



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Determinación de correlaciones entre parámetros hidrológicos y físicos, y la carga de lavado en algunas subcuencas del río Magdalena

Natalia Moreno Castro

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2017

Determinación de correlaciones entre parámetros hidrológicos y físicos, y la carga de lavado en algunas subcuencas del río Magdalena

Natalia Moreno Castro

Trabajo Final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Director (a):
Ing. Civil, Ms Carlos Eduardo Cubillos Peña

Línea de Investigación:
Ingeniería de ríos y Transporte de sedimentos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2017

Algunas personas me dijeron que era valiente alcanzar esta meta; por el camino entendí que lo valiente no era alcanzarla, lo valiente era robar el tiempo con ellos para poder hacerlo.

Gracias por entenderlo.

Gracias por apoyarme e impulsarme y sin duda alguna por creer en mi cuando incluso yo no lo hice.

Nelson, Papi, Mami, Moni y Cata; gracias porque me acompañaron a perseguir este logro, pero más que nada, porque me recordaron que tenerlos en mi vida es el más grande de ellos.

Resumen

La cuenca del río Magdalena cuenta con información sedimentológica suficiente para aplicar un modelo de regresiones lineales múltiples para la construcción de un modelo estadístico que estime razonablemente la producción de sedimentos de lavado en una cuenca a partir de un conjunto limitado de variables físicas, de cobertura del suelo e hidrológicas. Se seleccionaron 17 subcuencas localizadas algunas de ellas en el cauce principal del río Magdalena y otras en algunos de sus afluentes, a las cuales se les estimaron 15 parámetros morfológicos, hidrológicos y de cobertura de suelo, y se utilizaron para determinar su grado de significancia en la construcción de dos modelos paramétricos para estimar el Transporte sólido como la Carga de lavado y el Rendimiento sólido. Solo 9 de los 15 parámetros seleccionados inicialmente resultan relevantes y son de P_{mma} Precipitación media anual multianual (mm/Año), Q_{mma} Caudal Medio Multianual (m^3/s -Año), A_c Área de la cuenca (Km^2), H_t Desnivel Altitudinal (m), An_p Ancho promedio de la cuenca (Km), I_{Hips} Integral Curva hipsométrica (-), S_{cp} Pendiente promedio cauce principal (%), R_h Rendimiento hídrico / Escorrentía específica (m^3/s - Km^2) y K_{es} Factor Susceptibilidad de erosión de cobertura de suelo.

El ajuste R^2 obtenido tras la evaluación de las pruebas de hipótesis para estos dos modelos paramétricos está entre 0.76 y 0.66, los cuales representan un grado ajuste entre el valor medido y el valor pronosticado aceptable para, para la predicción de la Carga de lavado y el Rendimiento sólido respectivamente. Sin embargo, estos valores de R^2 resultan inferiores a los valores obtenidos en un ejercicio similar aplicado previamente a algunas subcuencas del río Cauca. Adicionalmente se encuentra que los modelos parámetros obtenidos son diferentes en su estructura y no arrojan resultados válidos al ser probados en una cuenca diferente a la de origen.

Palabras clave: Sedimentos, parámetros, cuenca, caudal.

Abstract

The Magdalena River basin has enough sedimentological information to apply a multiple linear regression model, this information will allow construction a statistical model that predicts the production of washing sediments, based on hydrological and physical variables of soil cover.

Considering the large amount of existing information, 17 sub-basins were selected from the main channel and its tributaries, which were evaluated for 15 morphological, hydrological and soil cover parameters; Each one of them was evaluated to determine its degree of relevance in the construction of two equations: the first one tried to estimate the solid transport - washing load and the second the solid performance.

After the evaluation, only 9 of the initial parameters studied were found to be relevant: P_{mma} (average annual multiyear rainfall), Q_{mma} (average multi-annual flow), A_c (basin area), H_t (altitudinal slope), An_p (average width of the basin), I_{Hips} (integral hypsometric curve), S_{cp} (mean main channel slope), R_h (water yield / Specific runoff), K_{es} (soil erosion susceptibility factor).

Additionally it was revealed that the adjustment obtained for these two equations oscillates between 0.76 and 0.66, values that represent an acceptable adjustment for its prognosis; however, these results are lower than the values obtained in a similar exercise applied to Cauca river basins.

Finally, it was determined that the models and parameters obtained are different in their structure and do not yield valid results when tested in a different basin from the one of origin.

Keywords: Sediment, parameters, basin, flow.

Contenido

PÁG.

1. GENERALIDADES	3
1.1. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.1.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	4
1.2. JUSTIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DEL ALCANCE	5
1.3. LIMITACIONES ASOCIADAS AL ESTUDIO	6
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. PROCESOS FORMADORES DEL PAISAJE Y SU UNIDAD DE ANÁLISIS	8
2.2. FACTORES QUE ALTERAN LAS MODIFICACIONES DEL PAISAJE	9
2.3. DENUDACIÓN, EROSIÓN, DEPOSITACIÓN Y SEDIMENTOS.	10
2.4. FORMAS DE EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL	11
2.5. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	14
2.6. CÓMO SE ESTIMA EL TRANSPORTE/PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS.....	15
3. METODOLOGÍA	18
3.1. ASPECTOS Y PARÁMETROS DE INTERÉS PARA CARACTERIZACIÓN DE SUBCUENCAS.....	20
3.2. CONSULTA Y ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN SEDIMENTOLÓGICA Y GEOGRÁFICA	22
3.3. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y DEPURACIÓN DE REGISTROS.....	23
3.3.1. <i>Delimitación de área de estudio en función de datos sedimentológicos</i>	24
3.3.2. <i>Depuración de registros de caudal líquido</i>	24
3.3.3. <i>Depuración de aforos sólidos existentes</i>	25
3.4. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA Y GEOGRÁFICA	26
3.4.1. <i>Caracterización hidrológica</i>	27
3.4.2. <i>Caracterización Sedimentológica</i>	28
3.4.3. <i>Caracterización morfológica y morfométrica</i>	29
3.4.4. <i>Caracterización de cobertura del suelo y geología para ingeniería</i>	30
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS HIDROLÓGICOS Y GEOGRÁFICOS	33
3.5.1. <i>Regresiones regresivas múltiples</i>	33
3.5.2. <i>Pruebas de hipótesis</i>	34
3.5.3. <i>Análisis de colinealidad</i>	34
3.6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS	34
4. DESARROLLO GENERAL DEL ESTUDIO	35
4.1. ETAPA I – DEFINICIÓN ÁREA DE ESTUDIO A PARTIR DE INFORMACIÓN SEDIMENTOLÓGICA	35
4.1.1. <i>La cuenca del río Magdalena</i>	35
4.1.2. <i>Consulta de información disponible</i>	37

4.1.3.	<i>Depuración de información de caudal líquido</i>	41
4.1.4.	<i>Depuración de información de caudal sólido</i>	43
4.2.	ETAPA II – CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	46
4.2.1.	<i>Caracterización hidrológica</i>	46
4.2.2.	<i>Caracterización Sedimentológica</i>	54
4.2.3.	<i>Caracterización morfológica y morfométrica</i>	59
4.2.4.	<i>Caracterización de cobertura del suelo y geología para ingeniería</i>	62
4.3.	ETAPA III – ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PARÁMETROS	63
4.3.1.	<i>Revisión de colinealidad de variables</i>	64
4.3.2.	<i>Construcción de regresiones regresivas</i>	65
4.4.	ETAPA IV – ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
4.4.1.	<i>Verificación del pronóstico de los modelos paramétricos obtenidos para el río Magdalena</i>	69
4.4.2.	<i>Comparación de la estructura del modelo paramétrico del río Magdalena y el río Cauca</i>	73
4.4.3.	<i>Análisis de los parámetros representativos en el modelo paramétrico del río Magdalena y en modelo del río Cauca</i> 75	
4.4.4.	<i>Análisis de la generalización de los pronósticos de carga de lavado de los modelos paramétricos construidos en el río Magdalena y en el río Cauca</i>	79
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
6.	BIBLIOGRAFÍA	82

Listado de Anexos

- A. INFORMACIÓN DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS
- B. INFORMACIÓN DE AFOROS SÓLIDOS
- C. ACEPTACIÓN DE AÑOS EN BASE DE DATOS
- D. CORRELACIONES DE CAUDAL DIARIO PARA AÑOS CON MESES INCOMPLETOS
- E. GRÁFICAS DE TENDENCIA DE AFOROS SÓLIDOS
- F. CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES Y DE CALIBRACIÓN
- G. MATRIZ DISPERSIÓN DE VARIABLES
- H. REGRESIONES MÚLTIPLES REGRESIVAS

Lista de figuras

PÁG.

Figura 2-1:	Formas de erosión hídrica superficial.....	12
Figura 2-2:	Sistema fluvial idealizado	13
Figura 3-1:	Estructuración metodológica del trabajo	19
Figura 4-1:	Área de estudio definida en función de información sedimentológica.....	37
Figura 4-2:	Área de estudio definida en función de información sedimentológica.....	40
Figura 4-3:	Gráficas de tendencia entre Concentración Media y Caudal Líquido Aforado.....	44
Figura 4-4:	Mapa Precipitación media anual multianual (mm) en el área de estudio	47
Figura 4-5:	Series de Caudal Medio Multianual para las estaciones del Río Magdalena.....	49
Figura 4-6:	Series de Caudal Medio Multianual para las estaciones en los afluentes.....	50
Figura 4-7:	Distribución de las estaciones alrededor del embalse de Betania.....	51
Figura 4-8:	Curvas de duración de caudales para verificación del efecto del Embalse de Betania.....	51
Figura 4-9:	Curvas de duración de caudales líquidos en estaciones del río Magdalena.....	52
Figura 4-10:	Curvas de duración de caudales líquidos en estaciones de los afluentes.....	52
Figura 4-11:	Curvas de duración de caudales líquidos en estaciones de los afluentes.....	53
Figura 4-12:	Curvas de calibración para algunas estaciones seleccionadas.....	55
Figura 4-13:	Tendencia de aforos sólidos para todas las estaciones utilizadas	56
Figura 4-14:	Tendencia de aforos sólidos para todas las estaciones sobre el río Magdalena	57
Figura 4-15:	Tendencia de aforos sólidos para todas las estaciones sobre los afluentes.....	57
Figura 4-16:	Curvas de duración de caudales sólidos en estaciones en el río Magdalena.....	58
Figura 4-17:	Curvas de duración de caudales sólidos en estaciones en los afluentes.....	58
Figura 4-18:	Mapa de subcuencas hasta cada estación.....	60
Figura 4-19:	Ejemplo de Mapa de geología para ingeniería y cobertura del suelo.....	62
Figura 4-20:	Comparación Pronóstico de Carga de Lavado (T_1) en río Magdalena y afluentes.....	70
Figura 4-21:	Comparación Pronostico Rendimiento Sólido (T_2) en río Magdalena y afluentes.....	70
Figura 4-22:	Comparación Pronostico (T_1) y (T_2) separados por cauce principal y afluentes	71

Lista de tablas

PÁG.

Tabla 2-1:	Clasificación de procesos erosivos según su agente detonador	11
Tabla 2-2:	Clasificación de los sedimentos.....	14
Tabla 2-3:	Modelos para cuantificación de sedimentos usados en ingeniería.....	17
Tabla 3-1:	Parámetros a usar en la caracterización de las subcuencas.....	22
Tabla 3-2:	Coefficiente de Susceptibilidad de erosión de cobertura de suelo (Ces).....	31
Tabla 3-3:	Coefficiente de Susceptibilidad de erosión de material geológico (Ceg).....	32
Tabla 4-1:	Resumen estaciones en cuenca del río Magdalena por departamento y tipo	38
Tabla 4-2:	Estaciones utilizadas sobre el cauce del río Magdalena. Datos generales.....	38
Tabla 4-3:	Estaciones utilizadas en subcuencas de corrientes afluentes. Datos generales.....	39
Tabla 4-4:	Resumen de depuración de datos de caudal líquido en todas las estaciones.....	42
Tabla 4-5:	Resumen disponibilidad de aforos de caudal líquido por estación	43
Tabla 4-6:	Aforos revisados bajo comparación de caudales líquidos medidos.....	45
Tabla 4-7:	Caudales medios mensuales multianuales en estaciones Río Magdalena	48
Tabla 4-8:	Caudales medios mensuales multianuales en estaciones en los afluentes.....	48
Tabla 4-9:	Resumen de Parámetros Hidrológicos	53
Tabla 4-10:	Resultados de la calibración QI Vs Qs en las estaciones analizadas.	54
Tabla 4-11:	Resumen de Transporte promedio multianual en cada estación	59
Tabla 4-12:	Resumen de Parámetros Morfométricos y Morfológicos (MOR)	61
Tabla 4-13:	Resumen de Parámetros Coeficientes de susceptibilidad de erosión (Ces-Geg).....	63
Tabla 4-14:	Matriz de correlaciones de variables	64
Tabla 4-15:	Agrupación por área de cuencas para análisis paramétrico.....	72
Tabla 4-16:	Parámetros de subcuencas en el río Magdalena y en el Río Cauca.....	76
Tabla 4-17:	Comparación de variación de Carga de Sedimentos de Lavado.	77
Tabla 4-18:	Comparación de variación de coeficientes de curva de calibración	77
Tabla 4-19:	Comparación de variación de Precipitación media Multianual	77
Tabla 4-20:	Comparación de variación de Caudal Promedio Multianual	78
Tabla 4-21:	Comparación de variación de área de la cuenca	78
Tabla 4-22:	Comparación de variación de Desnivel Altitudinal.....	78
Tabla 4-23:	Comparación de variación de Ancho promedio de la cuenca	78
Tabla 4-24:	Comparación de variación de Integral de la curva Hipsométrica	79
Tabla 4-25:	Comparación de variación de Pendiente Promedio del cauce principal.....	79

Introducción

En Colombia, se han implementado en los años recientes, esfuerzos a nivel gubernamental para consolidar la información demográfica, topográfica, catastral, de uso del suelo, climatológica, ambiental, de calidad de aire y agua, de actividad económica, entre otros, generada por todos los entes estatales y ponerla a disposición en plataformas electrónicas de acceso libre mediante internet. De todos aquellos quienes la requieran a nivel nacional, es posible contar con valiosa información cartográfica y de cobertura de suelo, primaria y secundaria, de carácter público que se encuentra actualmente accesible de manera gratuita para cualquier uso, permitiendo analizar las características físicas del terreno y el territorio en un amplio número de puntos a nivel nacional. Sin embargo, en el caso de la disponibilidad de información hidrológica y sedimentológica específicamente, no existe actualmente una cobertura tan amplia de puntos de medición que se encuentren operativos y que brinden información sobre el comportamiento de los sedimentos dentro de las cuencas de manera directa.

Existen en la literatura un sin número de técnicas, ecuaciones, y programas computacionales para estimar la producción de sedimentos que resuelven modelos matemáticos paramétricos (en su mayoría) a partir de algunos parámetros físicos medibles en terreno y otros parámetros que en el normal desarrollo de la ingeniería no son posibles de determinar con certeza y cuya selección depende entonces de la selección de valores típicos o teóricos reportados en trabajos realizados previamente, los cuales difícilmente se adaptan a las condiciones particulares de cada punto de estudio.

Es aquí donde se identifica la falta de ejercicios aplicados propiamente a las cuencas colombianas que den una idea del comportamiento de esas variables o, mejor aún, modelos matemáticos construidos a partir de datos reales medidos en el país. Se propone entonces la construcción del Trabajo Final de Maestría presentado en este documento, el cual plantea la construcción de un modelo paramétrico que permita predecir, con un grado de confiabilidad aceptable, la producción de sedimentos de carga de lavado generada en una cuenca a nivel promedio anual, haciendo uso de parámetros físicos, morfológicos, morfométricos, hidrológicos y de cobertura y uso del suelo.

La cuenca del río Magdalena es una de las cuencas que actualmente sí cuenta la información sedimentológica en algunos puntos que permite a los especialistas en el área de la ingeniería de ríos y de los sedimentos formular ecuaciones empíricas que se acerquen a describir el comportamiento de la producción de éstos últimos mediante relaciones estadísticas multivariadas y, por lo tanto, resulta propicia para desarrollar la metodología propuesta para este trabajo de grado. Esta información se encuentra concentrada en la cuenca del río Magdalena, existen 17 estaciones hidrológicas que se encuentran localizadas en su la cuenca alta y cuenca media del Río, con sus correspondientes afluentes, y las cuales cuentan hoy en día con información suficiente, tanto de aforos sólidos como de mediciones de caudal a nivel diario, para ser seleccionada como caracterizar el área de estudio. Esta información se encuentra

distribuida de manera discontinua en el tiempo y cuenta con algunos errores de medición y/o transcripción, que en este Trabajo Final de Maestría fueron identificados y eliminados según fuera el caso antes de incorporarlos a los parámetros.

Para construir el modelo paramétrico que logre pronosticar con cierto grado de confiabilidad la producción de carga de sedimentos de lavado dentro de un tramo de la cuenca del río Magdalena, se definen 15 entre muchos parámetros hidrológicos, sedimentológicos, de uso de suelo y material geológico, morfométricos y morfológicos que han sido utilizados con éxito en previos trabajos de investigación y se calculan sus valores para cada una de las 17 subcuencas seleccionadas. La información sedimentológica disponible en el área de estudio abarca un total de 1644 aforos para la construcción del modelo, que, si bien representa un valor aceptable de información, es limitado con respecto a la disponibilidad de caudales líquidos. Esta diferencia entre la disponibilidad de información de caudal líquido comparada con la disponibilidad de información de caudal sólido, refuerza la idea asociada a la importancia del análisis propuesto en este Trabajo Final de Maestría.

Para la construcción de los modelos paramétricos predictivos de la producción de sedimentos, en este Trabajo Final de Maestría se elige seguir el procedimiento utilizado anteriormente en el estudio de caso realizado para el río Cauca (Niño, 2015). La aplicación regresiones lineales múltiples permite conocer la influencia de un conjunto de variables independientes (en este caso definidas como variables hidrológicas, morfométricas, morfológicas, topográficas, de cobertura de suelo, entre otras) en la predicción de una variable dependiente (en este caso la producción de carga de lavado). Sin embargo, la aplicación de este modelo estadístico requiere que las variables descriptoras del proceso cumplan con los requisitos de no correlación entre ellas y distribución normal, lo cual se cumple de manera parcial para este caso.

Los modelos paramétricos obtenidos como resultado de este Trabajo Final de Maestría, definen un conjunto de variables independientes relevantes en el proceso de generación de sedimentos y arrojan resultados aceptables pero limitados para la predicción de caudales sólidos medios multianuales en una porción de la cuenca del río Magdalena. Si se compara con los resultados obtenidos en el caso del río Cauca, se identifican diferencias tanto en el nivel de confianza de la predicción, como en la selección de las variables relevantes. La existencia de este trabajo previo permite hacer un análisis de los resultados y compararlos a la luz de sus diferencias y similitudes, nutriendo así la investigación en el área.

1. Generalidades

La erosión superficial o la pérdida de suelo es un proceso natural y permanente que hace parte del ciclo geomorfológico asociado a la acción de la escorrentía (o el viento) y al golpe de las gotas de la lluvia sobre la superficie terrestre, lo que da paso a la modelación del paisaje. A pesar de que hace parte de un ciclo natural, la erosión también puede verse intensificada o acelerada por la acción antrópica sobre el terreno como la deforestación, urbanización y en general modificaciones en el uso del suelo. Esta erosión y/o desprendimiento de material, conlleva un arrastre, transporte y depositación de partículas llamadas sedimentos en zonas diferentes a las de origen, modificando las características del material superficial de las regiones y generando posibles impactos sobre el desarrollo local en términos agrícolas (por degradación de suelo), de riesgo (generación de cárcavas o debilitamiento de taludes) o movilidad (reducción de navegabilidad), por mencionar algunos.

Dentro del campo de la ingeniería de ríos se reconoce que los sedimentos pueden ser de dos orígenes primordialmente: de lavado, refiriéndose al desprendimiento de material en la cuenca aferente y conducido hasta el cauce; y de material de lecho, entendiéndose como el material que es desprendido a lo largo de la misma sección transversal del cauce.

Actualmente se cuenta con varias metodologías de confiabilidad limitada para estimar la carga de lavado total anual producida por una cuenca hidrográfica a partir de parámetros como factor de erosividad de la lluvia, factor de erodabilidad del suelo, factor de cobertura y manejo agrícola, factor de manejo y prácticas de suelo, los cuales son utilizados en distintas ecuaciones, pero cuya representatividad física no está disponible en el ejercicio rutinario de la ingeniería y, por consiguiente, se utilizan datos teóricos que generan incertidumbres sobre las condiciones del terreno.

La literatura reseña a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Universal Soil Loss Equation) –USLE- formulada por Wischmeier & Smith en 1978 como la formulación usada más ampliamente para la estimación de la carga de lavado total anual sobre otras como la de Gavrilovic o Miraki. Estas ecuaciones mencionadas anteriormente, se han aplicado dentro de algunos modelos matemáticos bajo hipótesis que raras veces se acercan a las condiciones naturales de las cuencas y su uso indiscriminado dentro de procesos de planeación rural de cuencas puede conducir a la estructuración de proyectos de conservación de suelos o de control de erosión que no se adaptan a las necesidades reales del sistema natural. Además, las ecuaciones originales del USSCS son ecuaciones para la producción de sedimentos in situ, causada por la erosión pluvial exclusivamente, en parcelas de tamaño muy reducido, las cuales para poder ser extrapoladas a cuencas extensas, requieren de factores de producción, cuya determinación adecuada depende de la existencia de mediciones de carga en los ríos de la cuenca.

Por lo anterior, la determinación de la carga de lavado de acuerdo con mediciones directas en las cuencas hidrográficas, resulta en una metodología más adecuada a la determinación de producción de sedimentos en cuencas extensas, que

otros modelos basados en ecuaciones empíricas. Una primera muestra de este tipo de modelos, se ha desarrollado en la UN en el Trabajo Final de Maestría denominado “IDENTIFICACIÓN DE CORRELACIONES ENTRE LA CARGA DE LAVADO Y ALGUNOS PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS Y DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO CAUCA” presentada en 2015 : (Niño, 2015), el ingeniero Otoniel Niño realizó un acercamiento a la identificación de parámetros físicos e hidrosedimentológicos relevantes para la estimación de cargas de lavado para una zona de estudio específica en Colombia, en la cuenca hidrográfica del río Cauca, de más de 80,000 Km².

Continuando esa identificación de correlaciones, se plantea el presente Trabajo Final de Maestría, de manera tal que se utilicen algunas subcuencas del río Magdalena y se analice la información hidrosedimentológica disponible de manera similar al trabajo realizado por el Ing. Niño, y así generar regresiones múltiples con ajustes razonables para la estimación de la carga de lavado total anual en algunas subcuencas. Se espera que el uso de las regresiones obtenidas permita superar las limitaciones de información de campo disponible y ofrezcan un acercamiento a una posible generalización de los parámetros relevantes en la estimación de carga de sedimentos de lavado para Colombia, y se reduzca la brecha existente entre la información teórica disponible y la realidad de nuestro país.

1.1. Objetivo general y objetivos específicos

1.1.1. Objetivo general

Determinar correlaciones entre parámetros físicos e hidrológicos para estimar la carga de lavado en un tramo del río Magdalena con base en las mediciones sedimentológicas disponibles en el sector.

1.1.2. Objetivos específicos:

- Seleccionar subcuencas del río Magdalena que cuenten con información morfométrica y morfológica; cobertura del suelo y geología para ingeniería, hidrológica y sedimentológica suficiente para la generación de correlaciones entre sus parámetros más representativos
- Recolectar, revisar, depurar y consolidar la información morfométrica y morfológica; cobertura del suelo y geología para ingeniería, hidrológica y sedimentológica disponible en las subcuencas del río Magdalena dentro del tramo de estudio.
- Plantear de correlaciones para los parámetros sedimentológicos; morfométricos y morfológicos; cobertura de suelo y geología para ingeniería e hidrológicos en algunas las subcuencas del río Magdalena dentro del tramo de estudio.
- Comparar las correlaciones estimadas con los resultados obtenidos en el trabajo elaborado en el río Cauca

1.2. Justificación y definición del alcance

Las incertidumbres asociadas a la estimación de cargas de lavado en cuencas al aplicar modelos teóricos, requieren de un esfuerzo a ejecutar desde la academia para la construcción de metodologías empíricas que permitan estimar la carga de lavado total en una cuenca a partir de parámetros morfométricos (como área de la cuenca, perímetro de la cuenca, elevación media, desnivel altitudinal, longitud del cauce principal, ancho promedio de la cuenca, coeficiente de compacidad, factor de forma, relación de elongación, entre otros); morfológicos (como pendiente de la cuenca, orden de la red hídrica, Integral de la curva hipsométrica, densidad de drenaje, relación de bifurcación, índice topográfico, entre otros); de cobertura y uso del suelo (como número de curva CN, porcentaje de área de bosques, cultivos o zona urbanizada, entre otros), geológicos (como factor de erodabilidad promedio, factor geológico promedio, unidades geológicas para ingeniería, entre otros), hidrológicos (precipitación media anual multianual en la cuenca, caudal medio anual, rendimiento hídrico, coeficiente de entrega, entre otros) y sedimentológicos (aforos líquidos y sólidos disponibles con mayor registro) que sean de fácil evaluación.

