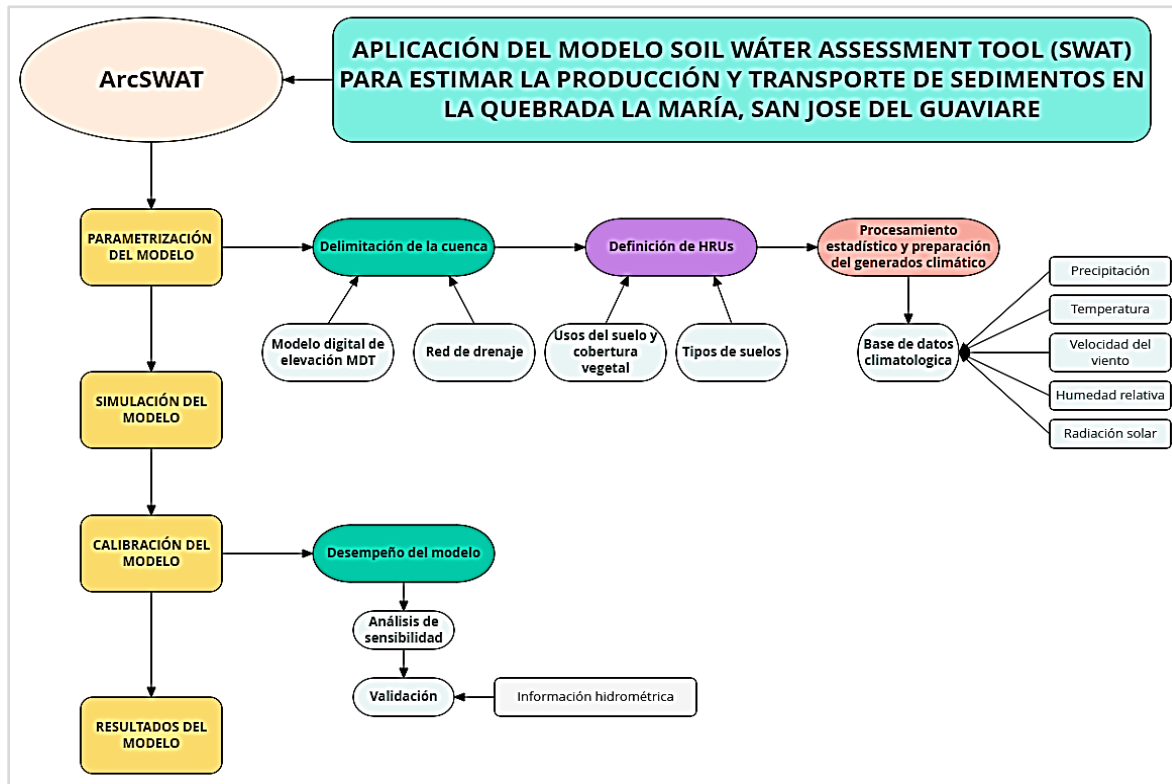
- Etapa final de oficina

Concluido el trabajo de campo se creó una capa temática de puntos en formato shapefile (.shp) en ArcGIS, comprendida por cada calicata examinada con las respectivas observaciones hechas en campo y los porcentajes de arcilla (A), limo (L), y arena (a). En esta etapa, se definieron los límites de suelos en ArcGIS, mediante la herramienta de Map Algebra y a partir de esto, se estimaron los datos en ubicaciones no muestreadas.

➤ MODELAMIENTO EN EL SOFTWARE SWAT

La modelación hidrológica se llevó a cabo en el software SWAT (Soil Water Assessment Tool), desarrollado para el Servicio Agrícola de Investigación de Estados Unidos (USDA), con la extensión ArcSWAT 2012.10.19 para el software ArcGIS 10.4. A continuación se observa detalladamente la metodología requerida para la modelación en SWAT (Figura 22).

Figura 22. Metodología para estimar la producción de sedimentos mediante SWAT



Fuente: Acosta S. (2017)

- Delimitación de la cuenca

Se cargó el modelo digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) con resolución de 12.5 metros, descargado de la plataforma ALASKA SATELLITE FACILITY, radar ALOS PALSAR. Posteriormente, en el menú de ArcGIS se seleccionó Tollbars y se escogió la correspondiente a ArcSWAT. Se creó un nuevo proyecto con Project Setup, habilitando el menú Watershed Delineation. En la delimitación de la microcuenca La María y sus respectivas subcuencas se utilizó la capa de drenajes sencillo del IGAC descargada del portal Sistema de Información Geográfica del Guaviare.

- Definición de HRUs

Para la generación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs) se utilizó información espacial de uso del suelo (Landuse), tipo de suelos y pendientes. Las pendientes se clasificaron de acuerdo a los cinco rangos (0-7%, 7-12%, 12-25%, 25-50% y >50%) establecidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

El SWAT utiliza un modelo de crecimiento vegetal para simular el desarrollo de los cultivos. Por lo tanto, se introdujo la capa de coberturas en formato Shape, se realizó otra

clasificación de acuerdo a los códigos de coberturas y usos del SWAT. De acuerdo con los códigos del SWAT, se obtuvieron 12 tipos de coberturas resultantes (Tabla 5)

Tabla 5. Usos del suelo y coberturas de la microcuenca La María-Año 2017

GRUPO	USO	TIPO DE COBERTURA (CORINE LAND COVER CLC)	COD. SWAT	AREA Km2
TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	ZONAS DE EXTRACCION MINERA Y ESCOMBREAS	Zona de extracción minera	UTRN	0.070 80
	ZONAS URBANIZADAS	Tejido urbano discontinuo	URHD	0.342 36
TERRITORIOS AGRICOLAS	PASTOS	Pastos limpios	PAST	2.619 45
		Pastos arbolados	RYEG	2.575 28
		Pastos enmalezados	RYE	1.998 38
	AREAS AGRICOLAS HETEROGENEAS	Mosaico de pastos, cultivos espacios naturales	CABG	1.945 07
	BOSQUES Y AREAS SEMINATURALES	BOSQUES	Bosque denso	FRSE
bosque fragmentado			FRST	1.659 74
Bosque de Galería y Ripario			FRSE	3.121 69
AREAS CON VEGETACION HERBACEA		Herbazal denso	RNGE	8.429 58
		Arbustal denso	RNGE	3.019 57
		Vegetación secundaria o en transición	RUBR	3.021 82
AREAS ABIERTAS SIN O CON POCA VEGETACION		Zonas arenosas naturales	BARR	0.579 16
SUPERFICIES DE AGUA	AGUAS CONTINENTALES	Ríos	WATR	0.034 08
		Lagunas Lagos y ciénagas	WATR	0.579 16
		Cuerpos de agua artificiales	WATR	0.028 77

Fuente: Acosta S. (2017)

Por otra parte, se ingresó el mapa de tipo de suelos de la microcuenca La María realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC para el departamento del Guaviare. Los suelos se reclasificaron de acuerdo a las características de los tipos de suelos de la base de datos del SWAT, teniendo en cuenta el estudio de textura de suelos realizado para cada una de las unidades. La información requerida del suelo utilizado en este estudio para el modelamiento en el SWAT son las características físicas, dado que el modelo sugiere como opcional las características químicas. Las propiedades físicas del suelo rigen el movimiento del agua a través del perfil y tienen un impacto significativo en el ciclo del agua dentro de la unidad de respuesta hidrológica (HRU). Las variables requeridas por el modelo se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Entrada de datos de suelos para el SWAT

OBJECT ID	SNAM	HYDGRP	SOL_ZMX	TEXTURE	SOL_Z	SOL_CBN	CLAY1	SILT1	SAND	ROCK	USLE_K
1	LVDc	A	500	SAND	3000	0.2	3	4	93	20	0.2401
2	RVAai	C	810	SANDY_CLAY_LOAM	700	1	22	12	66	0	0.2663
3	RVBai	D	1000	SILTY_CLAY_LOAM	500	2	20	56	24	0	0.279
4	RVCai	B	1000	SANDY_LOAM	500	1	12	16	72	15	0.2671
5	ZVAc	A	300	SAND	150	0.1	1	1	98	25	0.2115
6	ZVBc	A	300	SAND	200	0.2	2	4	94	10	0.2631
7	ZVBd1	A	500	SAND	300	0.1	5	5	90	15	0.2989
8	ZVBe2	B	250	SANDY_LOAM	100	1	10	6	84	10	0.2298
9	ZVBf	B	600	SANDY_LOAM	300	0.9	3	12	85	20	0.2798
10	ZVCc	A	700	SAND	300	0.1	5	2	93	15	0.2711
11	ZVDb	A	250	SAND	100	0.1	1	1	98	15	0.2965
12	ZVDc	A	300	SAND	200	0.1	2	4	94	30	0.3085
13	ZVDf	B	200	SANDY_LOAM	100	0.3	3	12	85	45	0.2687
14	ZVDg	A	200	SAND	100	0.1	4	5	91	40	0.2846

Fuente: Acosta S. (2017)

Donde **SNAM** - Nombre o identificador del suelo, **HYDGRP**- Grupo Hidrológico según la clasificación de El Servicio de Recursos Naturales de los Estados Unidos (Soil Survey Staff, 1996), **SOL_ZMX** - Profundidad máxima de enraizamiento el perfil (mm), **TEXTURE** - Textura del suelo, **SOL_Z** - Profundidad de la superficie del suelo a la capa más profunda, **SOL_CBN** - Contenido de carbono orgánico, en % del peso del suelo, **CLAY** - Contenido de arcillas en % de suelo (partículas menores a 0.002 mm), **SILT** - Contenido de limo en % de suelo (partículas entre 0.05-0.002 mm), **SAND** - Contenido de arena en

% de suelo (partículas entre 2-0.05 mm), **ROCK** - Contenido de fragmentos de roca en % de peso en el suelo (partículas mayores a 2 mm), **USLE_K** - Ecuación USLE de la probabilidad del suelo (K) ecuación universal de pérdida de suelo.

- **Procesamiento de datos climatológicos**

Para cada base de datos histórica de las estaciones se realizó el procesamiento para determinar datos faltantes y seguidamente los parámetros estadísticos requeridos por el SWAT (Anexo 7).

A partir de los datos ingresados, se corrió el modelo, generando resultados de sedimentación y caudales para la microcuenca La María. La simulación se realizó bajo condiciones mensuales para comparar los caudales estimados con los caudales observados.

- **Calibración, validación y análisis de sensibilidad**

La evaluación del modelo fue realizada automáticamente mediante el software SWAT-CUP versión 2012. Dentro del SWAT-CUT se usó SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) porque permite combinar las optimizaciones con un análisis de incertidumbre y se puede manejar varios parámetros a la vez (Abbaspour, Johnson, Van Genuchten, 2004). El modelo fue calibrado y validado en base a los caudales observados a la salida de Caño Arenales (Flow_out_286) otorgados por la empresa EMPOAGUAS ESP el municipio de San José del Guaviare. Para el periodo de calibración se separaron los registros de caudales del año 2013 2014, y para el periodo de validación de los caudales del 2015.

➤ **PROPUESTA DE SIMULACIÓN DE ESCENARIOS PARA LA MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

Las simulaciones implicadas en el análisis de generación de sedimentos consistieron en el escenario de coberturas de la tierra del año 2002 realizado por el SINCHI. Se compararon las coberturas actuales (año 2017) con las del año 2002 para tener mayor conocimiento de los cambios de usos en el suelo sobre la generación de sedimentos en la Quebrada La María.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

➤ ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA

En base a un análisis estadístico se obtiene la información morfométrica de la microcuenca La María referenciada en la tabla 7, necesaria para poder comprender y estimar el potencial erosivo e hidrológico por causas naturales y antropogénicas en la microcuenca.

Tabla 7. Características morfométricas Microcuenca La María

	Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
PARAMETROS BASICOS	Área	A	40.02	km ²
	Perímetro	P	58.98	km
	Longitud axial	Lax	13.08	km
	Longitud del cauce principal	Lcp	9.99	km
	Ancho promedio	Ap	3.06	km
	Ancho Máximo	Amax	4.86	Km
FORMA DE LA CUENCA	Factor forma	Ff	0.23	adimensional
	Coefficiente de compacidad	Kc	2.63	adimensional
	Índice de homogeneidad	Ih	11.81	adimensional
	Índice de alargamiento	Ia	8.23	adimensional
RELIEVE DE LA CUENCA	Altura media	Hmed	233.37	msnm
	Altitud media	Amed	240.00	msnm
	Altura mínima	Hmin	165.00	msnm
	Altura Máxima	Hmax	443.00	msnm
	Pendiente media	Sm	7.76	%
	Índice Hipsométrico	IH	0.25	adimensional
	Coefficiente de masividad	Cm	6.00	adimensional
RED HIDROGRAFICA	Orden	Orden	3.00	adimensional
	Pendiente del cauce principal	S	2.78	%
	Destino final delas aguas	Exorreica		

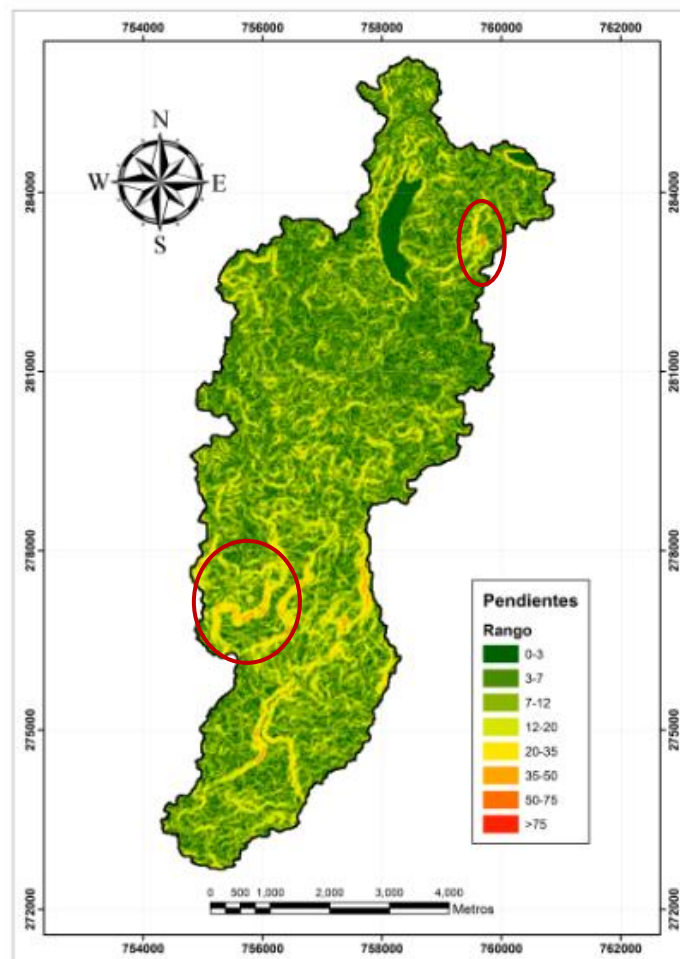
Fuente: Acosta S. (2017)

De acuerdo con la Tabla 8, la microcuenca La María es una cuenca pequeña considerando la clasificación propuesta por Campos (1992). El factor forma adimensional es 0.23, indicando que es un factor bajo, es decir, implica bajas probabilidades de experimentar frecuentes crecidas conforme a lo expresado por Henao (1998); además, López (1998), manifiesta que una cuenca con un factor forma bajo se caracteriza por ser

una cuenca alargada y con forma irregular, esta hipótesis se corrobora con el coeficiente de compacidad (K_c) o índice de Gravelius, el cual define que su forma es oval redonda a oval oblonga. Por otra parte, debido a que el índice de alargamiento es elevado, por lo tanto, la cuenca tiende a ser muy alargada y busca una forma rectangular, además su red de afluentes forman un ángulo pequeño con la red del cauce principal permitiendo evidenciar que los tiempos de concentración sean diferentes en cada caso (Henao, 1998).

Para explicar el relieve de la cuenca, el coeficiente de masividad con valor de 6 revela que la microcuenca La María predominan terrenos planos y poco acentuados. Del mismo modo, en la figura 23 se observa que en la parte alta de la microcuenca predominan pendientes medianas con fajas o líneas dispersas de pendientes fuertes y fuertemente accidentadas que representan procesos de erosión en macizos rocosos. De igual modo, se evidencia la presencia de pendientes fuertes en la zona baja relacionadas con procesos de erosión hídrica en meandros abandonados.

Figura 23. Mapa de pendientes

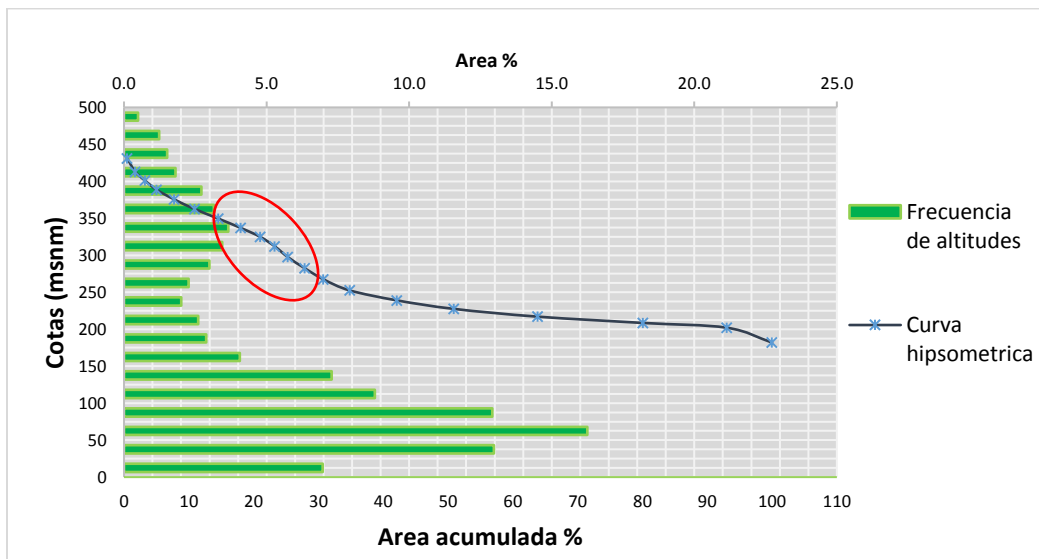


Fuente: Acosta S. (2017)

La pendiente media por su resultado de 7.76%, clasifica su relieve como medianamente accidentado. El valor de la pendiente media permite hacer comparaciones entre cuencas para observar fenómenos erosivos que se manifiestan en la superficie.

Por otra parte, con base en el análisis hipsométrico y comparación del gráfico 1 con el modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión de Senciales y Ferre (1999), se determina que la microcuenca La María se encuentra en la fase de monandok o vejez, donde la mayor parte de su área es de pendientes consideradas como llanas o suaves (Cardona, 2012). Además, se interpreta que corresponde a una cuenca sedimentaria con fuertes procesos de erosión debido al tránsito de las escorrentías superficiales y cuya evidencia son los bloques y acumulación de sedimentos observados cuando se recorre el cauce principal. Cabe resaltar que el comportamiento de la curva hipsométrica en el punto de inflexión señalado, está relacionado con los procesos tectónicos y litológicos de la cuenca, como lo expresa Rodríguez V. (2010), es decir, los cambios en el relieve por la unidad litologica de Formación Araracuara que se presenta en la parte alta de la microcuenca. Por otra parte, el coeficiente hipsométrico (Tabla 8), determina que la cuenca estaría dominada por procesos de erosión fluvial según la clasificación de Willgoose y Hancock (1998), en M. Menendez, G. Melendez, M. Alfageme, M. Serrano, & R.Garcia (2014).

Gráfico 1. Curva hipsométrica e Histograma de altitudes Microcuenca La María

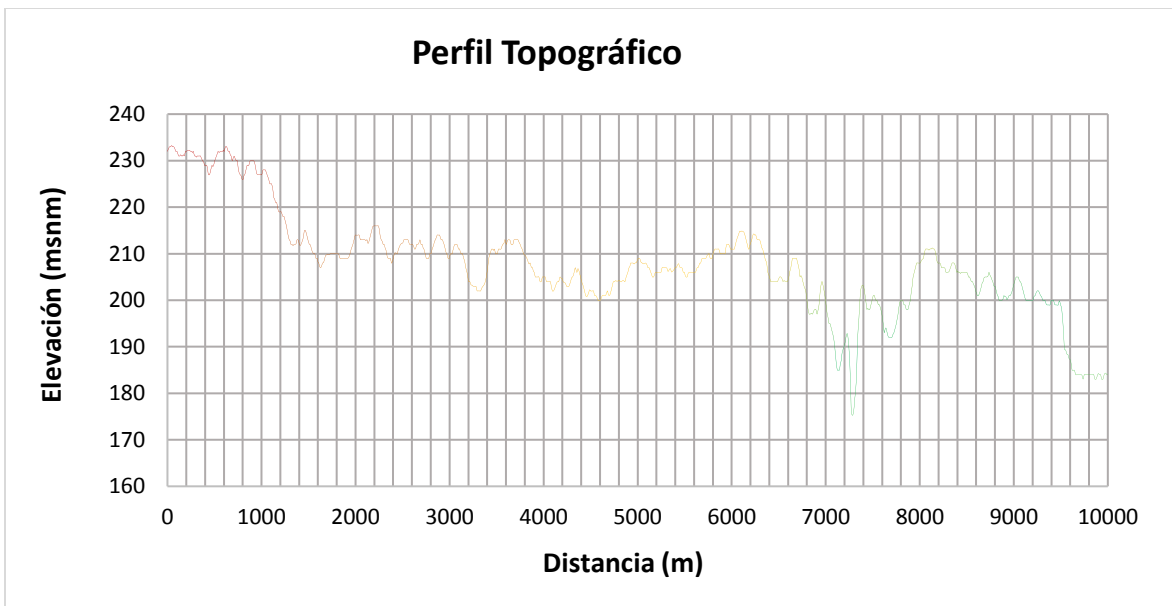


Fuente: Acosta S. (2017)

Según los criterios de Horton (1945) modificados por Strahler (1964), el grado de ramificación que se identifica en el cauce principal la microcuenca es de orden tres. Henao (1998) explica que a mayor orden mayor energía y mayor control estructural y por lo tanto mayor erosión. La quebrada la María recorre 9.99 Km desde su nacimiento hasta

su desembocadura; a lo largo del cual describe un perfil longitudinal que presenta cambios de gradiente relativamente bruscos (gráfico 2), condición que refleja el control litológico, estructural y del relieve en la morfología de la misma, corroborado con Henao (1998). La pendiente del cauce principal refleja que es una pendiente plana o suave, infiriendo así mismo en que los tiempos de concentración sean mayores. La pendiente media del perfil es un indicador de la presencia de bajas velocidades del flujo, mayor capacidad de transporte y acumulación de materiales y por lo tanto mayores tiempos de concentración como se refleja en la tabla 8.

Gráfico 2. Perfil longitudinal del cauce principal



Fuente: Acosta S. (2017)

En la tabla 8 se presentan los valores obtenidos para los tiempos de concentración (T_c) empleando diferentes fórmulas por diferentes autores. En cuanto a las fórmulas de Giandotti, Passini y Bransby Williams se observa que existen diferencias relativamente grandes subestimando los valores de tiempo de concentración con respecto a los demás autores. Sin embargo, sabiendo que el método más utilizado es el de Kirpich se toma como referencia los valores semejantes, como el método de Temez y Ventura-Heras y por consiguiente se descarta los demás. El valor medio estimado por Kirpich, Temez y Ventura-Heras es de 69.57 minutos y de acuerdo con los rangos expuestos por Fuentes J. (2004), se clasifica como moderado.

Tabla 8. Tiempos de concentración

Método	Valor	Unidad
Kirpich	62.59	minutos

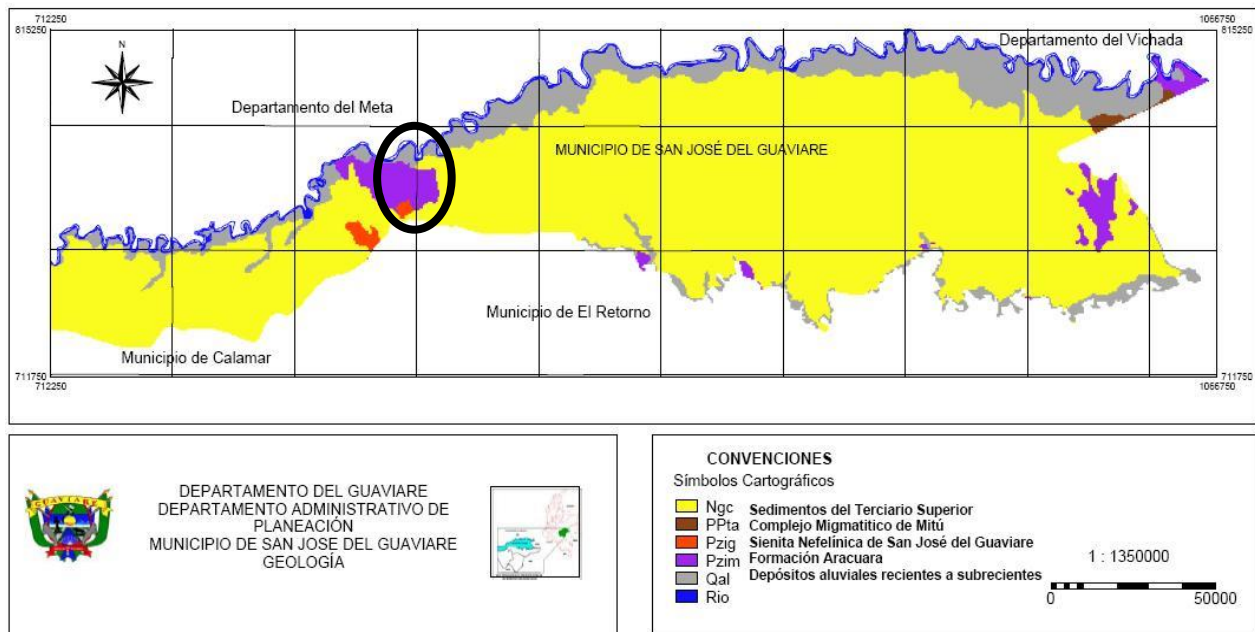
Giandotti	195.05	minutos
Temez	68.88	minutos
Ventura-Heras	77.24	minutos
Passini	250.57	minutos
Bransby Williams	168.16	minutos
Promedio	69.57	

Fuente: Acosta S. (2017)

➤ GEOLOGIA

La litología que conforma los suelos de La María y sobre los que se desarrollan sus actividades, determina el comportamiento tectónico y el ambiente de formación de la zona. Para entender la formación de la microcuenca La María fue necesario conseguir información extra para explicar cómo se encuentra geológicamente estructurada el área de influencia; por lo tanto se obtuvo la carta topográfica de unidades geo litológica del municipio de San José del Guaviare (Figura 24).

Figura 24. Unidades geo litológicas del municipio de San José del Guaviare



Fuente: Gobernación del Guaviare (2000)

Como se observa en la figura 24, en la microcuenca La María se distinguen cuatro unidades geológicas establecidas por rocas sedimentarias del Cuaternario. Se tienen la Sienita Nefelinita de San José del Guaviare (Pzig), la Formación Araracuara (Pzim), Sedimentos del Terciario Superior (Ngc) y Los depósitos Aluviales Recientes a Subrecientes (Qal).