Por lo anterior, se propone en este Trabajo Final de Maestría, la construcción de un modelo paramétrico obtenido mediante la aplicación de regresiones lineales múltiples entre parámetros morfométricos, morfológicos, de cobertura y uso de suelo, hidrológicos y sedimentológicos para varias subcuencas de un cauce específico colombiano, el río Magdalena, de acuerdo a la información disponible. Resulta pertinente aclarar que el presente Trabajo Final de Maestría se basa en una de las premisas fundamentales de la geomorfología, la cual indica que es posible realizar un análisis y cuantificación de procesos geomorfológicos en un paisaje a partir de las configuraciones geométricas de las formas encontradas en el relieve, es decir, reconocer que las formas del paisaje son resultado de la interacción de los procesos del ciclo geomorfológico y por lo tanto, es se puede esperar que exista una correlación entre la producción de sedimentos en una cuenca y sus características morfológicas, morfométricas e hidrológicas.

El desarrollo de este trabajo se enmarca en la disponibilidad de información temática dentro de la cuenca del río Magdalena, la cual resulta un criterio fundamental en la delimitación del área específica de estudio y acota el alcance de los análisis presentados. Si bien la cuenca del río Magdalena cuenta con bastantes estaciones activas de medición de caudal líquido y sólido desde su nacimiento hasta su desembocadura, es indispensable limitar el área de estudio de acuerdo a la disponibilidad de información cartográfica y de cobertura de suelo, la cual no es igual de abundante en todo su recorrido. Adicionalmente, desde el punto de vista de la escala de la información, se prefiere utilizar subcuencas que hagan parte de la zona andina del país, donde el uso de modelos digitales de elevación resulta acertado dadas las condiciones montañosas, y no utilizar zonas demasiado planas que dificulten la delimitación de las subcuencas en cada caso.

Adicionalmente, se resalta el interés que existió para la formulación de este Trabajo Final de Maestría asociado a dar un paso adicional al dado con el trabajo previo realizado en la cuenca del río Cauca hacia la generalización de una metodología que permita en un futuro construir un modelo paramétrico lo suficientemente certero para la estimación de cargas de lavado totales anuales promedio en cuencas de Colombia a partir de información morfométrica y morfológica; cobertura del suelo y geología para ingeniería e hidrológica. Por lo que se limita la profundidad de los análisis dentro de cada uno de los aspectos analizados a la definición de condiciones promedio multianuales.

1.3. Limitaciones asociadas al estudio

Desde la concepción misma de las actividades y durante el desarrollo general de este Trabajo Final de Maestría se hicieron evidentes algunas limitaciones particulares que generan restricciones al momento de recolectar, analizar la información disponible y obtener resultados de fácil interpretación.

A continuación, se describe cada una de ellas.

Limitaciones en disponibilidad y confiabilidad de la información

La disponibilidad de información representa, como ya se mencionó, el pilar fundamental en la justificación de este Trabajo Final de Maestría. Es así, como se parte de la existencia de información sedimentológica, hidrológica y cartográfica de diferentes temáticas suficiente en puntos determinados de la cuenca del río Magdalena para la definición del área de estudio específica y se excluye al mismo tiempo la inclusión de cuencas y fenómenos particulares dentro del conjunto de datos a analizar. Las implicaciones de la disponibilidad de información se mencionan en diferentes puntos del documento de acuerdo a su relevancia como la selección de las estaciones a analizar o el análisis de la influencia de algunos embalses.

Por otro lado, resulta relevante mencionar que la adquisición de la información de registros y cartografía básica necesaria para la consolidación de estos análisis requirió de más tiempo del que habitualmente se dispone para la elaboración de este tipo de análisis. Si bien el gobierno colombiano actualmente se encuentra aunando grandes esfuerzos para garantizar la libertad del acceso a la información de las entidades públicas (ley 1712 de 2014), aún resulta engorrosa su adquisición al ser necesario consultar de manera independiente cada sitio web o entidad. Iniciativas como el Sistema de Información Ambiental de Colombia (<http://www.ideam.gov.co/web/siac/index>) acercan a todos los involucrados con los temas ambientales a aprovechar la información disponible, pero requieren de más tiempo para lograr una consolidación total y disponibilidad real para los usuarios.

Limitaciones de escala y presentación de la información

Respecto a la escala de la información, este Trabajo Final de Maestría se detectó que algunos procesos resultan complejos en su realización dada las diferentes presentaciones de la información disponible. Es decir, existen registros de datos de largos periodos de tiempo en formatos de texto plano, cartografía temática en formato shape editable, cartografía en formato pdf que requiere manipulación, tablas de datos dentro de textos, entre otros, que implican un tiempo especial destinado para la unificación de toda la información relevante.

En el caso particular de la información de cartografía temática, se identifica además que la escala de presentación de la información en la cartografía con respecto a su ocurrencia o tamaño real puede tener una influencia en la precisión de las magnitudes de las variables estimadas y, por lo tanto, una influencia en la construcción misma de los modelos paramétricos. En este Trabajo Final de Maestría se utilizó cartografía desde escalas 1:500.000, 1:100.000, 1:50.000 hasta datos de cobertura estimadas a partir de escala 1:10.000 sin usar algún criterio diferente para su selección aparte de su disponibilidad, por lo que se recomienda tenerlo presente en futuros trabajos en la medida de lo posible.

Limitaciones de distribución espacial y temporal

Adicional a los criterios de escala, es relevante entender que la distribución espacial y temporal de la información disponible también tiene un efecto directo sobre los resultados obtenidos y en la precisión de la definición de los procesos sedimentológicos y las condiciones de cobertura. Al manejar escalas grandes pueden ignorarse eventos detonantes de la producción de sedimentos como avalanchas o derrumbes, e incluso la presencia de estructuras que modifiquen parcialmente la estimación de los sedimentos producidos en un tramo dado como embalses o procesos mineros, lo que afecta la confiabilidad de los resultados obtenidos en las diferentes correlaciones estimadas.

Como el alcance de este Trabajo Final de Maestría se enfoca en la producción de cargas de lavado promedio multianuales, se encuentra por fuera el estudio de la evolución de las cuencas en todos sus parámetros a lo largo del periodo analizado, lo cual sin duda puede verse reflejado de alguna manera en las mediciones. Es posible que este punto pueda ser abordado desde otro trabajo en un futuro.

2. Marco teórico

En los siguientes numerales se hace una descripción de los diferentes conceptos y procesos que hacen parte de la geomorfología terrestre en los aspectos relacionados con la modificación del paisaje y la generación de sedimentos asociados a una cuenca de drenaje, bajo el entendido de que todos los procesos tectónicos, hidrológicos y climáticos se encuentran relacionados entre sí a diferentes escalas y es ésta interacción continua, sumada con la acción del hombre, la que propicia condiciones para la modificación de la superficie terrestre, y que dichas modificaciones son importantes dentro de la planificación del territorio en ámbitos ambientales y económicos a mediano y largo plazo.

2.1. Procesos formadores del paisaje y su unidad de análisis

La geomorfología es la ciencia que estudia las formas del paisaje y los diferentes procesos que las crean a diferentes escalas, los cuales sufren diferentes evoluciones en el tiempo y son afectados en diferentes medidas por las actividades humanas.

En cualquier sistema geomorfológico existen variables internas o endógenas y variables externas o exógenas, las cuales interactúan constantemente a lo largo del tiempo (Huggett, 2007). En una cuenca de drenaje, por ejemplo, la humedad del suelo, la corriente del cauce, la cobertura del suelo, entre otras, corresponden a variables endógenas, mientras que variables como la precipitación, la radiación solar, la temperatura y otras cuantas que se originan fuera del sistema y que afectan la dinámica del sistema de drenaje son exógenas. Es así, como la interacción entre los procesos gobernados por fuerzas geológicas y los procesos gobernados por fuerzas climáticas modifican el paisaje, siendo las primeras las que crean terreno, mientras que las últimas generan desgaste, lo destruyen. Estas definiciones pueden verse desde la perspectiva del ciclo del agua, el ciclo de la roca y el ciclo bioquímico (Huggett, 2007) .

La superficie de la tierra o toposfera es el límite para la interacción de la fase sólida de la litósfera, la atmósfera gaseosa y la acuosa hidrósfera. Es en este escenario donde ocurren además un sinnúmero de procesos vivientes en medio de los cambios de fase gaseoso, líquido y sólido, los cuales son cruciales para el entendimiento de los procesos de transformación del paisaje.

En general, dentro del ciclo de la roca se puede hablar que las dos fuerzas geológicas que generan terreno y que son las formadoras del paisaje: las fuerzas tectónicas, donde el movimiento relativo de las placas tectónicas genera modificaciones en la superficie terrestre como la subsidencia (hundimiento) o levantamiento de la corteza sobre el nivel medio del mar ; y las fuerzas volcánicas, donde la emisión violenta de materiales provenientes de las capas inferiores de la litosfera emergen y se depositan sobre la superficie creando zonas duras de suelo nuevo, como en el caso de los volcanes que se encuentran en islas o zonas costeras, o cubriendo zonas de suelo con capas de material magmático y dando origen a nuevos procesos biológicos y químicos en la superficie.

Por otro lado, los agentes climáticos que mayor impacto tienen sobre el terreno y su modificación son el viento y el agua, los cuales interactúan con el suelo en sus diferentes formas, frecuencias e intensidades, generando la denudación o desprendimiento de partículas de la capa más superficial del suelo. Es así como las precipitaciones, corrientes de aire, corrientes de ríos, oleajes y mareas resultan ser las fuerzas que cambian la configuración del terreno en diferentes periodos de tiempo (estaciones, temporadas de lluvias) o en diferentes intensidades (crecientes, inundaciones, huracanes, maremotos).

Para efectos de este Trabajo Final de Maestría, el agua se considera como el agente de mayor incidencia en la generación de sedimentos, aunque no el único. El ciclo del agua es la circulación del agua por la hidrósfera, atmósfera, y la parte superior de la corteza. En su recorrido por la corteza, del ciclo del agua incluye los sistemas superficiales de drenaje (ríos, quebradas, vallados, lagos, manantiales, entre otros) y los sistemas subsuperficiales (acuíferos, ríos subterráneos, entre otros) de drenaje, los cuales conectan el ciclo del agua que se condensa en las nubes y precipita desde la atmósfera a la tierra, para luego ir infiltrándose, escurriendo y concentrándose hasta llegar al mar para evaporarse de nuevo a la atmósfera (Huggett, 2007).

Dentro del grupo de los agentes que modifican el paisaje es necesario incluir dos agentes adicionales que no hace parte de las fuerzas climáticas: la gravedad y la actividad antrópica. En primera instancia, la gravedad genera el desprendimiento de material de suelo (previa acción de los agentes climáticos) en procesos de remoción en masa como derrumbes y avalanchas, mientras que la acción antrópica genera procesos de degradación de suelo asociados a cultivos, deforestación y urbanización que modifican la composición del paisaje y su respuesta ante las fuerzas climáticas.

Para el adecuado estudio de las interacciones entre los agentes que modifican el paisaje, se debe prestar especial cuidado a la definición de la escala de trabajo y la unidad de análisis. Existen casos en los cuales se debe reconocer la interacción de procesos a nivel global (actividad tectónica y procesos climatológicos regionales como huracanes o glaciaciones) y existen otros eventos más localizados que tienen como área de afectación zonas más pequeñas (actividad volcánica y estaciones climáticas o tormentas puntuales).

Para el caso particular de este Trabajo Final de Maestría, se analizarán procesos puntuales asociados a sistemas hídricos de cauces naturales con una escala temporal del orden de años y usado como unidad de análisis la “cuenca”, definida como el área donde ingresa el agua desde la atmósfera y desde los almacenamientos subterráneos y que genera unas pérdidas asociadas a la evaporación, flujo superficial e infiltración.

2.2. Factores que alteran las modificaciones del paisaje

El efecto que puede tener sobre el paisaje la acción de los agentes climáticos (agua y viento) es modificado, ya sea disminuido o intensificado, debido a la presencia de otros factores como lo son la vegetación sobre el terreno, la forma o pendiente del terreno (topografía), el tipo de suelo expuesto, y en general el uso de la tierra en este sitio a través del tiempo.

En general, la vegetación sirve como un agente protector del suelo ante los agentes externos y su efectividad en la protección depende de su densidad y continuidad, y en otra gran medida en el tipo de vegetación existente. Se espera que los componentes aéreos (ramas y hojas) de algunas especies arbóreas permitan reducir la energía de las gotas de lluvia y obstaculicen las ráfagas de vientos que puedan circular sobre la superficie, mientras que los pastos, hierbas,

arbustos y los sistemas de raíces cumplen su función mediante la fijación del suelo de manera más cohesiva y protegiendo el efecto de arrastre de material por efecto de la escorrentía. De manera conjunta, la presencia de cualquier tipo de vegetación tiene un efecto benéfico adicional asociado a la evapotranspiración, la cual disminuye la tasa de precipitación que se convierte en escorrentía y le agrega rugosidad al terreno y por consiguiente reduciendo la cantidad y velocidad de flujo superficial respectivamente y, por consiguiente, su capacidad de arrastre. (UNESCO, 2010).

La topografía es una variable con alta incidencia en la intensidad con la cual los factores climáticos alteran el suelo. Factores como el ángulo de inclinación del suelo (pendiente) y distancia recorrida con dicha pendiente determinan la cantidad y velocidad del escurrimiento superficial que se generarán producto de una tormenta dada. Adicionalmente la pendiente tiene un efecto directo en la profundidad que genera un flujo (tanto en la cuenca como en el cauce) y así mismo en el poder de arrastre del mismo sobre el suelo.

Por otro lado, no todos los suelos son iguales en términos de su resistencia a la erosión. La erodabilidad de un suelo en particular está en función de variables como textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad superficial (Institute for Transportation at Iowa State University, 2017) y por lo tanto, la composición del suelo respecto al tipo de materiales predominantes (rocas, arenas o limos) es un criterio decisivo al momento de evaluar su susceptibilidad al arrastre dada la influencia de la cohesividad de las partículas y la capacidad de infiltración del suelo, lo cual disminuye la escorrentía generada. Se puede decir que la presencia de altos porcentajes de arena fina y limos favorecen la erosión del suelo, mientras que la presencia de arcillas y materiales orgánicos (que a su vez favorecen el crecimiento de vegetación) la reducen.

Finalmente, el uso del suelo de manera general representa en gran medida una modificación sobre la capacidad del terreno de reducir el efecto de los agentes climáticos dadas actividades forestales como la tala de bosques y construcción de caminos, actividades agropecuarias como la generación de cultivos con poca vegetación, actividades mineras donde se hace remoción de material vegetal o excavación de surcos sobre los cauces de los ríos y la actividad de urbanización sobre cualquier punto de la cuenca.

2.3. Denudación, erosión, depositación y sedimentos.

En términos geomorfológicos, el desgaste de las rocas derivado de la acción de procesos biológicos, químicos o mecánicos que incluye o no transporte, genera una serie de definiciones como “erosión”, “denudación”, “depositación” y “sedimentos”, los cuales permiten estudiar y entender el proceso de transformación del paisaje en cada una de sus etapas.

En primer lugar, aparecen los términos erosión y denudación, los cuales describen el inicio del proceso transformador del paisaje. La erosión, proveniente del latín *erodere*: “roer”, (Huggett, 2007) (UNESCO, 2009) es la suma de todos los procesos destructivos cuyo material producto del desgaste es recogido y transportado por algún agente actuando solo o en conjunto, ya sea hielo, agua o viento y es depositado posteriormente. Dentro del mismo grupo, la palabra denudación, derivada del latín *denudare* que significa “poner al descubierto”, y es el conjunto de acciones de desgaste y erosión que simultáneamente remueven el material de la superficie. En general, se suele preferir el uso de la palabra erosión para citar ambos procesos y es así como es posible generar una primera clasificación de proceso erosivos a partir de su agente causante, como se muestra en la **Tabla 2-1**

Tabla 2-1: Clasificación de procesos erosivos según su agente detonador

Agente	Tipo de Erosión	Tipo de Proceso Erosivo
Agua	Erosión hídrica	Erosión en cursos de agua fluvial Erosión de salpicadura /Impacto Erosión Laminar Erosión en surcos Erosión en Cárcavas Erosión Costera
Viento	Erosión Eólica	Abrasión / Deflación
Hielo	Erosión Glaciar	Movimiento de glaciares
Gravedad	Erosión por gravedad	Derrumbes / Movimientos en masa Suelos reptantes

Fuente: (UNESCO, 2009)

Por otro lado, la depositación o sedimentación se define como la acumulación del material producto de la erosión posterior a la disminución en la capacidad de transporte del medio o a la acción biológica o química de algún agente que facilite la precipitación de la carga sólida.

La existencia de estos procesos erosivos no suele presentarse de manera aislada en algunas ocasiones puede ser difícil la misma identificación de su presencia. Sin embargo, cualquiera que sea su origen, la erosión genera entonces una modificación del paisaje desprendiendo el material del terreno. Los sedimentos son entonces, el producto de la acción de los agentes erosivos y de la denudación, susceptibles de transporte y acumulación en el sitio de degeneración o en otro lugar (Huggett, 2007).

Los sedimentos son materiales sólidos, coloidales y solutos que requieren de diferentes magnitudes fuerzas para su transporte. Los sólidos incluyen el rango cantos rodados, arena y limos hasta arcillas, los solutos son partículas de menos de 1 nanómetro de diámetro que están altamente dispersos y existen en una solución molecular y los coloides son partículas de material orgánico y mineral en el orden de 1-100nm que normalmente adoptan un estado semi-sólido.

2.4. Formas de erosión hídrica superficial

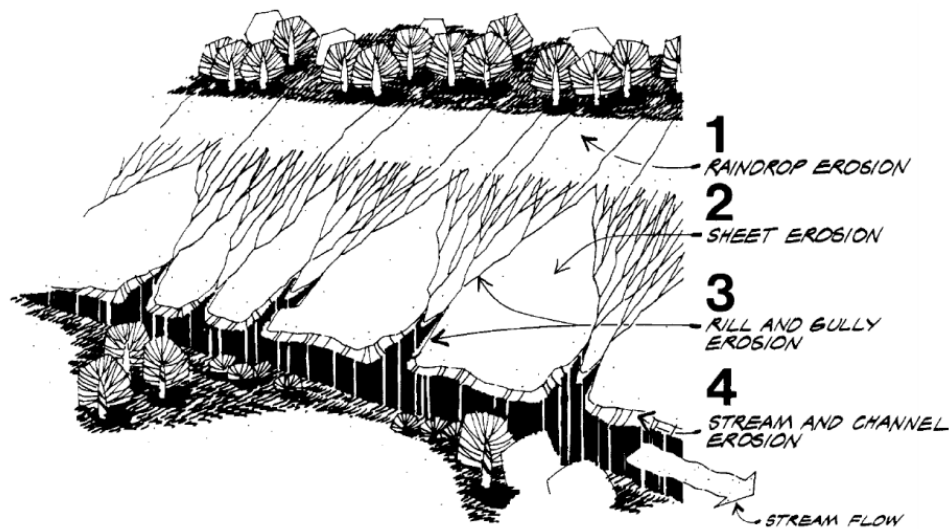
Para efectos de este Trabajo Final de Maestría es de especial interés el primero de los tipos de erosión mencionados en la **Tabla 2-1**, dado que la erosión hídrica superficial representa la forma más completa de degradación del suelo, dando cabida tanto a la degradación física como a la degradación química y biológica y es precisamente dicho poder degradante del suelo lo que coloca a la erosión superficial en el centro de atención dentro de los grupos trabajo tanto en el área del sector agrícola tanto como en la ingeniería fluvial dada la magnitud del impacto que ejerce la erosión de suelos (productivos principalmente) como la generación, transporte y depositación de sedimentos en los cauces respectivamente.

Específicamente hablando, se pueden identificar cuatro diferentes expresiones de erosión hídrica superficial (Institute for Transportation at Iowa State University, 2017)., las cuales se presentan generalmente de manera consecutiva dentro del proceso erosivo del agua sobre una cuenca hidrográfica, de acuerdo a las condiciones específicas de cobertura de suelo en una cuenca dada. En primer lugar, se presenta la *Erosión por salpicadura*, la cual ocurre en el momento mismo del impacto de las gotas de lluvia contra el suelo con energía suficiente para arrastrar y desplazar algunas partículas no consolidadas de suelo con cada golpe.

De manera simultánea se presenta la *Erosión Laminar* al presentarse el escurrimiento del agua de dichas gotas precedentes sobre el suelo y transportando las partículas previamente desprendidas por pequeños canales o irregularidades que abarcan algunos centímetros de profundidad. Este tipo de erosión suele ignorarse debido a la dificultad en su detección antes de concentrarse en flujos más grandes.

Posteriormente se puede hablar de la *Erosión en surcos*, la cual se refiere a aquellas concentraciones de flujo presentadas en irregularidades del terreno más pronunciadas dentro de las cuales se puede alcanzar un volumen y una velocidad suficiente para formar surcos del orden de los 10-50cm de profundidad. Este tipo de erosión normalmente evoluciona dado el escurrimiento constante hasta lograr la formación de *Erosión en barrancos o cárcavas*, los cuales son depresiones mucho más grandes que los surcos y que permiten el desarrollo de flujos que logran la remoción de suelo y pequeñas piedras durante o inmediatamente después de la tormenta.

Figura 2-1: Formas de erosión hídrica superficial



(Institute for Transportation at Iowa State University, 2017)

Es así como se desarrolla todo el proceso de erosión hídrica superficial, favoreciendo el desprendimiento de material particulado de suelo a diferentes escalas hasta generar depresiones de diversos tamaños y eventualmente formar los cauces y ríos que recorren el paisaje.

Es importante mencionar que, dentro de los tipos de erosión mencionados previamente, es necesario revisar la manera de incluir los aportes de erosión por gravedad (derrumbes y avalanchas) que en algunos casos tienen a la acción hídrica como su principal detonante asociado con la saturación de suelos. Para el caso particular de este Trabajo Final de Maestría, no se incluyó un parámetro que identifique la ocurrencia de este tipo de procesos, ya que se pretende estimar un valor promedio de la carga de lavado.

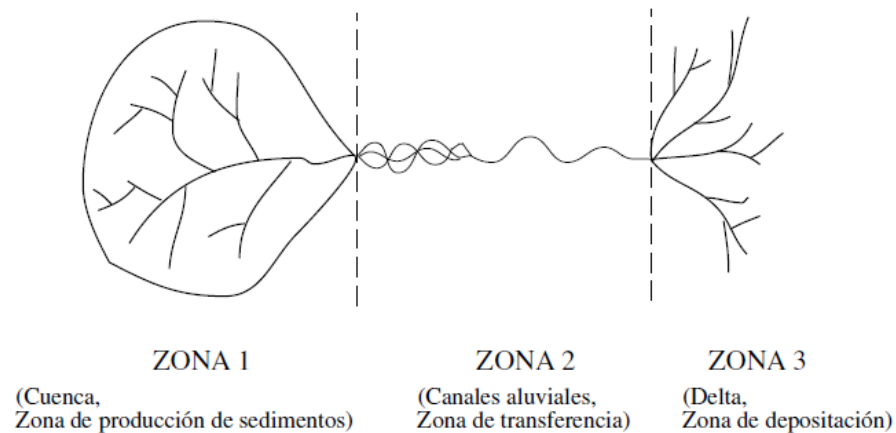
La **Figura 2-2** muestra un esquema de un sistema fluvial idealizado. Este se ha dividido en tres zonas, Zonas 1, 2 y 3, definidas en dirección hacia aguas abajo. La zona de más aguas arriba (Zona 1) corresponde a la cuenca hidrográfica o red de drenaje, y también al área de producción de sedimentos. Este es el área que aporta tanto el agua como los sedimentos al sistema fluvial. En esta zona los sedimentos son producidos y en la misma su almacenamiento es

despreciable. La Zona 2 es la zona de transferencia, donde para un canal estable, la tasa de entrada de sedimentos iguala a la tasa de salida de ellos. La Zona 3 es la zona de depositación de los sedimentos.

Estas tres subdivisiones del sistema fluvial pueden parecer arbitrarias, pues obviamente los sedimentos son almacenados, erosionados y transportados en todas las zonas en mayor o menor medida. Sin embargo, dentro de cada zona uno de dichos procesos es dominante y en el caso ideal, la Zona 1 es la zona de producción de sedimentos y la Zona 2 es la zona de transferencia o donde predomina el transporte de ellos. Eventualmente el sedimento es depositado en la Zona 3 sobre un abanico aluvial, una planicie aluvial, un delta, o en aguas profundas.