En la parte alta de la microcuenca se localiza la Formación Araracuara, más exactamente dentro de la vereda La Pizarra. De acuerdo con Martínez y Vanegas (1977) en PBOT del Municipio de San José del Guaviare (2001), está compuesta por estratos horizontales o ligeramente inclinados cuyo espesor alcanza los 200 m. Se presenta de forma secuencial en su mayoría como dos grandes fajas discontinuas de mesetas alineadas en dirección NW (Fotografía 14a), integrada por una serie de afloramientos rocosos de carácter sedimentario (Fotografía 14b) aislados al suroeste de San José del Guaviare (Serranía de La Lindosa).

Es importante destacar que la Formación Araracuara presente en la microcuenca La María está estrechamente relacionada con su morfología y cobertura, dado que en la parte alta, donde se desarrolla está constituida por terrenos medianamente escarpados con vegetación predominante poco exuberante compuesta por herbazales densos y arbustos. Por otro lado, es posible evidenciar que las rocas de La Formación Araracuara en la Serranía de La Lindosa están compuestas principalmente por una sucesión de capas de areniscas muy cementadas con geometrías tabulares, que a su vez han sido moldeadas por el impacto del agua y del viento (Fotografía 14c y 14d).

Fotografía 14. Rocas de la formación Araracuara

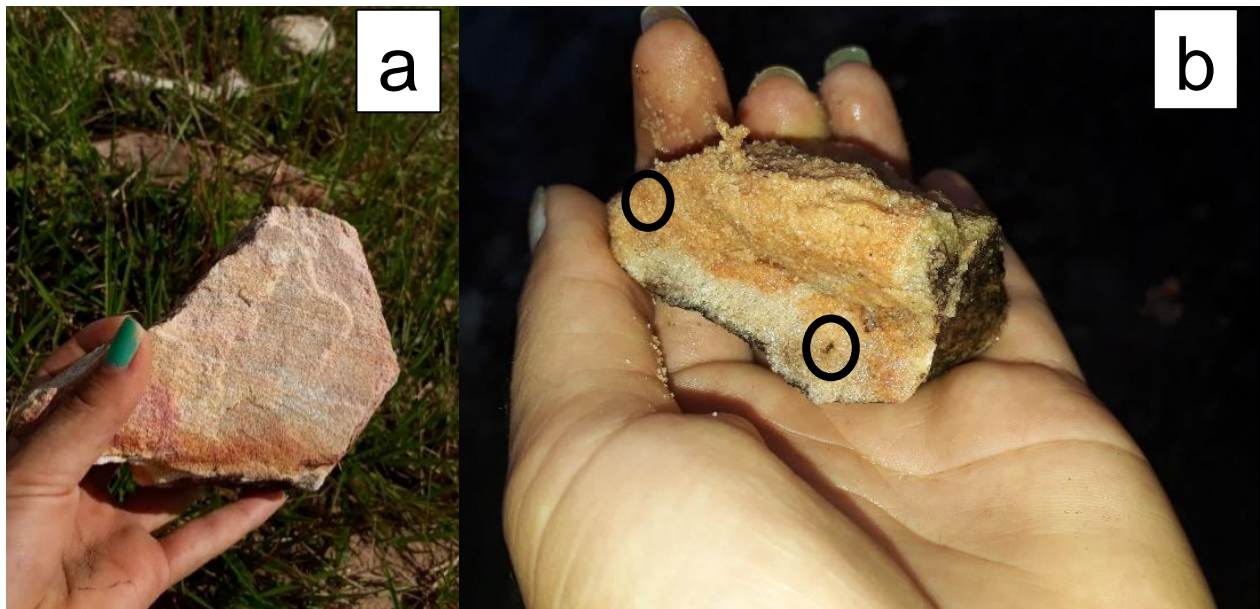


Fuente: Acosta S. (2017)

Según Vega y Castillo (1972), reportan que las areniscas de la Formación Araracuara reposan de manera discordante sobre la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare. A su vez se encontraron Sedimentos del Terciario Superior, los cuales corresponden a sedimentos de origen sedimentarios que cubren y que reposan de manera discordante sobre las unidades mas antiguas de la Serrania de La Lindosa. De acuerdo con el SINCHI (2008), son sedimentos continentales con variaciones en su espesor, está conformado por un conglomerado de matriz ferruginosa a la base y encontrando gran variación en el resto de las rocas, en donde se pueden apreciar arcillas rojas, amarillas y abigarradas y areniscas poco consolidadas.

Se hallaron rocas correspondientes a los Sedimentos del Terciario Superior, que consisten en rocas tipo de areniscas arcillosas (Fotografía 15a), limolitas y conglomerados. En concordancia con la literatura, las limolitas son de color gris verdoso con matriz arcillosa que encierra trocitos de vidrio volcánico de 0,01 mm negros y otras rojizas (Fotografía 15b), además granitos de feldespatos, glauconita, biotita y resto de conchas; los granos constituyen el 30% de la roca y la matriz 70%. Los conglomerados se tratan más bien de rocas con poca matriz arenisca compuestas por fragmentos o con cantos rodados dispersos de 1 a 4 cm bien redondeados (Fotografía 16), formados en el ambiente fluvial de la zona alta de la microcuenca.

Fotografía 15. a) Arenisca arcillosa. b) Limolitas



Fuente: Acosta S. (2017)

Fotografía 16. Conglomerados en la parte alta de la microcuenca

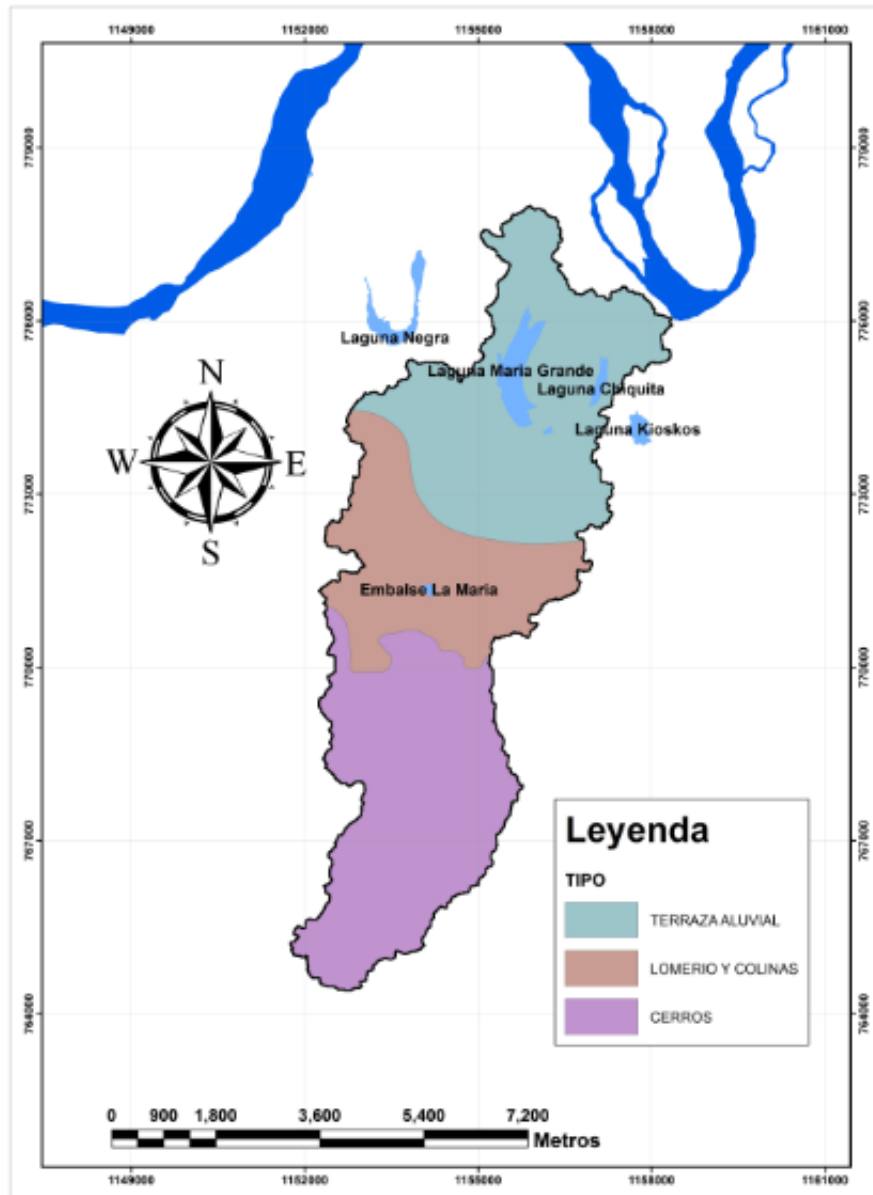


Fuente: Acosta S. (2017)

La unidad geo litológica que en la literatura se han considerado como “Depósitos Aluviales Recientes a Subrecientes”, en este documento se relacionan como depósitos de terraza, pertenecen al cuaternario y representa los sedimentos no consolidados de diferente granulometría (limo, arcilla, arena) que han sido transportados por los ríos y depositados en sus riberas (Gobernación del Guaviare, 2001). Estos depósitos aluviales se pueden apreciar aguas abajo de la microcuenca La María, en su llanura de inundación, cerca de las márgenes del río Guaviare. El Material detrítico transportado está normalmente compuestos por arenas y gravas asociados a la sedimentación, favorecidos por la meteorización y transporte de sedimentos generados de la unidad Formación Araracuara en el piedemonte de la serranía La Lindosa.

De acuerdo a la información cartográfica de unidades geomorfológicas de la microcuenca La María (Figura 25), obtenida de la Alcaldía de San José del Guaviare, se llevó a cabo un reconocimiento preliminar de la zona, fotográfico y cartográfico verificándose la confiabilidad de la fotointerpretación y ajustando las distintas unidades geomorfológicas existentes.

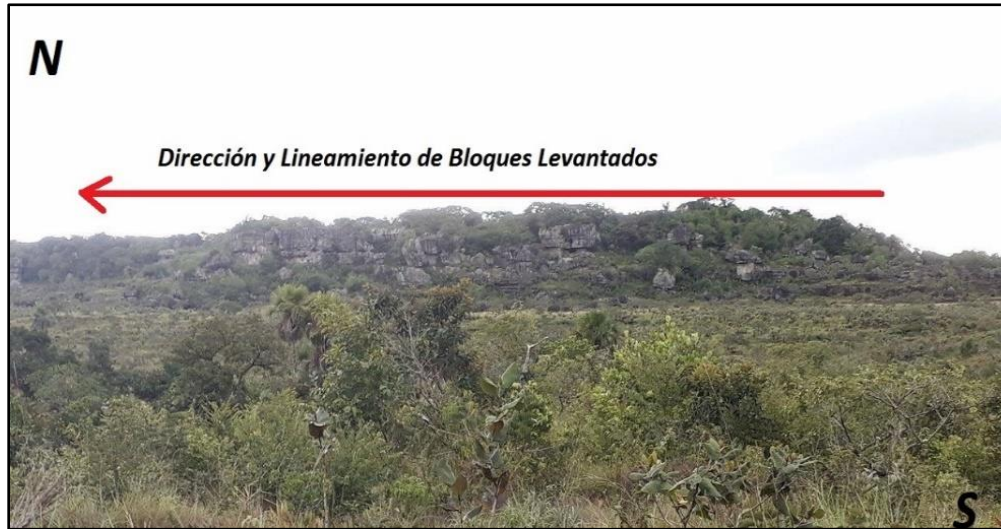
Figura 25. Mapa de Geomorfología de la microcuenca La María



Fuente: Acosta S. (2017), modificado de Alcaldía de San José del Guaviare (2010)

La unidad geomorfológica de Cerros se localiza en la parte alta de la microcuenca con una extensión de 14.85 km^2 y altitudes entre 420 y 240 m.s.n.m. Su relieve está caracterizado por formar un conjunto crestas y plegamientos de bloques hundidos y levantados que se prolongan linealmente, influenciados por la presencia de afloramientos rocosos (Fotografía 17) asociados a la Formación Araracuara, Se presenta en la zona de mayores pendientes, notándose una faja de pendientes fuertemente accidentadas en medio de pendientes accidentadas y medias.

Fotografía 17 Cerros en Serranía de La Lindosa, Guaviare



Fuente: Acosta S. (2017)

Las lomerío y colinas se forman en la parte media de la microcuenca después de la unidad de cerros, abarcando un área de 9.71 Km² entre elevaciones del terreno de 240 y 200 m.s.n.m. Se caracteriza por presentar ondulaciones suaves con pendientes medias entre 7 y 12 %; además, irregularidades en pequeñas áreas que tienen piedra superficial. Por otra parte, se evidencian procesos geomorfológicos actuantes como: erosión hídrica laminar, surcos y cárcavas (Fotografía 18).

Fotografía 18. Procesos de erosión en lomas y colinas



Fuente: Acosta S. (2017)

En la parte baja de la microcuenca se encuentra el paisaje de terrazas aluviales ocupando 15.43 km² de superficie. Su relieve se identifica por presentar las pendientes

más bajas (0- 7%) clasificándose topográficamente como un terreno plano inundable. Alcanza niveles entre los 180 y 200 m.s.n.m. La zona presenta alto riesgo de desastres e inundación durante las temporadas de lluvia. Allí se localiza Laguna María Grande (Fotografía 19) y Laguna Chiquita. A simple vista en temporada de verano, se generan grandes depósitos de playa y lacustres.

Fotografía 19. Laguna María Grande



Fuente: Acosta S. (2017)

Se infiere que estas lagunas correspondían antiguamente al curso natural del río Guaviare y que con el tiempo se fue modificando la sección hidráulica (Figura 26) del cauce por la colmatación de sedimentos, generando un yugo o meandro abandonado que hoy en día abarca el área de la microcuenca con la presencia de dos lagunas.

Figura 26. Modificación de la sección hidráulica del Río Guaviare por meandro abandonado

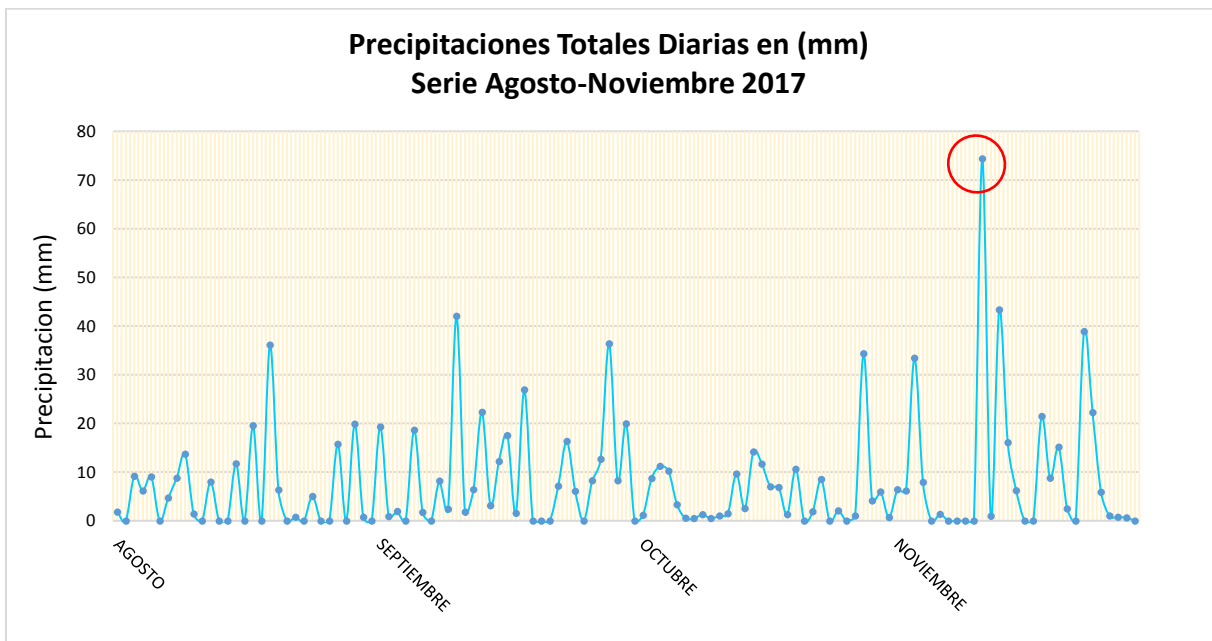


Fuente: Acosta S. (2017)

➤ ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y CLIMATOLÓGICO

Para el análisis de las precipitaciones de la microcuenca La María y las subcuencas que la componen, se descargaron los datos de precipitación total diaria en mm del sitio web Giovanni de la NASA, teniendo en cuenta que la serie de datos histórica de registro del IDEAM no se obtuvo completa para el año 2017. La información anteriormente solicitada se muestra en el gráfico 3, representativo para el área de influencia de la microcuenca La María con serie temporal del 01/08/2017 a 29/11/2017, para el fin de relacionarla con los procesos erosivos que se evidencian.

Gráfico 3. Precipitaciones totales diarias



Fuente: Acosta S. (2017)

De acuerdo con el gráfico anterior, la distribución de las precipitaciones es asimétrica en los cuatro meses. Dentro de los cambios significativos de alta y baja pluviosidad, se presentó una tendencia al incremento de las precipitaciones, caso que no concuerda con el régimen monomodal de lluvias de la región. Particularmente, la mayor variación se presenta en el mes de noviembre, donde se manifiesta la precipitación máxima el día 11 con un valor de 74.39 mm. Según estudios globales, las alteraciones en los datos de precipitaciones con incrementos de la intensidad en los periodos secos con fuertes precipitaciones, pueden estar relacionadas con cambios en la estacionalidad de la precipitación y el cambio climático. Al mismo tiempo, el director del IDEAM, Christian Uscátegui, afirmó que para esta época se ha venido desarrollando un fenómeno de La Niña muy débil, producto de la acumulación de nubosidad en la zona de la Amazonia por las bajas temperaturas en el océano pacífico.

Para el analizar el comportamiento de lámina de agua y caudal se establecieron cuatro puntos de aforo, que se describen en la tabla 9, para los cuales se obtuvo un registro continuo diario de datos cada seis horas (en el día), entre 18/08/2017 y 15/11/2017.

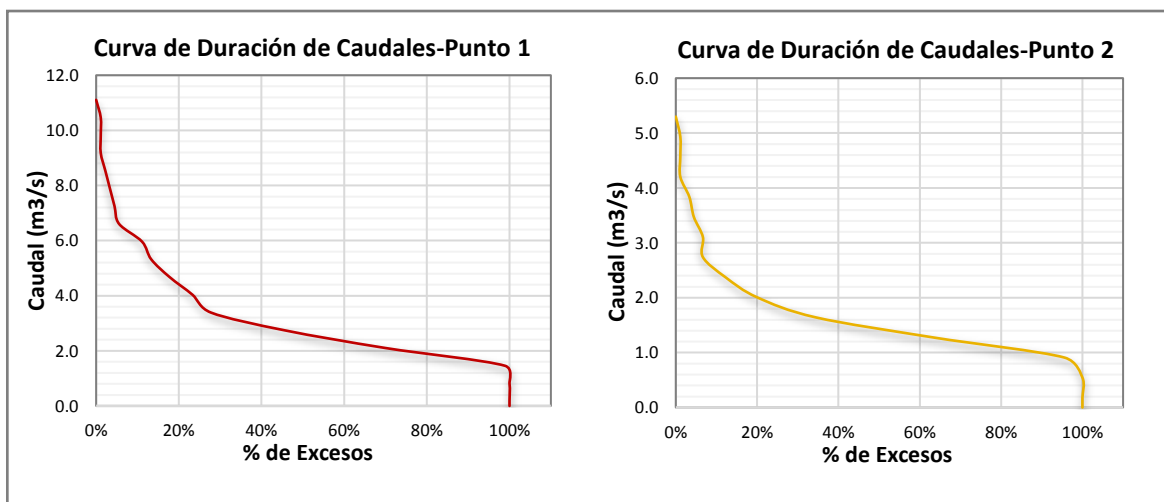
Tabla 9. Localización y descripción de puntos de aforo y nivel

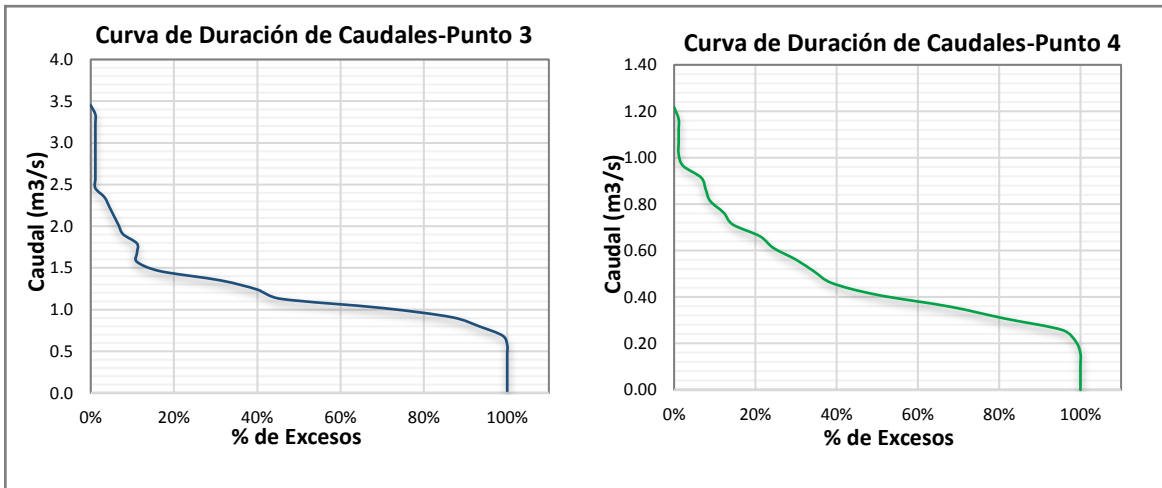
Punto	Latitud	Longitud	Altitud	Descripción
1	2.535848°	-72.68473°	192 msnm	Quebrada La María
2	2.529763°	-72.68341°	196 msnm	Quebrada La María
3	2.524704°	-72.68371°	195 msnm	Desembocadura de Caño Lajas
4	2.520901°	-72.70035°	214 msnm	Caño Arenales

Fuente: Acosta S. (2017)

A partir del análisis de frecuencias de la serie de caudales medios diarios tomados mediante la técnica del flotador o área-velocidad en los cuatro puntos de aforo, se realizó la curva de duración de caudales para cada punto (Gráfico 4). Las curvas de duración de caudales son representativas para el periodo del 18/08/2017 a 15/11/2017, siendo útiles para determinar si la fuente es suficiente para suplir las deficiencias durante periodos secos. Como se observa en el gráfico 4, la escala vertical de la curva de duración representa caudales medios diarios y la escala horizontal las probabilidades de ocurrencia de dichos caudales.

Gráfico 4. Curvas de Duración de Caudales para los puntos de aforo



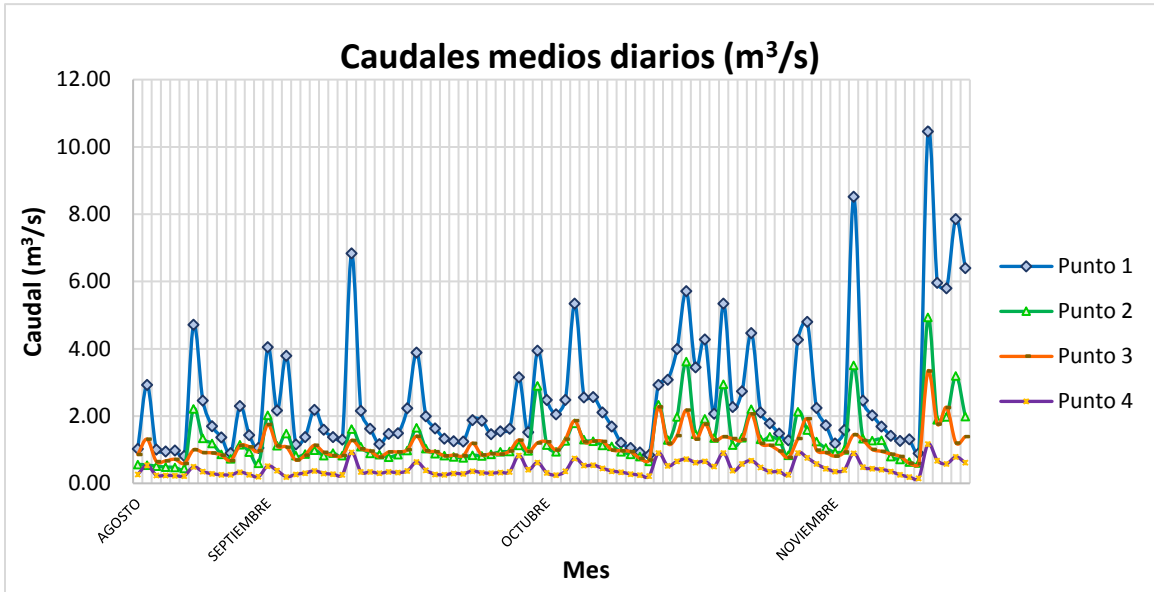


Fuente: Acosta S. (2017)

Las curvas de duración de caudales (grafico 4) para los puntos de aforo en la microcuenca La María, permiten observar la variabilidad de dichos caudales en el tiempo y a su vez tener un mayor conocimiento en la disponibilidad del agua. Además, se observa que las curvas poseen una forma similar característica de cuencas de baja pendiente, sin embargo, su comportamiento diferente en los cuatro punto se atribuye a los caudales que se presentaron en cada punto de muestreo, por ende, las curvas de duración de caudales son representativas para el periodo de estudio. La pendiente pronunciada en el tramo inicial de las curvas indica que los caudales altos se presentan durante periodos cortos, evidenciando los cortos tiempos de concentración que presenta la microcuenca La María.

La información general de los caudales medios diarios (m^3/s) tomados en los cuatro puntos se representa en el gráfico 5, donde se puede establecer la relación directa con las precipitaciones mostradas en el grafico 3. De igual modo, se refleja que los caudales medios máximos tuvieron lugar el día 11 de noviembre para los respectivos puntos con un patrón de incremento. Por otro lado, el flujo de caudal más bajo se presenta en punto 4 que corresponde a Caño Arenales, aguas arriba del embalse La María y captación del acueducto municipal. Con respecto al punto 1, se observa que posee los caudales mal altos en comparación a los otros puntos, esto explica que es el punto aguas debajo de la quebrada La María donde se recarga el flujo de los demás afluentes.

Gráfico 5. Caudales medios diarios para los puntos de aforo

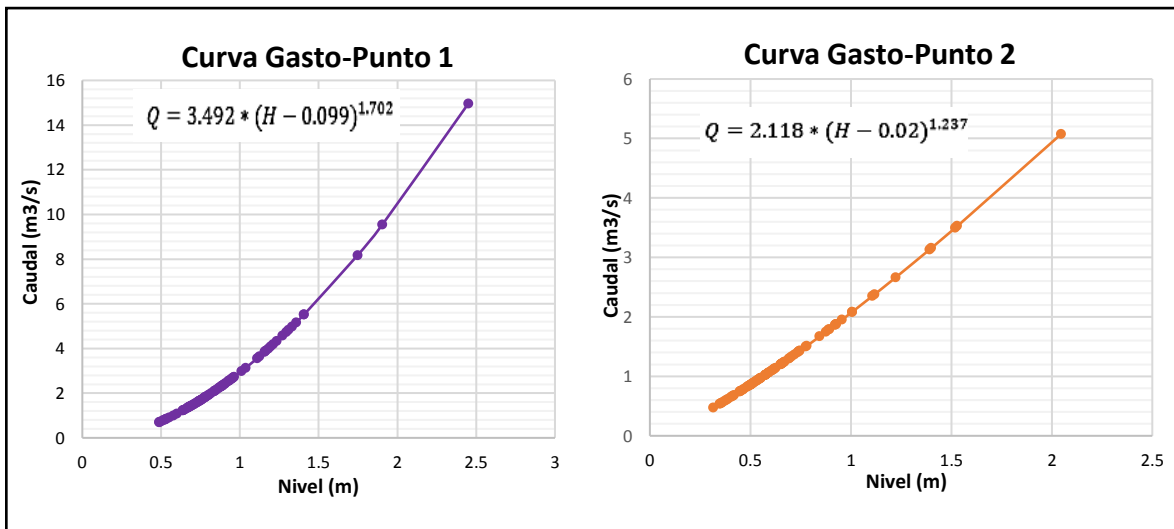


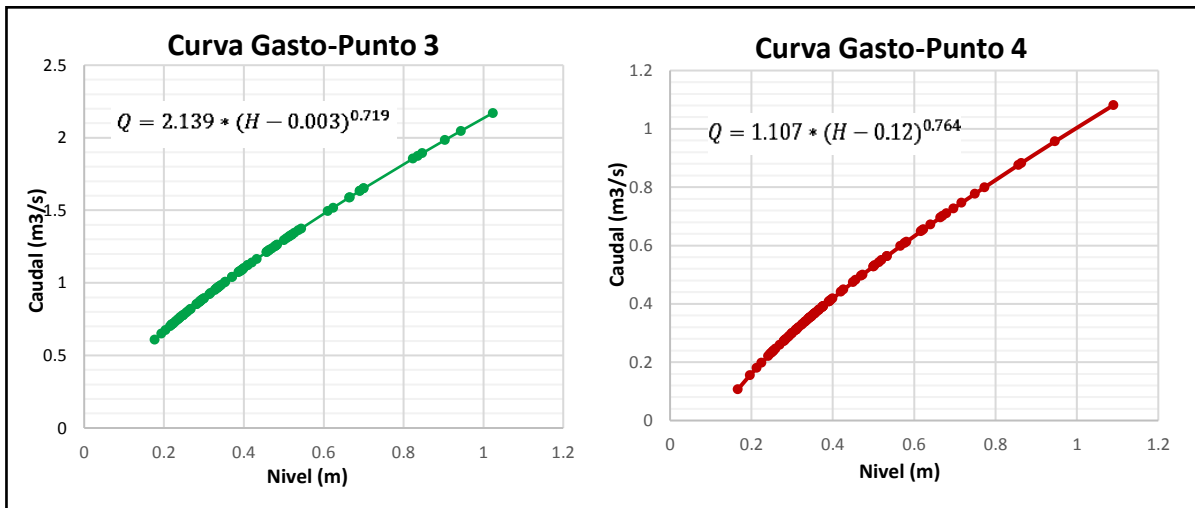
Fuente: Acosta S. (2017)

- **Curva de Gasto o de Calibración**

La relación entre los niveles y caudales se representa en el gráfico 6 a partir de las Curvas Gasto o de Calibración realizada para cada punto de aforo (punto 1, punto 2, punto 3 y punto 4), se obtuvieron buenos ajustes con coeficientes de correlación de 0.9514, 0.9893, 0.8395 y 0.9570 respectivamente.

Gráfico 6. Curvas Gasto para los puntos de aforo





Fuente: Acosta S. (2017)

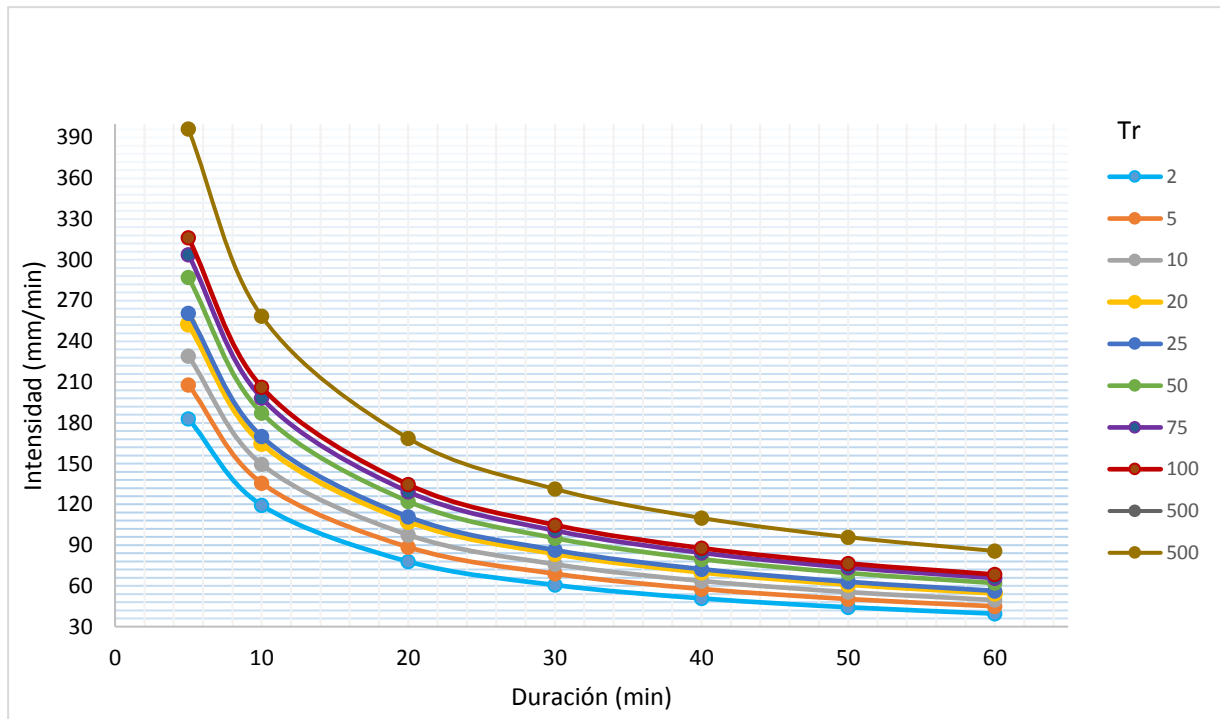
A partir de los resultados obtenidos, se infiere que debido a que la curva gasto para el punto 3 posee una correlación moderada positiva, es necesario continuar con la alimentación de más datos que permitan dar un mayor grado de confianza. La forma de las curvas de calibración obtenidas para los puntos de muestreo, tienen relación directa con las condiciones hidráulicas e hidrológicas de cada punto. Las curvas de calibración tienen múltiples aplicaciones, como por ejemplo para una planeación previa de control de inundaciones, cálculo de caudales durante emergencias y más aún que en la zona de estudio no se cuenta con un registro o con información suficiente para la realización de estudios hidrológicos.

- Curvas IDF y Hietogramas

En la elaboración de las curvas IDF se tomó la serie de datos de 1985-2015 obtenidos del IDEAM determinando 31 datos faltantes para las precipitaciones máximas mensuales por el método de valores normales. Mediante el uso de regresión potencial se obtuvo el coeficiente de regresión $R^2=0.9848$ y los coeficientes a, B y C con valores de 0.1399, 0.6163 y 448.010 respectivamente.

Calculando estas constantes se finaliza el proceso de construcción de las curvas IDF y se obtienen los valores de intensidad mediante la ecuación 8 para las distintas duraciones, se procedió a graficar los datos de intensidad de modo que se obtienen los puntos de la curva asociada a cada período de retorno seleccionado; 5, 10, 25, 50 y 100 años. De esta forma se expresa gráficamente la relación existente entre la intensidad, duración y frecuencia del evento de precipitación (Gráfico 7), registrado en la estación SAN JOSE DEL GUAVIARE.

Gráfico 7. Curvas IDF para la estación SAN JOSE DEL GUAVIARE-CÓD 32105070

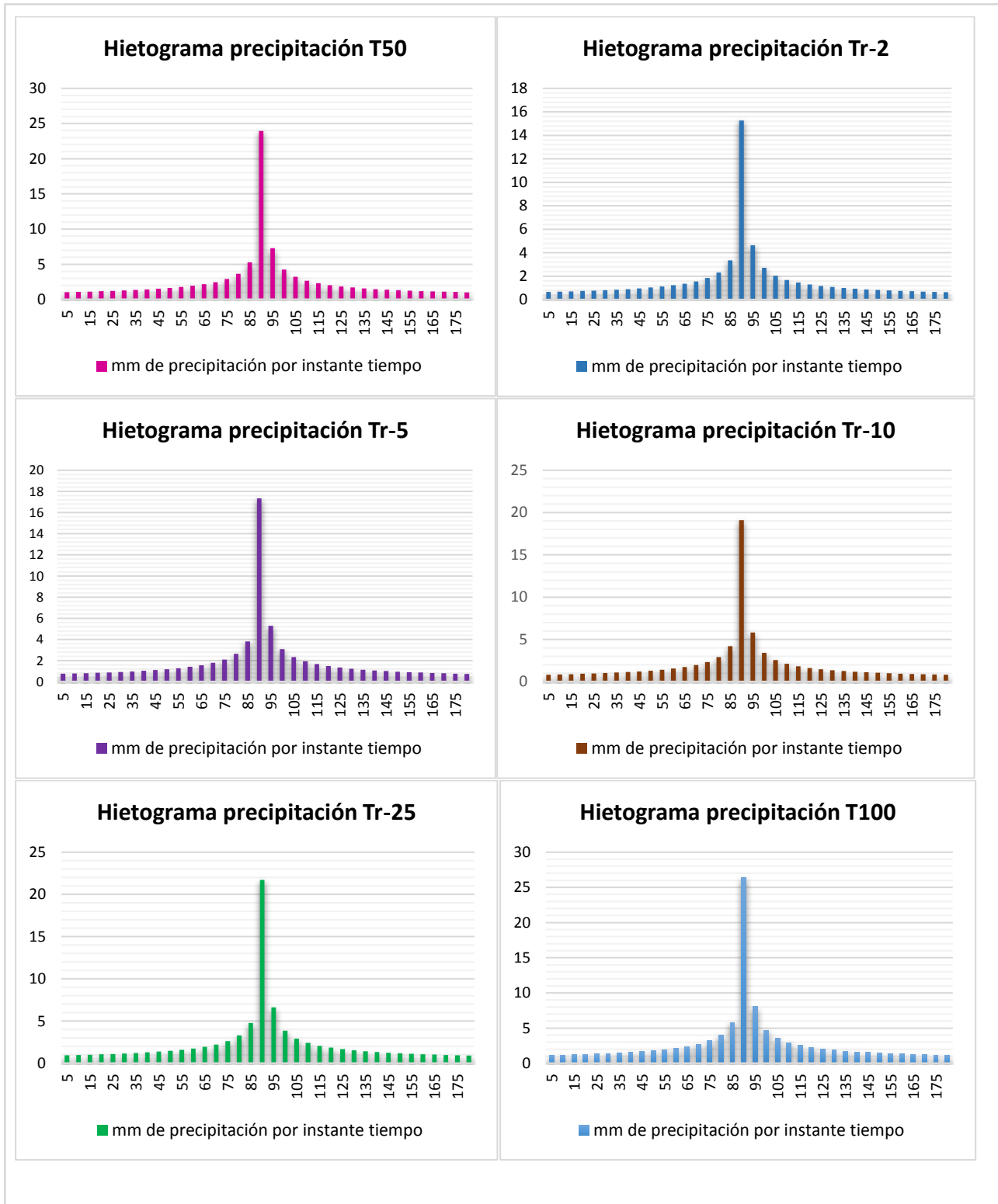


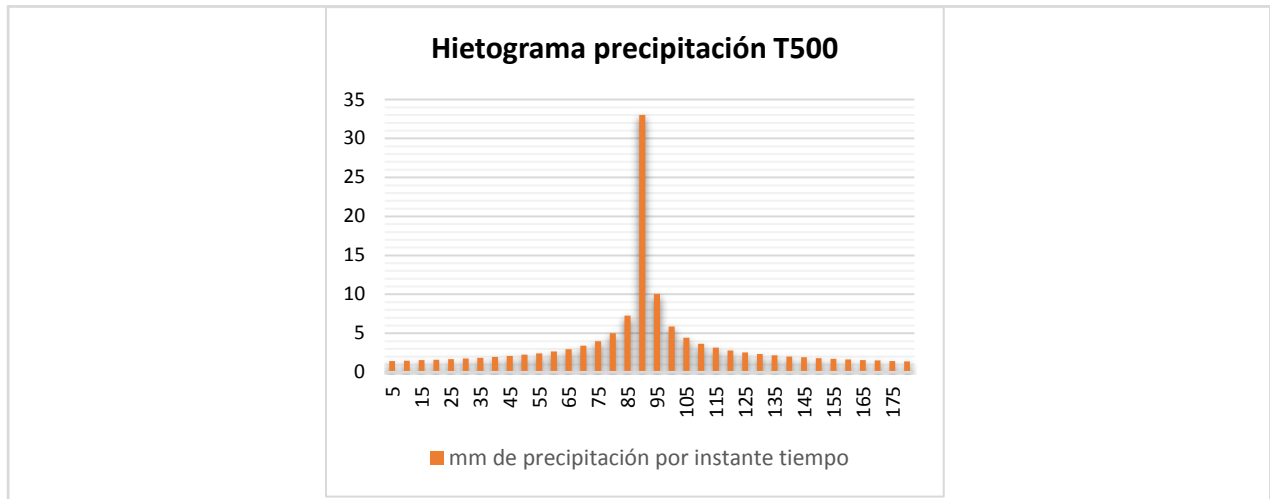
Fuente: Acosta S. (2017)

En el gráfico 7 se observa que entre mayor duración tengan las precipitaciones se dará una menor intensidad. Las intensidades máximas varían desde 39.57 mm/min hasta 396.34 mm/min. Es importante aclarar que las curvas IDF reales generadas, solo son representativas para la estación SAN JOSE DEL GUAVIARE y su área de influencia, es decir, la microcuenca La María.

En el gráfico 8 se presentan los histogramas en función del tiempo de concentración (horas) por la fórmula de Kirpich, intensidad de lluvia (mm/h), y el tiempo de duración de la tormenta (1.5 horas). Los histogramas muestran la distribución temporal de las precipitaciones sobre la microcuenca La María.

Gráfico 8. Hietogramas de la microcuenca La María para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años





Fuente: Hidroing, editado por Acosta S. (2017)

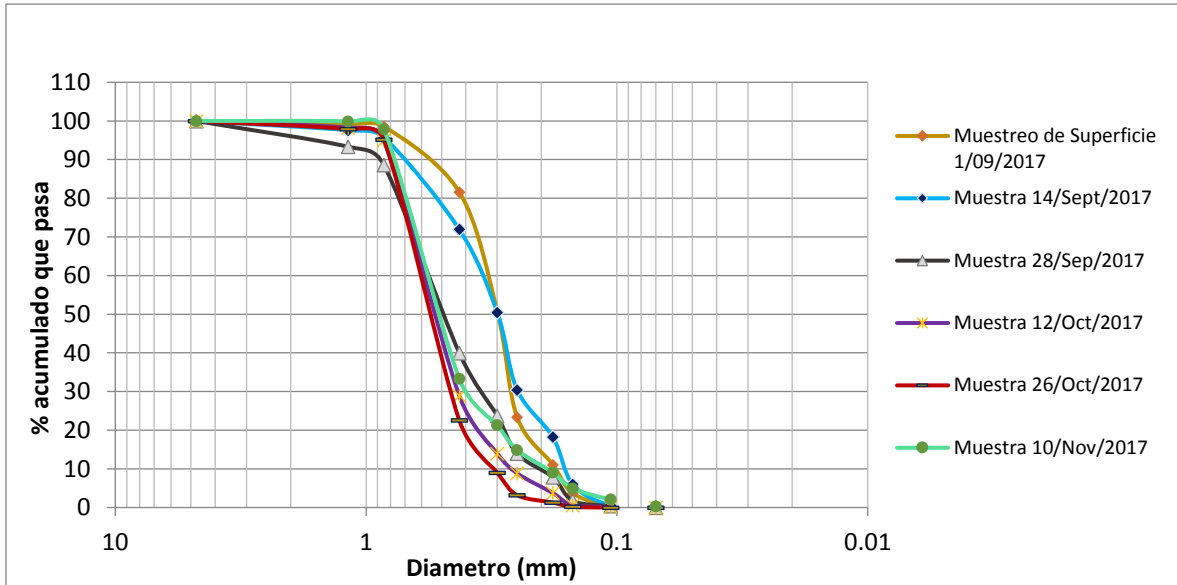
Analizando los hietogramas se determina que las precipitaciones para la microcuenca alcanzan un pico o máxima descarga en el minuto noventa del evento de la tormenta para todos los periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años) con distinta intensidad, y a su vez reduciendo su intensidad a medida que disminuye la tormenta.

➤ CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE SEDIMENTOS

- Sedimentos de trampas Bunte

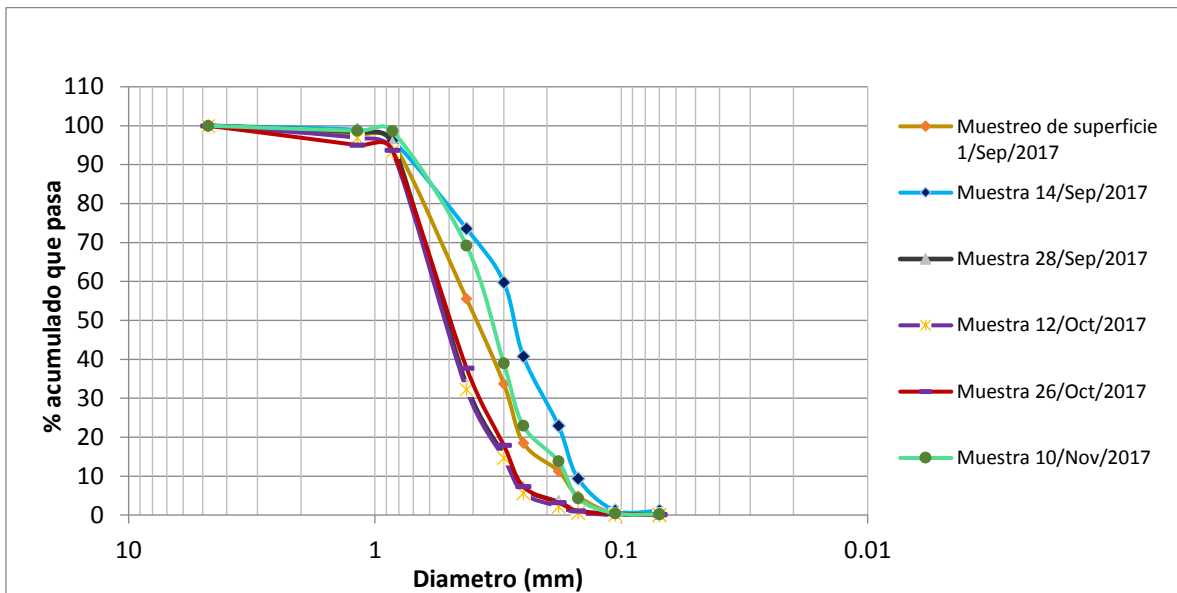
El análisis de granulometría del sedimento es importante para conocer cuál es el tipo de material que se está transportando y sedimentando en la corriente. La clasificación granulométrica se realizó a partir del sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) para los sedimentos retenidos en las trampas Bunte ubicadas en el lecho del cauce en distintos periodos de tiempo y para el muestreo inicial de superficie al margen del cauce en cada punto de muestreo (Grafico 9 al 12). En general, se encontró que todas las muestras presentan menos del 1% pasan en el tamiz No. 200. De acuerdo con las características granulométricas: coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura, los sedimentos retenidos en las trampas se clasificaron como arenas sin finos, mal gradadas (SP) y uniformes.

Gráfico 9. Granulometría de sedimentos del punto 1



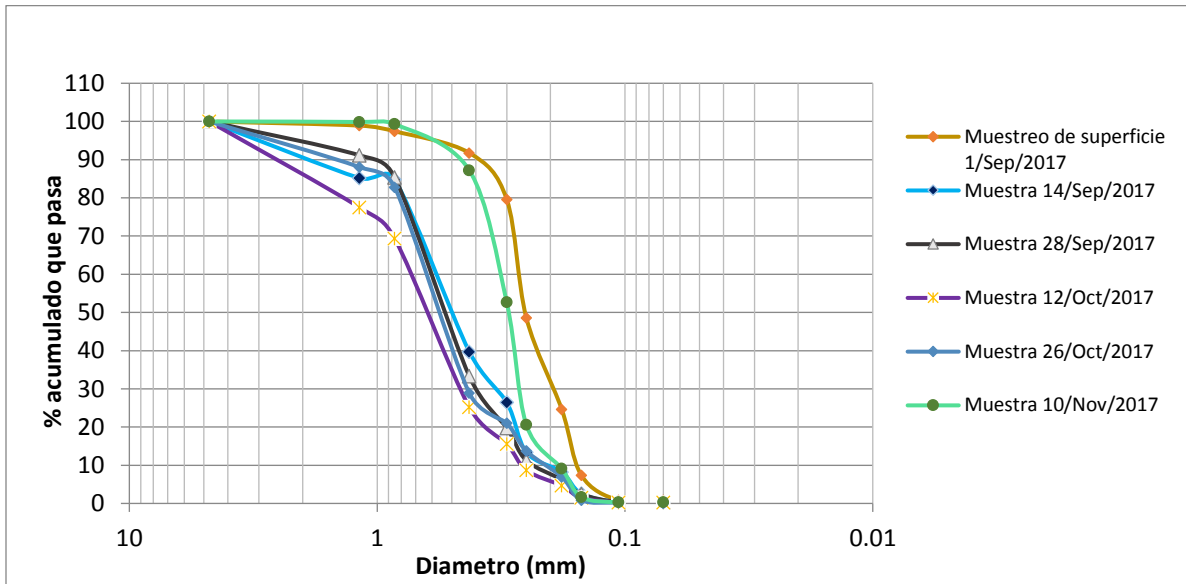
Fuente: Acosta S. (2017)

Gráfico 10. Granulometría de sedimentos del punto 2



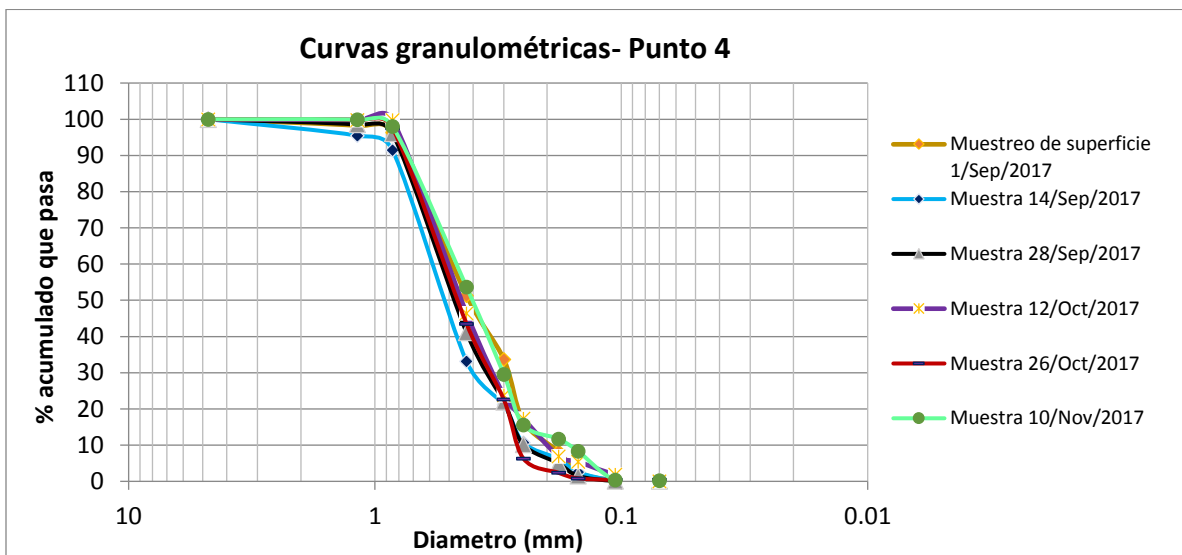
Fuente: Acosta S. (2017)

Gráfico 11 Granulometría de sedimentos del punto 3



Fuente: Acosta S. (2017)

Gráfico 12. Granulometría de sedimentos del punto 4



Fuente: Acosta S. (2017)