La Zona 1 es la de mayor interés para los hidrólogos y geomorfólogos interesados en la evolución de las redes de drenaje. La Zona 2 es la zona de interés principal para los ingenieros hidráulicos y profesionales asociados al manejo de ríos y también para geomorfólogos interesados en la morfología de canales aluviales.

Figura 2-2: Sistema fluvial idealizado



La interpretación de los sistemas fluviales, desde el punto de vista geomorfológico se basa en tres principios:

- La morfología de sistemas fluviales es dinámica. Cambios en dicha morfología debidos a erosión o depositación ocurren durante escalas de tiempo relativamente breves. En muchos casos estos cambios resultan de inestabilidades generadas por condiciones hidrológicas cambiantes o cambios en los patrones de uso del suelo, sin embargo, el cambio normal y progresivo del sistema no debe tomarse equivocadamente por indicios de inestabilidad.
- Los cambios en los sistemas fluviales son usualmente complejos. Las respuestas del sistema cambios en las variables externas pueden ser previstas, pero frecuentemente es imposible predecir en forma precisa su naturaleza.
- Usualmente, un cambio gradual de una variable externa puede producir como respuesta un cambio dramático del sistema fluvial. Uno de los problemas más críticos es determinar las condiciones externas límites que causan dichas modificaciones significativas del sistema. En ocasiones este tipo de respuesta no es causado por cambios en las variables externas sino por cambios graduales de las condiciones internas del sistema.

2.5. Transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos es un fenómeno complejo que responde a dos funciones: una que representa las características de la cuenca y otra las del flujo; una de las funciones indica la cantidad, naturaleza y propiedades físicas de los materiales disponibles para el transporte, y la otra, la capacidad del sistema hidráulico para generar el transporte propiamente dicho.

Las corrientes fluviales forman y ajustan sus propios cauces, la carga de sedimentos a transportar y la capacidad de transporte tienden a alcanzar un equilibrio. Cuando un tramo del río consigue el equilibrio, se considera que ha obtenido su perfil de equilibrio. Sin embargo, puede ser aceptable que existan tramos o sectores de un río que hayan alcanzado su equilibrio, aunque estén separados por tramos que no lo tengan tan definido.

Dependiendo de la energía del flujo, las partículas de fondo adquieren su movilidad dentro del flujo, cambiando las características físicas del lecho y generando formas como dunas, rizaduras o superficies planas, las cuales cambian la rugosidad del fondo y modifican el flujo propiamente dicho. Todos los tipos de movimiento que tienen las partículas se inician cuando las fuerzas de arrastre son mayores que las fuerzas estabilizantes; las fuerzas que tienden a mover o arrastrar los sedimentos son: la presión hidrodinámica, la sustentación y las fuerzas de viscosidad del flujo.

Las fuerzas que ofrecen resistencia a la acción de movimiento están relacionadas con: el tamaño del grano y la distribución de los granos que existen en el fondo, siendo el peso y la fricción. Las fuerzas que resisten el movimiento para los sedimentos de mayor tamaño, tales como gravas y arenas es el peso de la partícula mientras que para los finos son las fuerzas cohesivas. Las partículas gruesas tienen un movimiento en forma individual mientras que los finos tienen un movimiento en grupos. Debido a lo anterior, se puede clasificar los sedimentos de acuerdo a su mecanismo de transporte y su origen así:

Tabla 2-2: Clasificación de los sedimentos

Nombre	Descripción
Según el mecanismo de transporte	
Carga de Lecho	Partículas en contacto con el lecho, las cuales ruedan, se deslizan o saltan.
Carga en suspensión	Partículas en el agua. La tendencia de asentamiento de la partícula es continuamente compensada por la acción difusiva del campo de flujo turbulento.
Según el origen	
Transporte de Material de fondo	Este transporte tiene su origen en el lecho. Esto significa que el transporte es determinado por las condiciones del lecho y del caudal (puede consistir en carga de fondo y en carga de suspensión).
Carga de Lavado	El material es suministrado por fuentes externas (erosión) y no depende directamente de las condiciones locales existentes. Este material usualmente no se encuentra en la composición de lechos aluviales.

Fuente: (Huggett, 2007)

La dinámica de los ríos y su correspondiente transporte de sedimentos ha sido objeto de estudio desde las épocas de Grove Karl Gilbert, geólogo estadounidense que trabajó para el U.S. Geological Survey tras su creación en 1879, (Huggett, 2007) en Estados Unidos donde se comenzaron a discutir los mecanismos de los procesos fluviales en las montañas Henry en Utah, . (Huggett, 2007).

En cuanto al registro de procesos fluviales propiamente dicho y es posible encontrar registros de procesos fluviales mucho más antiguos como en el río Nilo en Egipto, los cuales se remontan hasta la primera dinastía de los faraones alrededor de los años 3100 a.C, algunos de ellos escritos sobre rocas o más recientemente los registros anuales de

sedimentos en el Río Missisipi en Estados Unidos, los cuales contienen información desde los años 1840s. (Huggett, 2007). Sin embargo, los primeros esfuerzos en la medición de procesos dedunacionales o erosivos no se presentan sino hasta la última parte del siglo XIX, creciendo rápidamente mediante la instrumentación de varias cuencas dado que la tecnología comienza a estar disponible para la creación de instrumentos de medición .

2.6. Cómo se estima el transporte/producción de sedimentos

Tras identificar el funcionamiento de los procesos erosivos dentro de una cuenca, se hace relevante concentrar esfuerzos para establecer las relaciones entre las variables que intervienen en dichos procesos de manera que se pueda hacer un monitoreo y una eventual gestión de la cuenca a partir de dicha información sedimentológica.

Se han generado un sin número de relaciones matemáticas para el cálculo de la cantidad de sedimentos generados en una cuenca, teniendo como objeto común la generación de herramientas de predicción de la pérdida de suelos para planes de conservación, proyectos e inventarios de erosión, para la ordenación del recurso, para obtener modelos matemáticos con base física que puedan predecir dónde y cuándo ocurrirán procesos erosivos, ayudando al planificador en la tarea de reducir su impacto, y contar con herramienta para lograr entender los procesos erosivos y sus interacciones, priorizando así futuras investigaciones.

Según (Restrepo & Restrepo, 2005) en los años 70 y 80 se mantenía la idea de que los fenómenos que más aportes de sedimentos generaban a los ríos eran la actividad tectónica y la configuración del relieve, mientras que investigaciones de los años 90 y 00 resaltan la acción combinada de parámetros físicos antes que la acción de un solo factor. En general es posible clasificar los diferentes modelos para la estimación de producción de sedimentos entre cualitativos y cuantitativos (UNESCO, 2009).

Los modelos cualitativos se usan de manera general para el diagnóstico y el reconocimiento y como una base para la toma de decisiones en temas de gestión y ordenamiento territorial. Particularmente se aplican este tipo de modelos en la generación de cartografía, apoyado principalmente en el uso de sistemas de información geográfica para la consolidación y presentación de la información. Por otro lado, existen los modelos cuantitativos en los cuales es posible identificar numéricamente la pérdida de suelo por erosión hídrica y su aplicación puede efectuarse de manera indirecta o directa. Como parte de los modelos cuantitativos, los de aplicación directa están relacionados con actividades experimentales en modelos físicos construidos a escala con la necesidad de instalar instrumentos para la medición de la pérdida de suelo generada en una condición particular de operación, pero estos están por fuera del alcance de este Trabajo Final de Maestría. Mientras que los modelos cuantitativos de aplicación indirecta, incluyen *modelos físicamente basados*, los cuales hacen uso de leyes de conservación de masa y energía, *modelos conceptuales* que partiendo de las leyes físicas incluyen modelos hidrológicos, modelos de erosión y modelos de transporte de sedimentos y los *paramétricos*, los cuales ha sido utilizados más ampliamente y buscan encontrar relaciones entre diferentes parámetros de las cuencas y su correspondiente producción de sedimentos o tasa de erosión.

Se destaca dentro de los modelos cuantitativos paramétricos la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (**USLE**, por su sigla en inglés) desarrollada en los años 70 por Wischmeier y Smith (1978) (UNESCO, 2009), (UNESCO, 2010), que calcula la pérdida de suelo promedio anual en laderas bajo usos y manejos de suelo específicos, siendo una ecuación estocástica, dado por el producto de seis factores independientes. La aplicación de este método tiene limitaciones en cuanto a la variabilidad espacial y temporal de los parámetros y a la confiabilidad de los datos usados para la definición de los mismos.

Estas dificultades generan algunas modificaciones de la ecuación como la propuesta por Williams y Berndt que da origen a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (**MUSLE**) (UNESCO, 2009) incrementando la precisión predictiva y posibilitando su aplicación en eventos reemplazando el factor de erosividad de la lluvia por un factor de escorrentía. Más adelante aparece la revisión del modelo USLE, dando origen a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (**RUSLE**), la cual permite predecir las pérdidas de suelo a largo plazo para un sistema específico de manejo la cual es nuevamente actualizada en 1991 que incluye un nuevo procedimiento para estimar el factor C, a partir de cinco variables, de fácil determinación y estimación.

Siguiendo dentro de los modelos cuantitativos paramétricos, se encuentran también: el modelo de **Djorovic** (UNESCO, 2009) que evalúa la degradación específica en cuencas, considerando como parámetros definitorios, la precipitación, la temperatura, el suelo, el relieve, la vegetación y el grado y tipo de intensidad de los procesos erosivos existentes en la cuenca, y el modelo **Gavrilovic** (UNESCO, 2009), usado en ambientes de cuencas montañosas especialmente en Europa y que estima la cantidad de material producido por la erosión superficial en una cuenca, y que es transportado a la sección del río que la define.

Estos y muchos otros modelos matemáticos han sido implantados en programas computacionales para sistematizar y agilizar la estimación de la producción de sedimentos en una cuenca basados en diferentes tipos de aproximaciones numéricas y conceptos sedimentológicos de (Sommerlot, Nejadhashemi, Woznicki, & Giri, 2013), pero en todos los casos se requieren de parámetros que son de difícil definición y que cuentan con una importancia elevada comprobada en la estimación de las cargas de sedimento. A continuación, se describen de manera somera algunas de estas herramientas computacionales

RUSLE2:

Modelo desarrollado por la USDA (Agricultural Research Service) en el año 2003. Este modelo está basado en la RUSLE, la cual estima el promedio anual de sedimentos generados por unidad de área basado en las propiedades del suelo, la precipitación diaria y la temperatura. (USDA, 2017)

SWAT:

El SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo espacialmente distribuido, físicamente basado desarrollado por la USDA-ARS (United States Department of Agriculture Agricultural Research Service). Este modelo es capaz de simular una lista de componentes que incluyen los hidrológicos, planificación de la tierra, clima, crecimiento de plantas, transporte químico y transporte de nutrientes. Tiene además un módulo particular para el transporte de sedimentos a partir de la MUSLE. (Texas A&M University, 2017)

HIT:

El modelo High Impact Targeting (HIT) fue diseñado por el NRCS (Natural Resources Conservation Services) para identificar las áreas altamente erosivas en una cuenca. Es una herramienta de uso online que usa información geográfica para generar mapas de alto impacto a partir de información de uso del suelo, contenido de arcilla del suelo, elevación erodabilidad del suelo y algunos factores para calcular la cantidad de erosión de suelo a escala de una cuenca. (Michigan State University, 2017).

La **Tabla 2-3** muestra la formulación de los modelos matemáticos anteriormente mencionados.

Tabla 2-3: Modelos para cuantificación de sedimentos usados en ingeniería

MODELO	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	EC.
USLE (UNESCO, 2010) (UNESCO, 2009)	$A = R * K * L * S * C * P$ <p>A = pérdida de suelo promedia anual (t ha-1 año-1) R = erodabilidad de la lluvia y escorrentía (MJ mm ha-1 h-1) K = erodibilidad del suelo (t ha h ha-1 MJ-1 mm-1) L = factor de longitud de vertiente (adimensional) S = factor de gradiente de la vertiente (adimensional) C = factor de uso y manejo del suelo (adimensional) P = factor de prácticas conservacionistas (adimensional)</p>	(2.1)
MUSLE (UNESCO, 2009)	$Y = 11,8 * (V + Qp)^{0.56} * K * C * PE * LD$ <p>Y= Producción de sedimentos desde la cuenca en toneladas. V = Volumen de escorrentía superficial para la cuenca en m3. qp = Caudal pico para la cuenca en m³/s. K, C, Pe y LS = Factores de la USLE, pero calculados como promedios ponderados para el área de la cuenca.</p>	(2.2)
RUSLE (UNESCO, 2009)	$A = R * K * L * S * C * P$ <p>A = pérdida de suelo promedia anual (t ha-1 año-1) R = erodabilidad de la lluvia y escorrentía (MJ mm ha-1 h-1) K = erodibilidad del suelo (t ha h ha-1 MJ-1 mm-1) L = factor de longitud de vertiente (adimensional) S = factor de gradiente de la vertiente (adimensional) C = factor de uso y manejo del suelo (adimensional) P = factor de prácticas conservacionistas (adimensional)</p> <p>Existen expresiones particulares para la estimación de cada parámetro que la diferencia de la ecuación 2.1</p>	(2.3)
Djorovic (UNESCO, 2009) (Niño, 2015)	$W = \pi * T * h * F * \sqrt{Z^3}$ <p>W = Caudal sólido m³/año, como medida de degradación específica de la cuenca. T = Factor de temperatura; t₀ = temperatura media anual de la cuenca en °C. h = Precipitación media anual en mm. F = Superficie de la cuenca en proyección horizontal en km²; Z = Coeficiente erosión que refleja la intensidad y extensión del fenómeno erosivo de una cuenca. Además, valora la influencia de los factores de suelo, vegetación y relieve mediante la siguiente expresión:</p>	(2.4)
Gavrilovic (UNESCO, 2009) (Niño, 2015)	$G = W * R$ <p>Cálculo erosión media anual de sedimento por lluvia y escorrentía superficial (W). Determinación del coeficiente de redepositación o de retención de sedimentos (R).</p>	(2.5)

3. Metodología

Como punto de partida para la determinación de correlaciones entre parámetros hidroclimáticos y físicos y la carga de lavado en algunas subcuencas del río Magdalena, se definen todos los parámetros, criterios y actividades que son utilizados para la construcción de este Trabajo Final de Maestría, con el ánimo de identificar desde el inicio la pertinencia de cada uno de ellos dentro del estudio. Es importante establecer las razones por las cuales se incluyen o eliminan estaciones, parámetros o conceptos, de manera tal que se tenga un horizonte claro para el cumplimiento de los objetivos planteados.

En primer lugar, se definieron cuatro (4) grandes etapas que agrupan las diferentes actividades requeridas para la elaboración del estudio y que se ilustran de manera consecutiva en el transcurso del documento, tal y como fueron ejecutadas. En los numerales siguientes se muestran los aspectos y parámetros de interés en la caracterización física y sedimentológica del área de estudio (ver 3.1), se describe el proceso de adquisición y origen de la información disponible (Ver 3.2), se explica la metodología utilizada para la selección del área de estudio dentro de la cuenca del río Magdalena asociada a la disponibilidad de información confiable (es decir, posterior a la depuración de los registros) (ver 3.3), se describen los criterios utilizados para la caracterización de las subcuencas desde cada uno de los aspectos identificados como relevantes (ver 3.4), se describe la construcción del modelo estadístico de regresiones múltiples con los datos obtenidos de la caracterización (ver 3.5) y finalmente se describe el proceso de análisis y comparación de resultados (ver 3.6)

A continuación, se describen cada una de las etapas definidas y se enuncian las actividades relevantes que se realizaron en cada una de ellas:

- **ETAPA I - DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO A PARTIR DE INFORMACIÓN SEDIMENTOLÓGICA**

En esta primera etapa se delimita el área específica de interés dentro de la cuenca del río Magdalena, teniendo en cuenta la disponibilidad de información sedimentológica. Se revisan las estaciones existentes y se adquiere toda la información registrada en cada punto. Dado que las mediciones de caudal sólido no tienen una amplia cobertura en nuestro país o cuentan con deficiencias que limitan el uso de estos registros, se analizan estas deficiencias y se depuran tanto como sea posible la información tanto de caudales líquidos como sólidos. Tras el análisis de datos existentes, se definen las estaciones que efectivamente son incluidas en el análisis y se da el punto de partida para la extracción de los demás datos morfológicos, morfométricos, hidrológicos, geológicos y de cobertura del suelo de las subcuencas seleccionadas.

- **ETAPA II - CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

En esta etapa se analizan las características sedimentológicas, morfométricas y morfológicas, cobertura del suelo y geología para ingeniería e hidrológicas de las subcuencas definidas en la etapa anterior, con la ayuda de información cartográfica disponible en entidades públicas.

▪ **ETAPA III - ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PARÁMETROS**

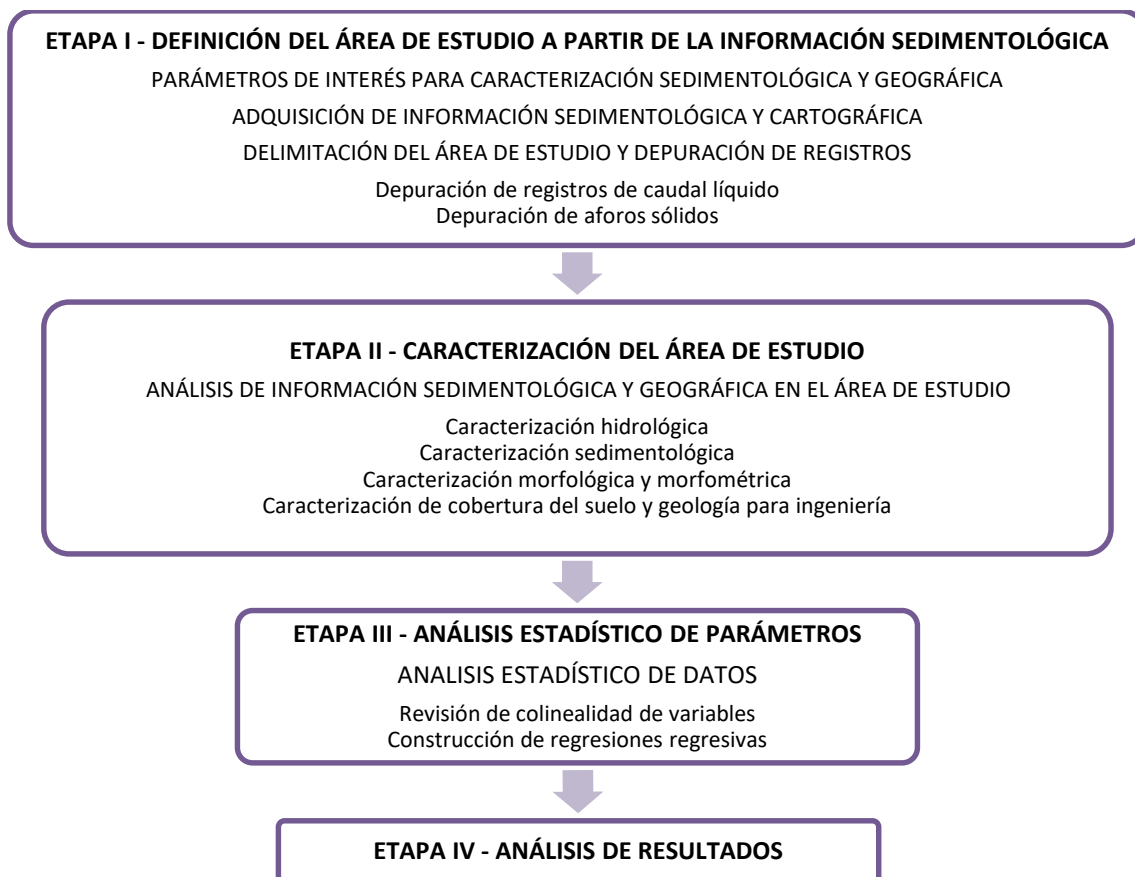
Posteriormente se toman los valores de todas las variables estudiadas (ver 3.1) para cada una de las subcuencas y se buscan relaciones estadísticas mediante regresiones múltiples que permitan estimar, con el mejor grado de confianza posible, la producción de sedimentos promedio anual de la subcuenca. Se definen los estadísticos a calcular para la aceptación o rechazo de las variables y las regresiones, límites de aceptación de mismos y los coeficientes de determinación (R^2 y R^2 Ajustado), los cuales indican el grado de confianza obtenido en cada iteración de las regresiones múltiples. Este análisis se realiza con la ayuda del programa R, el cual es de libre acceso y cuenta con herramientas de análisis estadístico.

▪ **ETAPA IV - ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Con las expresiones obtenidas de la etapa anterior, se analizan y comparan los resultados obtenidos con los registrados para estudios similares para establecer si existe algún tipo de similitud entre ellas.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, se presenta a continuación un diagrama de flujo de las diferentes etapas del proyecto con sus respectivas actividades de análisis de información.

Figura 3-1: Estructuración metodológica del trabajo



3.1. Aspectos y Parámetros de interés para caracterización de subcuencas

Resulta de vital importancia iniciar el proceso de construcción de Trabajo Final de Maestría definiendo los aspectos y cuales parámetros que se usaron como una medida de las diferentes características de las subcuencas en los aspectos sedimentológicos, morfométricos y morfológicos, cobertura del suelo y geología para ingeniería e hidrológicos.

Dentro de la literatura es posible encontrar una gran variedad de índices y coeficientes que relacionan de manera directa aspectos del relieve de la cuenca con parámetros de cobertura de suelo y la correspondiente producción de sedimentos en el cauce, y por tal motivo se usan textos como (Restrepo & Restrepo, 2005), (Niño, 2015), (López, Martínez, & Fera, 2014) (Chow, Maidment, & Mays, 1994) (Cubillos & Forero, 2015) de referencia para seleccionar parámetros que hayan probado ser representativos para estimados similares en otras cuencas. De esta manera se reduce la cantidad de variables dentro del análisis de correlaciones, partiendo de resultados previamente comprobados.

Adicionalmente a los aspectos previamente incluidos en la bibliografía consultada, se incluyeron conceptos nuevos que se considera pueden aportar criterios importantes para la construcción de las correlaciones, buscando dar un valor agregado al análisis de datos y expandiendo un poco los conceptos de cobertura y uso del suelo con un enfoque más hacia la intervención antrópica del territorio.

Es así como a continuación se definen y describen tanto los aspectos como los parámetros a utilizar y en la **Tabla 3-1** se relacionan uno a uno los parámetros utilizados para la construcción de las correlaciones.

- **Aspectos sedimentológicos:**

Este grupo asocia los parámetros que dan una medida de la cantidad de sedimento de lavado producido dentro de una cuenca debido a la interacción de varias condiciones puntuales y regionales. Los parámetros sedimentológicos son el inicio y fin de este trabajo y su estimación requirió de la mayor atención y dedicación dentro del proceso de selección y depuración de datos que son medidos directamente en campo y que pueden tener datos erróneos que debe ser descartados de los análisis.

- **Aspectos Hidrológicos:**

Este grupo asocia los parámetros relacionados con el potencial erosivo de la lluvia o con la generación de caudal como respuesta al proceso lluvia escurrimiento dentro de la cuenca hidrográfica. El caudal producido por una cuenca está relacionado con la cobertura del suelo, por lo que es importante establecer cuáles de los parámetros o variables identificados son realmente "independientes" entre sí o cual representación de dichas variables es la más conveniente para la interpretación regional del proceso.

- **Aspectos Morfométricos y Morfológicos:**

En general se conoce a la "Morfometría" como a la descripción de las características físicas de una cuenca hidrográfica definidas por relaciones geométricas entre parámetros altimétricos y planimétricos, los cuales pueden ser medidos directamente en campo o indirectamente mediante la información cartográfica y geográfica disponible. Los avances tecnológicos en los sistemas de información geográfica, facilidades en la adquisición de información espacial del territorio (cartografía, fotografías aéreas, imágenes satelitales, modelos digitales del terreno) permiten acelerar el procesamiento de este tipo de información y acelerar los análisis morfométricos.

Adicionalmente se revisan algunos parámetros morfológicos que representan características físicas de una cuenca definidas por relaciones geométricas entre parámetros relacionados con el drenaje dentro de la misma. Son parámetros que describen la red hidrográfica dentro de la cuenca y dan indicios de su comportamiento hidráulico.

▪ **Aspectos de cobertura del suelo y geología para ingeniería:**

Para este aspecto en especial se propone un concepto ligeramente diferente al empleado en los trabajos previos consultados, ya que se busca generar un acercamiento más evidente al impacto generado por las intervenciones del hombre en los usos del suelo para asignarles una medida de su vulnerabilidad asociada a cada cobertura del mismo.

Es así como se realiza una calificación de acuerdo a la categoría de cobertura de suelo encontrada en la cartografía consultada, dándole un peso variable a cada categoría y se construye así un único índice que reúna la incidencia de los diferentes tipos de cobertura como una medida de la producción de sedimentos. A continuación, se discriminan dentro de estas categorías definidas como:

- Cobertura del suelo: Es una clasificación de las áreas cubiertas por determinada cobertura vegetal natural dentro de una misma subcuenca. Parte de la cobertura natural del suelo todos los elementos y áreas que son resultado de una intervención humana dentro del terreno natural.
- Unidades de geología para ingeniería: Son definidas como características físicas del terreno asociadas a la composición física y bioquímica del subsuelo dentro de la cuenca hidrográfica, como representaciones de la susceptibilidad de producir sedimento.

Estas definiciones de Cobertura del Suelo y Unidades de geología para ingeniería, y su correspondiente asignación de valor se presentan con mayor profundidad en el capítulo 3.4.4.

En la **Tabla 3-1** se resumen los parámetros elegidos para este Trabajo Final de Maestría con sus correspondientes unidades y la nomenclatura utilizada a lo largo de los siguientes capítulos.

Tabla 3-1: Parámetros a usar en la caracterización de las subcuencas

Parámetros sedimentológicos (SED)		
Parámetro	Unidad	Sigla
Transporte sólido medio anual – Carga de lavado	Ton/Año	T ₁
Transporte sólido medio anual - Rendimiento sólido	Ton/Año-km ²	T ₂
Parámetros Hidrológicos (HID)		
Precipitación media anual multianual	mm/año	X ₁
Caudal medio multianual	m ³	X ₂
Rendimiento hídrico / Escorrentía específica	m ³ / km ²	X ₃
Parámetros Morfométricos y Morfológicos (MOR)		
Área de la cuenca	km ²	X ₄
Desnivel altitudinal	m	X ₅
Elevación media	msnm	X ₆
Ancho promedio de la cuenca	km ²	X ₇
Coefficiente de compacidad	---	X ₈
Pendiente promedio de la ladera	%	X ₉
Integral curva hipsométrica	---	X ₁₀
Pendiente promedio del cauce principal	%	X ₁₁
Relación de relieve	---	X ₁₂
Factor de entrega	---	X ₁₃
Parámetros de cobertura natural, uso antrópico del suelo y geología para ingeniería (CUG)		
Factor Susceptibilidad de erosión de cobertura de suelo	---	X ₁₄
Factor Susceptibilidad de erosión de material geológico	---	X ₁₅

(Fuente: Elaboración propia)

3.2. Consulta y adquisición de información sedimentológica y geográfica

Se realizó una etapa inicial de consulta y adquisición sedimentológica y geográfica de información en las distintas entidades públicas de carácter nacional en busca de cartografía, informes y datos medidos en todos los ámbitos de interés mencionados en el capítulo 3.1 con el ánimo de delimitar un área de estudio dentro de la cuenca del río Magdalena que cuente con información morfométrica y morfológica; cobertura del suelo y geología para ingeniería, hidrológica y sedimentológica suficiente para estimar la caracterización de la producción de carga de lavado en un cauce específico.

La búsqueda de la información se concentra en la disponibilidad de datos relacionados con la cuenca del río Magdalena, tanto en su parte alta como en su parte media, ya que su importancia dentro de la hidrografía nacional colombiana mantiene activas un buen número de estaciones de medición de caudal líquido y sólido y, además, existe una cobertura

En el capítulo 4.1.1 se amplía la información sobre la cuenca. A continuación, se relacionan las fuentes de información consultadas y la información disponible.

- **IDEAM- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES**: Es el centro de información más consultado ya que se adquiere toda la información sedimentológica e hidrológica de la región andina enfocada específicamente en la cuenca del río Magdalena y sus principales afluentes en formatos de datos (para las series levantadas en campo) y cartografía digital a nivel regional (IDEAM, 2017).
- **IGAC – INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI**: Dentro de su portal de internet existen varios servicios de WMS o Web Map Services que permiten visualizar un gran número de datos cartográficos a escalas 100.000 y 500.000. (IGAC, 2017)
- **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**: Dentro de su portal de internet existen varios servicios de WMS o Web Map Services que permiten visualizar un gran número de datos cartográficos a escalas 100.000 y 500.000. (SGC, 2017)
- **SIGOT - SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA PLANEACIÓN Y EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL**: Es un portal de internet administrado por el IGAC dentro del cual es posible consultar y descargar información geográfica de carácter nacional y departamental de diferentes índoles con sus respectivos metadatos. La descarga puede hacerse a formato shape y kml, según lo requerido. (SIG-OT, 2017)
- **SICAT – SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA EL INVENTARIO, CATALOGACIÓN, VALORACION Y ADMINISTRACIÓN DE LA INFORMACIÓN TÉCNICO CIENTÍFICA**: Consulta de los planos de UGI generados de acuerdo a la guía metodológica del SGC (Servicio Geológico Colombiano, 2015). (SICAT, 2017)
- **PORTAL ASTERGDDEM**: Se descarga y consolidan los modelos digitales de elevación del territorio nacional como resoluciones de 90x90 y 30x30, los cuales se encuentran desagregados en 4 segmentos del territorio nacional. Dado que la cuenca del río Magdalena es la más grande dentro del país, se debió consolidar el modelo digital completo y luego someterlo a cortes específicos para su manipulación. (GISAT, 2017)

En general se prefirió el uso de información que sea de libre consulta y que se encuentre disponible en medios electrónicos, bajo la premisa de promover una manipulación de la información oficial producida por las entidades estatales y acercar a los consultores y académicos del medio al uso de estas nuevas plataformas de información. Sin embargo, se obtuvo parte de la información relacionada con geología para ingeniería de fuentes directas de los autores.

3.3. Delimitación del área de estudio y depuración de registros

Dentro de los siguientes numerales se describen las diferentes actividades llevadas a cabo para la delimitación del área de estudio con base en la información disponible que se utilizó en el presente Trabajo Final de Maestría y su localización dentro de la cuenca del río Magdalena.

3.3.1. Delimitación de área de estudio en función de datos sedimentológicos

El punto de partida de todos los análisis que componen este Trabajo Final de Maestría se encuentra en la disponibilidad de registros sedimentológicos derivados de las mediciones directas realizadas por el IDEAM en las subcuencas del río Magdalena.

Dichos datos están ligados con la localización de las estaciones, su operatividad y la longitud de sus registros y son precisamente estos factores los que son usados para hacer una delimitación secundaria de las subcuencas que serán incluidas dentro del análisis. En cuanto a su localización, se consulta la totalidad de las estaciones limnimétricas y limnigráficas reportadas en el catálogo nacional de estaciones del IDEAM (IDEAM, 2017) que se encuentren sobre la corriente principal del río Magdalena y sus afluentes, buscando en estas últimas siempre las estaciones que se encuentren más cerca a la desembocadura en el río Magdalena.

Algunas de estas estaciones se encuentran fuera de servicio desde hace algunos años, pero se solicita al IDEAM de igual manera su registro sedimentológico para tener la mayor cantidad de datos en un análisis inicial. En el capítulo 4.1 se detallan las estaciones utilizadas y su información. La disponibilidad de registros sedimentológicos determina la necesidad de incluir estaciones con algunas particularidades en sus registros de caudal que requieren que se implementen algunos procedimientos adicionales para la correcta utilización de los mismos, lo cual se detalla en el capítulo 3.4.1.

Como parte de este documento se incluyen los anexos A y B, los cuales relacionan los archivos originales de datos que fueron obtenidos para las estaciones utilizadas dentro de este Trabajo Final de Maestría

3.3.2. Depuración de registros de caudal líquido

Como parte del proceso de selección de información, fue necesario hacer una depuración de la información que fue extraída de los registros hidrosedimentológicos con el ánimo de establecer la confiabilidad en la misma y eliminar los datos que parezcan atípicos o errores en su medición o transcripción, entre otros.

Con esta intención se evaluaron los siguientes criterios iniciales de aceptación de años dentro de registro de caudal medio diario (Qmd) en la totalidad de datos medidos de una misma estación los cuales se definen en función de la cantidad de datos registrados por año. En el capítulo 4.1.3 se muestra la aplicación de esta metodología.

- **Aceptación directa -Años con registros superiores al 95% de los datos:** En primera instancia se incluyeron en el análisis todos los años de todas las estaciones que cuenten con una cantidad de datos de caudal medio diario (Qmd) superior al 95% del total de días del año (>347 días de registro de caudal).
- **ceptación indirecta: Inclusión de años con registros entre el 70% y 95% de los datos:** En segunda instancia se analizó un grupo de años que cuentan con información entre un 70% y 95% del total del registro anual de caudal medio diario (Qmd), los cuales se buscaron fueran incluidos dentro de la base de datos del estudio siempre y cuando este conjunto de registros sea representativo de las condiciones hidrológicas del cauce. Para tal fin se propusieron dos criterios adicionales así:

Indirecta A: Inclusión de años con meses incompletos en el registro: Este criterio estimó el Q_{ma} (Caudal medio anual) de los años con meses de información incompleta y revisó si éste cae dentro el intervalo de confianza de los años aceptados así:

- Q_{ma} (Caudal medio anual) y desviación estándar de años con registro completo
- Calculo del Intervalo de confianza ($Q_{pma} - \sigma$, $Q_{pma} + \sigma$)
- Q_{ma} (Caudal medio anual) y desviación estándar de años con registro incompleto
- Verificación de representatividad de años incompletos con respecto a años completos.

Indirecta B: Inclusión de años con meses faltantes en el registro: En este caso se prefiere estimar el Q_{mm} (caudal medio mensual) de los meses sin información a partir de correlaciones entre los valores de Q_{mm} (caudal medio mensual) para el mismo año en la estación con mejor ajuste estadístico, lo que representaría una similitud entre el comportamiento mensual de los caudales entre esas dos estaciones (datos concurrentes).

- Q_{mm} (caudal medio mensual) para cada en cada estación
- Correlación de Q_{mm} (caudal medio mensual) entre la estación a completar y las demás
- Revisión de ecuación de ajuste para selección de estación base
- Estimar Q_{mm} (caudal medio mensual) de la estación a completar con la estación base.

- **Eliminación directa – Años con registros inferiores al 70% de los datos:** Finalmente se estableció que todos los años que cuenten con un registro de datos por año inferior al 70% del total no serían incluidos dentro del análisis (<255 días de registro de caudal).

3.3.3. Depuración de aforos sólidos existentes

Siguiendo con el proceso de depuración de información, se definió otra serie de criterios de selección de información, esta vez relacionados con la calidad de la información sedimentológica consignada en los resúmenes de aforos sólidos realizados en diferentes años para cada estación. A continuación, se define cada criterio aplicado:

- **Análisis de tendencia de Ql con Qs de aforos en cada estación:** Para verificar la congruencia general entre las mediciones de Ql (caudal líquido) y Qs (caudal sólido) entre los diferentes aforos de una misma estación, se construyó la gráfica de tendencia potencial en formato log-log entre ambos parámetros reportados en el aforo para cada una de las estaciones, se identificaron los puntos de aforos que se encontraran por fuera del intervalo de confianza establecido y se seleccionaron como “aforo Anómalo” para revisar un criterio adicional antes de su exclusión definitiva de la base de datos.
- **Análisis de correspondencia de Qla (caudal líquido del aforo):** Para los aforos que no se encontraban dentro de la tendencia, se les revisó particularmente la correspondencia entre el Qla (caudal líquido del aforo) contra los datos registrados para el Qmd (Caudal medio diario) de la estación alrededor de la fecha del aforo, comprobando si la diferencia entre cada parámetro era de más de 15%.

Si la diferencia es mayor, se mantiene la categoría de “aforo Anómalo” y se eliminó, pero si la diferencia es menor se cambia el valor de Ql (caudal líquido) por el estimado en cada criterio y se vuelve a incluir en la gráfica de tendencia. Si a pesar del cambio se mantiene fuera del intervalo de confianza, se elimina completamente.

- **Comprobación de Qla (caudal líquido del aforo) registrado en aforos sólidos con Qmd3r (caudal medio diario del registro) de 3 días sucesivos alrededor de la fecha:** En caso de que se obtuviera una diferencia mayor al 15% se compara entonces el **Qla (caudal líquido del aforo)** reportado en el aforo con el **Qmd3r (caudal medio diario del registro)** calculado con el día antes y el día después del día del aforo. Si la diferencia entre el Ql (caudal líquido) reportado en el aforo con el Qpd (Caudal promedio diario) era menor al 60% se asume válido y se intercambian para la comprobación de la tendencia.

En el capítulo 4.1.3 se muestra más detalladamente la aplicación de esta metodología con los correspondientes resultados en cada uno de los casos. Como parte de este documento se incluyen los anexos B, C, D y E, que recopilan la información completa de cada proceso.

3.4. Análisis de información hidrológica y geográfica

Luego de contar con la información sedimentológica ya seleccionada y depurada, se requiere del correspondiente análisis de la información hidrológica y geográfica para obtener los datos requeridos en el modelo estadístico.

En primera instancia se realiza la caracterización hidrológica a partir de la información de caudales sólidos y caudales líquidos obtenidos en el IDEAM mediante procesadores de datos convencionales (tipo Excel) que permiten manipular, operar y graficar los diferentes tipos de datos para así poder identificar tendencias en el comportamiento de cada una de las series en cada una de las estaciones seleccionadas. La presentación de estos análisis se realiza dentro de las mismas hojas de cálculo y procesadores de texto para su consolidación dentro documento final.

En los capítulos 3.4.1 y 3.4.2 se detallan los respectivos procedimientos.

La información restante que se obtiene para la definición de los parámetros enunciados en el capítulo 3.1 debe ser procesada mediante herramientas de análisis geográfico que son una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión. El sistema permite separar la información, ya sea en formatos de vectores o raster, en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podrían obtenerse de otra forma.

La visualización espacial de la información resulta clave en un análisis como el propuesto dentro de este trabajo ya que se requiere revisar la coincidencia de criterios dentro de una misma unidad de análisis (las subcuencas para este caso). Sin embargo, es importante recordar que estos análisis geográficos son y su confiabilidad son altamente dependientes de la escala de todas las capas de información, por lo que su homogeneidad es relevante al momento de los análisis.

Es así como se usa el sistema de información geográfico de libre acceso QGIS Versión 2.18 que permite la visualización y manipulación de la toda la información cartográfica obtenida en los recursos mencionados en el capítulo 3.2 y la caracterización de los diferentes tipos de datos, bajo los criterios que se detallaran en los capítulos a continuación.

3.4.1. Caracterización hidrológica

Para poder obtener los diferentes parámetros de interés, fue necesario generar algunos procedimientos preliminares que permitieron homogenizar la información de entrada y contar con series de datos que puedan ser comparadas de manera eficiente y coherente.

En primera instancia se hizo uso de las Curvas de duración de caudales líquidos (CDQL) de cada estación incluida en el área de estudio como se mencionó en el capítulo 3.4.2 como punto de partida para el análisis sedimentológico. Sin embargo, es necesario hacer un proceso intermedio para la construcción de dichas curvas, dada la disparidad de longitudes de registros que existen en las estaciones disponibles. Es así como se aplicó el procedimiento denominado *Extensión de curvas de duración a un periodo base*, también utilizado en el caso del río Cauca (Niño, 2015) el cual permite comprar los datos de caudal de cada día de registro existente en cada estación con los correspondientes datos de la estación con el registro más largo (llamada Estación índice). Adicional a la longitud del registro, se buscó la estación cuyos parámetros relacionados en los aforos sea más estable en el tiempo, y se siguió el siguiente procedimiento.

- Elaborar la Curva de duración de caudales líquidos diarios (CDQL) para la estación base con la totalidad de sus registros, identificando el caudal correspondiente para cada porcentaje de ocurrencia en la estación base como QBp.
- Elaborar la Curva de duración de caudales líquidos diarios (CDQL) para la estación cuyo registro debe ser extendido a partir de su información propia, pero haciendo uso únicamente de los registros concurrentes con la estación base, usando una nomenclatura de QCpc para los caudales de la estación corta de los datos concurrentes para un porcentaje
- Elaborar la Curva de duración de caudales líquidos diarios (CDQL) para la estación base con los registros concurrentes con la estación corta exclusivamente, denominando QBpc al caudal de la estación base correspondiente al porcentaje del dato concurrente con la estación corta.
- Elaborar la Curva de caudal de la estación corta extendida (QCpe) aplicando una relación de proporción básica entre los valores previamente estimados así:

$$QCpe = \left(\frac{QCpc}{QBpc} \right) * QBp \quad (3.1)$$

Luego de terminar este proceso, se cuenta entonces con las curvas de duración de caudales extendidas y homogéneas para cada uno de los sitios de medición tanto en el cauce del río Magdalena como en los afluentes que hacen parte de la cuenca de estudio. En el capítulo 4.2.1 se profundizan y se presentan los resultados de este proceso.

Se define un proceso particular adicional para este caso en el cual una de las estaciones disponibles dentro del área de estudio no cuenta con registros diarios de caudal, pero si cuenta con registros mensuales para la totalidad del registro. Es así como se requiere hacer un proceso adicional que permita construir la curva de duración de caudales diarios a partir de la curva de duración de caudales medios. A continuación, se presenta el correspondiente proceso:

- Elaborar la Curva de duración de caudales líquidos diarios (CDQI) para la estación base con la totalidad de sus registros, identificando el caudal correspondiente para cada porcentaje de ocurrencia en la estación base como QBpd
- Elaborar la Curva de duración de caudales líquidos medios (QDQIm) para la estación base con los datos concurrentes con la estación que solo reporta caudales medios – estación objetivo - para cada porcentaje de ocurrencia en la estación base como QBpm.
- Elaborar la Curva de duración de caudales líquidos medios (QDQIm) de la estación objetivo con la totalidad de los registros disponibles correspondiente para cada porcentaje de ocurrencia en la estación base como QMpm.
- Elaborar la Curva de duración de caudales líquidos diarios (CDQI) para la estación objetivo para cada porcentaje de ocurrencia en la estación base como QMpd mediante la aplicación de una proporción básica entre los valores previamente encontrados así:

$$QMdp = \left(\frac{QMpm}{QBpm} \right) * QBpd \quad (3.2)$$

Este procedimiento permite entonces incluir la estación particular dentro de los registros y aprovechar su información sedimentológica. Adicionalmente se usa otro análisis sobre la información de caudales líquidos que implica la construcción de las series de caudal medio multianual para cada una de las estaciones, estimado como el caudal promedio de cada año a partir del caudal promedio de cada uno los meses, las cuales permiten comparar el comportamiento del caudal medido mes a mes para la totalidad del registro. Los resultados obtenidos se muestran en el capítulo 4.2.1.

3.4.2. Caracterización Sedimentológica

El primer proceso que corresponde propiamente a la caracterización de la cuenca desde el aspecto sedimentológico, basado en el análisis sedimentológico tradicional, es el análisis de los registros de caudales líquidos y caudales sólidos registrados en cada una de las estaciones seleccionadas como parte del área de estudio con el objetivo de encontrar el área bajo la curva de Duración de Carga Sólida Medida (Cubillos & Forero, 2015) , de la misma manera como se aplicó en el río Cauca (Niño, 2015) , y se describe a continuación:

- Construir Curvas de duración de caudales líquidos (CDQI): Curva de frecuencia acumulada obtenida de los registros de caudal medio diario medidos en cada estación que usa los valores medidos de caudal medio diarios durante el periodo de registro para encontrar la relación de frecuencia de los datos medidos. En el capítulo 4.2 se detalla su construcción.
- Construir Curvas de Calibración Caudales sólidos medidos (CCalQsm): Este procedimiento usa regresiones potenciales para encontrar una expresión que relacione el caudal líquido que circula por el cauce en un momento dado con la carga sólida medida.

- Construir Curvas de duración de caudales sólidos (CDQS): Curva de frecuencia acumulada obtenida de los registros de caudal medio diario medidos en cada estación, obtenida con base en la CCalQsm.

Luego de aplicar esas técnicas es posible estimar entonces el (T_{sma}) Transporte sólido Medio Anual (Ton/Año) como el área bajo la CDQS y el Rendimiento sólido R_s (Ton/Año-km²) como el T_{sma} dividido por el área total de la cuenca. Estos dos parámetros son los que se busca encontrar con las correlaciones planteadas en este Trabajo Final de Maestría. Este procedimiento se efectuó para cada una de las subcuencas que conforman el área de estudio y se obtuvieron tantas curvas y datos como subcuencas. Estos análisis se documentan como parte del capítulo 4.2

3.4.3. Caracterización morfológica y morfométrica

Siguiendo con la caracterización, se definen los parámetros morfológicos y morfométricos que dan una medida de las características físicas, topográficas e hidrográficas de las cuencas y que se consideran relevantes de acuerdo a los trabajos realizados previamente en el tema.

Partiendo de la premisa principal de este Trabajo Final de Maestría la cual identifica una clara falta de información primaria en los proyectos de ingeniería asociados a los cauces y su producción de sedimentos, se plantea el uso del Modelo Digital del Terreno (MDT) obtenido del portal (GISAT, 2017) con una resolución espacial de 90x90, lo que significa que cada celda de modelo topográfico representa un área de 90mx90m, para medir así los diferentes parámetros que se consideran relevantes.

Este proceso se realizaba de manera manual con ayuda de planchas topográficas impresas hasta hace unos años, pero la implementación de los sistemas de información geográfica permite reducir los tiempos de procesamiento de estas actividades dada la cantidad de herramientas de análisis espacial que ahora se encuentran disponibles dentro de estos programas. Es así como es posible programar operaciones entre capas de información vectorial o tipo raster que permiten la estimación de los parámetros físicos de interés.

Es importante resaltar que todos los resultados obtenidos de los procesamientos de información geográfica dependen ampliamente de la resolución y confiabilidad de los datos originales, por lo que se debe tener siempre presente una validación inicial de la información disponible en aras de minimizar las incertidumbres o errores asociados a esto. Por eso, se aplicaron técnicas de verificación de datos atípicos en las elevaciones, píxeles vacíos y procesos de llenado rápido de datos mediante interpolación de elevaciones en puntos específicos del MDT.

Como parte del análisis físico de las subcuencas, se utiliza el sistema de información geográfica QGIS para extraer la información necesaria para construir las curvas hipsométricas de cada una de ellas, haciendo la diferenciación del porcentaje de área de cada una de ellas que se encuentra sobre una determinada cota sobre el nivel del mar. Al expresarlas en porcentaje, es posible comparar las curvas de diferentes cuencas y analizar las repercusiones de estas. Cuando las curvas encontradas se alejan del comportamiento reportado en la literatura, se puede explicar la presencia de algún tipo de control tectónico o litológico. El valor del área calculada bajo las curvas hipsométricas es indicativo del grado de evolución de la subcuenca y determina si la cuenca es geológicamente joven o senil.

En el capítulo 4.2.3 se presentan las curvas hipsométricas obtenidas por estas metodologías para cada una de las subcuencas de interés.

3.4.4. Caracterización de cobertura del suelo y geología para ingeniería

Como es bien sabido, la cobertura (entendida como una descripción del tipo de material expuesto en la superficie terrestre) y uso del suelo (entendido como la clasificación de coberturas asociadas a actividades antrópicas como vías o cultivos) es un factor determinante en la cantidad de sedimento que es producido por una cuenca ya que esta cobertura define el grado de exposición de un suelo o roca a la acción erosiva del agua y el aire. Es por esto que resulta importante contar con información de los diferentes tipos de cobertura del suelo dentro del área de estudio para así acercarse a identificar ese grado de exposición.

Es por eso que se buscan dos fuentes de información que superpuestas pueden dar información un poco más completa sobre la medida de la producción de sedimento para el caso particular de unas subcuencas del río Magdalena. En primer lugar, se usa el mapa de cobertura del suelo elaborado por el IDEAM con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia en (IDEAM, IGAC & CORMAGDALENA, 2008) construido para consolidar una descripción de la cobertura del suelo en Colombia, consolidando una nomenclatura unificada de tipos de suelos que comparte criterios con la nomenclatura usada en Europa.

Por otro lado, se usa la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (Servicio Geológico Colombiano, 2015) la cual establece algunos criterios técnico asociadas a la conformación litológica del terreno para analizar la posibilidad de que se generen movimientos en masa, agrupando criterios hidrológicos, geotécnicos y de ingeniería para poder calcular la vulnerabilidad del terreno que son de utilidad en este caso.

Estas dos fuentes de información son procesadas según sea el caso para tenerlas en formato vectorial o raster e incorporarlas dentro del sistema de información geográfica y así poder hacer análisis espaciales con los datos que se le asignen a cada entidad. Pero para tal fin, es necesario asignarle un valor numérico a las clasificaciones de tipo de suelo que se usan en cada tipo de cartografía y ejecutar un procedimiento que permita obtener un valor consolidado de cada tipo para cada subcuenca.

Es así como se definieron para efectos de este Trabajo Final de Maestría un Coeficiente de Susceptibilidad de Erosión de Cobertura de Suelo (C_{es}) y un Coeficiente de Susceptibilidad de Erosión de Material Geológico (C_{eg}) correspondientes a un área determinada dentro de la subcuenca analizada y que se definen en la **Tabla 3-2** y la **Tabla 3-3** que finalmente serán agrupados como un único factor ponderado por área, en el cual se establece cual es el Factor de Susceptibilidad de erosión de cobertura de suelo (K_{es}) y el Factor de Susceptibilidad de erosión de material geológico (K_{eg}) para la totalidad de la subcuenca, definidos como:

$$K_{es} = \frac{C_{eg1}A_1 + C_{eg2}A_2 + \dots + C_{egn}A_n}{\sum_{n=1}^i A_n} \quad (3.3)$$

$$K_{eg} = \frac{C_{es1}A_1 + C_{es2}A_2 + \dots + C_{esn}A_n}{\sum_{n=1}^i A_n} \quad (3.4)$$

Con las expresiones anteriores se logra entonces consolidar en un solo número que oscilará entre 0-1 la susceptibilidad de erosión de los materiales superficiales en cada subcuenca.