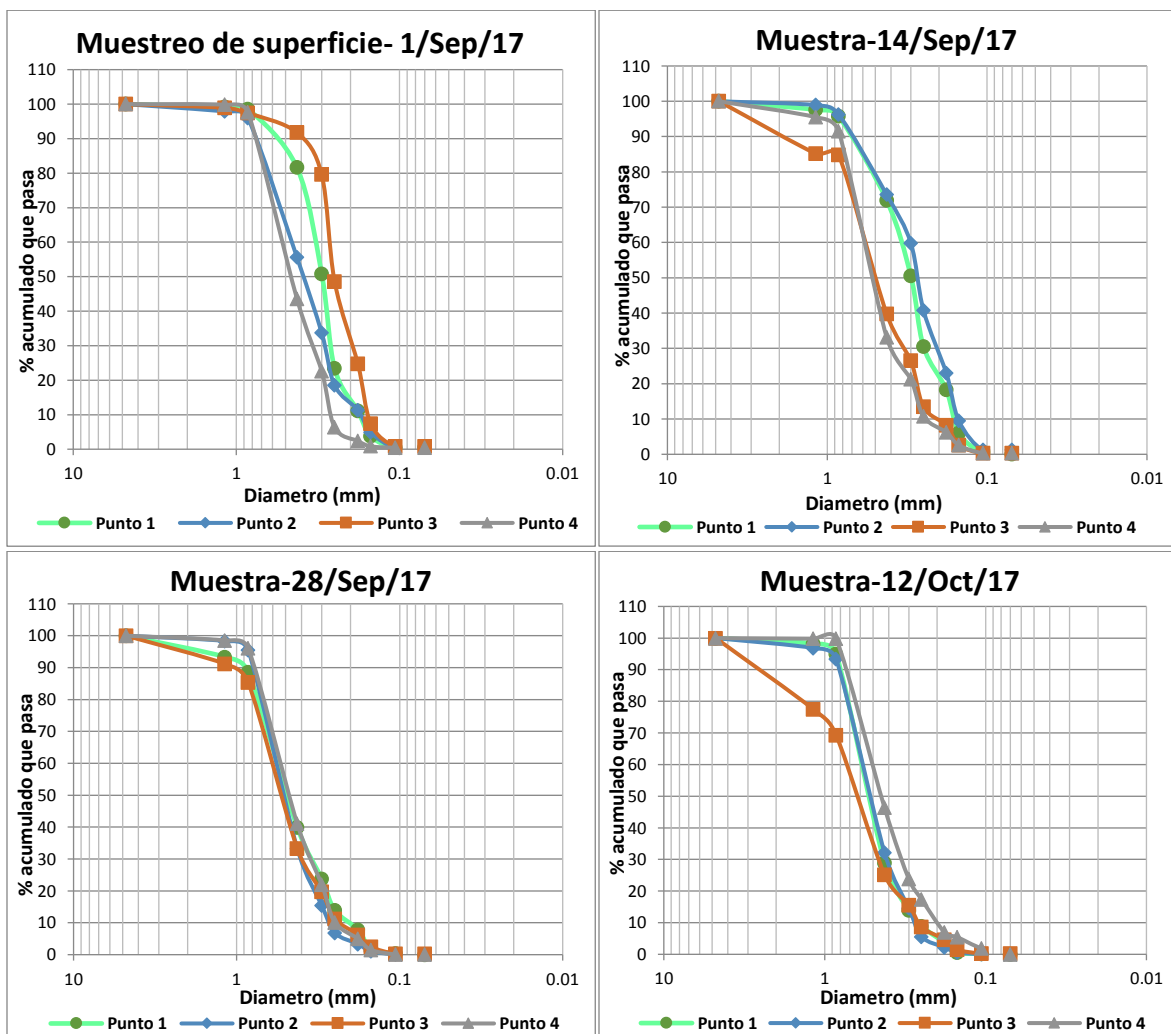
En las gráficas 8-12 se observa que la granulometría de los sedimentos está conformada principalmente por arenas gruesas y arenas medias en menor proporción con cantidades subordinadas de arenas finas que varían en función de la distancia de transporte y de los fenómenos post-deposicionales. Existen coincidencias de transporte de sedimentos grueso durante épocas de mayor pluviosidad como se observa en las curvas granulométricas del muestra 28/Sep./2017 y muestra 12/Oct/2017, donde tuvo lugar las

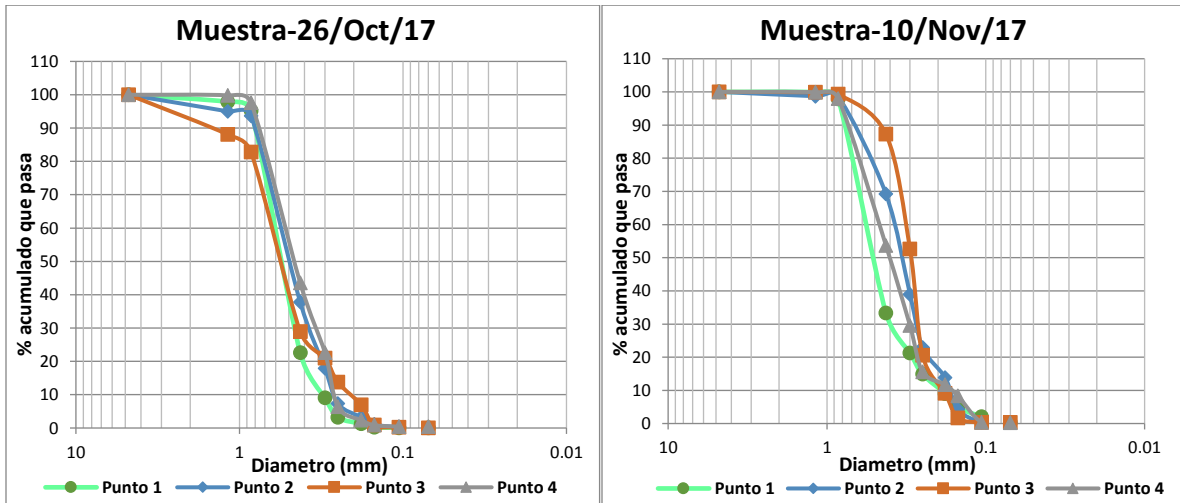
precipitaciones máximas diarias como la del 19 de agosto, 10 de septiembre y 28 de septiembre con valores en mm de 36.14, 42.02 y 36,38 mm de precipitación, respectivamente.

Se observa una uniformidad en las curvas granulométricas de los sedimentos del punto 4 (Grafico 14) que probablemente pueden estar relacionados con las características edafológicas de la subcuenca de Caño Arenales o por las condiciones de flujo y energía bastante uniformes. Por otra parte, las curvas granulométricas de sedimentos representativas de Caño Lajas en el punto 3, se caracterizan por estar compuestas de sedimentos más gruesos asociados a desprendimientos de roca en el lecho del cauce y por la abrasión de la corriente, considerando que a la salida del flujo de Caño Lajas se encuentran grandes depósitos de fragmentos de roca.

Para analizar la variabilidad de las características de los sedimentos en los cuatro puntos y en diferentes fechas se realizó un gráfico comparativo (Gráfico 13).

Gráfico 13. Comparación de curvas granulométricas en los cuatro puntos





Fuente: Acosta S. (2017)

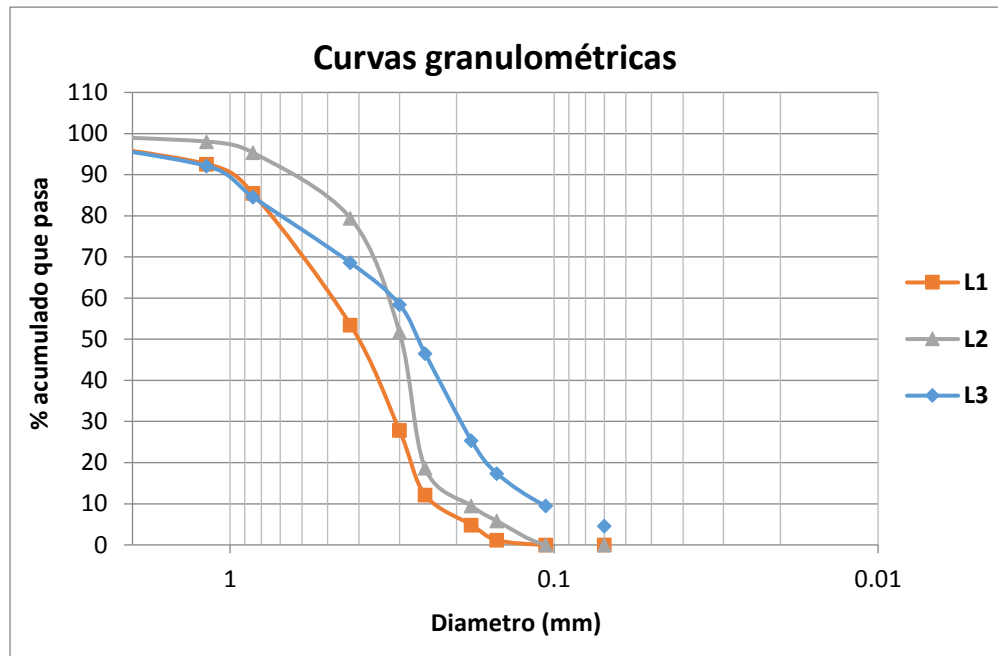
Se destaca del gráfico 13 que las muestras de superficie del punto 1 y el punto 3 denotan fenómenos de arrastre y depositación de material relativamente fino para la época de muestreo; estos materiales pudieron quedar fijados en el cauce cuando disminuye la velocidad de la escorrentía y permanecieron inalterados hasta el próximo evento lluvia-escorrentía. Por otra parte, las curvas granulométricas con fecha de 28 de septiembre y 26 de octubre presentan bastante homogeneidad y similitud entre ellas, presentándose de igual modo durante los periodos de muestreo precipitaciones similares. Las curvas para las demás fechas muestran variabilidad de acuerdo a la energía de la corriente en el momento de la medición en los diferentes puntos.

- Sedimentos de trampas de ladera

Con respecto a los sedimentos captados en laderas, las curvas granulométricas para las tres trampas (L1, L2 y L3) se observan en el gráfico 14. Se determinó que los sedimentos corresponden a arenas mal gradadas mediante el coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura. Por otro lado, debido a que el coeficiente de uniformidad fue menor a tres en todos los casos, los tamaños de las partículas reflejan que los sedimentos corresponden suelos uniformes que presentan ausencia de algunos tamaños.

El análisis granulométrico permite conocer que en L1 y L2 poseen arenas de tamaños gruesos, medios y finos en menor proporción; L2 contiene mayor fracción de arenas finas con respecto a L1. La curva granulométrica de L3 presenta menos arenas gruesas y medias; sin embargo su curvatura refleja que contiene más fracción de tamaños finos (Gráfico 14). Los resultados obtenidos están relacionados con los factores ambientales de la zona de estudio, como: cobertura vegetal, pendiente y tipo de suelos.

Gráfico 14. Curvas granulométricas de sedimentos en laderas



Fuente: Acosta S. (2017)

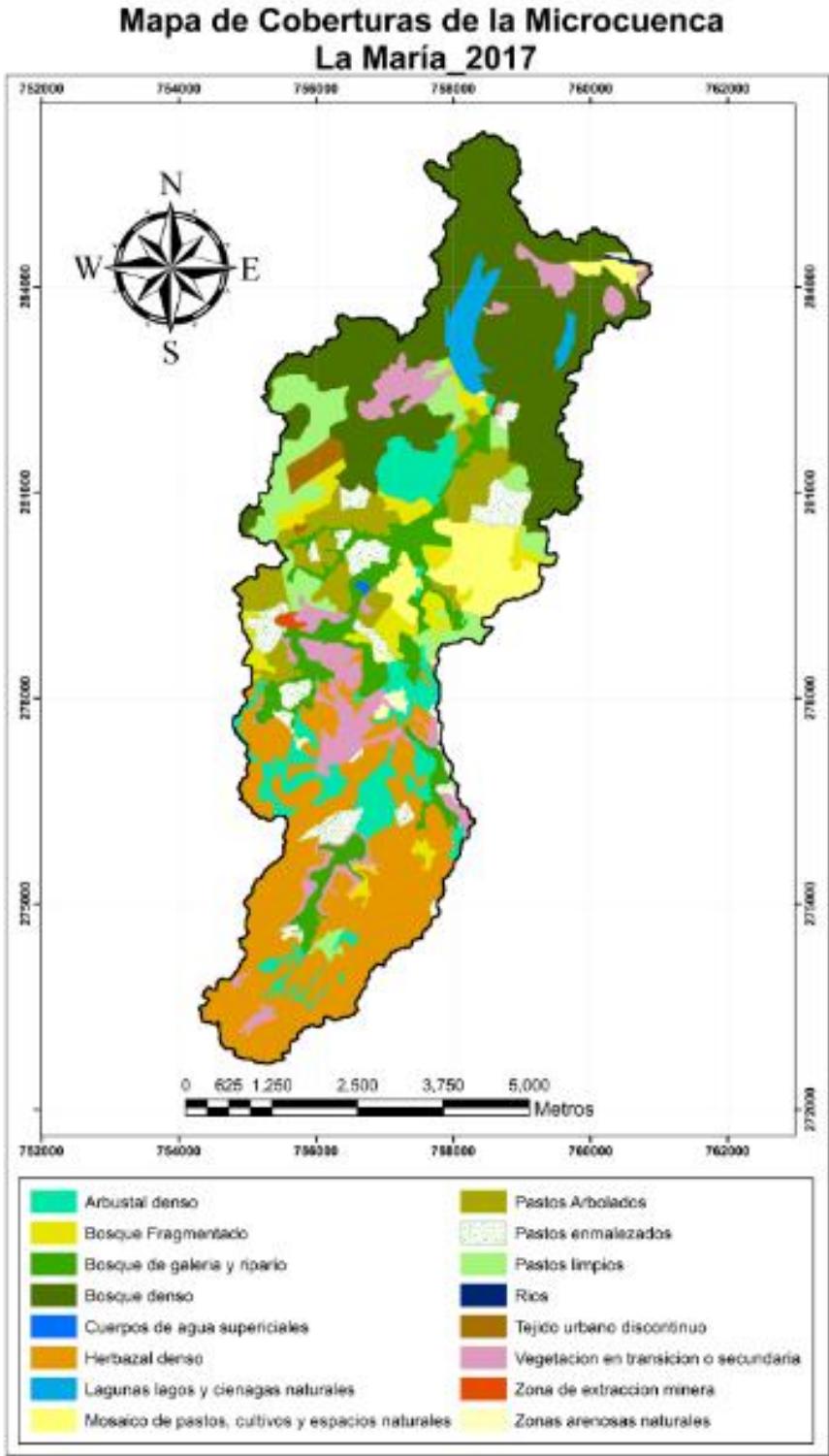
➤ COBERTURA Y USO DEL SUELO

A partir de la teledetección y las visitas a campo se obtuvieron mapas de coberturas y usos del suelo en la microcuenca La María para el año 2017, mediante la adopción de la nomenclatura Corine Land Cover del año 2010.

- Coberturas de la Tierra

Las unidades cartográficas representadas en el mapa de coberturas de la microcuenca La María (Figura 27) se identificaron en base a “Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra” adaptándola a escala 1:50.000. La leyenda se manejó de manera jerárquica, derivando las unidades de coberturas de la tierra con base a criterios fisonómicos como altura y densidad, claramente definidos y aplicables a todas las unidades consideradas para un grupo de coberturas del mismo tipo. El mapa temático generado de las coberturas existentes para el año 2017 en la microcuenca, proporciona el conocimiento previo para evaluar las formas de ocupación y apropiación del territorio, además, proporciona una herramienta importante para apreciar la dinámica de los cambios de uso en el suelo. En el gráfico 15 se muestra el resumen de las coberturas encontradas.

Figura 27. Mapa de Cobertura en la microcuenca La María



Fuente: Acosta S. (2017)

Gráfico 15. Estadísticas a nivel general de la interpretación de coberturas



Fuente: Acosta S. (2017)

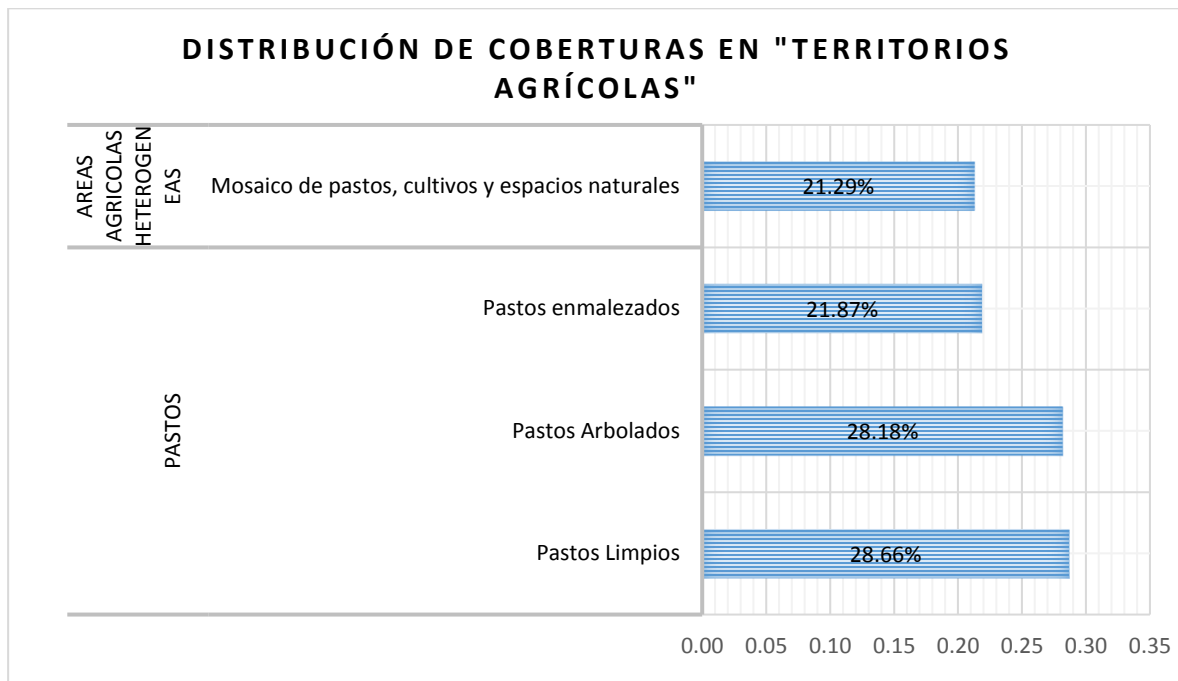
El gráfico 15 muestra la distribución de las coberturas en la microcuenca donde se aprecia que la mayor extensión corresponde a los denominados “Bosques y áreas seminaturales” con el 74.52% equivalente a 29.81 Km², seguido por “Territorios agrícolas” con 22.84% en 9.13 Km², las demás clases en menor proporción como “Superficies de agua” y “Territorios artificializados” con porcentajes de 1.60 y 1.03 respectivamente. Considerando las cuatro categorías mencionadas, se interpretaron y encontraron 16 tipos de coberturas sintetizados en el mapa de la figura 27.

En la categoría de “Territorios artificializados” con una extensión de 0.413 Km² (1.03%) se encontraron dos tipos de coberturas siendo “Zonas de extracción minera” y “Tejido urbano discontinuo”. Estas coberturas comprenden territorios que están siendo incorporados mediante un proceso gradual de urbanización con la obtención de predios y alteración del paisaje para el caso de la extracción minera, debido a que se realiza de manera ilegal en la zona.

En cuanto a las áreas para la categoría “Superficies de agua” corresponde a 0.642 Km² (1.60), distribuidas entre Laguna Grande La María, Laguna Chiquita y el embalse La María.

Los "Territorios Agrícolas" representan 9.13 Km² (22.83%) del área total de la microcuenca. Comprenden áreas dedicadas principalmente a usos pecuarios y agrícolas, ejerciendo presión sobre las zonas de bosques. Esta categoría se enlaza con dos subgrupos: a) Pastos y b) Áreas agrícolas heterogéneas; que contienen las coberturas de Pastos limpios, pastos arbolados, pastos enmalezados y mosaico de pastos, cultivos y espacios naturales. En el gráfico 16 se observa que la distribución de las coberturas en los territorios agrícolas es similar y uniforme en proporciones que van desde 21.29% para "Mosaicos de pastos, cultivos y áreas naturales" y 28.66% para "Pastos limpios".

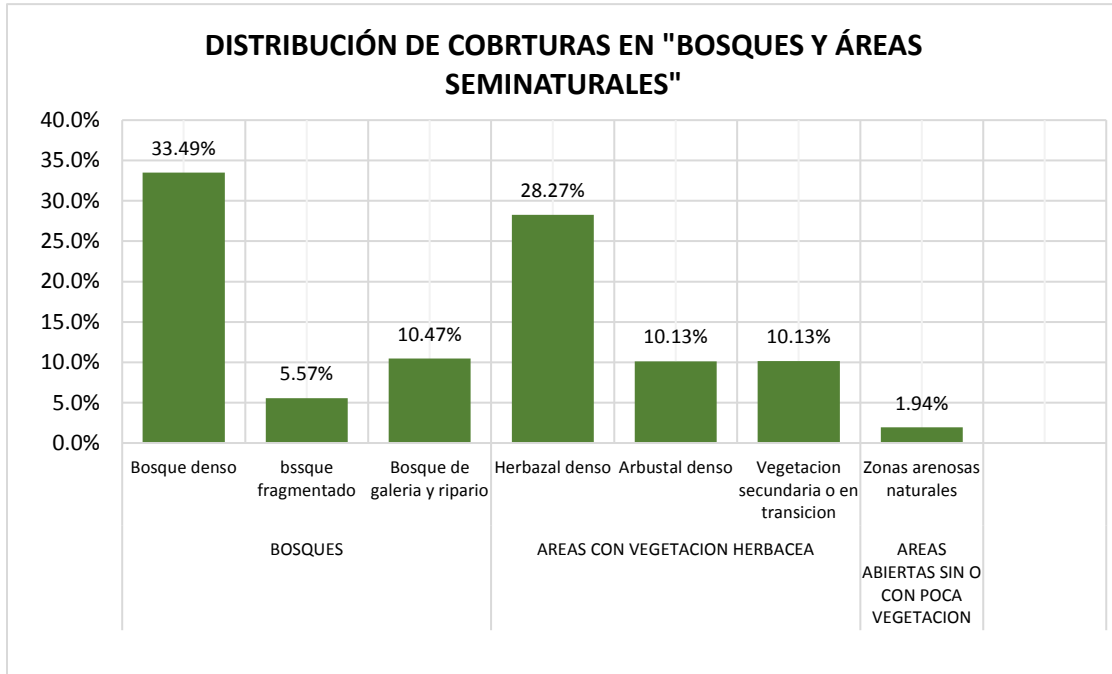
Gráfico 16. Estadística general de "Territorios Agrícolas"



Fuente: Acosta S. (2017)

La categoría de "Bosques y Áreas Seminaturales" comprende la extensión más amplia de la microcuenca con 29.82 Km² (74.52%). Dentro de esta categoría se encuentran clases como: a) "Bosques" b) "Áreas con vegetación herbácea" y c) "Áreas abiertas sin o con poca vegetación". Las coberturas encontradas corresponden a Bosque denso, bosque fragmentado, Bosque de galería y ripario, y por último zonas arenosas naturales. Estas, áreas pertenecen a los bordes de afluentes y a las zonas sin intervención antrópica con cultivos o pasturas. En el gráfico 17 se observa que las coberturas predominantes con mayor porcentaje de área son las coberturas de Bosque denso y Herbazal denso, encontrados en su mayoría en la zona baja y alta de la microcuenca, respectivamente, condicionados por las características biofísicas de la zona o ecosistema donde se desarrollan.

Gráfico 17. Estadística general de “Bosques y áreas seminaturales”



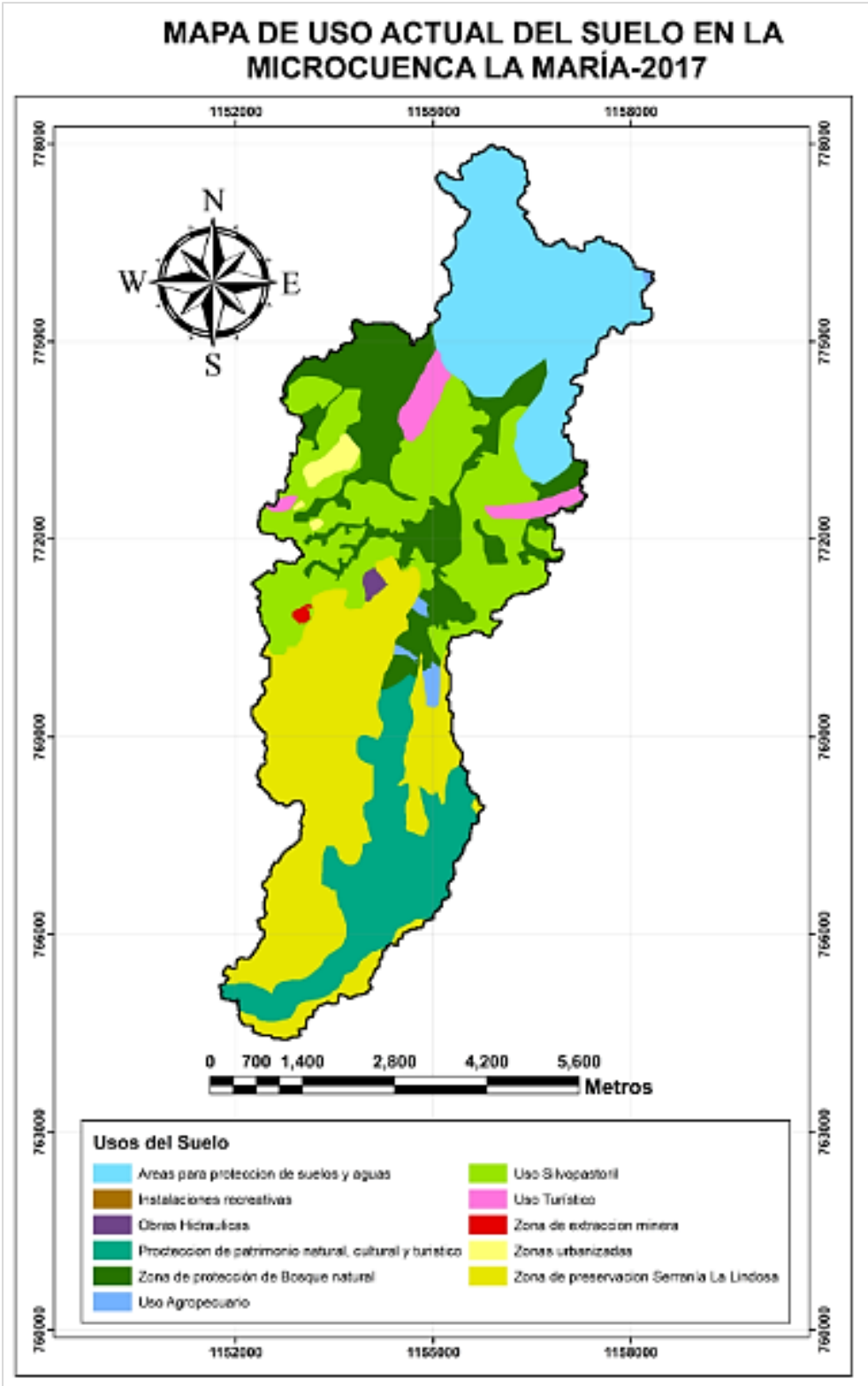
Fuente: Acosta S. (2017)

El rompimiento ecológico de las coberturas de bosque natural se hayan principalmente en la zona central de la microcuenca, donde la cobertura predominante corresponde a pastos asociados a las actividades ganaderas y agrícolas que se desarrollan en el sector. Cabe señalar que las “Zonas arenosas naturales” hacen referencia a zonas de sedimentos colmatados en el paisaje de llanura aluvial y terrenos constituidos por suelos arenosos y pedregosos encontrados en la parte alta de la microcuenca.