Este análisis difiere significativamente de las clasificaciones realizadas en las subcuentas del río Cauca (Niño, 2015), ya que no se limita a la selección o estimación de valores utilizados en la literatura como lo son el Número de cura (SCS) o porcentajes de cobertura, pero se usan bajo la premisa de estar dándole un valor más realista a las características del suelo y subsuelo superficial y estar integrando de esta manera las características geológicas de la región. Esta diferencia también impacta la cantidad de parámetros utilizados para el aspecto de cobertura y uso de suelo dentro de las correlaciones, dejando para este Trabajo Final de Maestría únicamente dos (2) contra los cinco (5) usados en el río Cauca y fue tenida en cuenta como parte de las comparaciones de resultados efectuadas en las etapas finales. A continuación, se profundiza en la definición de estos parámetros

Caracterización de la cobertura del suelo

Para el análisis de la cobertura del suelo se usa entonces la clasificación que plantea CORINE LAND COVER (IDEAM, IGAC & CORMAGDALENA, 2008) construido mediante un esfuerzo interinstitucional a nivel nacional, el cual utilizó imágenes de satélite LANDSAT, fotografías aéreas del IGAC, cartografía básica del IGAC, mapas temáticos obtenidos de las corporaciones autónomas regionales, del IDEAM, el Sistema Nacional Ambiental y el Instituto Humbolt para la clasificación de las diferentes coberturas del suelo, haciendo uso de sus dos primeros niveles de la estructura de unidades de suelo, ya que para el alcance de este Trabajo Final de Maestría existen limitaciones de escala y de precisión de la información que no generarían valor agregado al usar niveles más detallados.

Dentro del documento (IDEAM, IGAC & CORMAGDALENA, 2008) se describen los alcances de cada una de las unidades establecidas y tras una lectura genera de esa clasificación se encuentra adecuado el uso de estas mismas categorías para evaluar un coeficiente que represente la susceptibilidad a la erosión de estas coberturas del suelo llamado (Ces), el cual es asignado como se muestra en la **Tabla 3-2**.

Tabla 3-2: Coeficiente de Susceptibilidad de erosión de cobertura de suelo (Ces)

Unidades de cobertura	Ces
Zonas urbanizadas	0.80
Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	0.90
Zonas de extracción minera y escombreras	1.00
Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	0.70
Cultivos anuales o transitorios	0.76
Cultivos permanentes	0.70
Pastos	0.60
Áreas agrícolas heterogéneas	0.72
Bosques	0.30
Áreas con vegetación herbácea y/o Arbustiva	0.50
Áreas abiertas sin o con poca vegetación	0.62
Áreas húmedas continentales	0.10
Aguas continentales	0.10
Aguas marítimas	0.10

(Fuente: Elaboración propia)

Caracterización geológica para ingeniería

Como es de esperarse, la conformación litológica del terreno dentro de la cuenca juega un papel importante dentro de su caracterización con el ánimo de darle una clasificación a la susceptibilidad de ser erosionado.

Con esto en mente, el Servicio Geológico Colombiano junto con la colaboración de diferentes entidades públicas y privadas desarrolló en 2015 la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa (Servicio Geológico Colombiano, 2015), la cual muestra el procedimiento que debe ser seguido por todos los profesionales que requieran generar información de la amenaza geográfica asociada a eventos de desprendimiento de material asociados a unas unidades geológicas para ingeniería, cartografía geomorfológica, cartografía de cobertura y uso de suelo y un inventario de los movimientos en masa de la región de interés.

De esta metodología es de especial interés la creación de los mapas de Geología para Ingeniería, los cuales se describen como “un mapa de geología para ingeniería es un tipo de mapa geológico que muestra información sobre la distribución y propiedades físicas y mecánicas de las rocas y los suelos, el agua subterránea, las características del relieve y los procesos geodinámicos actuales, que son considerados los componentes básicos del ambiente geológico, de suma importancia en estudios de geología aplicada a la ingeniería” (Servicio Geológico Colombiano, 2015) . Este mapa está conformado por las Unidades de Geología para Ingeniería (UGI) las cuales represan una homogenización de las características ingenieriles de los materiales en el área de estudio.

La metodología agrupa todas estas UGI principalmente como Rocas o Suelos, siendo los primeros estimados de acuerdo a sus características geomecánicas por el método SMR y los últimos definidos como “aquellos materiales sueltos o inconsolidados, compuestos de una mezcla de materia orgánica, fragmentos de roca, arcilla y minerales, producto de la descomposición in situ del material rocoso o de sedimentos transportados por diferentes medios (Servicio Geológico Colombiano, 2015) .

Es así, como diferentes universidades han trabajado durante los últimos años en la construcción de diferentes mapas de geología para ingeniería, siguiendo la metodología sugerida por el Servicio geológico y consolidando todos los análisis previamente descritos (SICAT, 2017). Para el caso particular de este Trabajo Final de Maestría, se utilizan entonces las UGI como la base para la asignación de un coeficiente de susceptibilidad a erosión del material geológico (Ceg), el cual se asigna como un número entre 0-1 de acuerdo a las características propias de la UGI en su definición.

Tabla 3-3: Coeficiente de Susceptibilidad de erosión de material geológico (Ceg)

UGI	Ceg
Suelo antrópico	1.00
Suelo residual	0.90
Suelo transportado	0.80
Roca blanda	0.60
Roca dura	0.30

(Fuente: Elaboración propia)

3.5. Análisis estadístico de datos hidrológicos y geográficos

Tras haber utilizado todas las técnicas descritas anteriormente, se emprendió la labor de analizar estadísticamente todos los valores de cada uno de los parámetros encontrados en cada una de las subcuencas.

Para la aplicación de los análisis estadísticos se hizo uso del programa R (R Development Core Team, 2017), el cual es un entorno y lenguaje de programación con un enfoque al análisis estadístico de libre acceso que se puede descargar libremente desde cualquier navegador de internet. R proporciona una amplia variedad de modelos estadísticos (modelos lineales y no lineales, pruebas estadísticas clásicas, análisis de series de tiempo, clasificación, agrupación, etc) y técnicas gráficas que permiten una fácil interpretación de los resultados.

Es así como en los siguientes numerales se explican los conceptos y procedimientos utilizados para la consolidación de los análisis estadísticos de datos.

3.5.1. Regresiones regresivas múltiples

El uso de regresiones en estadística es una práctica común cuando se pretende modelar la relación entre unas variables con la finalidad última de poder pronosticar una de ellas. Predecir la variable dependiente, a partir del conocimiento de las otras las variables independientes. Se pueden construir regresiones simples y múltiples, lineales o exponenciales de cualquier índole de acuerdo al tipo de datos que se tengan, siendo necesario, para el caso de este Trabajo Final de Maestría, el uso de regresiones múltiples exponenciales, de manera tal que se mantenga la estructura de las ecuaciones paramétricas que se usan en el ámbito del cálculo de producción de sedimentos.

Sin embargo, para la aplicación de esta metodología es conveniente usar variables que sean independientes entre si para evitar incluir en el resultado variables que no aportan valor a la estimación de la variable dependiente. Si por el contrario se utilizan variables dependientes entre ellas para la construcción del modelo paramétrico, se produce el fenómeno de redundancia, lo que reduce la precisión de las predicciones. (López E. , 1998).

La estructura de una regresión múltiple se compone por:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (3.5)$$

Donde y es la variable dependiente, β_0 es el intercepto, β_1 coeficiente de pendiente de la 1ra variable exploratoria, β_2 coeficiente de pendiente de la segunda variable exploratoria, β_n coeficiente de pendiente de la n-ésima variable exploratoria y ε el valor remanente que no es capaz de explicar la regresión.

Para la generación de las regresiones múltiples existen dos tipos principales de construcción del modelo: Forward Stepwise Regression y Backward Stepwise Regression, lo que en español puede denominarse regresiones progresivas y regresiones regresivas. En el primer caso se parte de un modelo de una variable y se va incrementando el número de variables independientes revisando el cumplimiento de las pruebas de hipótesis, mientras que en el segundo caso se inicia con un modelo compuesto de la totalidad de las variables independientes para hacer la eliminación una a una de las variables que no cumplan con las pruebas de hipótesis establecidas. En este Trabajo Final de Maestría se elige la segunda técnica, regresiones regresivas, para conservar el procedimiento usado para el río Cauca, (Niño, 2015) y mantener el mismo margen de incertidumbre asociado al proceso.

3.5.2. Pruebas de hipótesis

Para establecer si los coeficientes hallados en cada una de las etapas son estadísticamente válidos para entrar al modelo planteado es necesario establecer las pruebas de hipótesis que deben ser cumplidas por cada variable al nivel de significancia de 5% en cada una de las iteraciones por cada una de las variables, así:

H0= La variable considerada no es representativa

H1= La variable considerada es representativa

De acuerdo con las recomendaciones de Knighton (1984) y Millman y Syvtsky (1992) que consideran que a relación entre la producción de sedimentos y determinados parámetros físicos se describe mejor en términos de funciones logarítmicas, y que la mayoría de propuestas metodológicas para la estimación de producción de sedimentos son de tipo potencial, los análisis desarrollados en el presente estudio han conservado dicha estructura.

3.5.3. Análisis de colinealidad

Como se mencionó en el capítulo 3.5.1, la colinealidad es un problema del análisis de regresión que consiste en que los predictores del modelo están relacionados constituyendo una combinación lineal. Este hecho tiene consecuencias fundamentales en el modelo de regresión: si los predictores se encuentran en combinación lineal, la influencia de cada uno de ellos en el criterio no puede distinguirse al quedar solapados unos con otros, no se consigue una explicación del fenómeno en cuestión, los pronósticos no son nada fiables, puesto que otra combinación de predictores introducida en el modelo variando el orden y produce predicciones en el criterio contradictorias. (López E. , 1998)

Es por eso que se hace un análisis previo en busca de identificar las variables que puedan tener esa colinealidad antes de iniciar con la construcción de modelo, limitando así los posibles errores en sus resultados. Para este efecto de este Trabajo Final de Maestría se usa la misma técnica utilizada para el río Cauca (Niño, 2015) elaborando la matriz de correlación entre las variables del mismo tipo para así descartar que existan relaciones entre ellas. El procedimiento es aplicado aun sabiendo que la selección de las variables iniciales en este Trabajo Final de Maestría ya tenía en cuenta que hubieran sido utilizadas en otras regresiones, y por lo tanto hubieran sido aceptadas en procesos similares. En el capítulo 4.3.1 se detallan los resultados obtenidos en esta etapa.

3.6. Comparación de resultados

Ya habiendo finalizado todo el análisis estadístico, se encontraron expresiones paramétricas que relacionen algunas variables independientes con la variable dependiente del sedimento producido, lo cual constituye un indicativo del grado de significancia que tienen estas variables dentro del proceso. En este punto se compararon las expresiones encontradas en este Trabajo Final de Maestría con las encontradas en trabajos similares, buscando revisar si los parámetros significativos y los coeficientes obtenidos corresponden a los mismos para las cuencas estudiadas o si por el contrario se presenta una diferencia evidente entre los comportamientos.

Cabe mencionar que como parte de los resultados se elaboraron análisis adicionales, los cuales se mencionan en el numeral 4.4.

4. Desarrollo general del estudio

Este capítulo corresponde al desarrollo propio de todas las consultas y análisis requeridos para cumplir los objetivos planteados en el capítulo 1.1 y se encuentra dividido en 4 grandes etapas, tal y como se describió el capítulo 3. Dentro de los siguientes numerales se muestra la información recolectada, los análisis descritos y demás desarrollos de los procedimientos explicados previamente para el caso específico de las subcuencas del río Magdalena seleccionadas.

4.1. Etapa I – Definición área de estudio a partir de información sedimentológica

El desarrollo de las actividades de consulta de información representa un procedimiento importante para la consolidación de este Trabajo Final de Maestría, dado que su origen técnico radica en su totalidad en la disponibilidad de información. En los siguientes numerales se muestra el proceso de adquisición de información, depuración de datos y definición del área de estudio de acuerdo a la disponibilidad de información sedimentológica.

4.1.1. La cuenca del río Magdalena

El río Magdalena es la más importante vía fluvial de Colombia, así como una gran fuente hidroeléctrica y belleza natural. Nace cerca de la Laguna de la Magdalena ubicada en el Páramo de las Papas del Macizo Colombiano. Atraviesa el territorio colombiano de sur a norte desembocando en el Mar Caribe en Bocas de Ceniza. Su longitud total hasta su desembocadura es de 1.558 km de los cuales son navegables 1.290km, sin interrupción. Es el río interandino más largo de Suramérica. Arroja al mar 8000 m³/s. Su cuenca tiene una superficie de 256.000 km². Recibe las aguas de unos 500 afluentes y más de 5.000 arroyos y quebradas.

La cuenca Magdalena-Cauca constituye el sistema de drenaje más importante de la región andina, y permite el acceso hacia el interior de nuestro territorio desde la costa del Caribe. Los ríos homónimos que la recorren, y en particular el Magdalena, por ser más caudaloso y tener grandes trayectos navegables de poca pendiente, han sido determinantes en la conformación de nuestra nacionalidad y en la ocupación del territorio.

Como es sabido, la gran mayoría de las actividades económicas, políticas y comerciales del país se realizan en la cuenca del Magdalena-Cauca y en ella habitan alrededor de 33,6 millones de personas, es decir, el 80% de la población total del país, y se asientan las grandes ciudades y los principales centros urbanos: Bogotá y Tunja en las altiplanicies de la cordillera Oriental; Cali, Popayán y las ciudades del Valle del Cauca; Medellín en el macizo Antioqueño; Barranquilla y Cartagena a orillas del Caribe, Bucaramanga y Barrancabermeja en Santander; Manizales, Pereira y Armenia en el eje cafetero; Ibagué y Neiva en el valle del alto Magdalena. En algunas partes de ella, la presión que

ejercen estas actividades antrópicas sobre los recursos naturales y el medio ambiente ha superado ampliamente la capacidad de regeneración de la naturaleza, llegando a condiciones de deterioro que pueden extender sus efectos negativos sobre otras partes de la cuenca.

Los ejemplos más dramáticos de estas intensas presiones son las cargas de contaminación en los ríos Cauca, Bogotá y Nechí, fruto de una visión no sostenible de las actividades sociales y económicas y de la ausencia de prácticas respetuosas con el medio ambiente y los recursos naturales. La deforestación constituye otro grave ejemplo, ya que el alto grado de intervención sobre los bosques y la cobertura vegetal ha producido serios impactos que se manifiestan en la reducción del efecto regulador que ésta ejerce sobre el caudal de los ríos y en el aumento de la erosión en las laderas de las cordilleras, fenómeno que incrementa la pérdida de suelos que el agua transporta y que los ríos y cuerpos de agua acaban por recibir en calidad de sedimentos.

De acuerdo a su perfil altitudinal y su aptitud para la navegación, el curso del río Magdalena se ha dividido en tres partes muy bien diferenciadas que hallan expresión en una sectorización total de la cuenca: Alto Magdalena, Medio Magdalena y Bajo Magdalena (Cubillos & Forero, 2015), (Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena, 2007), las cuales se presentan esquemáticamente en la

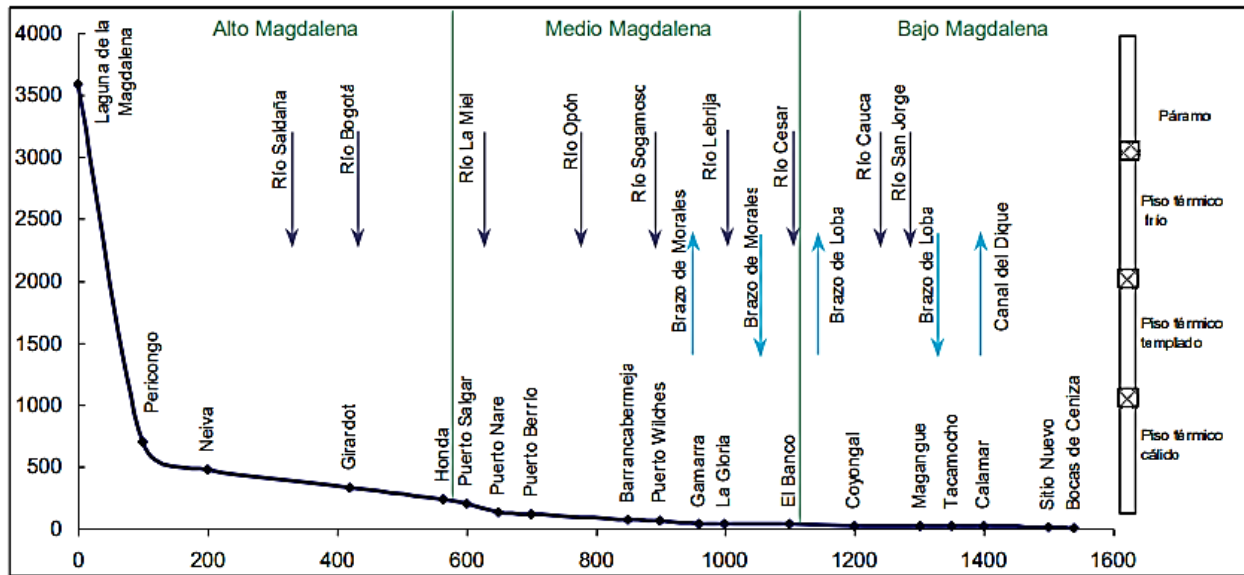
Alto Magdalena: Incluye desde su nacimiento del río en la laguna de la Magdalena, ubicada en el páramo de las Papas en el macizo Colombiano a 3.685 msnm, hasta los rápidos de Honda, situados a 229 msnm, para una diferencia altitudinal total de 3.456 m. Este tramo tiene una longitud total de 565 km y en los tramos iniciales el río se caracteriza por ser muy pendiente y turbulento. Pasa por la zona arqueológica de San Agustín y luego va recibiendo afluentes cada vez más importantes, hasta que en Pericongo se configura como un río de llanura, pese a que aún tiene una pendiente pronunciada. Las poblaciones más importantes en este trayecto son las ciudades de Neiva, Girardot y Honda.

Medio Magdalena Empieza en Honda, en donde se reinicia la navegación interrumpida por los rápidos del mismo nombre. Este tramo se extiende hasta El Banco, en la desembocadura del río Cesar, situado a una altura de 33 msnm. Los municipios más importantes en este trayecto medio del río —Puerto Salgar, La Dorada, Puerto Wilches, Barrancabermeja, Puerto Berrío y Gamarra— tuvieron una importante actividad naviera que impulsó su desarrollo. Al desaparecer la navegación entraron en un proceso de retroceso, con excepción de Barrancabermeja, cuya importancia a nivel nacional radica en que es el centro de la industria petrolera y la cabecera del transporte fluvial de derivados del petróleo hacia la refinería de Cartagena.

Bajo Magdalena Se extiende desde El Banco hasta la desembocadura del río Magdalena en Bocas de Ceniza y en la bahía de Cartagena a través del canal del Dique. En este tramo el cauce discurre por la llanura del Caribe siguiendo una pendiente muy suave y adquiere su carácter de complejo fluvio-lacustre al formar innumerables ciénagas que actúan como reguladoras de las crecientes al almacenar agua en los períodos lluviosos y devolverlas al río en los secos. Estos humedales conforman un complejo extenso que se extiende desde la Ciénaga Grande de Santa Marta, al pie de la Sierra Nevada del mismo nombre, hasta el canal del Dique y la depresión Momposina, que constituye un delta interior en el que confluyen los ríos Cauca, Cesar y San Jorge. En este sector se encuentran entre otros los municipios de El Banco, Barranco de Loba, Pinillos, Magangué y Mompós.

Para el caso particular de este Trabajo Final de Maestría, se prefirió en primera instancia la selección de cuencas en la parte alta y media del río Magdalena, evitando la complejidad hidrodinámica de estas últimas zonas fluviales de llanura e inundación.

Figura 4-1: Área de estudio definida en función de información sedimentológica.



(Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena, 2007))

Respecto a su comportamiento hidrológico y sedimentológico, el río Magdalena es único en el mundo por su dinámica, su caudal de agua y sedimentos, compartiendo altos niveles en la clasificación de cauces con altos valores de transporte de sedimentos con ríos como el Mississippi, el Paraná, el Yangtze y el Mekong (Ordóñez, 2015) alcanzando tazas promedio de $170000 \cdot 10^3$ Ton/año.

4.1.2. Consulta de información disponible

La consulta de información para la caracterización de una parte de la cuenca del río Magdalena, comienza con la consulta de la información hidrosedimentológica disponible. Para esto, se acudió al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y se solicitó la totalidad de registros de caudal líquido y mediciones de caudal sólido existentes en las estaciones que se encuentran instaladas en el río Magdalena. Con esto, se buscó contar con un panorama general de la disponibilidad de información a lo largo del cauce seleccionado para el trabajo.

Como premisa inicial de la selección de información, se prefirió utilizar estaciones que formen parte de la cuenca alta y la cuenca media del río Magdalena, bajo la hipótesis de que estas zonas cuentan con formas topográficas más definidas (zonas montañosas) evitando entrar en la cuenca baja donde las zonas de planicie y zonas de inundación del río podrían dificultar los análisis morfológicos previstos, especialmente asociados a la delimitación de las cuencas hidrográficas.

El río Magdalena actualmente cuenta con un total de 209 estaciones instaladas a lo largo y ancho de su cuenca dentro de las que se encuentran estaciones hidrológicas, meteorológicas, agrológicas y algunas de ellas son automáticas o manuales (IDEAM, 2017) y representan un porcentaje aproximado de 4.6% de la totalidad de las estaciones que hacen parte del catálogo nacional de estaciones. La **Tabla 4-1** muestra el resumen de la cantidad de puntos de medición de información que está administrada por el IDEAM, clasificada inicialmente por el departamento en el que se encuentra y separándola por su tipo: HID (hidrológica), HMT (Hidrometeorológica), MET (Meteorológica).

Tabla 4-1: Resumen estaciones en cuenca del río Magdalena por departamento y tipo

DEPARTAMENTO	HID	HMT	MET
ANTIOQUIA	5	1	6
ATLÁNTICO	2	2	27
BOLÍVAR	18	1	8
BOYACÁ	1	0	4
CALDAS	0	0	2
CESAR	5	1	9
CUNDINAMARCA	3	1	8
HUILA	15	1	33
MAGDALENA	6	1	10
SANTANDER	14	1	7
TOLIMA	2	1	14

(Fuente: Extraído de Catálogo de Estaciones (IDEAM, 2017))

Ahora bien, para el caso específico de este Trabajo Final de Maestría se requiere hacer una revisión particular asociada a la disponibilidad de aforos sólidos en cada punto de medición, los cuales son la base para todos los análisis requeridos. Es así como se procedió entonces a revisar cuáles de todas las estaciones existentes (activas o no) cuentan con registros sedimentológicos en la cuenca alta y media del río Magdalena, quedando reducido a un grupo de 10 estaciones sobre el cauce principal y 7 estaciones sobre los afluentes que se encuentran en ese mismo tramo y que cuentan con suficiente información para ser incluidas dentro del estudio.

La **Tabla 4-2** muestra entonces la información básica de las estaciones que cumplieron con la disponibilidad de información relacionada en el numeral 3.3 para el cauce principal del río Magdalena y que fueron incluidas en el presente estudio.

Tabla 4-2: Estaciones utilizadas sobre el cauce del río Magdalena. Datos generales

CÓDIGO	NOMBRE	CORRIENTE	LATITUD	LONGITUD	ALTURA
21237010	NARIÑO AUTOM	MAGDALENA	4.38	-74.84	277
23037010	PTO SALGAR AUTOM	MAGDALENA	5.47	-74.66	186
21237020	ARRANCAPLUMAS	MAGDALENA	5.20	-74.73	222
21137050	ANGOSTURA RIO	MAGDALENA	3.44	-75.12	345
21077020	PASO DEL COLEGIO	MAGDALENA	2.46	-75.57	536
21017030	CASCADA SIMON BOLIVAR	MAGDALENA	1.87	-76.23	1.272
21027010	PERICONGO	MAGDALENA	2.05	-75.85	839
21077030	VICHECITO	MAGDALENA	2.50	-75.55	620
21097070	PTE SANTANDER	MAGDALENA	2.94	-75.31	431
21077010	PTE MOMICO	MAGDALENA	2.62	-75.48	533

(Fuente: Extraído de Catálogo de Estaciones (IDEAM, 2017))

Estas estaciones limitan entonces el tramo del río Magdalena que se incluyen en los análisis y permite extender la búsqueda de información sedimentológica hacia las subcuencas aferentes de los afluentes más grandes (y que estén monitoreados) dentro de este tramo.

Posteriormente, se seleccionan 7 subcuencas adicionales tanto en el margen oriental como en el margen occidental del río Magdalena, que permitirán conocer un poco más el comportamiento hidrológico y sedimentológico de los afluentes. La **Tabla 4-3** muestra la información básica de las estaciones localizadas en los afluentes incluidas en el presente estudio.

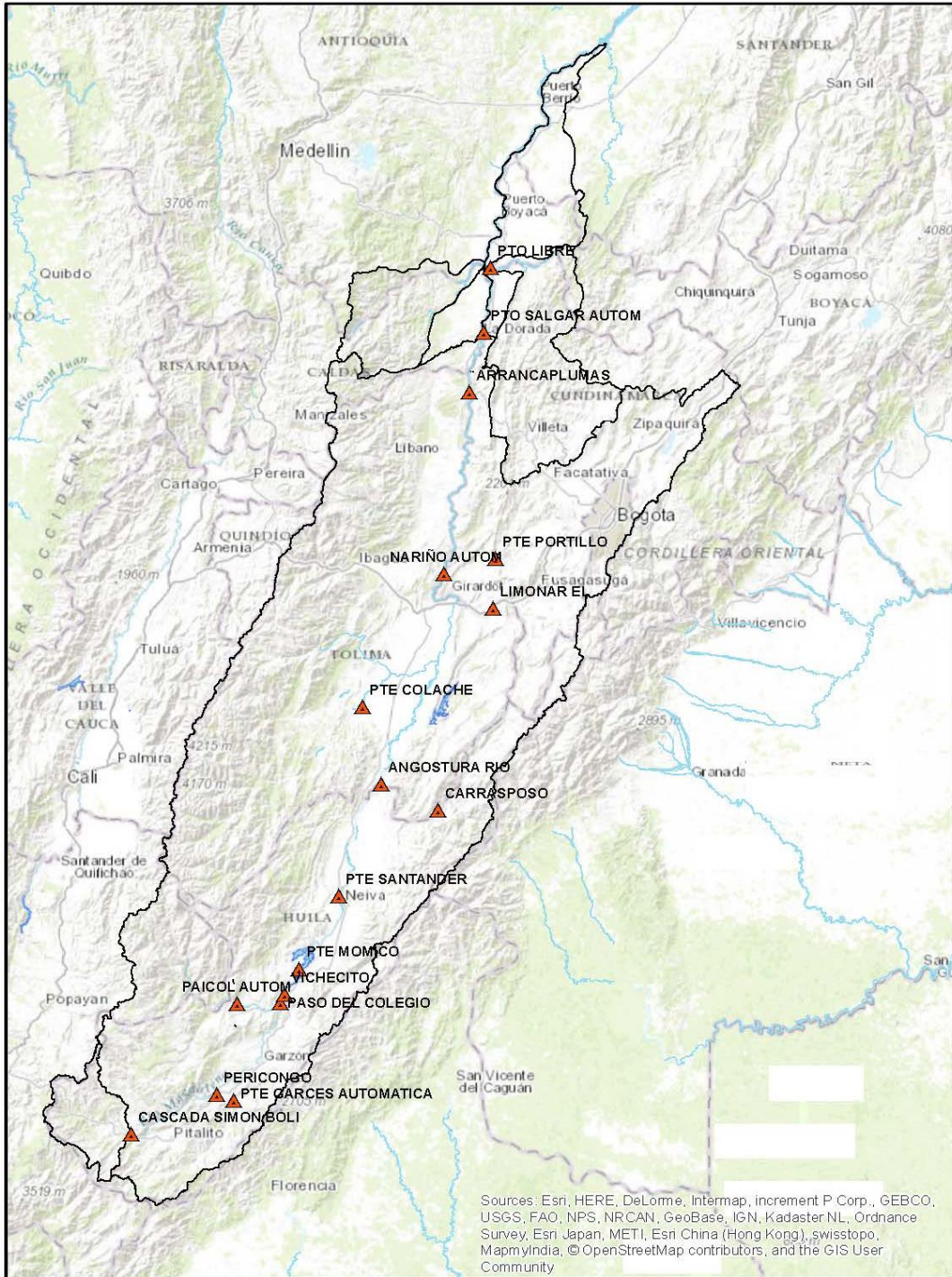
Tabla 4-3: Estaciones utilizadas en subcuencas de corrientes afluentes. Datos generales.

CÓDIGO	NOMBRE	CORRIENTE	LATITUD	LONGITUD	ALTURA
21037010	PTE GARCES AUTOMATICA	SUAZA	2.026	-75.775	893
21057060	PAICOL AUTOM	PAEZ	2.460	-75.761	785
23067040	PTO LIBRE	NEGRO	5.759	-74.631	1.784
21207960	PTE PORTILLO	BOGOTA	4.454	-74.608	361
22057070	PTE COLACHE	SALDANA	3.790	-75.202	372
21197150	LIMONAR EL	SUMAPAZ	4.232	-74.620	405
21147030	CARRASPOSO	CABRERA	3.327	-74.866	730

(Fuente: Extraído de Catalogo de Estaciones (IDEAM, 2017)

La selección de estas 17 estaciones como puntos de medición define entonces el área final de estudio para este Trabajo Final de Maestría la cual se muestra consolidada en la **Figura 4-2**. En el ANEXO A. INFORMACIÓN DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS Y ANEXO B. INFORMACIÓN DE AFOROS SÓLIDOS, se presentan todos los datos entregados por el IDEAM asociados a las estaciones utilizadas.

Figura 4-2: Área de estudio definida en función de información sedimentológica.



4.1.3. Depuración de información de caudal líquido

La etapa siguiente a la consulta y recolección de la información sedimentológica corresponde a la revisión de ésta y de los registros de caudal líquido para garantizar que se encuentre libre de errores y que se utilicen los datos representativos para cada una de las estaciones, para garantizar que el comportamiento adecuado del modelo estadístico que se quiere consolidar y que se logren resultados más confiables en su aplicación. De acuerdo a lo mencionado en el capítulo 3.3.2 y el capítulo 3.3.3, se hace una revisión inicial de los registros de caudal medio diario (Qmd), en cada una de las 17 estaciones seleccionadas de manera tal que se identifiquen los años que realmente tienen la información suficiente para ser incluida dentro del estudio, o, establecer cuáles de los años que no tienen información suficientes, pueden ser incluidos por ser representativos del comportamiento hidrológico del cauce, ya sea en el río Magdalena o en sus afluentes. En el ANEXO A. INFORMACIÓN DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS, se presentan todos los datos entregados por el IDEAM asociados a las estaciones utilizadas.

De las estaciones del río Magdalena, la estación Arrancaplumas (21237020) es la estación que cuenta con más años registro de caudal medio diario (Qmd) con un total de 80 años disponibles en el IDEAM, comenzando en el año 1934 y cuyos datos se encuentran reportados en la entidad hasta el 2014 y se mantiene activa hasta el día de hoy. Por otro lado, en el grupo de estaciones seleccionadas en el río Magdalena se encuentran las estaciones Paso del Colegio (21077020) y la estación Vichecito (21077030) cuyos registros no superan los 15 años totales y no consecutivos, a pesar de que ambas estaciones se encuentran instaladas desde los años 1980 y 1984 respectivamente. Las demás estaciones cuentan con registros que oscilan entre 30 y 40 años en promedio.

De las 10 estaciones localizadas sobre el río Magdalena que se incluyen en el análisis, 3 de ellas aparecen suspendidas en el catálogo oficial de estaciones publicado por el IDEAM de su página web (IDEAM, 2017) Paso del Colegio (21077020) suspendida en el año 2016, Vichecito (21077030) suspendida en 2011 y Pte Momico (21077010) suspendida en 1979. Esta última cuenta con un registro corto, pero al contar con información sedimentológica se considera de utilidad.

Para las 7 estaciones seleccionadas de los afluentes, se tiene la estación con registro más largo que corresponde al río Cabrera en la estación Carrasposo (21147030) con un registro total de 44 años, mientras que el afluente con el registro más corto es el correspondiente al río Saldaña en la estación Pte Colache (22057070) con 31 años disponibles. Para este conjunto de estaciones se encuentra que todas fueron instaladas entre los años 1964 y 1975, lo cual deja un conjunto de información estadísticamente útil y se identifica además que todas las 7 estaciones permanecen activas hasta el día de hoy.

Del análisis de la longitud de los registros reportados por el IDEAM para los caudales líquidos de las estaciones seleccionadas, se hace evidente que el reporte oficial se encuentra atrasado en su publicación entre 2 y 3 años, lo cual representa un punto negativo para el estudio. Si se implementaran metodologías para hacer esta retroalimentación de una manera más eficiente, se podría aprovechar más eficazmente la información que ya se encuentra en las regionales y ampliar así el alcance de los resultados.

Otro punto importante de resaltar en esta revisión inicial de la información, está relacionada con la coherencia de la información reportada en los distintos registros entregados por el IDEAM, versus los datos reportados por el catálogo que se encuentra actualmente disponible en su sitio web (IDEAM, 2017).

Es así como se encuentra que la estación Pte Santander (21097070) en el catálogo tiene un año de instalación correspondiente a 1960, pero los registros reportados tienen información relacionada desde el año 1948. En este caso particular se asume cierta la longitud del registro y se obvia lo mostrado en el catálogo.

Para la depuración de los registros, se analizaron cada uno de los criterios expuestos en el capítulo 3.3.2 y se establece que para el total de las estaciones se aceptaron de manera directa por tener en su registro total por año un número de datos superior al 95%, alrededor del 82% de los años de la totalidad de las estaciones, lo que varía entre 60% y el 98%. Es así como se identifica que para el río Magdalena, la estación cuyo registro se encuentra más completo es la estación Arrancaplumas (21237020) con un total de 64 años aceptados y para el grupo de afluentes es el río Suaza en la estación Pte Garcés automática (21037010) la del registro más completo con un total de 47 años aceptados.

El siguiente criterio de aceptación, tal y como se menciona en el capítulo 3.3.2, fue la inclusión en la base de datos de años con meses cuyo registro diario se encuentra incompleto tras verificar su representatividad hidrológica. Esto se logra al comprobar los valores de caudal diario de los años con meses incompletos caen o no dentro del intervalo de confianza estimado para los años con registro completo.

Posteriormente, los años que cuentan con meses sin información (meses completos faltantes) fueron analizados por medio de correlaciones entre años en estaciones completas. Este ejercicio se realiza para verificar un total de 64 años sumados en todas las estaciones, los cuales tienen datos faltantes superiores 26 días e inferiores a 96 días al año. Finalmente, los años con un registro que contara con ausencia de información para un total mayor de 96 días al año, fueron eliminados por completo de la base de datos.

El resultado final del análisis y depuración de caudal medio diario (Qmd), arroja que el 99% de la información recolectada inicialmente fue utilizada para la construcción de las correlaciones tras haber sido revisada y completada según corresponda, y la **Tabla 4-4** presenta el resumen de dicho proceso para la totalidad de las estaciones.

Tabla 4-4: Resumen de depuración de datos de caudal líquido en todas las estaciones

CÓDIGO	NOMBRE	CORRIENTE	FECHA INSTALAC.	FECHA SUSPENS.	CANT. AÑOS EN REGISTRO	AÑO INICIAL	AÑO FINAL	ACEPTACIÓN DIRECTA	70<X<95%	AÑOS RECHAZADOS
21237010	NARIÑO AUTOM	MAGDALENA	15/08/1977	-	37	1978	2014	37	0	0
23037010	PTO SALGAR AUTOM	MAGDALENA	15/01/1936	-	69	1937	2016	64	1	2
21237020	ARRANCAPLUMAS	MAGDALENA	15/01/1934	-	80	1934	2014	66	9	4
21137050	ANGOSTURA RIO	MAGDALENA	15/01/1975	-	40	1975	2014	31	6	2
21077020	PASO DEL COLEGIO	MAGDALENA	15/06/1980	06/01/2016	14	1998	2011	9	3	2
21037010	PTE GARCES AUTOMATICA	SUAZA	15/04/1964	-	49	1893	2014	47	2	0
21057060	PAICOL AUTOM	PAEZ	15/07/1971	-	42	1971	2014	39	0	2
21017030	CASCADA SIMON BOLI	MAGDALENA	15/04/1971	-	33	1971	2014	29	3	1
23067040	PTO LIBRE	NEGRO	15/09/1974	-	40	1975	2015	24	14	3
21027010	PERICONGO	MAGDALENA	15/06/1980	-	36	1980	2015	35	0	1
21207960	PTE PORTILLO	BOGOTA	15/04/1965	-	41	1973	2014	32	6	3
22057070	PTE COLACHE	SALDANA	15/10/1976	-	31	1984	2015	28	2	1
21197150	LIMONAR EL	SUMAPAZ	15/12/1975	-	37	1977	2014	27	7	4
21077030	VICHECITO	MAGDALENA	15/11/1984	21/07/2011	11	1985	2008	8	3	0
21147030	CARRASPOSO	CABRERA	15/02/1972	-	44	1972	2015	36	8	0
21097070	PTE SANTANDER	MAGDALENA	15/09/1960	-	58	1948	2014	0	0	0
21077010	PTE MOMICO	MAGDALENA	15/08/1971	15/12/1979	44	1972	2015	0	0	0

Por comodidad en la lectura de este documento, se ha limitado la presentación de estos criterios de aceptación y rechazo de los años dentro de la base de datos de este análisis y se ha consolidado en el ANEXO C. ACEPTACIÓN DE AÑOS EN BASE DE DATOS y en el ANEXO D. CORRELACIONES DE CAUDAL DIARIO PARA AÑOS CON MESES INCOMPLETOS las tablas y figuras que muestran cada uno de los análisis realizados, para obtener finalmente que de los 64 años sumados en todas las estaciones que no tuvieron una aceptación directa, solo 2 de ellos fueron rechazados finalmente al verificar que su caudal promedio no caía en el intervalo de confianza, tal y como se estipula en el capítulo 3.3.2.

4.1.4. Depuración de información de caudal sólido

El siguiente paso corresponde a la verificación de la información registrada en los resúmenes de aforos sólidos que es entregada por el IDEAM para cada una de las estaciones, lo cual se realiza a partir de la metodología descrita en el capítulo 3.3.3.

Para este Trabajo Final de Maestría se cuenta con un total de 17 estaciones las cuales cuentan con información de aforos sólidos elaborados por el IDEAM en diferentes momentos desde su fecha de instalación. De acuerdo a la información disponible, se identifica que la estación con mayor número de datos es la estación Paicol Automática (21057060) sobre la corriente del Paez con 184 aforos mientras que el siguiente con mayor cantidad es la estación Pte Santander (21097070) en el río Magdalena con 182 aforos. De manera contraria se tiene que la estación incluida con el registro más corto corresponde a Pte Colache (22057070) en el río Saldaña con 21 registros. La **Tabla 4-5** presenta el resumen de los datos de aforos utilizados.

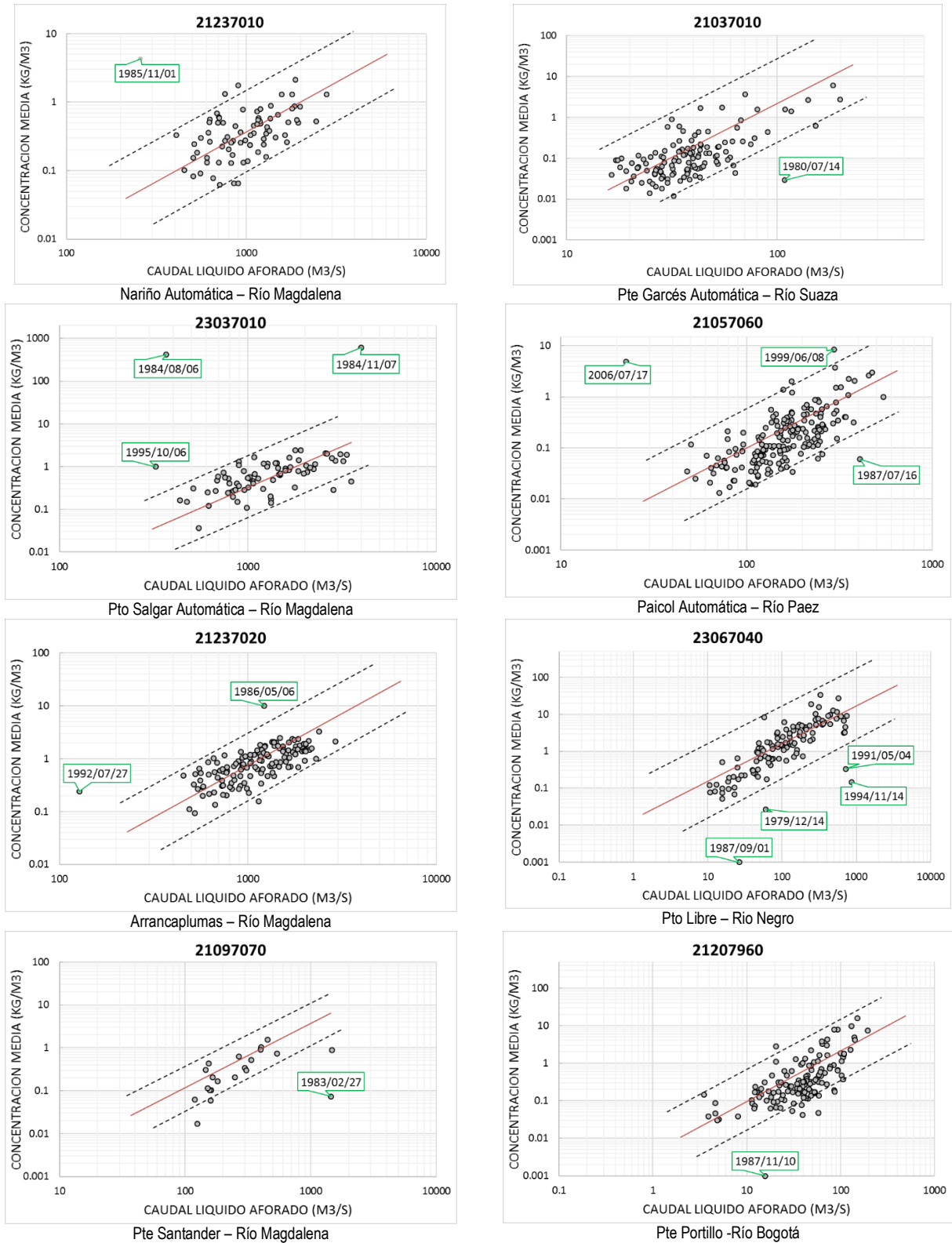
Tabla 4-5: Resumen disponibilidad de aforos de caudal líquido por estación

CÓDIGO	NOMBRE	CORRIENTE	PERIODO DE AFOROS		NUMERO DE AFOROS
			INICIAL	FINAL	
21237010	NARIÑO AUTOM	MAGDALENA	1979/08/02	2011/07/07	80
23037010	PTO SALGAR AUTOM	MAGDALENA	1978/04/11	2011/08/01	78
21237020	ARRANCAPLUMAS	MAGDALENA	1974/04/19	1980/06/09	140
21137050	ANGOSTURA RIO	MAGDALENA	1980/06/17	2003/11/14	102
21077020	PASO DEL COLEGIO	MAGDALENA	1996/12/07	2014/03/19	30
21037010	PTE GARCES AUTOMATICA	SUAZA	1980/06/19	1995/06/22	127
21057060	PAICOL AUTOM	PAEZ	1973/02/27	1984/03/10	184
21017030	CASCADA SIMON BOLI	MAGDALENA	1971/04/30	1982/10/10	174
23067040	PTO LIBRE	NEGRO	1975/02/13	1992/10/26	119
21027010	PERICONGO	MAGDALENA	1980/10/06	1995/06/14	110
21207960	PTE PORTILLO	BOGOTA	1975/03/13	1992/10/30	131
22057070	PTE COLACHE	SALDANA	1980/08/05	1987/11/02	21
21197150	LIMONAR EL	SUMAPAZ	1980/07/31	2007/11/24	92
21077030	VICHECITO	MAGDALENA	1984/12/22	2008/10/14	65
21147030	CARRASPOSO	CABRERA	1985/05/07	2006/12/12	90
21097070	PTE SANTANDER	MAGDALENA	1980/08/05	1987/11/02	182
21077010	PTE MOMICO	MAGDALENA	1974/03/29	1992/03/16	80

(Fuente: Elaboración propia)

Así, se construyen las gráficas de tendencia correspondientes a cada estación donde se verifica si existen aforos que se encuentren por fuera de las líneas de tendencia que pudieran indicar que existe algún tipo de error asociado a su reporte.

Figura 4-3: Gráficas de tendencia entre Concentración Media y Caudal Líquido Aforado.



Estas gráficas se construyen con la totalidad de los datos relacionados en el resumen de aforos, se muestran en formato log-log para poder hacer una adecuada representación de los mismos y se presentan en el ANEXO E. GRÁFICAS DE TENDENCIA DE AFOROS SÓLIDOS, donde se señala específicamente el dato de aforo que se considera atípico y que pasa a ser objeto del siguiente criterio de decisión para verificar si puede ser o no incluido dentro de la base de datos. En general se encontraron que del total de aforos para todas las estaciones que suman un total de 1644 solamente 22 datos se encuentran por fuera de los valores de tendencia lo que corresponde a un porcentaje de 1.1% del total. Esta evaluación muestra en primera instancia que existe un alto grado de confiabilidad en la información.

Luego de identificar estos datos, se realizó con la siguiente verificación que corresponde a la comparación de los valores de caudal líquido registrado para el momento del aforo con los registros de caudal medio diario (Qmd), de la serie reportada independientemente por el IDEAM. para la fecha. Según lo mencionado en el capítulo 3.3.3. se asume que el valor de caudal líquido es aceptable siempre y cuando se encuentre en un rango del 15% de variación dadas las diferentes técnicas aplicadas en cada caso.

Subsecuentemente, se analizan de ese grupo no aceptado los valores de **Qmd3r (caudal medio diario del registro)** que corresponde a los 3 días alrededor de la fecha del aforo, de manera tal que se verifique que no corresponda a un error de transcripción. Si se identifica el error se corrige y se incluye en la tendencia, de lo contrario, dicho aforo se elimina completamente del análisis. La **Tabla 4-6** muestra los aforos que son objeto de esta verificación y los correspondientes caudales medidos, cuando el valor se encuentra dentro del rango, es aceptado en la base de datos.

Tabla 4-6: Aforos revisados bajo comparación de caudales líquidos medidos

CÓDIGO	NOMBRE	CORRIENTE	FECHA AFORO	CAUDAL AFORO (m ³ /s)	CAUDAL REGISTRO (m ³ /s)	-15%>X<15%
21237010	NARIÑO AUTOM	MAGDALENA	1985/11/01	258.00	1,274.000	NO
23037010	PTO SALGAR AUTOM	MAGDALENA	1984/08/06	368.32	1,447.000	NO
			1984/11/07	3,991.08	3,485.000	SI
			1995/10/06	323.272	815.000	NO
21237020	ARRANCAPLUMAS	MAGDALENA	1986/05/06	1,219.540	1,528.000	NO
			1992/07/27	127.790	1,251.000	NO
21077020	PASO DEL COLEGIO	MAGDALENA	1998/08/27	525.126	550.000	SI
21037010	PTE GARCES AUTOMATICA	SUAZA	1980/07/14	108.547	71.300	NO
21057060	PAICOL AUTOM	PAEZ	1987/07/16	408.600	344.900	NO
			1999/06/08	295.109	204.400	NO
			2006/07/17	22.452	150.800	NO
23067040	PTO LIBRE	NEGRO	1979/12/14	60.583	61.100	SI
			1987/09/01	26.500	68.600	NO
			1991/05/04	717.500	564.300	NO
			1994/11/14	865.100	145.500	NO
21027010	PERICONGO	MAGDALENA	2007/06/19	15.059	281.400	NO
21207960	PTE PORTILLO	BOGOTA	1987/11/10	15.660	54.300	NO
21077030	VICHECITO	MAGDALENA	1993/12/07	595.420	565.000	SI
			1994/07/23	430.261	765.000	NO
21147030	CARRASPOSO	CABRERA	1989/01/24	12.650	17.200	NO
21097070	PTE SANTANDER	MAGDALENA	1983/02/27	1,446.600	329.300	NO
21077010	PTE MOMICO	MAGDALENA	1978/11/23	2,215.710	241.000	NO
			1987/04/22	3,036.600	-----	-----

(Fuente: Elaboración propia)

4.2. Etapa II – Caracterización del área de estudio

Luego de culminar con la verificación de la información que puede ser utilizada efectivamente dentro de este Trabajo Final de Maestría, se cierra la etapa de delimitación del área y se procede entonces con la caracterización propiamente dicha de cada una de las subcuencas desde el punto de vista de cada uno de los aspectos definidos como relevantes:

- Caracterización Hidrológica
- Caracterización Sedimentológica
- Caracterización morfológica y morfométrica
- Caracterización de cobertura del suelo y geología para ingeniería

En los siguientes numerales se presenta los parámetros elegidos como parte de este Trabajo Final de Maestría y se relacionan los valores obtenidos en cada caso para cada una de las subcuencas que conforman el área de estudio tanto para el cauce del río Magdalena como para los afluentes seleccionados.