- Usos del suelo

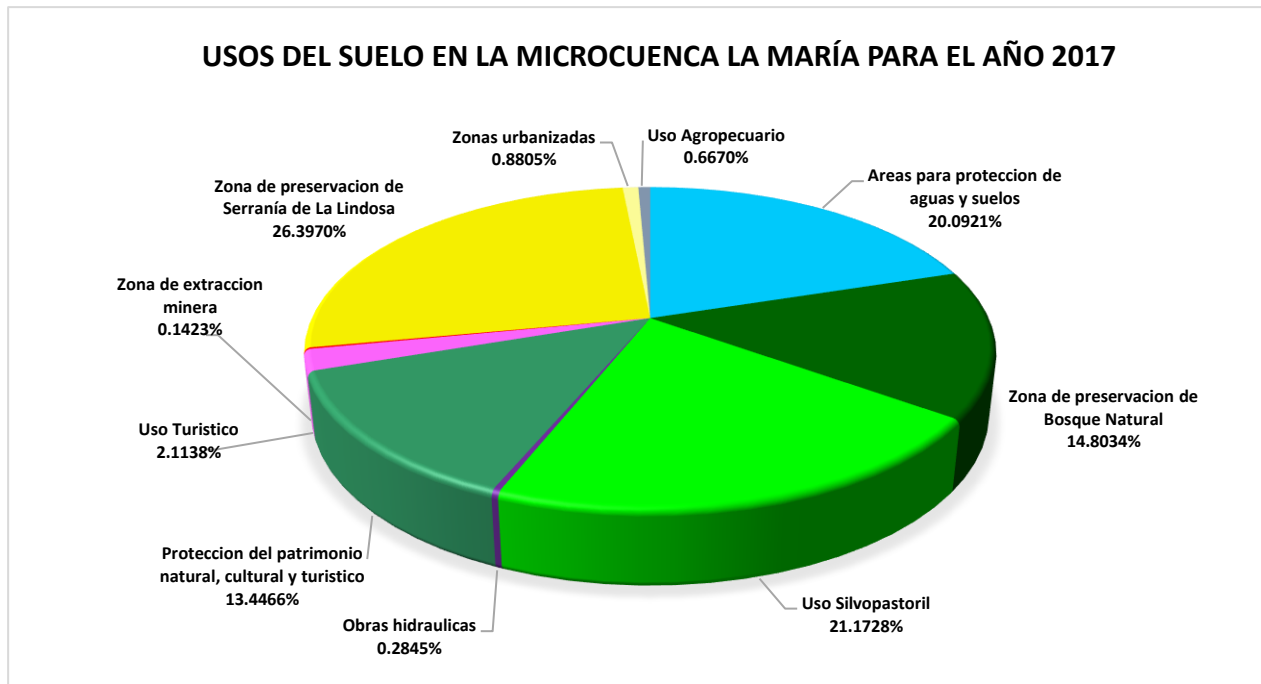
Con respecto al mapa de usos del suelo (Figura 28), se clasificó y delimitó según su complementariedad entre las coberturas y el uso o aprovechamiento de los recursos naturales, producción agrícola, pecuaria y afines. Por lo tanto, se utilizó la carta topográfica No. ZPSLL a escala 1:50.000 de la CDA para establecer los límites de las áreas de conservación, preservación y protección complementada con las visitas a campo para establecer los demás usos. El uso del suelo está directamente relacionado con las coberturas que se establecen en la capa superficial de la tierra, bien sea en forma natural o con la intervención del hombre, con el fin de satisfacer intereses económicos, sociales y ecológicos. En el sentido de lo anteriormente expuesto en la microcuenca La María se identifican principalmente usos de índole agropecuaria, protección, preservación y urbana (grafico 18).

Figura 28. Mapa de uso actual del suelo en la microcuenca La María



Fuente: Acosta S. (2017)

Gráfico 18. Estadísticas de la interpretación de usos del suelo para el año 2017



Fuente: Acosta S. (2017)

Como se observa en la figura 28 y en el gráfico 18, los principales usos de la tierra que se dan actualmente corresponden a la categoría de Zona de preservación de la Serranía De La Lindosa, Uso Silvopastoril y áreas de protección de aguas y suelos, representados por los porcentajes del área total 26,29%, 21,13% y 20,09% respectivamente.

La unidad cartográfica correspondiente a “Áreas de protección de suelos y aguas” agrupa la vegetación correspondiente a Bosques densos y Lagunas (Laguna Grande La María, Laguna Chiquita). La unidad de “Protección del patrimonio natural, cultural y turística” incluye coberturas como zonas arenosas naturales, Arbustal denso y herbazal denso incluyendo zonas con afloramientos rocosos. Por otra parte, “La “Zona de preservación de Serranía de La Lindosa” comprende coberturas Arbustal denso, herbazal denso, bosque de galería y ripario, vegetación en transición y pastos limpios.

El uso silvopastoril se componen por coberturas como pastos limpios (pastos manejados), mosaico de pastos, cultivos y áreas naturales, pastos arbolados y pastos enmalezados. La parte media de la microcuenca se encuentra intervenida por actividades agropecuarias que ejercen gran presión sobre el bosque de galería presente, descendiendo altitudinalmente se identifica la fragmentación y perdida de bosque por la introducción de pastos para ganado, por tanto se debe establecer la recuperación de estas áreas.

Dentro del análisis de los usos actuales de los suelos, se puede inferir que gran parte de la microcuenca La María está siendo influenciada por las actividades antrópicas como lo

es la siembra de cultivos y pastos, las zonas urbanizadas y zonas de extracción minera o de materiales para la construcción que se relacionan con la remoción de coberturas vegetales que modifican del paisaje, y a la misma vez contribuyen con los procesos erosivos de la cuenca. Sin embargo, se destacan las grandes cantidades de áreas destinadas a la protección y preservación que abarcan 46,38% del área total, delimitadas por la Corporación Para El Desarrollo Sostenible Del Norte Y El Oriente Amazónico (CDA) en el Plan De Manejo De La Serranía De La Lindosa Y Su Área De Influencia Departamento Del Guaviare (2005).

➤ MAPA DE TEXTURA DE SUELOS.

Inicialmente se determinaron las zonas de vida existentes en la microcuenca, a partir de las condiciones de temperatura media mensual (°C) y precipitación total anual (mm). De acuerdo la tabla 10, la estación SAN JOSE GUAVIARE presenta condiciones de temperatura media mensual de 25.48 °C, precipitación total anual de 2549.735 mm en régimen monomodal y elevación de 165 msnm, que permiten caracterizar la zona baja de la microcuenca dentro de Bosque Húmedo Subtropical (bh-S). Para la estación EL TRUENO se determinó que la Temperatura promedio anual es de 25.17 °C, con precipitación total anual de 4746.47 mm y elevación de 150 msnm, clasificándose dentro de la zona de vida de Bosque muy Húmedo Tropical (bmh-T) según el sistema de Zonas de Vida de Holdridge.

Tabla 10. Datos para la clasificación según Holdridge

Estación	Elevación msnm	Código	Temperatura Media Mensual	Precipitación Total Anual	Zona De Vida
SAN JOSE GUAVIARE	165	32105070	25.488	2549.735	bh-S
EL TRUENO	150	31015010	25.170	4746.471	bmh-T

Fuente: Acosta S. (2017)

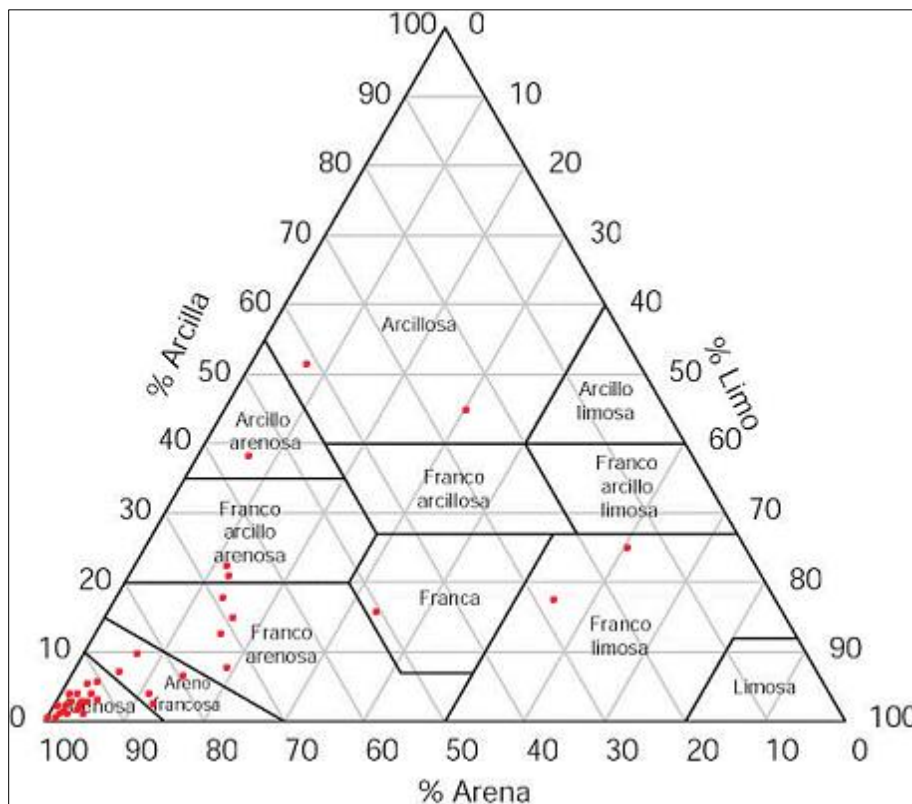
La zona de vida de Bosque muy Húmedo Tropical (bmh-T) es el bioma más complejo de la tierra en términos de su estructura y diversidad de especies, se localiza en la parte alta de la microcuenca presentando un alto régimen de pluviosidad. De acuerdo con la UNAD (2013), ocurre bajo condiciones ambientales óptimas para la vida, disponibilidad de calor durante todo el año y abundante precipitación. No hay estaciones de crecimiento e hibernación como en las zonas templadas norte y sur. Clemente (2011) afirma que en esta zona de vida se encuentran suelos pobres en nutrientes resultado de prolongados periodos sin perturbaciones geomorfológicas, es decir, de edad avanzada, con

temperaturas constantemente altas y con grandes volúmenes de precipitación anual que conducen a que se produzca una meteorización intensiva y una lixiviación profunda.

Los Bosque Húmedo subtropical (bh-S) se encuentra en la zona baja de la microcuenca con extensiones de tierra cubierta de densa vegetación comprendida por bosque denso y vegetación en transición o secundaria. Según la literatura, se diferencian de los bosques muy húmedos tropicales por presentar una pluviosidad menor a la de éstos, aunque en promedio sigue siendo mayor a la de otros ecosistemas. Clemente (2011), expresa que en zonas cubiertas de bosques es posible que el suelo y el bosque tengan un ciclo de nutrientes notablemente cerrado, produciendo vegetación exuberante en suelos de mediana fertilidad natural, como se observa en el mapa de coberturas la existencia de grandes extensiones de bosque denso en la zona baja de la microcuenca.

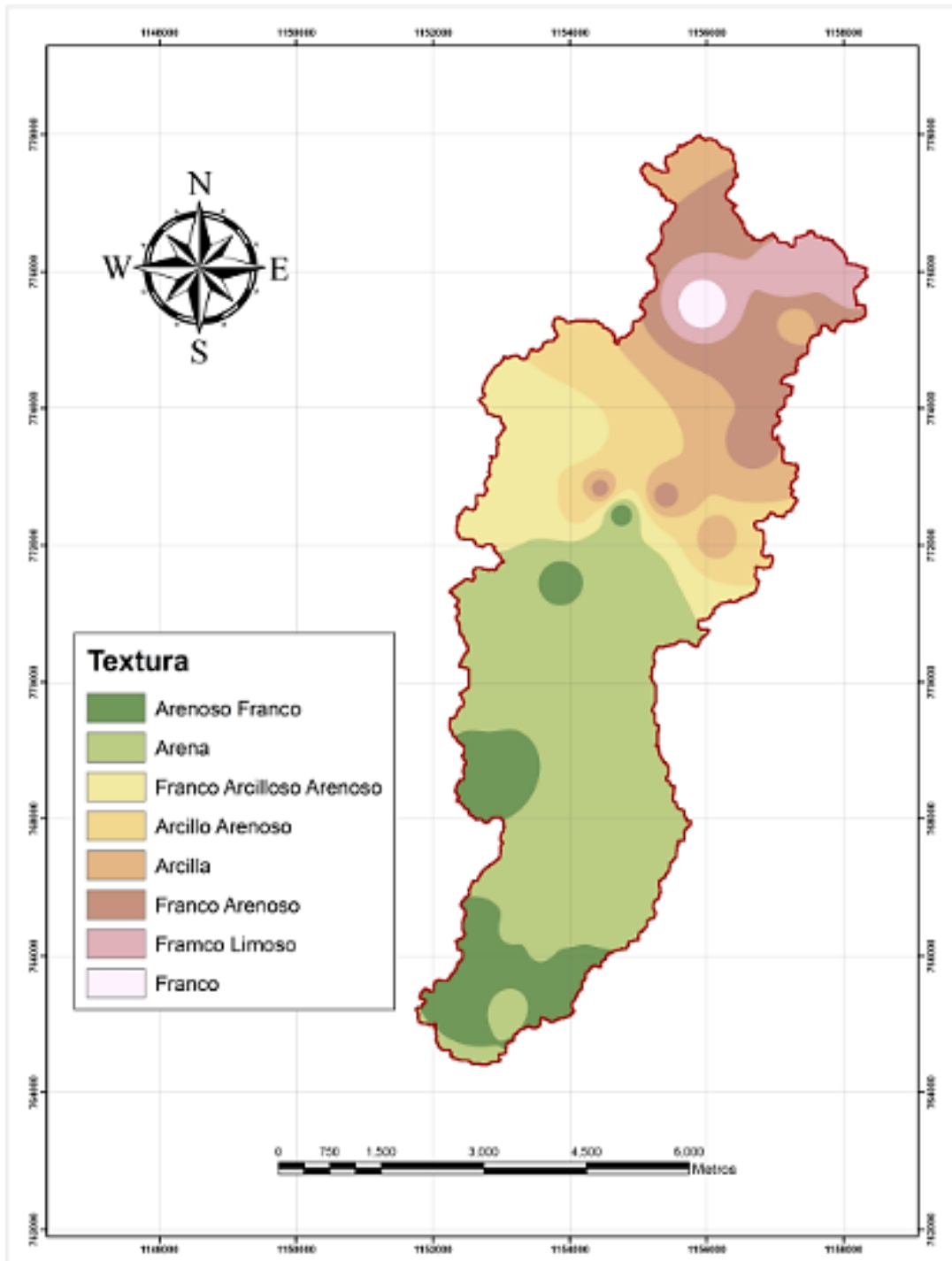
Con respecto a la clasificación de texturas del suelo en la microcuenca, se obtuvieron los porcentajes de arena, limo y arcilla individualmente para los 36 puntos de muestreo, posteriormente cada porcentaje fue ingresado al triángulo de texturas consiguiendo la clasificación de la muestra de suelo (Figura 29) y finalmente ser representados cartográficamente en la Figura 30.

Figura 29. Distribución de las muestras en el triángulo textural



Fuente: Acosta S. (2017)

Figura 30. Mapa de textura de los suelos en la microcuenca La María



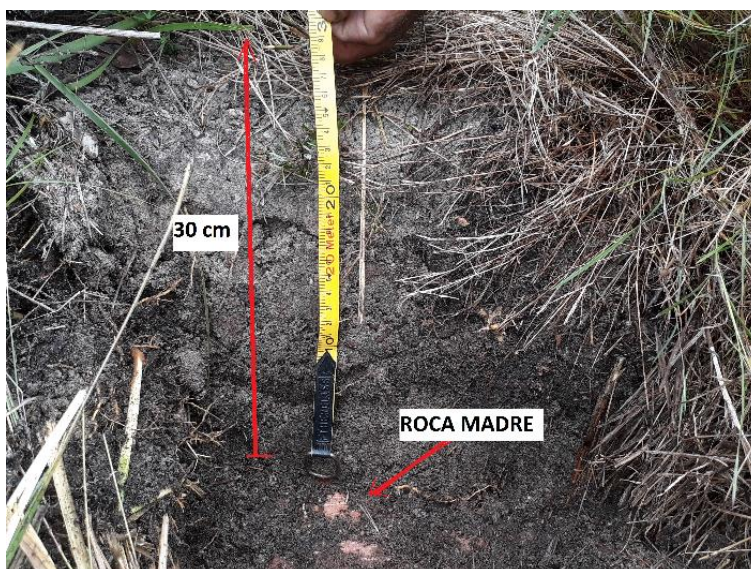
Fuente: Acosta S. (2017)

De acuerdo al mapa de texturas del suelo (Figura 31), se puede ver claramente que en la zona alta y media de la microcuenca predominan suelos de tamaño grueso clasificándose como arenas en mayor proporción y suelos arenoso franco. Sin embargo,

en la zona baja los suelos están caracterizados por ser más heterotexturales con tamaños que varían según la topografía y condiciones geológicas y geomorfológicas. El comportamiento en la distribución de las texturas de suelos en la microcuenca, refleja la edad que posee la cuenca; además, debido a la permeabilidad, se facilita el desarrollo de procesos erosivos y el aumento proporcional de escorrentía, que se refleja en el desprendimiento y transporte de materiales, que han dado lugar a las formaciones de suelo existentes en la parte baja de la microcuenca, generando suelos más profundos y de tamaños más finos, producto del arrastre de sedimentos finos desde la zona alta durante eventos de precipitación.

De acuerdo con los datos tomados en campo, de las calicatas realizadas en cada punto, se pudo observar que los suelos arenosos de la parte alta de la microcuenca corresponden a suelos con fertilidad natural muy baja, poco profundos alcanzando profundidades de 30 cm (Fotografía 20) y moderadamente drenados. Al mismo tiempo, en vista de su baja capacidad de retención de agua y a la naturaleza composicional y granulométrica se tienen coberturas vegetales pobres y es frecuente la presencia de afloramientos rocosos.

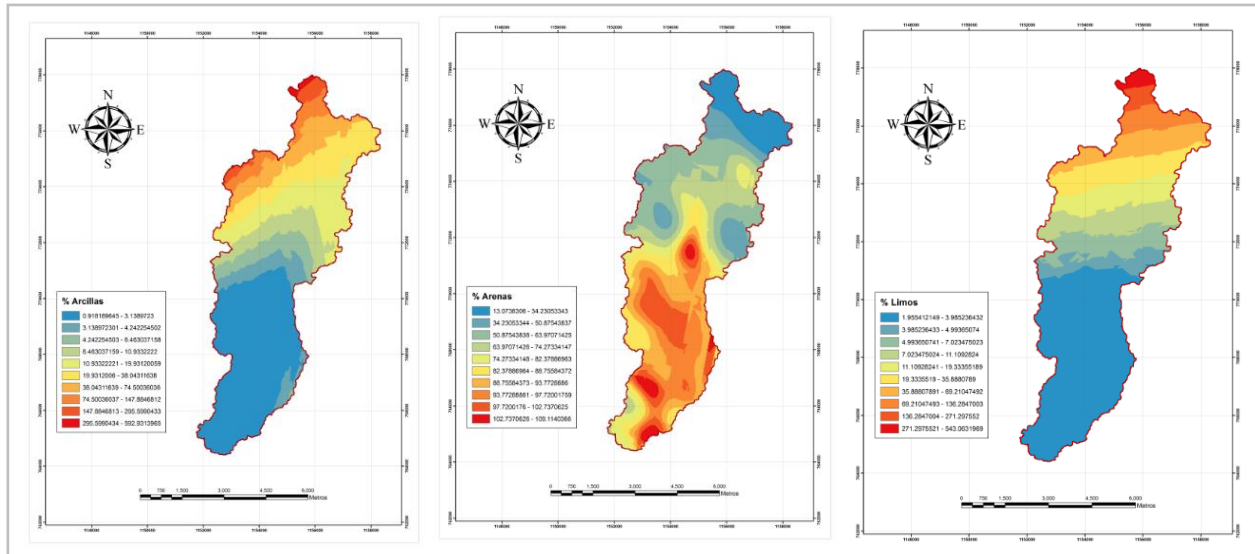
Fotografía 20. Punto de observación No. 11



Fuente: Acosta S. (2017)

Se realizó la distribución individual de los porcentajes de arcilla, arena y limo respectivamente (Figura 31) mediante el método de interpolación Kriging del software ArcGIS para los 36 puntos de muestreo en la zona de estudio. El modelo teórico de mejor ajuste fue el Logarítmico. En el anexo 6 se observan las Histogramas de ajuste y las gráficas de desviación estándar.

Figura 31. Mapas de distribución de arcillas, arenas y limos



Fuente: Acosta S. (2017)

En la figura 31 se observa de manera más explicativa que zonas se encuentran con mayor concentración en porcentajes de arenas, limos y arcillas, De acuerdo con los mapas mostrados, se pueden relacionar claramente con las texturas de suelo determinadas, las zonas de mayor contenido de arcilla se presentan en la zona baja disminuyendo gradualmente hacia la zona media; la parte alta de la microcuenca corresponde a terrenos fuertemente arenosos. Los resultados obtenidos se están directamente asociados a los sedimentos retenidos en las trampas de ladera.

De acuerdo, con la zonificación de texturas se relacionan así mismo los usos del suelo, ejemplo de ello son las zonas dedicadas a la agricultura; los suelos son pobres en nutrientes para el establecimiento de cultivos.

➤ RESULTADOS DE MODELACIÓN EN SWAT

La modelación de la producción y transporte de sedimentos para la microcuenca La María en el modelo SWAT se realizó para el periodo 01/01/2002 hasta 31/12/2015 debido a la disponibilidad de información de base climática. A partir del modelo SWAT se generó la delimitación de la microcuenca mostrando diferencias con las delimitaciones realizadas en otros estudios, estas se reflejan en la forma y el área de la cuenca, siendo la delimitación generada por el modelo más ajustada teniendo en cuenta la compleja red de drenajes (Anexo 8) y la dirección de flujo que crea el modelo basados en algoritmos y la resolución del MDT. Por otra parte, la definición de las Unidades de Respuesta Hidrológica dio lugar a 3807 áreas de tierra con igual condición de cobertura de la tierra,

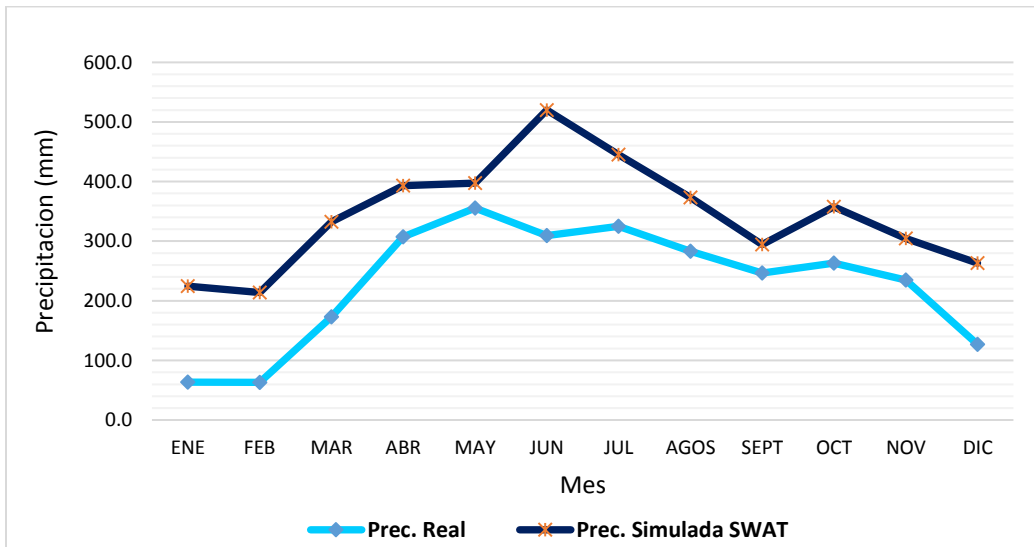
tipo de suelo y pendientes. Este proceso aumenta la exactitud del modelo para predecir la carga de sedimentos en las subcuencas y al mismo tiempo en La Quebrada La María.

De acuerdo con el reporte de análisis de HRUs se encontró que el uso del suelo más frecuente pertenece al código FRSE correspondiente a la cobertura de Bosque Denso con 31.1%, seguido por RNGE que corresponde a Arbustal Denso con el 28.54%. El tipo de suelos más abundante es la asociación RVBai con el 28.37%, este tipo de suelos se encuentra en el plano de inundación de la microcuenca contemplado dentro de los sedimentos aluviales recientes, hacen alusión a suelos con texturas finas a medias, con fertilidad media y pobremente drenados con frecuentes inundaciones. El segundo tipo de suelos es la asociación LVDc con el 19.19% localizado en el relieve de lomeríos y colinas, son suelos profundos, bien drenados con texturas gruesas y baja fertilidad desarrollándose como principal actividad económica la ganadería. Por otra parte, se encontró que el 48.26% del área tiene pendientes en el rango 0-7%, seguido por el rango 7-12% con el 35.49%.

Calibración, validación y análisis de sensibilidad

Una vez cargada la información al modelo SWAT se compilo y se obtuvieron datos simulados para la microcuenca La María arrojando resultados sobre las variables hidrológicas en la cuenca. En el grafico 19 representa la comparación entre la precipitación simulada por SWAT y la precipitación real. Estos primeros resultados mostraron datos de precipitación un poco exagerados comparados con la precipitación real, sin embargo, reflejan de manera semejante la distribución monomodal de la zona.