4.2.1. Caracterización hidrológica

En la primera etapa de la caracterización, se revisa el comportamiento de las variables hidrológicas definidas en el capítulo 3.1 que son: Precipitación media anual multianual (Pma), Caudal Medio Multianual (Qma) y Rendimiento hídrico / Escorrentía específica (Rha). A pesar de existir un sinnúmero de parámetros hidrológicos que podrían ser estimados para esta caracterización se usa el criterio de partir de parámetros que hayan sido previamente validados como relevantes en otros proyectos y se limita solo el uso de los anteriores 3 mencionados.

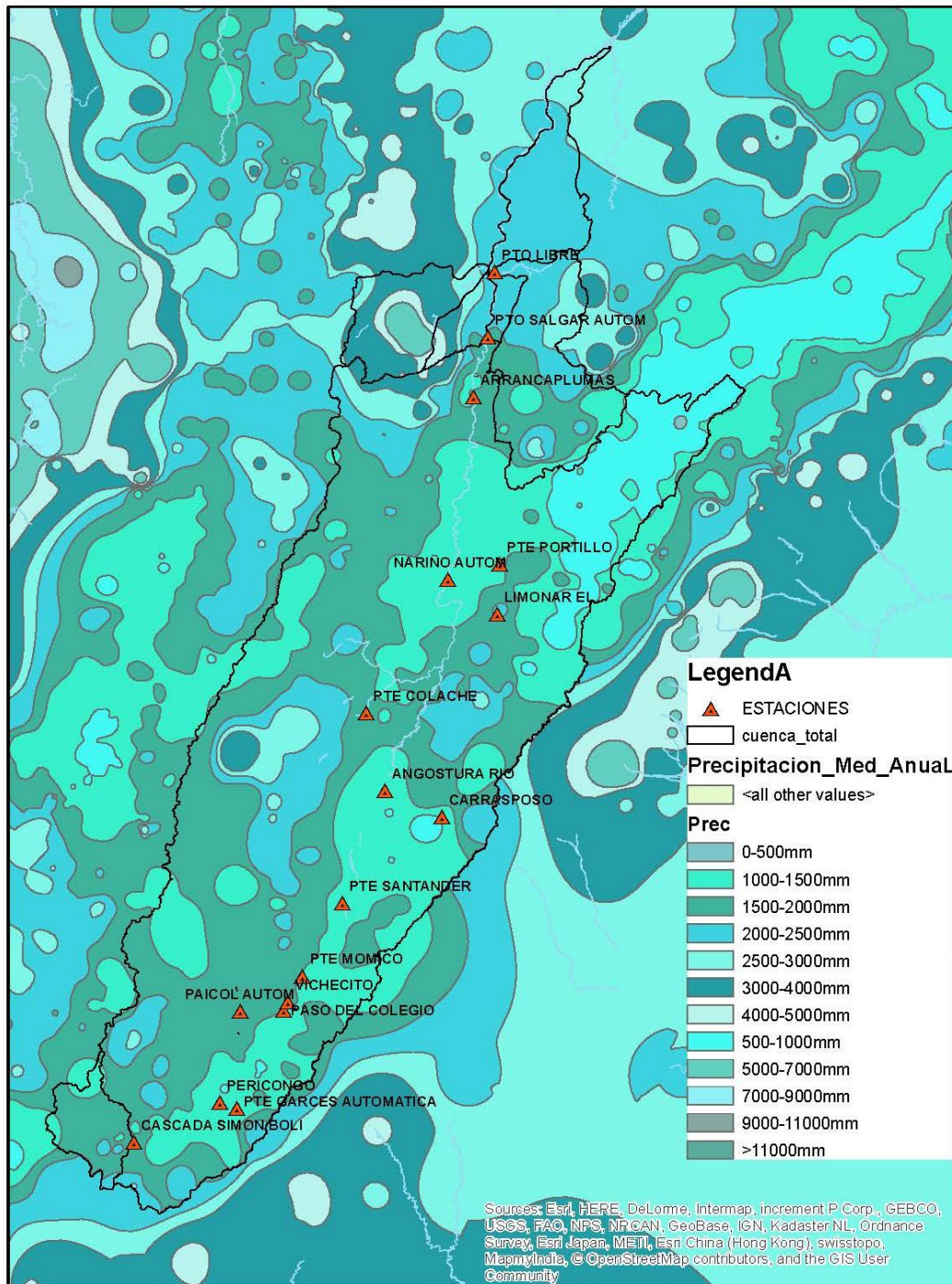
Precipitación media anual multianual (Pma)

Para el primer parámetro se hace uso de los mapas de Precipitación media anual multianual (Pma) obtenidos del SIGOT IDEAM (SIG-OT, 2017) dentro de la zona de interés y su disponibilidad en formato shape permite entonces hacer la correspondiente interpolación de los valores espacialmente distribuidos para contar con un valor único promedio por subcuenca. De acuerdo a la información obtenida se cuenta con que el tramo del río Magdalena en estudio cuenta con valores de Precipitación media multianual de entre 1035-2846 mm/año siendo la subcuenca con un mayor registro la correspondiente a la estación Cascada Simon Bolivar (21017030), seguida por la estación Pto Libre (23067040).

Para el primer parámetro se hace uso de los mapas de precipitación medial multianual obtenidos del SIGOT IDEAM (SIG-OT, 2017) dentro de la zona de interés y su disponibilidad en formato shape permite entonces hacer la correspondiente interpolación de los valores espacialmente distribuidos para contar con un valor único promedio por subcuenca.

En general los valores de la Precipitación media multianual se encuentran por debajo de los valores medios generales para el país, representando una zona de precipitaciones bajas, comparadas con las zonas más lluviosas de la Costa Pacífica o la Amazonía Colombiana, los cuales alcanzan valores de entre 8000-9000 mm/año. Esta distribución de la lluvia se presenta en la **Figura 4-4**.

Figura 4-4: Mapa Precipitación media anual multianual (mm) en el área de estudio



Caudal Medio Multianual (Qma)

El segundo parámetro que se considera relevante para ser incluido dentro del modelo estadístico es el Caudal Medio Multianual (Qma). Este valor representa el promedio de los caudales medios para cada estación estimados a partir de los reportes diarios de caudales medios en los sitios de medición entregados por el IDEAM y presentados en los anexos de este documento. La **Tabla 4-7** y la **Tabla 4-8** presentan los caudales medios mensuales multianuales estimados para la totalidad de los registros disponibles en cada una de las estaciones seleccionadas para este Trabajo Final de Maestría.

Tabla 4-7: Caudales medios mensuales multianuales en estaciones Río Magdalena

CAUDALES MEDIOS MENSUALES MULTIANUALES (m ³ /s)												
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
NARIÑO AUTOM - 21237010	856,00	887,51	1064,91	1419,06	1515,56	1322,89	1207,07	973,24	822,69	1069,07	1388,82	1238,11
PTO SALGAR AUTOM - 23037010	1149,02	1217,93	1372,87	1844,12	2107,87	1830,71	1616,35	1331,28	1169,57	1621,99	2059,00	1686,34
ARRANCAPLUMAS - 21237020	974,29	988,43	1147,05	1509,22	1732,22	1522,62	1395,96	1132,34	972,16	1323,57	1698,74	1363,44
ANGOSTURA RIO - 21137050	466,18	489,63	563,61	703,98	756,44	782,01	795,96	626,33	479,78	557,42	692,85	639,32
PASO DEL COLEGIO - 21077020	289,70	296,26	328,93	513,56	580,74	655,31	567,77	450,24	354,47	363,54	421,55	396,98
CASCADA SIMON BOLI - 21017030	44,00	49,40	59,81	72,25	90,54	121,10	142,59	104,39	74,73	65,85	64,17	55,44
PERICONGO - 21027010	96,00	109,90	120,74	155,33	182,53	234,98	254,22	193,64	133,28	132,64	134,85	118,41
VICHECITO - 21077030	482,86	492,25	439,34	607,78	709,47	868,59	980,05	823,79	630,93	652,03	575,02	349,47
PTE SANTANDER - 21097070	663,15	656,20	719,18	889,39	956,54	1050,33	1149,11	932,04	694,54	766,03	829,52	791,51
PTE MOMICO - 21077010	248,80	276,07	355,39	435,67	523,30	579,42	649,20	497,03	452,12	410,41	462,29	358,69

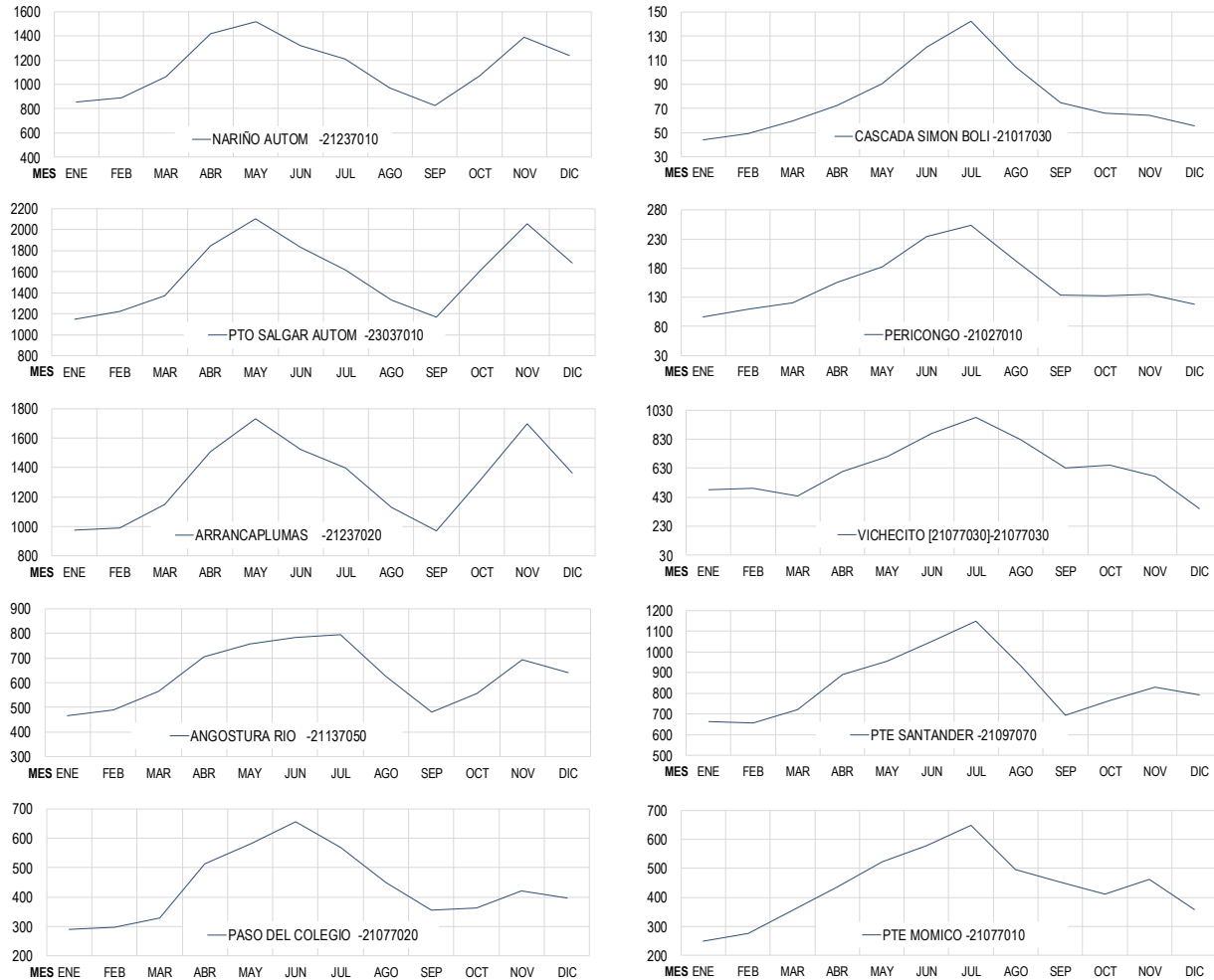
Tabla 4-8: Caudales medios mensuales multianuales en estaciones en los afluentes

CAUDALES MEDIOS MENSUALES MULTIANUALES (m ³ /s)												
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PTE GARCES AUTOMAT- 21037010	25,57	26,70	32,75	41,44	50,63	61,21	67,78	56,50	47,15	40,90	37,02	31,73
PAICOL AUTOM - 21057060	110,75	115,16	132,77	183,04	212,43	230,65	249,75	198,78	156,27	165,53	166,92	143,14
PTO LIBRE - 23067040	84,61	101,69	132,06	201,81	215,65	124,62	71,47	61,96	84,32	168,93	223,54	152,95
PTE PORTILLO- 21207960	33,18	33,34	39,61	48,45	52,80	43,05	36,43	30,89	30,61	46,28	61,88	44,68
PTE COLACHE - 22057070	201,17	212,77	246,53	324,07	357,85	332,39	309,10	246,50	206,50	249,82	300,39	260,74
LIMONAR EL - 21197150	22,49	28,34	38,25	75,97	70,22	46,45	36,49	30,58	27,76	57,89	67,14	37,63
CARRASPOSO - 21147030	23,71	25,46	33,32	54,71	70,92	86,54	88,75	59,88	40,15	48,40	63,30	41,85

Graficando dichos valores a nivel mensual es posible identificar el comportamiento interanual de los caudales en cada una de las subcuencas. Es así como el comportamiento de algunas subcuencas identificadas sobre el mismo río Magdalena muestran 2 picos de caudal asociados a los meses de abril-mayo y octubre-noviembre con un pronunciado punto de aguas bajas para el mes de septiembre y el mes de enero, lo cual corresponde con el régimen de lluvia conocido en la zona andina. Este comportamiento se ve con claridad para las estaciones Nariño Autom (21237010), PTO Salgar Autom (23037010) y Arrancaplumas (21237020) pero el comportamiento es diferente para el resto de las estaciones, donde se aprecia un comportamiento mono modal con un valor pico en los meses de junio-julio.

La **Figura 4-5** muestra las series multianuales de caudal obtenidas con esta información para las estaciones del río Magdalena.

Figura 4-5: Series de Caudal Medio Multianual para las estaciones del Río Magdalena

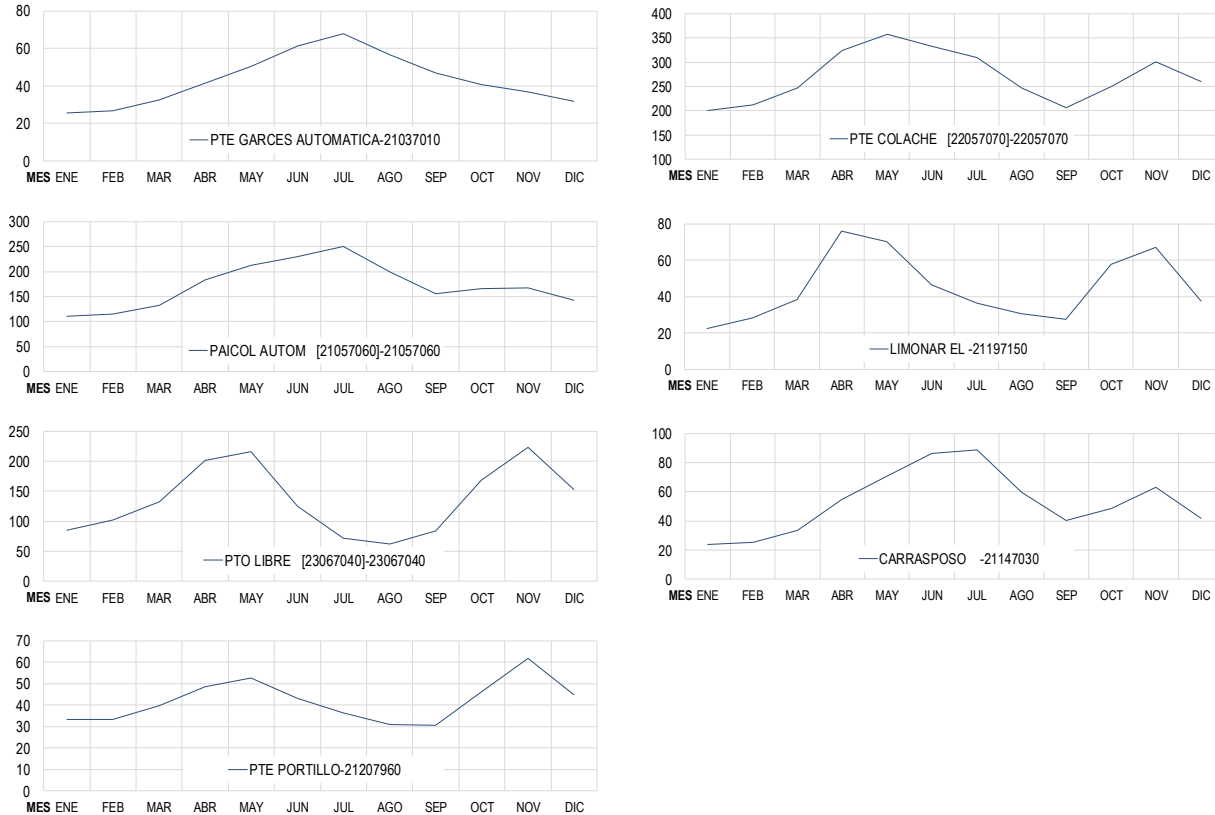


Ahora bien, repitiendo el ejercicio para los afluentes, las series de caudal muestran un comportamiento similar al presentado para el caso de las estaciones localizadas directamente sobre el río Magdalena, mostrando comportamientos bimodales en las estaciones Pto Libre (23067040), Pte Portillo (2120760), Pte Colache (22057070), El Limonar (21197150), y Carrasposo (21147030) y mono modales en los demás casos.

Es evidente, que aun estando en una misma área y formando parte de una misma cuenca (la del río Magdalena), las diferencias en la respuesta hidrológica de la cuenca evidenciadas con estas series de caudal es una evidencia de que existen factores locales adicionales a las condiciones climáticas de la región, que modifican el proceso de generación de escorrentía y, por lo tanto, que modifican la producción de sedimentos para las diferentes cuencas.

La **Figura 4-6** muestra las series multianuales de caudal obtenidas con esta información para las estaciones del río Magdalena.

Figura 4-6: Series de Caudal Medio Multianual para las estaciones en los afluentes



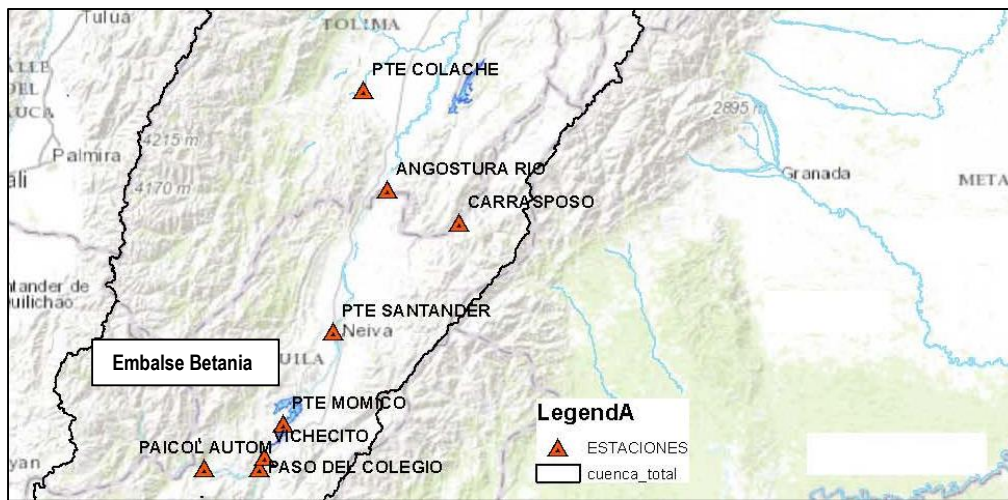
Efecto del Embalse de Betania en los caudales

En este punto resulta fundamental revisar cual es la influencia del Embalse de Betania en las mediciones de caudal de las estaciones que se encuentran localizadas aguas abajo desde que entró en operación en 1987. La represa de Betania se está localizada a aproximadamente 40km aguas debajo de la ciudad de Neiva y se encuentra en la desembocadura del río Yaguará en el río Magdalena.

La manera como se analizó esa posible afectación sobre los regímenes de caudales líquidos y sólidos por presencia del embalse, es construir las curvas de duración de caudales para dichas estaciones con diferentes rangos de tiempo que diferencien las épocas previas a la puesta en operación del embalse y las posteriores a este y compararlas para detectar posibles cambios.

La primera estación que se encuentra desde la descarga del embalse es la estación Pte Santander (21097070) a aproximadamente 30km y la siguiente estación en el cauce corresponde Angostura Río (21137050) a 110km. La **Figura 4-7** detalla la localización de las estaciones alrededor del embalse de Betania.

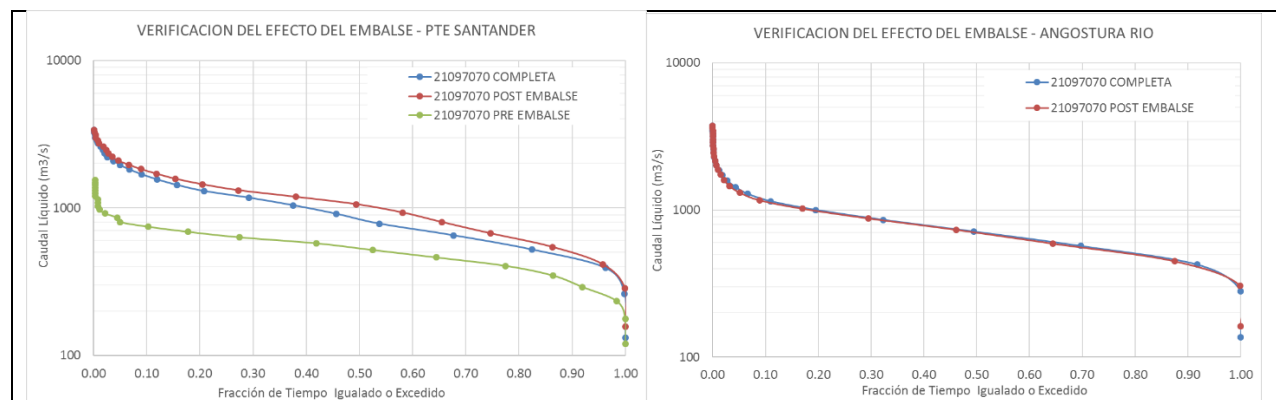
Figura 4-7: Distribución de las estaciones alrededor del embalse de Betania.



Es así como encuentra que para las estaciones localizadas aguas abajo del embalse, los efectos sobre los regímenes de caudales solo se hacen evidentes en la primera estación Pte Santander (21097070) donde las curvas de duración de caudales generadas con los conjuntos de datos disponibles previos a la puesta en operación del embalse y las curvas generadas en el periodo a partir de la puesta en operación del embalse, son considerablemente diferentes tanto en magnitud como en forma, lo que es de esperarse dada la corta distancia que separa la descarga del mismo con el punto de medición.

Por otro lado, para la siguiente estación Angostura Río (21137050) el comportamiento es prácticamente el mismo en cualquiera de los dos periodos. La **Figura 4-8** muestra las curvas de duración de caudales en las dos estaciones más cercanas aguas abajo del embalse de Betania.

Figura 4-8: Curvas de duración de caudales para verificación del efecto del Embalse de Betania



Debido a lo anterior, se decide no utilizar los datos de la estación Pte Santander (21097070) para los años posteriores a la puesta en operación del embalse y dejar únicamente los datos de caudal líquido y caudal sólido correspondiente al periodo pre embalse. Para las demás estaciones localizadas aguas abajo del embalse se mantiene el uso del registro disponible completo sin ninguna variación particular.

Continuando con el análisis de los regímenes de caudales en las estaciones, se requiere de la construcción de las Curvas de duración de caudales líquidos (CDQL), como punto de partida para la construcción de las curvas de duración de caudales sólidos y poder así estimar el valor del sedimento generado, como se muestra en el capítulo 4.2.2. De acuerdo a lo estimado, todas las Curvas de duración de caudales líquidos (CDQL), cuentan con el comportamiento típico reportado en la naturaleza, a excepción de estación Vichecito (21077030), la cual presenta un salto para los primeros porcentajes de tiempo. Hasta el momento no se ha determinado alguna razón particular para este resultado. En el ANEXO F. CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES Y DE CALIBRACIÓN se presentan las curvas individuales para cada estación, mientras que en la **Figura 4-9** y **Figura 4-10** se presentan de manera conjunta.