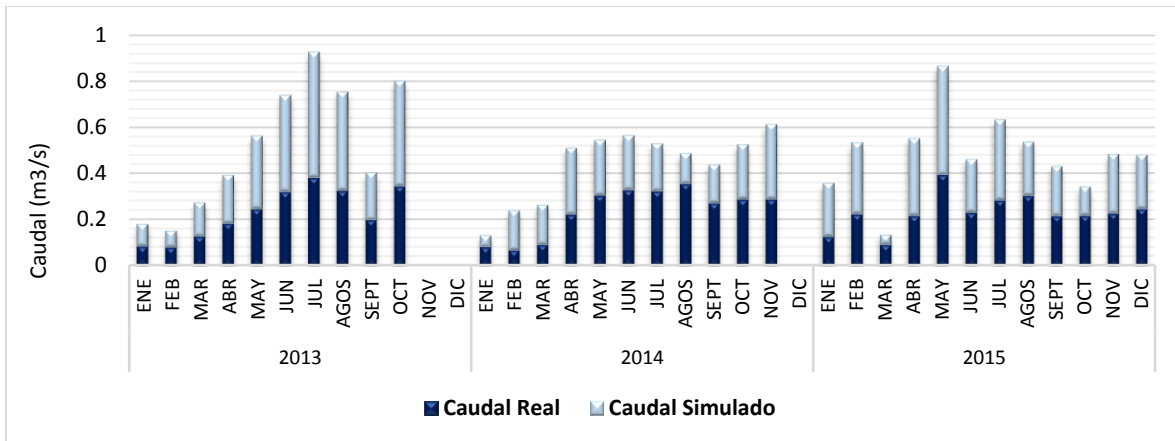
Gráfico 19. Comparación de precipitación real vs precipitación simulada



Fuente: Acosta S. 2017

De acuerdo con los datos de caudales medios mensuales de Caño Arenales para los años 2013, 2014 y 2015 otorgados por la empresa EMPOAGUAS ESP de San José del Guaviare, se realizó la comparación con los caudales medios mensuales simulados en SWAT para la subcuenca correspondiente (Grafico 20)

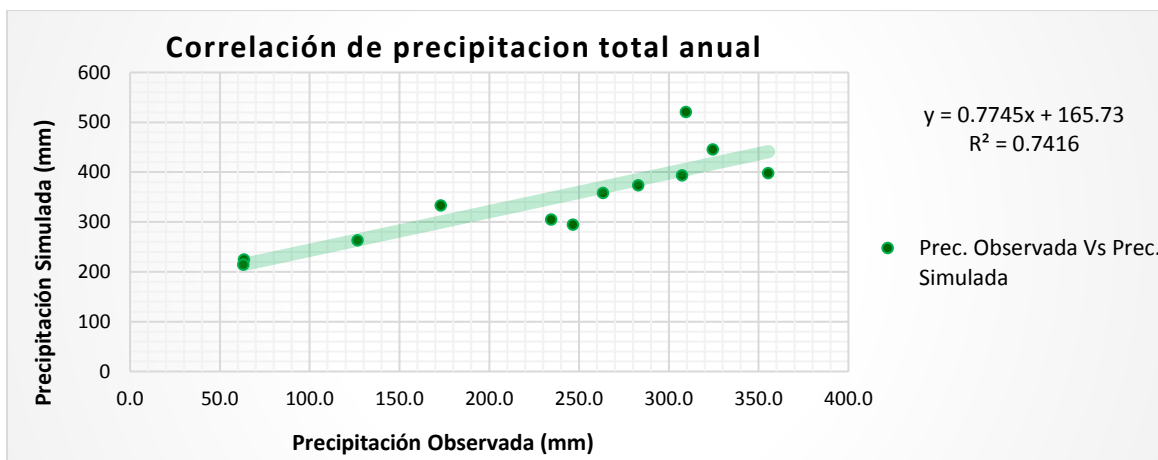
Gráfico 20. Comparación de caudales real vs caudales simulados de Caño Arenales



Fuente: Acosta S. (2017)

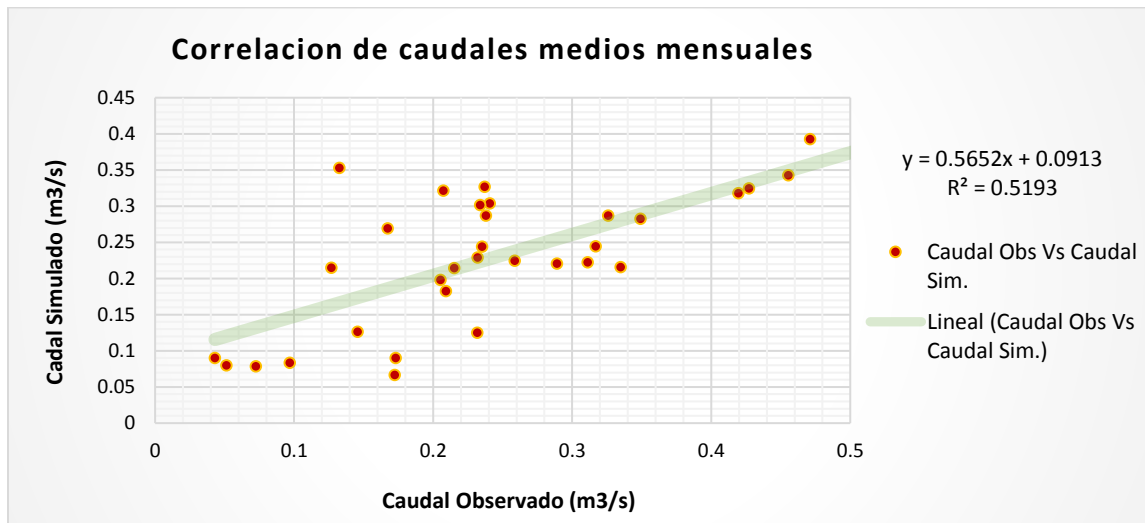
De los gráficos comparativos se concluye a manera general que existe una tendencia en la mayoría de los valores simulados con los valores observados, sin embargo, existe una subestimación de los datos simulados por parte del SWAT. Se observa que los picos estimados por el modelo tienden a representarse de manera semejante siguiendo la tendencia temporal de los datos observados. En los gráficos 21 y 22 se presenta la correlación entre los datos observados y datos simulados por el modelo.

Gráfico 21. Regresión lineal de la precipitación total anual de la estación San José y la precipitación total anual simulada en SWAT- serie 2002-2015



Fuente: Acosta S. (2017)

Gráfico 22. Regresión lineal de caudales mensuales observados para la subcuenca de Caño Arenales y caudales mensuales simulados en SWAT- serie 2013-2015



Fuente: Acosta S. (2017)

De acuerdo con los gráficos 21 y 22, el coeficiente de determinación (R^2) para la variable precipitación obtuvo un valor de 0.74, lo que representa una correlación moderada positiva. Sin embargo el coeficiente de determinación para la variable de caudal presenta un valor de 0.51, es decir una correlación débil positiva que demuestra que la ejecución del modelo no fue satisfactoria para el periodo modelado. Este resultado puede estar siendo afectado por factores como que la serie de datos es muy deficiente, la frecuente existencia de datos faltantes, errores en la toma de los datos y probablemente a que las lluvias en las estaciones pluviométricas no sean representativas para la microcuenca, por lo tanto se debe realizar la calibración del modelo para obtener datos reales de sedimentación.

En el periodo de calibración se realizaron múltiples iteraciones con SWAT-CUP cada una con 20 simulaciones, modificando 14 parámetros que influyen en el ciclo hidrológico y el enrutamiento de los sedimentos (Tabla 11) hasta tener un valor aceptable del coeficiente de determinación (R^2). La variable observada que se eligió fue caudales medios mensuales serie 2013-2014 para compararlos con los caudales mensuales simulados. Los parámetros fueron seleccionados inicialmente de acuerdo a estudios relacionados a estos temas. En la tabla 11 se describen los parámetros utilizados con sus valores por defecto y los valores modificados para la mejor simulación. Las estadísticas de la evaluación del desempeño del modelo para la fase de calibración y validación se dan en la tabla 12. Cabe señalar que en el periodo de calibración hubo algunos registros ausentes, en el año 2013 con los meses de noviembre y diciembre y el año 2014 con el mes de diciembre.

Tabla 11. Parámetros usados en la calibración de modelo

Aut-Calibración resultado					
Parámetro	File Ext.	inferior	superior	Método	Valor de ajuste
CN2	.mgt	-0.2	0.2	Relative	0.190
ALPHA_BF	.gw	0	1	Relative	0.875
GW_DELAY	.gw	30	450	Relative	208.500
USLE_P	.gw	0	2	Relative	0.170
CANMX	.mgt	0	1	Relative	22.500
CH_K2	.hru	0	100	Relative	87.540
CH_N2	.rte	0.01	500	Relative	0.147
ESCO	.rte	0.01	0.3	Relative	0.235
SOL_AWC	.bsn	0	1	Relative	0.970
SOL_K	.sol	0	1	Relative	0.500
SURLAG	.bsn	0.05	24	Relative	15.010
EPCO	.bsn	0	1	Relative	0.175
FFCB	.bsn	0	1	Relative	0.725
GWQMN	.gw	0	2	Relative	1.150

Fuente: Acosta S. (2017)

Donde CN2 - Número de curva inicial para la condición de humedad II, ALPHA_BF - Constante de recesión del caudal base, GW_DELAY - Retraso del flujo subterráneo, USLE_P - Factor referente a las practicas (P) en la ecuación USLE, CANMX - Almacenamiento máximo del dosel (mm), CH_K2 - Conductividad hidráulica efectiva en el cauce principal (mm/h), CH_N2 - coeficiente de rugosidad n de Manning para el canal, ESCO - factor de compensación por evaporación en el suelo, SOL_AWC - capacidad de cada capa de suelo para almacenar agua, SOL_K - conductividad hidráulica saturada (mm/hr), SURLAG - Coeficiente de retraso de la escorrentía superficial, EPCO - Factor de compensación de consumo de la planta, GWQMN - profundidad umbral del acuífero superficial requerida para que el flujo de retorno ocurra.

De acuerdo con los resultados obtenidos (tabla 12) para la mejor simulación durante el periodo de calibración y verificación de los caudales mensuales fueron satisfactorios, comparados según las estadísticas recomendadas para los índices de rendimiento a escala mensual expuestos por Moriasi et al (2007). En el grafico 23 se representan la curva de caudales simulados y caudales observados durante el periodo de calibración y validación, evidenciando que aún ocurre una sobreestimación del caudal simulado en las fases de calibración y validación.

Las causas de esta diferencia se atribuyen al método de aforo en la fuente Caño Arenales. El método de aforo usado en la fuente de abastecimiento al acueducto municipal es poco efectivo para medir caudales con precisión (método del flotador); los aforos son

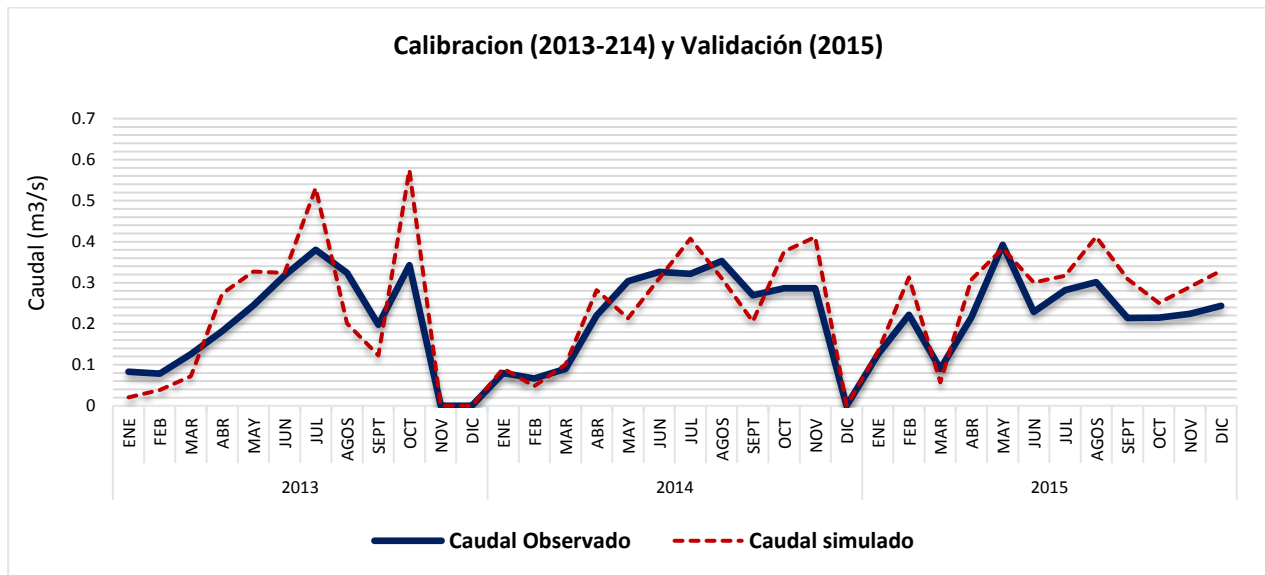
realizados una vez en el día y generalmente son tomados cuando las condiciones climáticas son favorables, es decir, preferentemente en los días sin precipitación. Por esta razón, se producen diferencias entre los valores simulados y los observados debido a que no toman en cuenta el aumento de precipitación en días lluviosos y especialmente los picos experimentados en el caudal. Sin embargo, el $NSE = 0,67$ y $R^2 = 0,79$ obtenidos en la fase de validación indican que el rendimiento general del modelo fue bueno en la simulación de caudal.

Tabla 12. Estadísticos a nivel mensual entre caudales medidos y caudales simulados

Parámetro	Calibración (2013-2014)	Validación (2015)
R² Nash	0.70	0.79
NSE	0.53	0.67

Fuente: Acosta S. (2017)

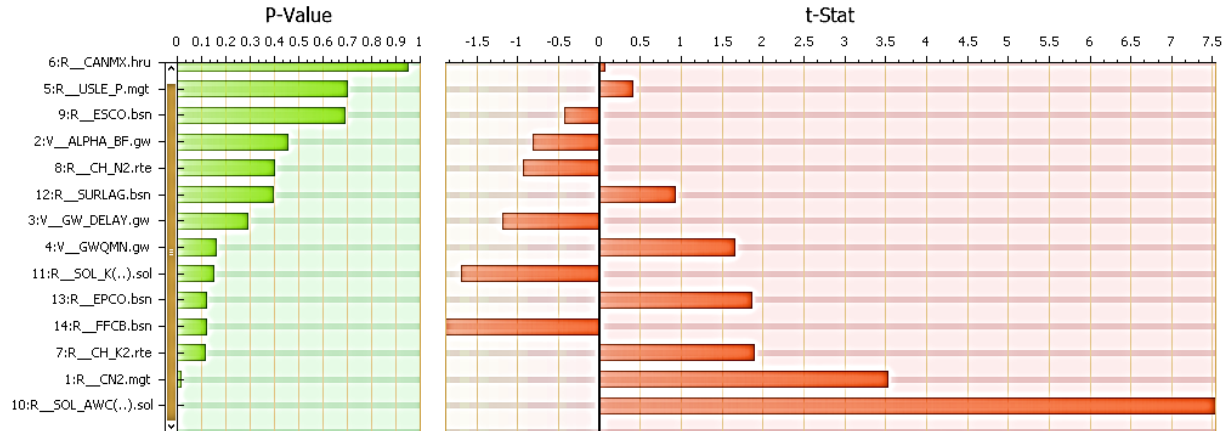
Gráfico 23. Caudales medios mensuales-fase de calibración y validación



Fuente: Acosta S. (2017)

Por otra parte, el uso del modelo SUFI-2 incorporado en el software SWAT-CUP, realizó un análisis de regresión múltiple para obtener las estadísticas de la sensibilidad en los parámetros involucrados en la producción de caudal y por consiguiente a la generación de sedimentos en la Quebrada La María, mediante los coeficientes P-Valor y t-Stat. El resultado de este análisis se representa en la figura 32.

Figura 32. Significancia de parámetros en SWAT-CUP



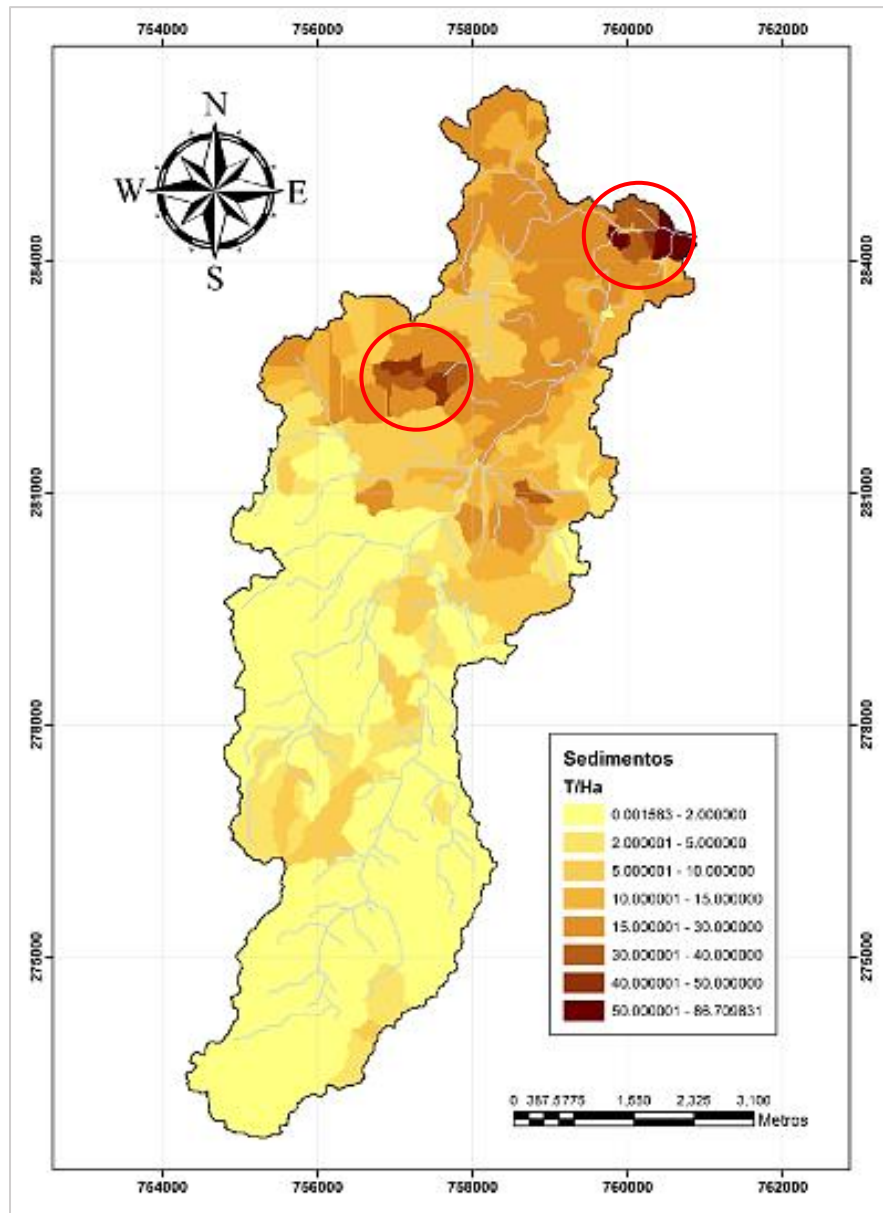
Fuente: Acosta S. (2017)

Según la prueba t-Stat y P-Value, el software proporcionó una medida y el significado de la sensibilidad, respectivamente. De acuerdo con el análisis global de sensibilidad obtenido por el SWAT-CUP, en la figura 32 se presenta la distribución de los parámetros de mayor a menor significancia, determinando que los parámetros con un alto grado de sensibilidad corresponden a: CANMX (Almacenamiento máximo del dosel), USLE_P (Factor referente a las practicas (P) en la ecuación USLE) y ESCO (factor de compensación por evaporación en el suelo), seguidos por los factores ALPHA_BF (Constante de recesión del caudal base), CN (Número de curva inicial para la condición de humedad II) y SURLAG (Coeficiente de retraso de la escorrentía superficial).

- Sedimentación En La Microcuenca La María

A partir de la simulación a escala mensual se obtuvieron datos de sedimentación para el periodo 2002 – 2015. En la Figura 33 se visualizan los resultados de carga de sedimentos por subcuenca para el año 2015 en Toneladas/Hectárea.

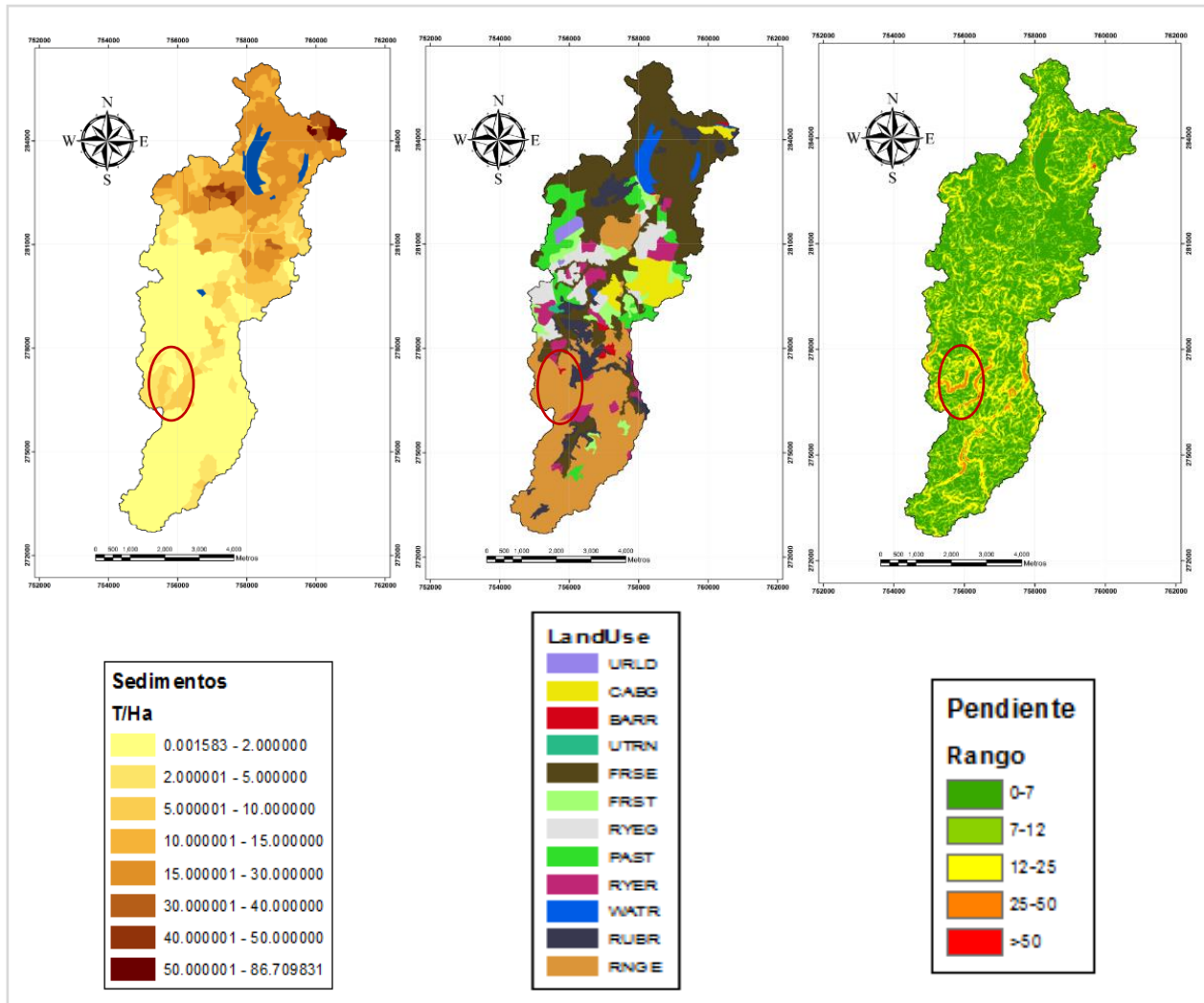
Figura 33. Mapa de sedimentación en la microcuenca La María (2015)



Fuente: Acosta S. (2017)

Se puede deducir a manera general que la microcuenca ha pasado por fuertes procesos erosivos, presentándose fenómenos de sedimentación en la parte baja de la microcuenca. Según los resultados arrojados por el modelo, se identifican unas zonas con mayor acumulación de sedimentos, indicadas en la Figura 33. Una zona coincide con la entrada de la Laguna María Grande alcanzando valores de hasta 50 Toneladas de sedimentos por año. La otra zona de mayor recarga de sedimentos se evidencia a la salida de la microcuenca, desembocando al Río Guaviare, en donde se presentan valores de 50-80 Ton/Ha-año.

Figura 34. Sedimentos, coberturas y pendientes



Fuente: Acosta S. (2017)

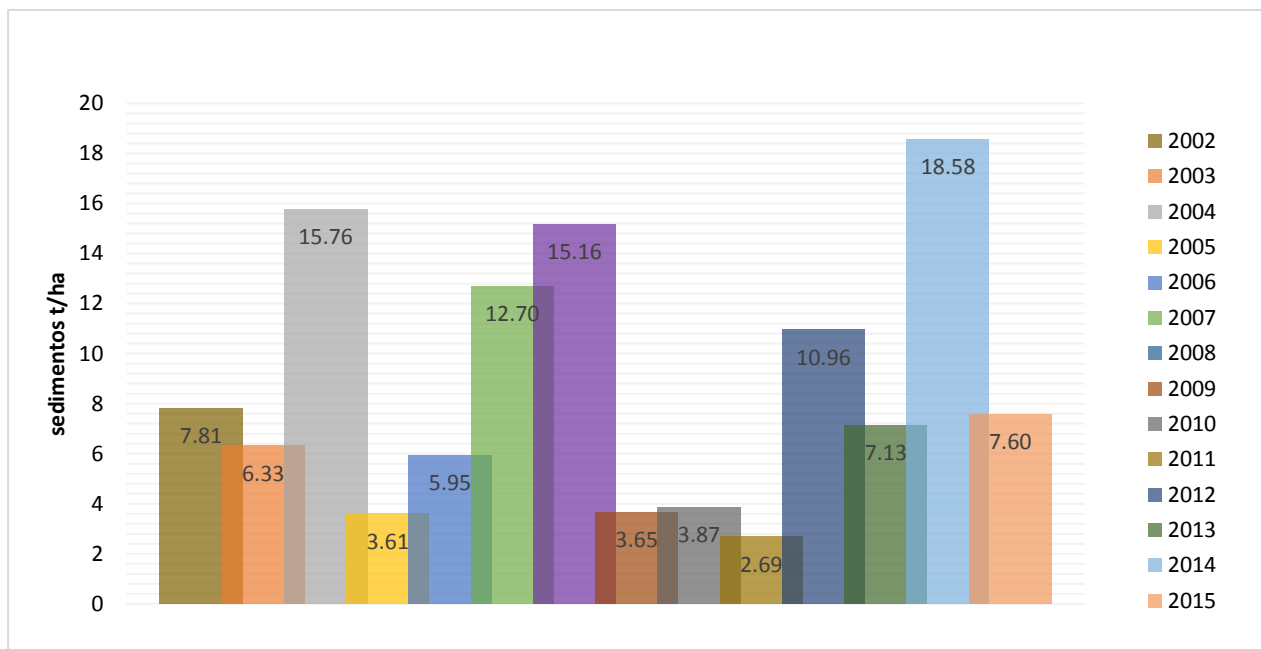
Según la figura 34 se puede establecer una relación entre la producción de sedimentos y los factores pendiente, cobertura vegetal y uso del suelo. La zona indicada en la figura muestra un grado de sedimentación entre 5 a 10 Toneladas por Hectárea donde también se presentan fuertes pendientes (25-50%) y su cobertura corresponde a áreas con vegetación herbácea. La zona indicada, la cual corresponde a la subcuenca de Caño Arenales, representa un aporte de sedimentos al cauce principal (Quebrada La María) afectando de manera permanente la capacidad de transporte de agua. En la parte baja de la microcuenca se da la sedimentación del material erodado por procesos de escorrentía; allí se da lugar a pendientes relativamente bajas formándose una zona de recarga o colmatación.

Las prácticas agropecuarias en la zona media-alta de la microcuenca estarían directamente relacionadas con la facilitación del transporte de sedimentos hasta la zona

de desagüe, aportando gran cantidad de sedimentos al Rio Guaviare. Por otra parte se infiere que las partículas más finas atraviesan las lagunas mediante la densidad del flujo formando una turbidez para luego depositarse, corroborando lo dicho por García Sánchez, (2000) en Londoño G., *et al*, (2013), sin embargo se requiere un estudio más detallado para comprobar dicha hipótesis.

En el gráfico 24 se ilustra la producción anual de sedimentos en la microcuenca La María para el periodo 2002-2015, en donde se destaca el año 2004 y 2014 con promedios de 15.76 y 18.58 Toneladas de sedimentos por Hectárea. Las tasas de sedimentación correspondientes a estos años predichos por el SWAT revelan elevadas cifras sobre la erosión que se está desarrollando en esta importante microcuenca.

Gráfico 24. Promedio de la sedimentación anual 2002-2015

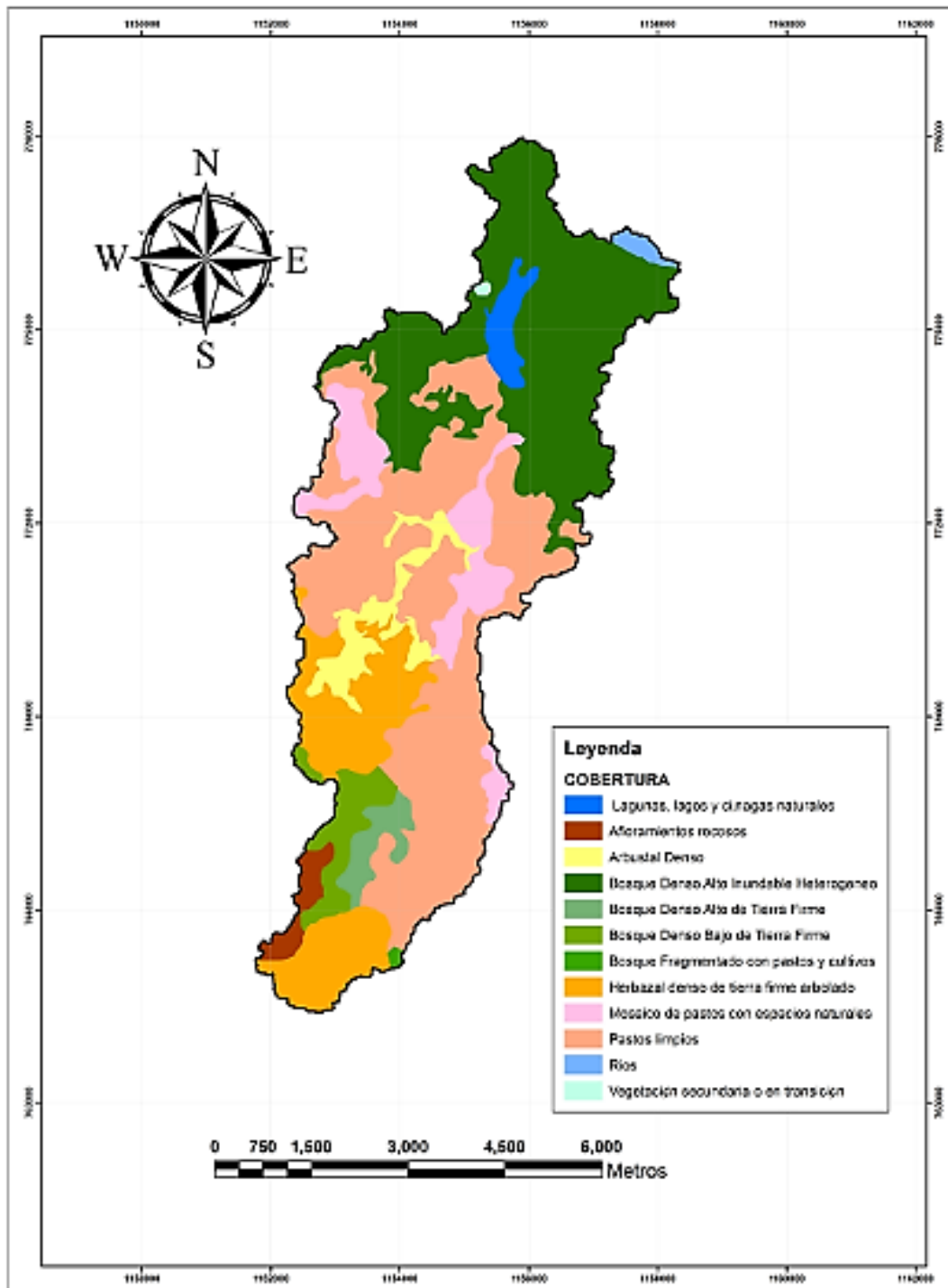


Fuente: Acosta S. (2017)

- **Sedimentación Para Escenario Propuesto Para La Microcuenca La María**

Para conocer los impactos de las coberturas y usos del suelo sobre la producción se sedimentos se optó por realizar la simulación en el SWAT con el mapa de coberturas del año 2002 obtenido del SINCHI (Figura 35).

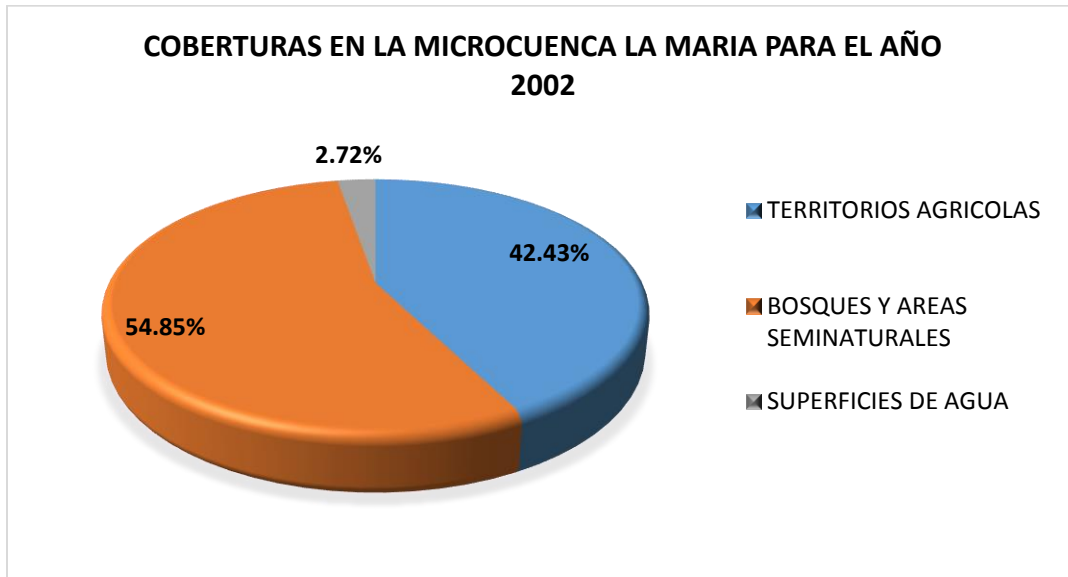
Figura 35. Mapa de coberturas del 2002



Fuente: SINCHI (2002); editado por Acosta S. (2017)

Detallando el mapa (Figura 35) se puede ver claramente que en la zona de estudio predominan áreas cubiertas por pastos limpios. En el Grafico 25 representa los grupos de las coberturas en porcentaje, se observa que los grupos de mayor superficie corresponden a “Bosques y áreas Seminaturales” y “Territorios Agrícolas” con el 54.85% y 42.43%, respectivamente. Mostrando que la cobertura de “Territorios Agrícolas” ejerce gran presión sobre el área de la microcuenca.

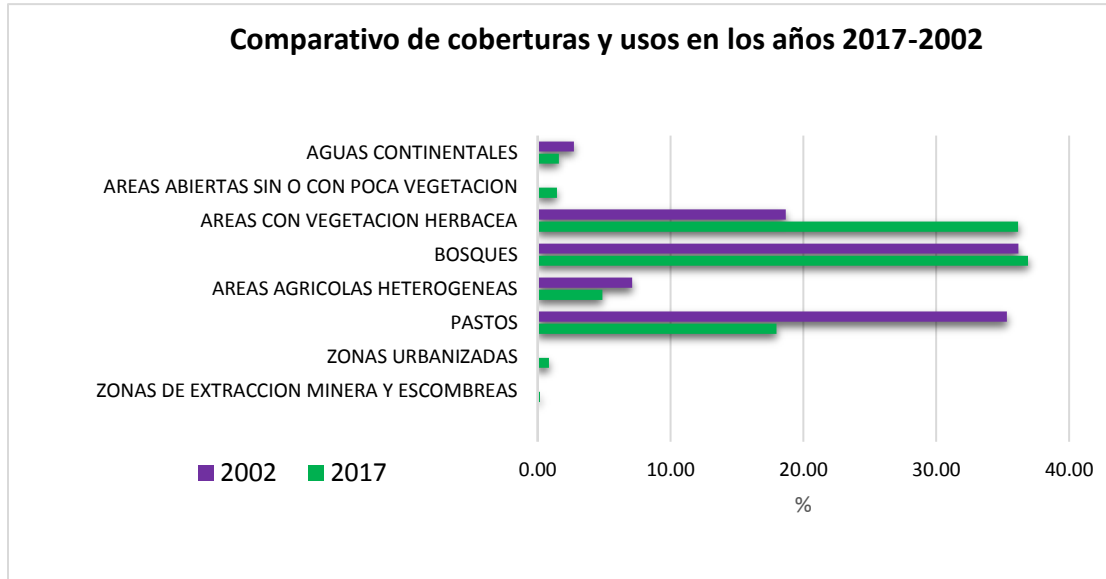
Gráfico 25. Coberturas en la microcuenca La María –año 2002



Fuente: Acosta S. (2017)

Con respecto al análisis comparativo del grafico 26 y los mapas de coberturas del año 2017 y 2002, se concluye que 1) La microcuenca ha sido alterada en relación a la cobertura de “Aguas continentales” debido a la aparición de la Laguna Chiquita y el Embalse La María para el año 2017, además la urbanización y zonas de extracción minera que se dan en el año 2017. 2) La cobertura de “Bosques” se ha mantenido con respecto a las cifras en porcentaje, sin embargo se ha visto una transición espacial en la distribución de esta cobertura, disminuyendo en la zona baja de la microcuenca y aumentando en las rondas hídricas de la Quebrada La María y sus principales afluentes. 3) En el año 2002 se presenta un alto porcentaje en la cobertura de pastos, factor que favorece el escurrimiento y por tanto la erosión del suelo.

Gráfico 26. Comparativo de coberturas 2017 y 2002



Fuente: Acosta S. (2017)

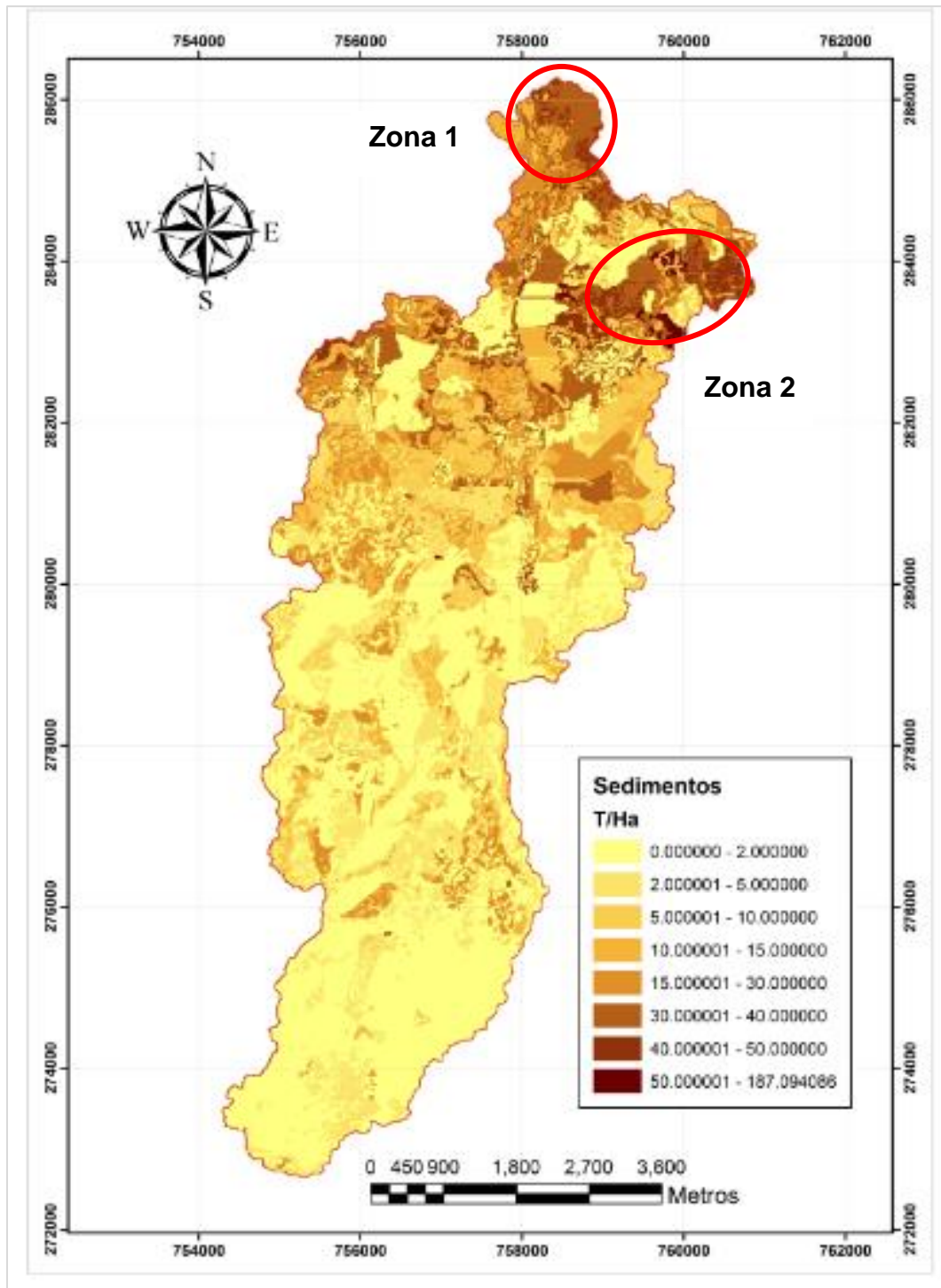
En la tabla 13 se describen los usos y coberturas para el año 2002 adaptados a la nomenclatura Corine Land Cover CLC con los respectivos códigos del SWAT para ser ingresados al modelo. A partir del escenario propuesto se obtuvieron datos de carga de sedimentos para la microcuenca (Figura 36)

Tabla 13. Usos del suelo y coberturas de la microcuenca La María-Año 2002

GRUPO	USO	TIPO DE COBERTURA CORINE LAND COVER CLC	COD. SWAT	AREA	%Área
TERRITORIOS AGRÍCOLAS	PASTOS	Pastos limpios	PAST	14.1372	35.318
	ÁREAS AGRÍCOLAS HETEROGÉNEAS	Mosaico de pastos con espacios naturales	CABG	2.8451	7.108
BOSQUES Y AREAS SEMINATURALES	BOSQUES	Bosque Denso Alto Inundable Heterogéneo	FRSE	14.4203	36.026
		Bosque Fragmentado	FRST	0.0618	0.154
	ÁREAS CON VEGETACIÓN HERBACEA	Arbustal denso	RNGE	2.3007	5.748
		Herbazal denso	RNGE	5.1165	12.782
		Vegetación secundaria o en transición	RUBR	0.0571	0.143
SUPERFICIES DE AGUA	AGUAS CONTINENTALES	Lagunas, lagos y ciénagas	WATR	0.8050	2.011
		Ríos	WATR	0.2840	0.710

Fuente: Acosta S. (2017)

Figura 36. Mapa de sedimentación en la microcuenca La María (2002)



Fuente: Acosta S. (2017)

De acuerdo con la Figura 36 se puede observar los efectos del cambio de escenario en la producción de sedimentos, se puede apreciar altas tasas de sedimentos en los valores

representados que llegan hasta las 187 Toneladas por Hectárea. El aumento de la sedimentación es atribuible a los procesos de escurrimiento favorecidos por las coberturas pobres (Pastos). En la parte alta se observa que existen depósitos de sedimentos que con el tiempo fueron transportados mediante la acción del agua. Por otro lado, las zonas indicadas en la figura representan los sitios de mayor acumulación de sedimentos; la zona 1 se ubica en los límites con el río Guaviare, es decir la microcuenca La María representa un foco de contaminación de sedimentos para esta importante fuente hídrica de la región Orinoquia y Amazonía. La zona 2 tiene repercusión en lo que hoy se conoce como Laguna Chiquita y en la salida de la quebrada La María.

CONCLUSIONES

- A partir de la caracterización morfométrica se determina que la microcuenca la María corresponde a una cuenca sedimentaria que se encuentra en la fase de vejez, en donde predominan procesos de erosión hídrica, simbolizados en los procesos de erosión en macizos rocosos en la parte alta, y en meandros abandonados por los cambios en la dirección y posición de Rio Guaviare.
- La geología y geomorfología de la zona de estudio está directamente relacionada con los procesos erosivos que se dan en la microcuenca. De acuerdo con la revisión en campo, la microcuenca La María se encuentra geológicamente estructurada por rocas sedimentarias del cuaternario como: La Formación Araracuara, Areniscas arcillosas, Limolitas y conglomerados, además, los sedimentos aluviales que se pueden apreciar en su llanura de inundación, cerca de las márgenes del rio Guaviare; normalmente compuestos por arenas y gravas asociados a la meteorización y transporte de sedimentos generados en la parte alta de la serranía La Lindosa.
- La cobertura vegetal actual (año 2017), indica que las coberturas predominantes en la zona corresponden a “Bosques y zonas Seminaturales” con 74.52% equivalente a 29.81 Km², seguida por “Territorios agrícolas” con 22.84% que corresponde a 9.13 Km².
- La microcuenca La María posee una cobertura vegetal variada y perturbada, la cual se ve influenciada por la gran intervención humana que existe en la zona, lo que ha producido la aparición de sucesiones secundarias como pastos, mosaicos de pastos y cultivos, zonas urbanizadas y zonas de extracción minera.
- Del mapa de uso de suelo y cobertura vegetal de la microcuenca La María, se puede ver cómo se distribuye la vegetación y los diferentes usos del suelo en relación a las propiedades del suelo. Llevando consigo la expansión de los territorios agropecuarios. Esto permite identificar sitios claves para diferentes usos y conservación, resultando de gran importancia en la gestión y manejo de microcuencas.
- Las actividades agropecuarias que se dan en la zona, han provocado cambios en las coberturas de las rondas hídricas de La Quebrada la María, acelerando los fenómenos de erosión natural, que se refleja en el aporte de sedimentos por torrentes de aguas lluvias. Según la granulometría de los sedimentos en las

trampas Bunte y trampas en ladera, los sedimentos transportados por la corriente son de carácter grueso correspondiendo a arenas medias y finas.

- Las áreas protegidas han sido intervenidas por las actividades agropecuarias que se dan en la zona, con la introducción de pastos para la ganadería favoreciendo los procesos erosivos en la cuenca y al mismo tiempo afectando la variabilidad de los caudales en tiempos secos.
- El análisis y mapeo de suelos, realizado mediante técnicas de geo estadística permitieron obtener el mapa de isolineas de la distribución de cada variable.
- En relación a las clases texturales encontradas y los parámetros morfométricos, se determina que la microcuenca La María presenta bastantes procesos erosivos en la zona alta, más exactamente la región que cubre La vereda La Pizarra. A pesar de ser zona de preservación de La Serranía de La Lindosa, se evidencia que posee suelos bastante erodados debido al frecuente tránsito de escorrentías en las temporadas de alta pluviosidad. Según la granulometría de las trampas establecidas en ladera, los sedimentos arrastrados en su mayoría corresponden a arenas finas mal gradadas, generando suelos pobres e infértiles.
- Los suelos en la zona baja de la microcuenca son de carácter heterotextural, producto del arrastre y depositación de materiales u sedimentos provenientes de la de la formación Araracuara, además, influenciados por las características de bosque húmedo subtropical.
- Las curvas IDF muestran que entre mayor duración tengan las precipitaciones se tendrá una menor intensidad. Las intensidades máximas varían desde 39.57 mm/min hasta 396.34 mm/min.
- Los resultados obtenidos a partir de la calibración y validación del modelo permiten reducir la incertidumbre en los resultados de sedimentación sobre la microcuenca, permitiendo al SWAT ser de gran ayuda en el manejo integral de cuencas hidrográficas.
- El análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo SWAT mostraron que los las variables más significativas dentro del proceso de la modelación de la microcuenca se atribuyen a las actividades antrópicas y a los procesos de escorrentía, caudal base y evaporación del suelo. Entre las actividades antrópicas más influyentes en la producción de sedimentos se destaca la introducción de pastos para actividades agropecuarias.

- Las zonas de mayor recarga de sedimentos corresponde a las pendientes más bajas de la microcuenca o llanura aluvial, afectando el curso del agua en La Quebrada La María y los cuerpos de agua superficiales en esta parte, del mismo modo, la microcuenca posee un moderado potencial erosivo siendo un foco de contaminación de sedimentos para el Rio Guaviare.
- El modelo predijo varias áreas de la cuenca hidrográfica para ser contribuyentes de sedimentos relativamente grandes, sin embargo, se debe trabajar más para corroborar los procesos que rigen la dinámica de erosión.
- Los resultados de carga de sedimentos obtenidos por el modelo SWAT dependen exclusivamente de los mecanismos de erosión y transporte dominantes para la microcuenca La María debido a que el modelo no lo expresa.
- Los valores de producción de sedimentos predichos por el SWAT aumentan en relación a la pendiente y la dinámica de la escorrentía en relación a las coberturas y usos del suelo.
- El resultado de la simulación para el escenario de coberturas del año 2002, evidenció la disminución que han tenido las tasas de sedimentación en la microcuenca asociados a la tendencia de madurez que posee la misma. A su vez, relacionada con las coberturas existentes para el año 2002 favoreciendo los procesos de escurrimiento y por ende la sedimentación.
- Se establece que para el año 2002 hubo mayor acumulación de sedimentos en la microcuenca La María, que al paso del tiempo y con ayuda de los fenómenos de erosión se han ido lavando o transportando.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a la Gobernación, Alcaldía y CDA realizar la gestión para instalar estaciones hidrométricas en la microcuenca La María que permitan tener registros diarios de caudal y nivel en sus principales afluentes; más aún en las zonas donde se ve afectada la disponibilidad de agua por la sedimentación. Además, la medición de carga de sedimentos en varias zonas del cauce principal de la Quebrada La María.
- A la CDA, promover acciones encaminadas hacia la protección del recurso hídrico de la microcuenca La María. Así como también, la recuperación de predios en áreas de preservación de la Serranía De La Lindosa que permitan garantizar la protección de los recursos naturales.
- Se recomienda evaluar el rendimiento del modelo para estudios futuros en otros puntos de la cuenca para la variable de flujo y sobre todo para la variable de carga de sedimentos, además, teniendo en cuenta una serie histórica de datos de flujo más extensa para mejorar los resultados obtenidos en la fase de calibración.
- Utilizar el modelo SWAT para evaluar los efectos del cambio climático sobre el flujo y dinámica de los sedimentos en la microcuenca La María.

BIBLIOGRAFÍA

Abbaspour, KC; Johnson, CS; Van Genuchten, MT. 2004. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zone Journal* 3: 1340-1352

Álvarez, S. C. (2015). Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en Antioquia. Universidad Nacional de Colombia.

Aparicio Mijares, F. (1992). *Fundamentos de hidrología de Superficie*. Primera Edición. D.F.: Editorial Limusa, S.A. de C.V.

Barbudo Cadena, L., Ochoa Daza, J. M., & Verbel Acosta, E. (2016). Aplicación del modelo swat en el estudio hidrosedimentológico de la cuenca quebrada san pedro en el municipio de curumaní, departamento del Cesar. Universidad de Manizales.

Borrero, A., & Carmona Jiménez, J. (2015). Evaluación hidrológica de una corriente periurbana y su impacto en el potencial de servicios de los ecosistemas. *ELSEVIER*.

Bunte, K.; Swingle, K.; ABT, S. (2007). Guidelines for Using Bedload Traps in CoarseBedded Mountain Streams: Construction, Installation, Operation, and Sample Processing. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-191. Fort Collins, Colorado: U.S.A. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 91 p

Campos, A. (1992). *Proceso del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 1ª ed. San Luis Potosí, México. 22-23 p.

Campero Sánchez, J. G. (2016). Estudio de riesgo: vulnerabilidad a deslizamientos sísmicos e inundaciones en Tingo María, Perú. Recuperado el 10 de octubre de 2017, de <http://www.monografias.com/trabajos108/estudio-riesgo-deslizamientos-sismos-inundaciones-tingo-maria-peru/estudio-riesgo-deslizamientos-sismos-inundaciones-tingo-maria-peru2.shtml>

Cardona, B. L. (2012). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*.

C.D.A. (2012). *Plan de manejo ambiental de la microcuenca hidrográfica La María*. Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico.

C.D.A. (2013). *Proyecto: Delimitación y formulación del plan de manejo ambiental de las zonas de reserva forestal protectora del departamento del Guaviare*. Corporación Para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico.

Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. (M. E. Suarez, Ed.) Bogotá, Colombia: Nomos S.A.

Clemente., G. E. (2011). Influencia de los suelos en los bosques tropicales. Bosque natural.org. Recuperado el 13 de septiembre de 2017, de <http://amazoniaforestal.blogspot.com.co/2011/09/influencia-de-los-suelos-en-los-bosques.html>

Córdova López, L. F., & Torres Hugues, R. (2011). Modelo matemático para la determinación del transporte longitudinal para playas del Caribe. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Cuello Espinosa, M. (2003). Estimación de la producción y transporte de sedimentos en la cuenca alta del río yaque del norte y del río guanajuma, república dominicana. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

Elsenbeer, H. (2001). Hidrológica trayectorias de flujo en paisajes-suelos de bosques tropicales - una revisión. Procesos hidrológicos.

E., J., & M., M. (2009). Zonas de vida. Eco-Hispaniola. Recuperado el 3 de septiembre de 2017, de <http://www.jmarcano.com/ecohis/zonas/humedos.html#bmhs>

EL TIEMPO, (2017). Casi un tercio de la tierra en Colombia está mal utilizada.

Escolares.net. (2014). Bosque húmedo subtropical. Recuperado el 28 de septiembre de 2017, de <http://www.escolares.net/biologia/bosque-humedo-subtropical/>

Farfán, Fabio, Urbina, L., Ferreira, S., & Brandan, M. (2010). Caracterización y Red de Drenaje de la Subcuenca del Río Tin-Tin, PN. Los Cardones, Salta. Universidad Nacional de Salta, volumen 5.

Francés, A., & Bussi, G. (2014). Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido. Revista ELSEVIER.

Fuentes Junco, J. A. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional Pico de tancitaro. Instituto Nacional de Ecología.

FAO. (2017). Portal de Suelos de la FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>

García-Chevesich, P. (2008). Procesos y control de la erosión. Outskirts Press. Denver, 276.

García, J. C., & Galindez, L. F. (2011). Caracterización ecológica de la microcuenca abastecedora de agua del acueducto municipal de San José del Guaviare. Revista EIDENAR. Recuperado el 21 de noviembre de 2017, de <http://revistaeidenar.univalle.edu.co/revista/ejemplares/10/d.htm>

Guaviare, G. d. (2001). P.B.O.T San José del Guaviare. Recuperado el 27 de agosto de 2017, de <http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/pbot%20-%20san%20jose%20del%20guaviare%20-%20analisis%20territorial.pdf>

Hermelin M. & Restrepo J., (2006). Factores que controlan la producción de sedimentos en una de las principales de América del Sur cuenca: el río Magdalena, Colombia. ELSEVIER. Universidad EAFIT de Medellín. Colombia.

Ibáñez, J. J. (2008). Erosión, Transporte y Sedimentación: Erosión Geológica. Madrimasd. Obtenido de <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/08/15/98822>

IDEAM, IGAC, & CORMAGDALENA. (2008). Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena (ISBN: 978-958-8323-19-0).

INGEOMINAS. (2011). Geología y geoquímica de la plancha 350 san José del Guaviare. Servicio geológico colombiano. Obtenido de http://aplicaciones1.sgc.gov.co/Bodega/i_vector/230/08/0100/24451/documento/pdf/2105244511101000.pdf

León, J. M. (2009). Producción de sedimentos en cuencas: Revisión de criterios y aplicabilidad a la cuenca del río Apulco. Universidad Autónoma de México.

López Urrutia, L. V. (2016). Estudio hidrológico de Caño Arenales afluente de la microcuenca la maría de san José del Guaviare. Universidad de Pamplona.

López, J. L. (2015). Alternativas de manejo sustentable de la subcuenca del río pitura, provincia de Imbabura, Ecuador. Universidad Nacional de La Plata.

Londoño González, F., & Zapata Henao, S. (2013). Variabilidad espacial de los sedimentos en la cuenca del embalse la Fe. Escuela de Ingeniería de Antioquia.

López Cadenas de Llano F. (1998). Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y Control de la Erosión. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Editorial Mundi Prensa. España: 945 p

Melo y Camacho, (2005), en Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca, Metodología Corine Land Cover Adaptada para Colombia, escala 1:100.000, IDEAM, IGAC, CORMAGDALENA

Maza Chamba, C. V. (2009). Clasificación y análisis de la cobertura vegetal sobre la subcuenca Zamora huayco - cantón Loja. Universidad Católica de Loja.

Mínguez Menéndez, A., García Meléndez, E., Martín Alfageme, S., Martín Serrano, A., & Rodríguez García, A. (2014). Técnicas SIG aplicadas al estudio del relieve de los Montes de León (NO de la Península Ibérica). Universidad de León.

Nájera, J. Z. (2015). Estimación de la producción y transporte de sedimentos en cuencas urbanas pequeñas a escala de evento mediante un modelo de base física basado en SIG. Universidad Politécnica de Catalunya.

Niño, Y. (2004). Hidráulica fluvial y transporte de sedimentos. *ci61f transporte hidráulico de sólidos*.

Neitsch, S., Arnold, J., Kiniri, J., Srinivasan, R., & Williams, J. (2004). Soil And Water Assessment Tool. Versión 5.

OMM. (2011). Guía de Prácticas Hidrológicas. (S. Edición, Ed.) Organización Mundial de Meteorología, Volumen I.

Oestreicher, J. (2008). Aplicación de la Herramienta de Evaluación de agua en el suelo en una cuenca tropical Agrícola de la Cuenca del Canal de Panamá: Implicaciones para su uso en actividades de manejo de cuencas. Universidad McGill.

Ortiz Mendoza, M. A. (2005). Determinación de los coeficientes de permeabilidad para un flujo de pozo en un simulador hidrológico. Instituto Politécnico Nacional.

Pérez González, M. (2012). Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Mundo.

Ramírez Cuenca, M. A., & Rodríguez Acosta, D. (2015). Simulación y modelación de la producción de sedimentos en dos escenarios dominantes de ocupación de suelo en la cuenca hidrográfica del río Coello. *Revista Nova*.

Rodríguez Vagaría, A. M. (2010). Efecto de la restauración agro-hidrológica sobre el escurrimiento superficial en la Sierra de Pillahuinco.

Rojas R., 2009. Hidrología aplicada al manejo de cuencas. Universidad de los Andes. Edición provisional sujeta a revisión

SINCHI. (2008). Flora de las formaciones rocosas de La Lindosa. (D. Cárdena López, N. Castaño Arboleda, & M. Jaramillo Echeverry, Edits.) Instituto Amazónico de investigaciones Científicas-SINCHI. Recuperado el 28 de septiembre de 2017, de https://www.sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/Flora_lindosa%20para%20web.pdf

Suarez Gamboa, N. (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.

Tamayo García, (2017). Evaluación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos estimados con el modelo soil water assessment tool (swat) y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados. Escuela politécnica nacional.

Tavera Pinzón, A. (2015). Estudio de la dinámica de los sedimentos asociadas al impacto de la explotación minera sobre cauces de ríos andinos. Universidad Nacional de Colombia, p. 36.

UNESCO. (2010). Procesos de erosión- sedimentación en cuencas y cauces. (D. J. Brea, & F. Balocchi, Edits.) Programa Hidrológico internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe, Volumen 1.

Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Centro Internacional de agricultura Tropical Internacional CIAT.

UNAD. (2013). Clasificación de los ecosistemas colombianos. Obtenido de <https://es.slideshare.net/elambientesano/clasificacin-de-los-ecosistemas-colombianos>

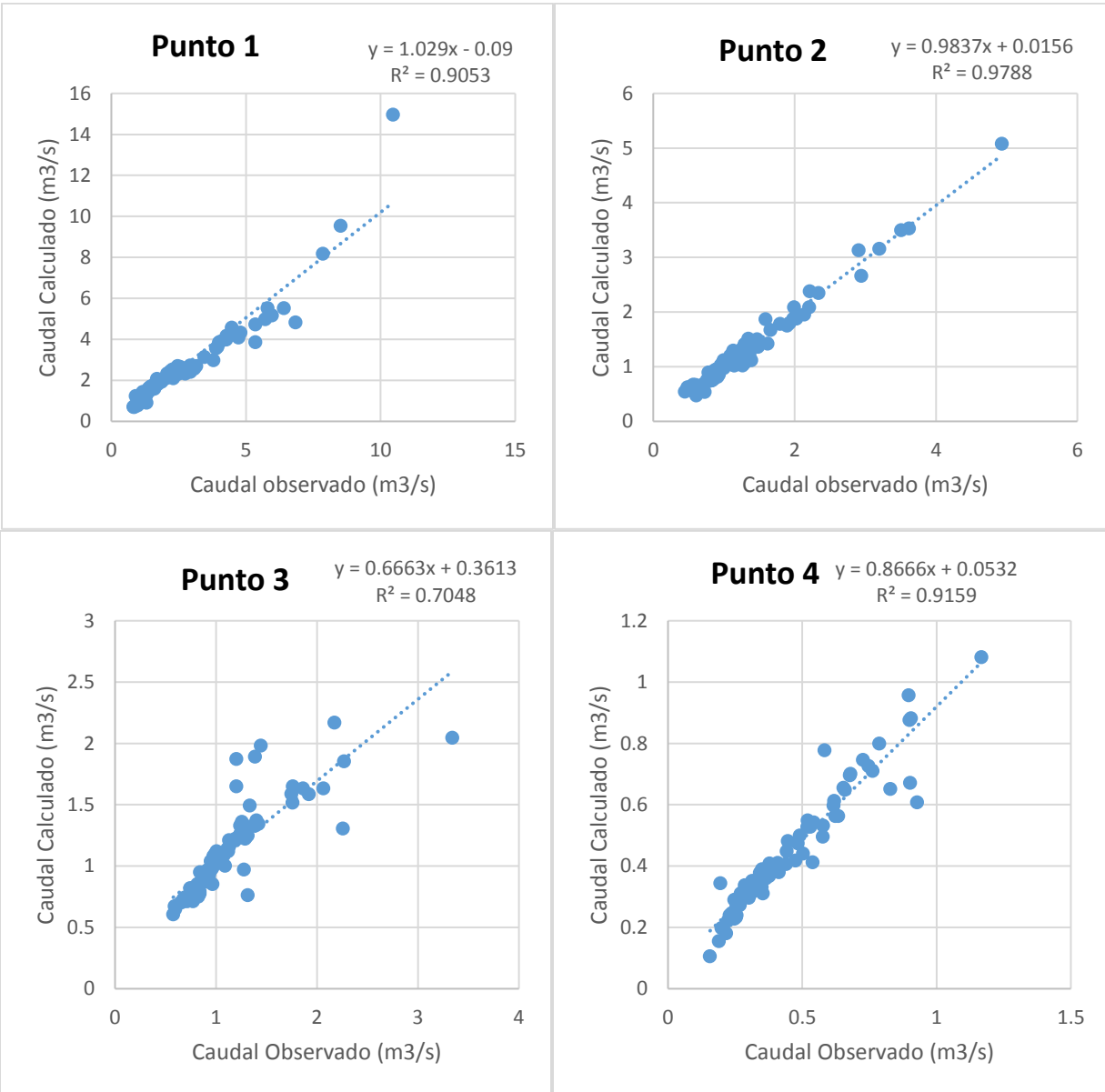
Velázquez, J., Ochoa, G., Oballos, J., Manrique, J., & Santiago, J. (2004). Metodología para la delineación cartográfica de suelos.

Yehayis, E. (2010). Predicción la escorrentía y la producción de sedimentos uso swat modelo para ija galma waqo oleada proyecto de riego. Instituto de Tecnología de la Facultad de Recursos Naturales e Ingeniería Ambiental.

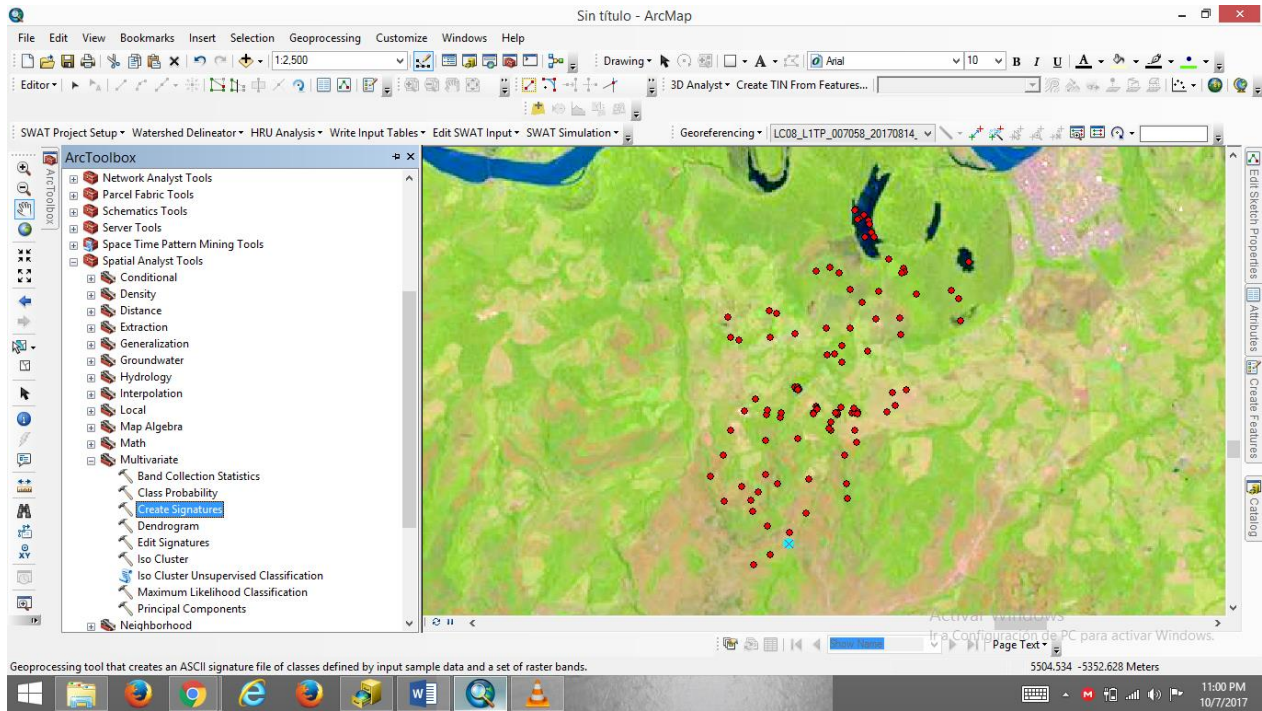
Williams, J., Jones, C., & Dyke, P. (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosión and soil productivity.

ANEXOS

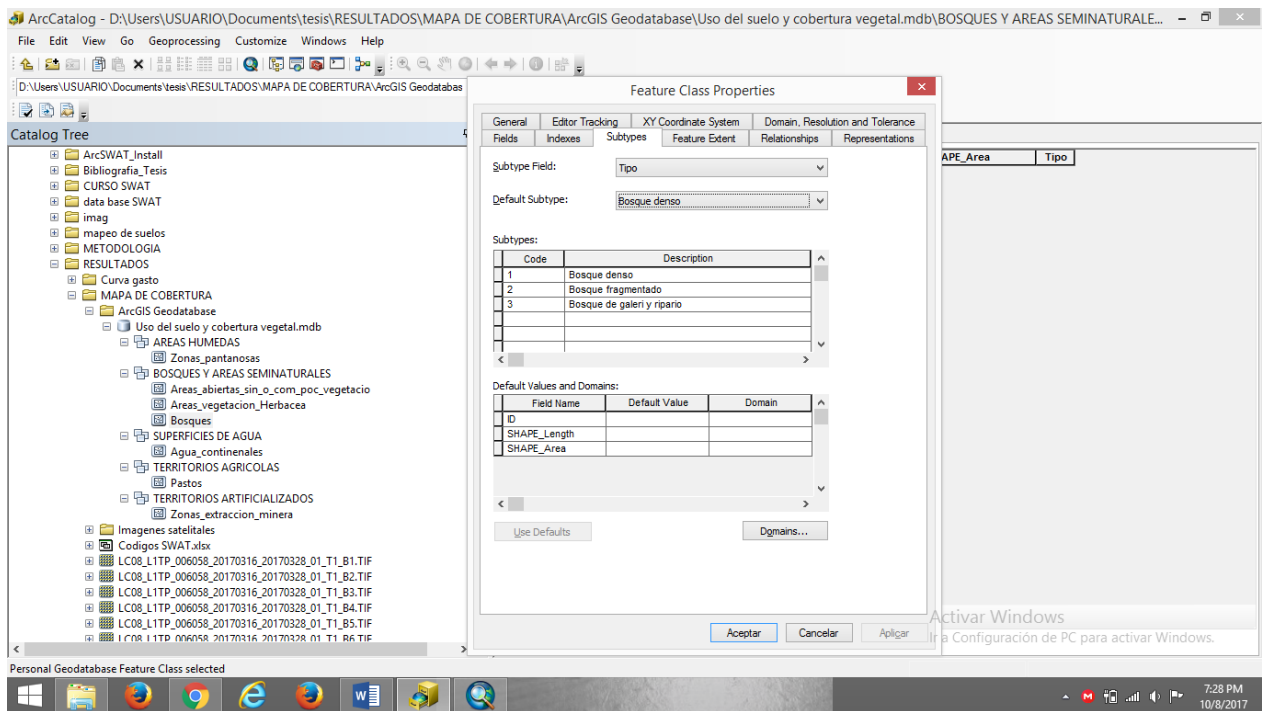
Anexo 1. Regresión lineal para caudales por logarítmico



Anexo 2. Clasificación supervisada de imagen satelital Landsat 8

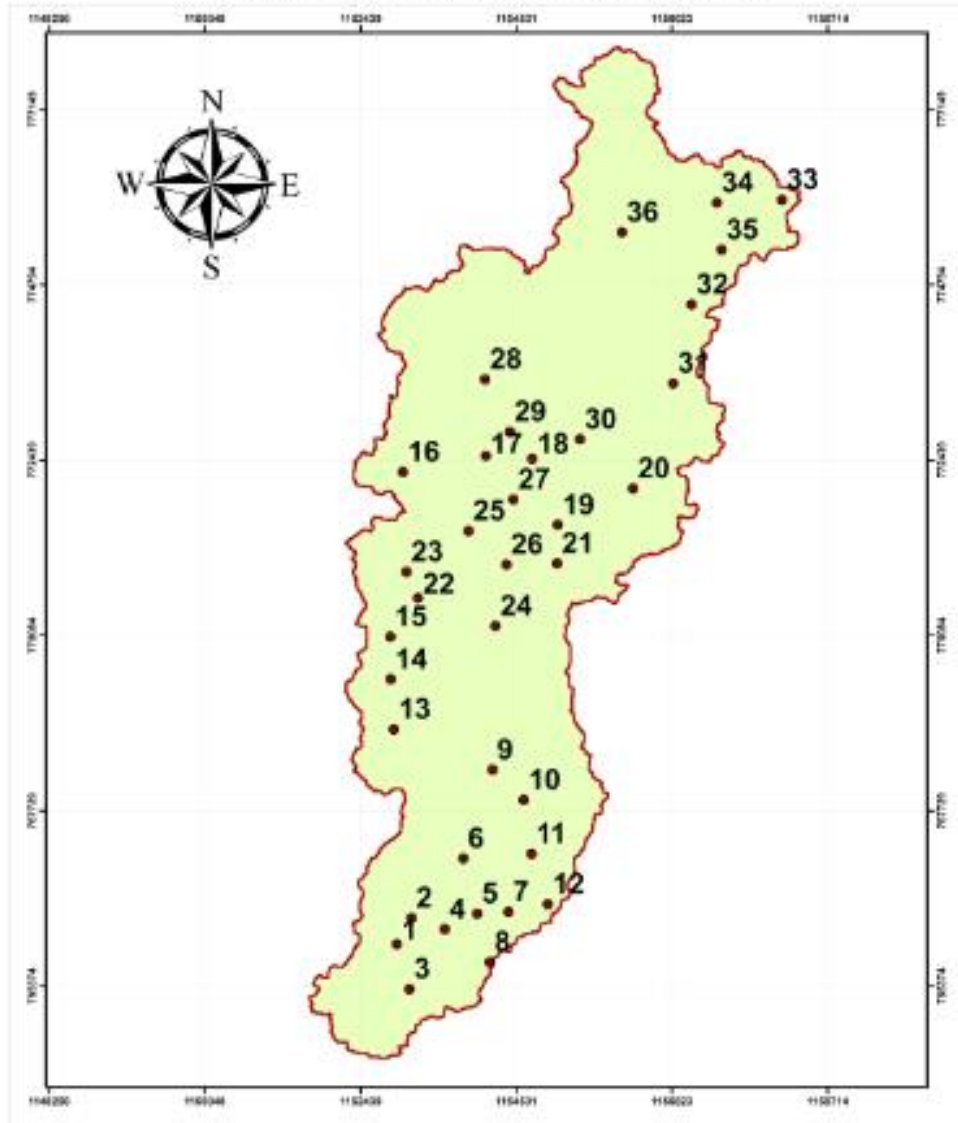


Anexo 3. Geodatabase para Mapa de coberturas



Anexo 4. Puntos de muestreo de suelos

Ubicacion de puntos de muestreo de suelos

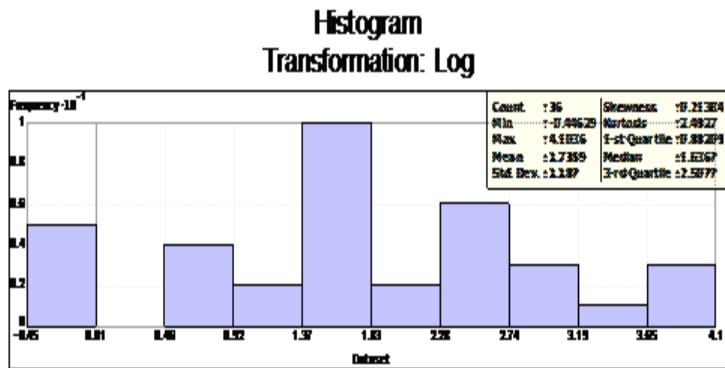


PROYECTO: "APLICACIÓN DEL MODELO SOIL WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) PARA ESTIMAR LA PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA QUEBRADA LA MARÍA, SAN JOSÉ DEL GUAVIARE"		LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO 
ESCALA GRÁFICA 0 200 400 600 800 1.000 1.200 Metros	LEYENDA ● Puntos de muestreo de suelos ■ División de la microcuenca	
ESCALA 1:50,000	REVISADO POR: PRO. María F. Pizarro MSc. Juan Carlos López	
REFERENCIA ESPACIAL WGS84, Colombia, Bogotá	ELABORADO POR: Patty Mariana Acosta Sánchez Estudiante Ingeniería	

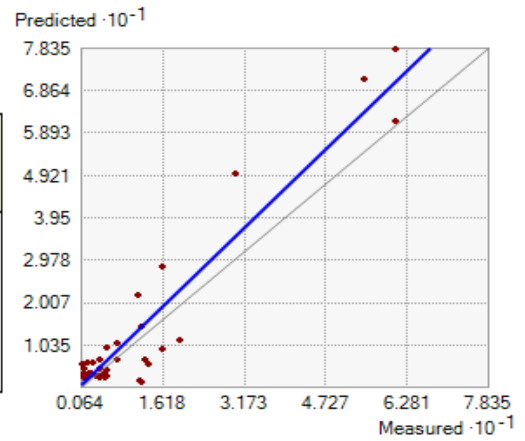
Anexo 5. Revisión en campo de suelos y geología

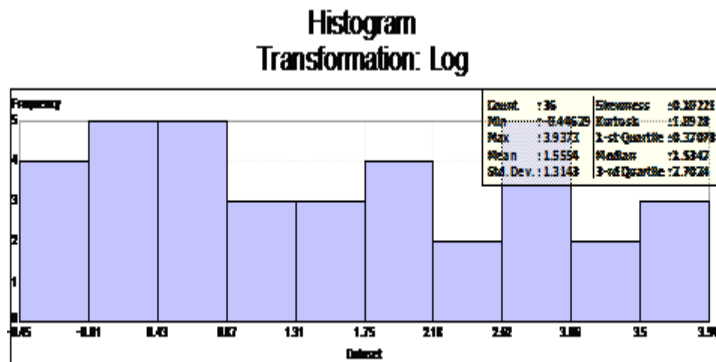


Anexo 6. Histogramas y desviación estándar de la interpolación con Kriging para %Arena, %Arcilla y %Limo

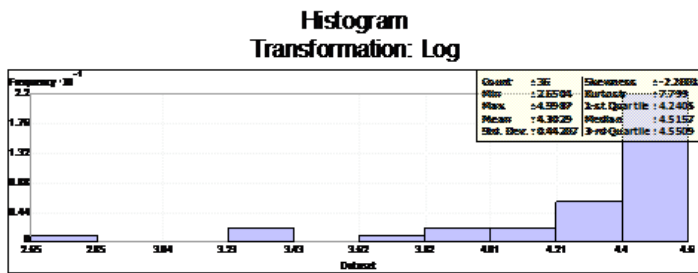
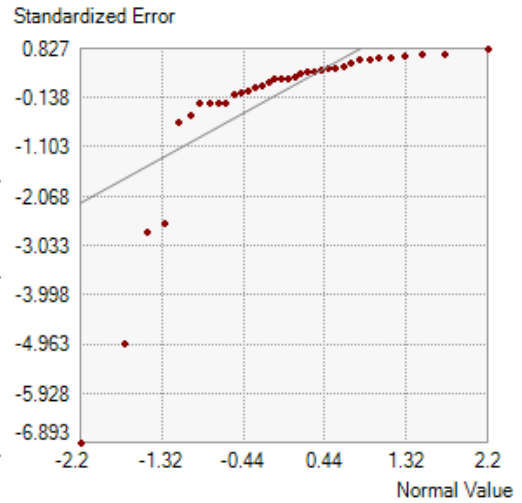


Dataset : Export_Output Attribute: F_Limo

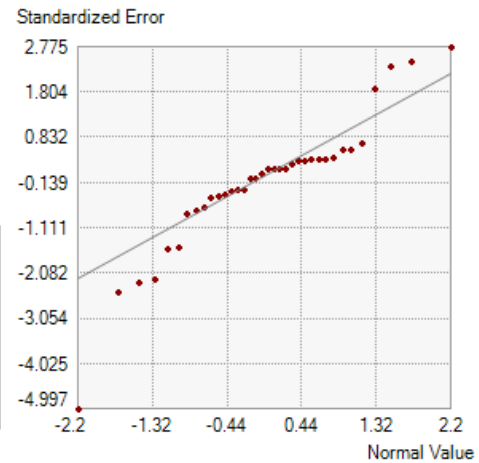




Dataset: Export Output Attribute: F Arcilla



Dataset: Export Output Attribute: F_Arena



Anexo 7. Tabla WGEN_Estaciones para el modelamiento en SWAT

Estación: San José Guaviare												
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TMPMX	32.5	33.3	32.1	31.1	30.0	29.7	29.7	30.4	31.5	31.4	31.0	31.5
TMPMIN	21.7	21.9	22.4	22.4	22.4	22.3	21.9	22.1	22.3	22.7	22.6	22.2
TMPSTDMX	1.8	2.2	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.8	1.7	1.8	1.6	1.4
TMPSTDMIN	2.0	1.6	1.5	1.4	1.2	1.2	1.1	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1
PCPMM	300.3	373.3	540.3	404.7	381.1	537.3	363.5	596.5	613.3	414.9	410.6	362.3
PCPSTD	19.6	39.2	42.7	31.3	24.0	47.9	23.6	60.9	80.6	30.4	44.4	38.1
PCPSKW	3.1	8.0	5.1	5.7	7.0	11.2	4.2	9.1	11.0	5.8	7.1	8.7
PR_W1	0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
PR_W2	0.6	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6
PCPD	14.9	15.8	19.3	17.6	19.8	21.0	19.0	17.8	16.6	16.4	14.6	14.1
RAINHHMX	25.0	95.0	82.7	123.0	37.7	173.7	183.7	279.0	92.7	165.3	401.7	117.3
SOLARAV	21.9	21.6	19.4	16.8	15.4	15.5	17.9	19.8	21.7	21.1	20.4	21.1
DEWPT	17.4	21.4	20.7	16.6	20.9	23.1	21.3	14.8	18.6	19.6	20.0	21.1
WINDAV	25.2	23.5	26.9	23.6	1.8	23.5	22.5	24.2	24.3	24.8	22.2	24.1

Estación El Trueno												
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TMPMX	32.866	33.612	32.441	31.760	31.364	30.772	30.813	31.501	32.174	32.047	31.744	32.223
TMPMIN	22.4	22.5	22.3	22.2	21.9	22.0	22.2	22.5	22.6	22.3	21.8	21.8
TMPSTDMX	1.9	2.2	2.1	2.4	2.7	3.0	2.9	2.9	2.2	2.2	2.2	2.0
TMPSTDMIN	1.3	1.3	0.9	0.8	0.9	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	1.3	1.4
PCPMM	317.7	257.4	305.7	324.3	345.0	338.0	290.1	226.6	188.1	258.3	284.7	242.6
PCPSTD	21.7	16.5	19.6	20.4	23.2	22.0	19.7	21.7	14.7	18.0	20.2	18.5
PCPSKW	3.0	2.3	3.0	2.7	3.9	3.1	3.5	5.2	4.0	2.9	3.1	4.6
PR_W1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
PR_W2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5
PCPD	13.5	12.1	12.6	13.5	14.9	15.1	13.4	10.1	10.0	12.0	12.4	12.2
RAINHHMX	50.4	28.6	45.7	45.8	63.2	44.8	53.1	58.7	41.4	46.1	50.7	57.7
SOLARAV	20.2	19.6	17.8	15.4	13.5	13.4	15.4	17.7	20.0	20.0	19.5	20.0
DEWPT	22.1	21.1	22.4	19.6	20.2	22.0	21.2	20.3	20.6	22.9	25.9	23.7
WINDAV	36.0	32.2	23.1	19.2	16.7	15.5	18.4	17.9	19.5	19.9	23.2	33.1

Anexo 8. Mapa de drenajes de la microcuenca La María