Figura 4-9: Curvas de duración de caudales líquidos en estaciones del río Magdalena

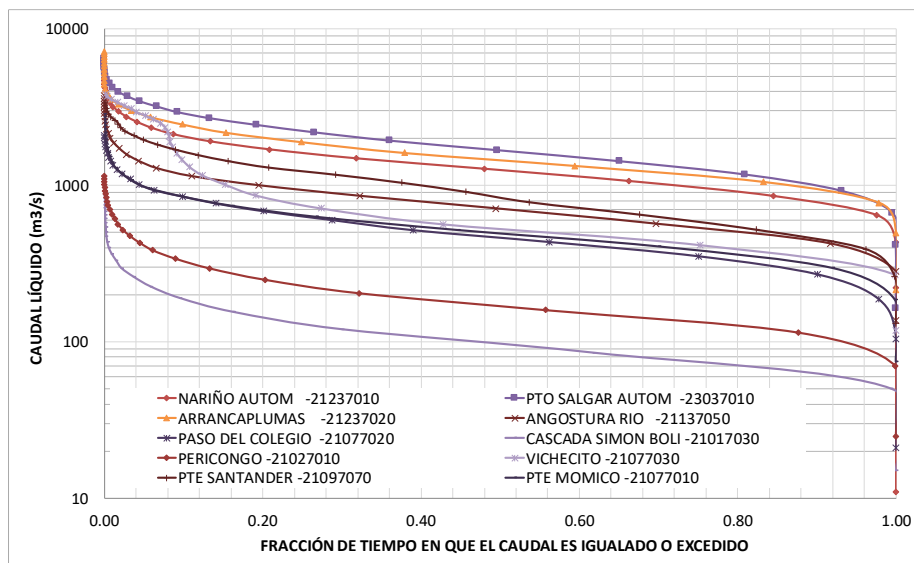
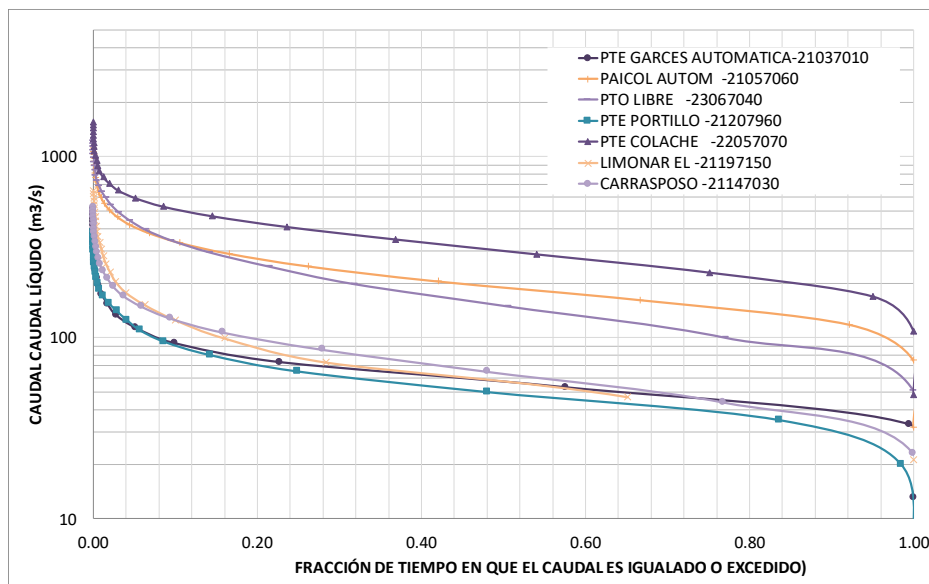


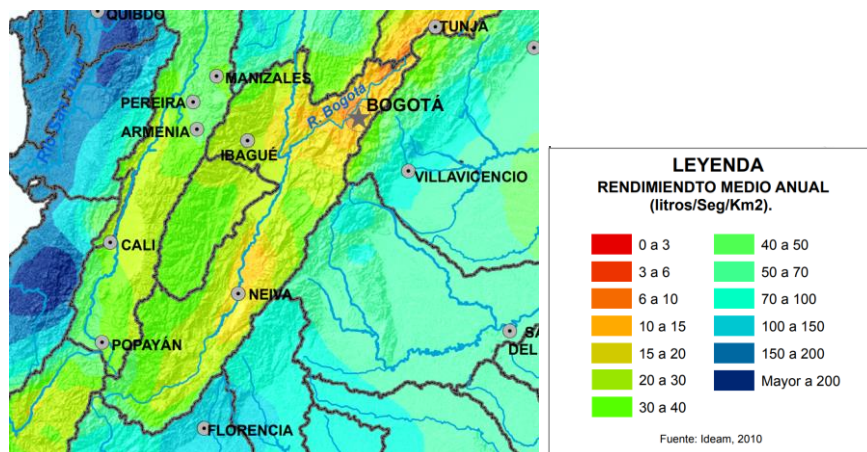
Figura 4-10: Curvas de duración de caudales líquidos en estaciones de los afluentes



Rendimiento hídrico / Escorrentía específica (m³/Km²)

Finalmente, se estima para cada una de las cuencas el rendimiento hídrico o escorrentía específica, la cual se encuentra como la relación entre el caudal medio multianual y el área de cada una de las cuencas, cuyo procedimiento de cálculo se detalla en el capítulo 4.2.3. De acuerdo a los resultados obtenidos, los rendimientos hídricos para el conjunto de subcuencas analizadas oscilan entre 0.007 m³/Km² para la estación Pte Portillo (21207960) en el río Bogotá y el más alto 0.0558 m³/Km² en la estación Vichécito (21077030) en el río Magdalena. Estos valores estimados se encuentran dentro de los rangos de rendimiento hídrico en un año medio para Colombia reportados por el IDEAM (IDEAM, 2017)

Figura 4-11: Curvas de duración de caudales líquidos en estaciones de los afluentes



(Fuente: (IDEAM, 2017))

La **Tabla 4-9** se presentan el resumen de los parámetros hidrológicos estimados.

Tabla 4-9: Resumen de Parámetros Hidrológicos

CÓDIGO	NOMBRE ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN MEDIA MULTIANUAL (mm/año)	CAUDAL MEDIO MULTIANUAL (m ³ /s)	RENDIMIENTO HÍDRICO / ESCORRENTÍA ESPECÍFICA (m ³ /Km ²)
21237010	NARIÑO AUTOM	1250	1148.64	0.0239
23037010	PTO SALGAR AUTOM	1695	1612.22	0.0285
21237020	ARRANCA PLUMAS	1360	1366.94	0.0252
21137050	ANGOSTURA RIO	1454	629.94	0.0283
21077020	PASO DEL COLEGIO	1784	434.29	0.0366
21037010	PTE GARCÉS AUTOMÁTICA	1135	43.30	0.0438
21057060	PAICOL AUTOM	1679	172.92	0.0357
21017030	CASCADA SIMÓN BOLI	2846	78.85	0.0545
23067040	PTO LIBRE	2354	107.15	0.0235
21027010	PERICONGO	1248	156.11	0.0441
21207960	PTE PORTILLO	1384	41.58	0.0077
22057070	PTE COLACHE	1739	269.86	0.0420
21197150	LIMONAR EL	2198	46.08	0.0189
21077030	VICHECITO	1876	666.72	0.0558
21147030	CARRASPOSO	1035	53.59	0.0323
21097070	PTE SANTANDER	1325	491.43	0.0325
21077010	PTE MOMICO	1210	436.34	0.0356

(Fuente: Elaboración propia)

4.2.2. Caracterización Sedimentológica

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización sedimentológica realizada en el área de estudio, siguiendo los lineamientos planteados en el capítulo 3.4.2, los cuales se plantaron con el objetivo de estimar las cargas medias anuales multianuales de sedimentos transportados para cada uno de los puntos de medición incluidos dentro de este Trabajo Final de Maestría, haciendo uso de la metodología tradicional. Para conocer el comportamiento de los caudales líquidos y los caudales sólidos de las cuencas hasta las estaciones seleccionadas, se construyen curvas de duración de caudales líquidos y sólidos para cada una, de manera tal que se vea de una manera acumulada cuales son los caudales esperados para un determinado porcentaje del tiempo.

Curvas de Calibración Caudales sólidos medidos (CCalQsm)

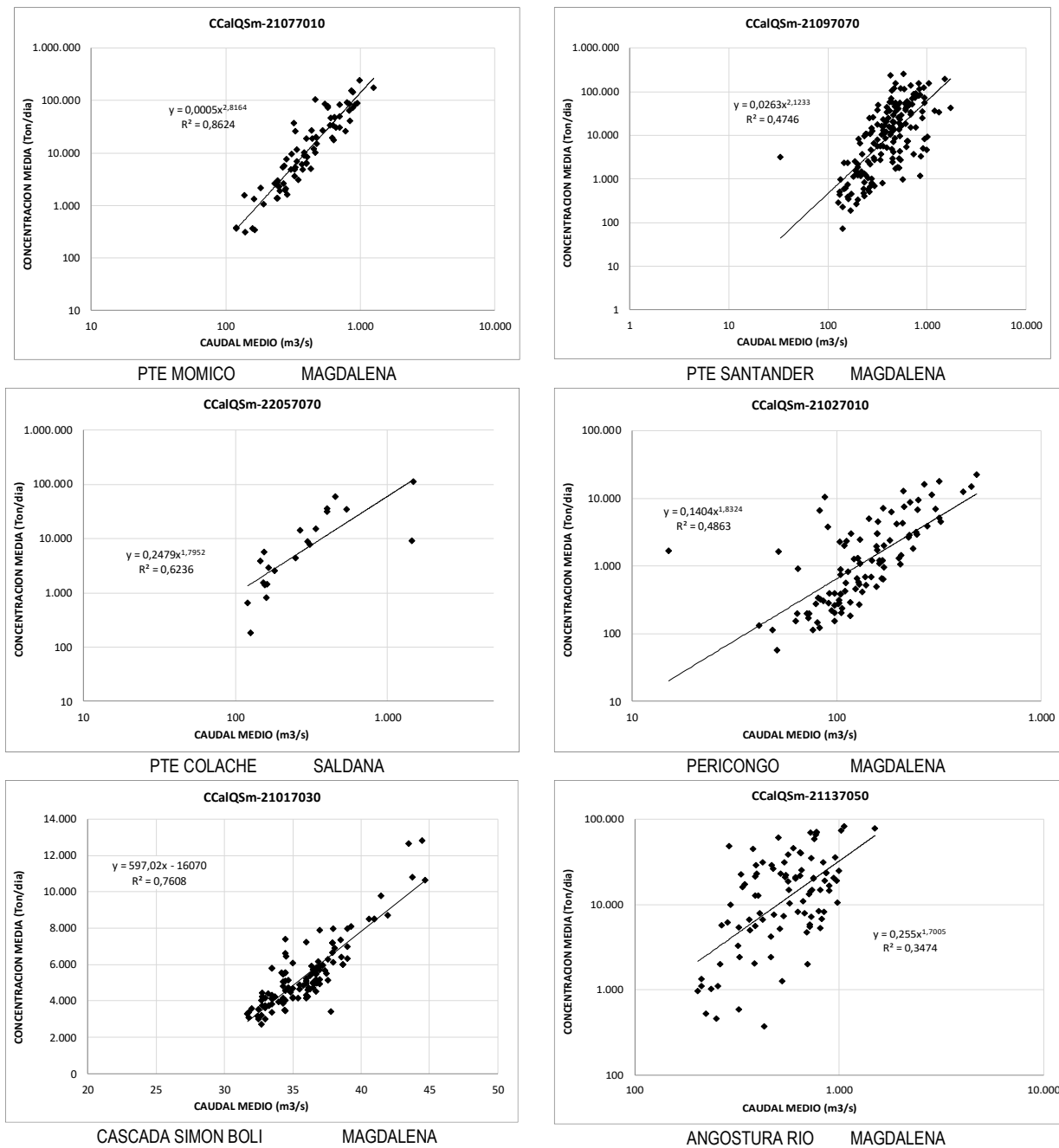
Para generar las curvas de duración de caudales sólidos, se requiere la curva de Curvas de Calibración Caudales sólidos medidos (CCalQsm), las cuales son muestra del comportamiento hidrosedimentológico de cada una de las subcuencas y resulta un factor importante de comparación entre ellas como descriptor de los fenómenos de producción de sedimentos. En la **Tabla 4-10** se resumen los valores de la calibración para cada caso y en la **Figura 4-12** se muestran algunas de las estaciones utilizadas en este estudio como muestra de los diferentes comportamientos de los aforos.

Tabla 4-10: Resultados de la calibración Ql Vs Qs en las estaciones analizadas.

CÓDIGO	NOMBRE	CORRIENTE	Qs=KQ ⁿ		R ²	Área Km ²
			k	n		
21237010	NARIÑO AUTOM	MAGDALENA	0,3431	1,65	0,469	48.115,05
23037010	PTO SALGAR AUTOM	MAGDALENA	0,0596	1,94	0,68	56.512,52
21237020	ARRANCAPLUMAS	MAGDALENA	0,0402	2,066	0,77	54.343,22
21137050	ANGOSTURA RIO	MAGDALENA	0,255	1,705	0,347	22.282,00
21077020	PASO DEL COLEGIO	MAGDALENA	0,002	2,923	0,678	11.866,83
21037010	PTE GARCES AUTOMATICA	SUAZA	0,0562	2,394	0,567	989,58
21057060	PAICOL AUTOM	PAEZ	0,0046	2,559	0,674	4.840,60
21017030	CASCADA SIMON BOLI	MAGDALENA	0,0119	3,624	0,738	1.445,97
23067040	PTO LIBRE	NEGRO	0,5655	2,122	0,829	4.567,44
21027010	PERICONGO	MAGDALENA	0,1404	1,832	0,486	3.543,67
21207960	PTE PORTILLO	BOGOTA	0,1847	2,433	0,699	5.408,00
22057070	PTE COLACHE	SALDANA	0,2479	1,795	0,623	6.430,52
21197150	LIMONAR EL	SUMAPAZ	1,0796	1,6095	0,643	2.432,88
21077030	VICHECITO	MAGDALENA	0,1714	2,2095	0,784	11.938,22
21147030	CARRASPOSO	CABRERA	0,0006	2,742	0,755	1.658,45
21097070	PTE SANTANDER	MAGDALENA	0,0263	2,123	0,474	15.129,38
21077010	PTE MOMICO	MAGDALENA	0,0005	2,816	0,862	12.266,86

Respecto a las Curvas de Calibración Caudales sólidos medidos (CCalQsm) se encuentra que los ajustes de la curva de tendencia para estas no superan un R² de 0.6 en la mayoría de los casos. Esta situación demuestra la naturaleza de no proporcionalidad de la producción de sedimentos y la dependencia de ésta a factores diferentes a las condiciones netamente hidrológicas e hidráulicas del cauce. Es así como se construye el ANEXO F CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES Y DE CALIBRACIÓN dentro del cual se muestran las 3 curvas que se construyen para cada estación, dentro de las que están Curvas de duración de caudales líquidos (CDQl), Curvas de Calibración Caudales sólidos medidos (CCalQsm) y Curvas de duración de caudales sólidos (CDQS), las cuales se requieren para estimar el valor total de carga sólida promedio multianual a partir de las mediciones puntuales disponibles en cada uno de los sitios de medición.

Figura 4-12: Curvas de calibración para algunas estaciones seleccionadas.

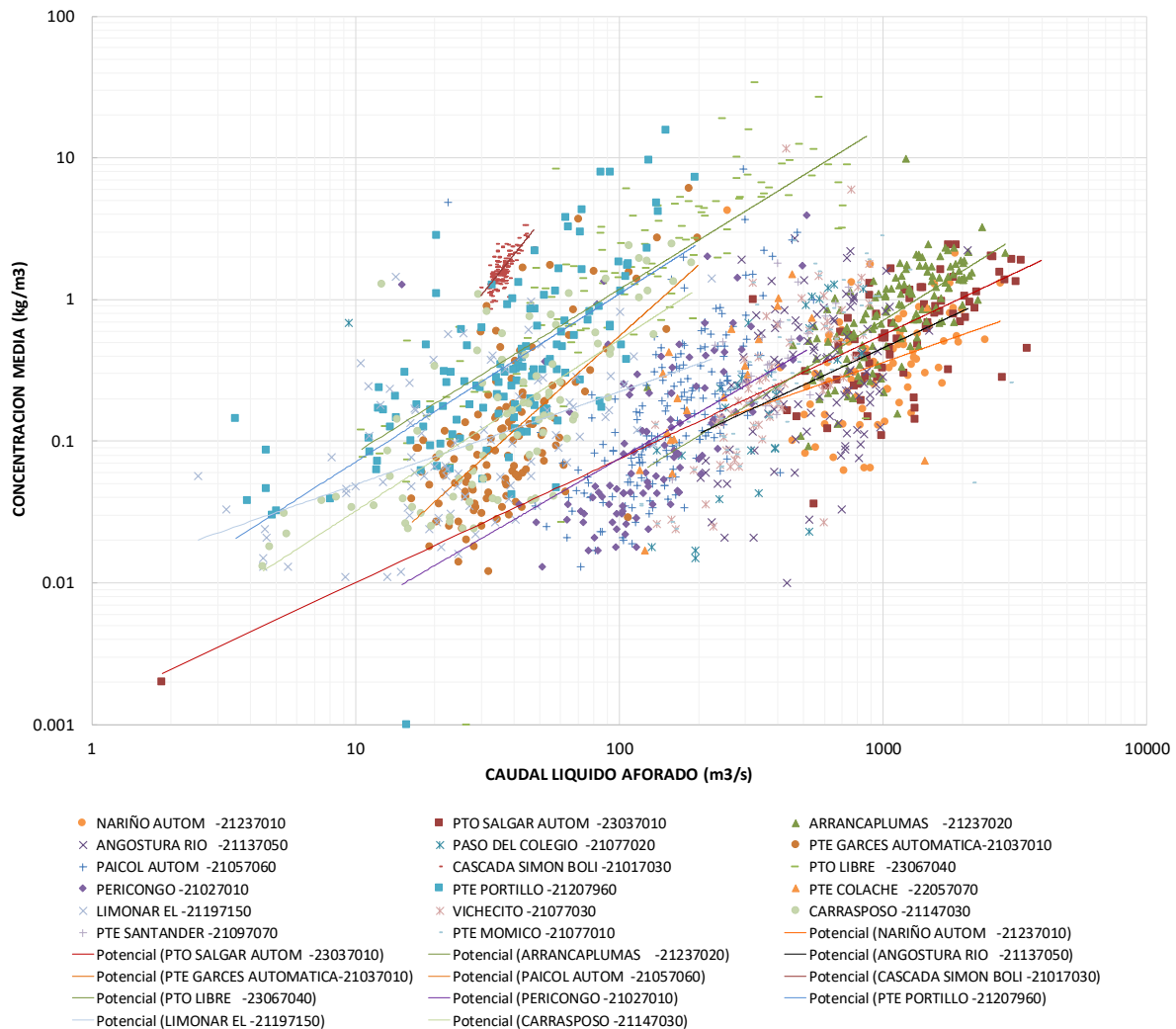


Tanto la **Figura 4-12** como la **Tabla 4-10** dejan en evidencia que el comportamiento de los caudales sólidos no es tan claramente similar entre las subcuencas analizadas y la gran variedad de número de afloros disponibles en cada caso. A pesar de que se ha efectuado un proceso previo de depuración de la información, se identifican algunos valores fuera de la tendencia que no pudieron ser descartados, pero que afectan el ajuste estadístico del modelo plantando en los siguientes capítulos de este documento. Las demás gráficas se pueden consultar en el ANEXO E.

Cuando se grafican la totalidad de los aforos sólidos en una misma figura, es posible notar que las líneas de tendencia en cada estación presentan pendientes distintas en la mayoría de los casos, aunque es posible identificar una pendiente predominante para la mayoría de los datos. Sin embargo, su posición dentro de la misma gráfica muestra que las diferencias entre sus magnitudes son significativas y resulta apresurado identificar cualquier tipo de asociación, partiendo del hecho de que cada punto de medición tiene asociados diferentes parámetros morfométricos.

En general, la **Figura 4-13** permite distinguir dos grupos principales de curvas, lo cual es un indicativo de que existen dos subconjuntos de subcuencas del grupo de 17 usado en este Trabajo Final de Maestría, en las cuales se genera una mayor producción de sedimentos para algunas subcuencas comparado con el otro grupo para un mismo caudal líquido generado dentro de la cuenca.

Figura 4-13: Tendencia de aforos sólidos para todas las estaciones utilizadas



Con el ánimo de identificar esa subdivisión se construyen también las gráficas que agrupan la tendencia de las curvas de calibración separadas por afluentes y para el río Magdalena directamente en la **Figura 4-14** y **Figura 4-15**.

Figura 4-14: Tendencia de aforos sólidos para todas las estaciones sobre el río Magdalena

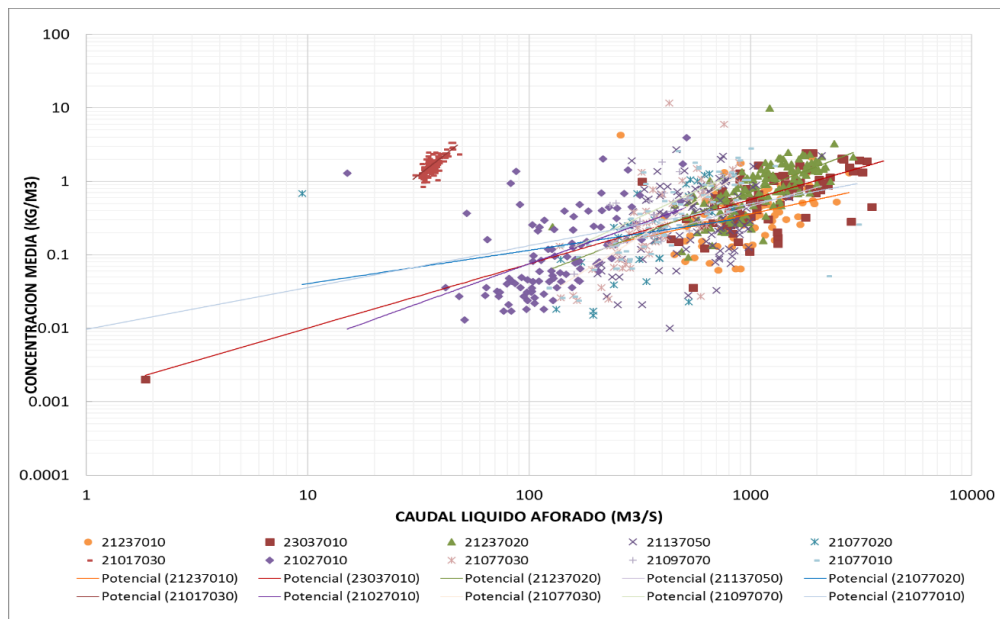
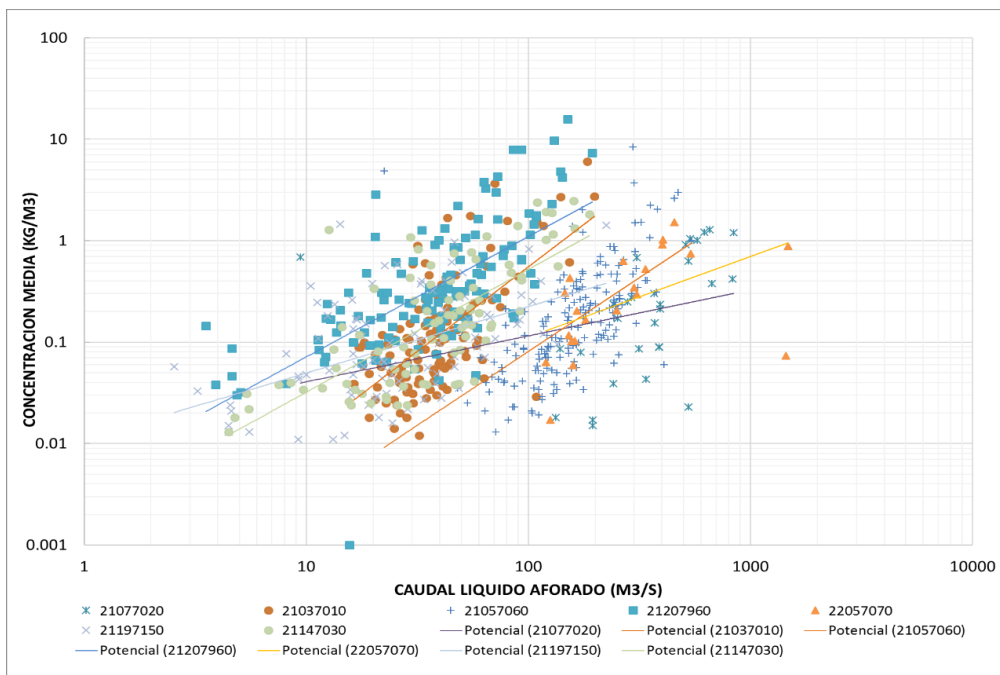
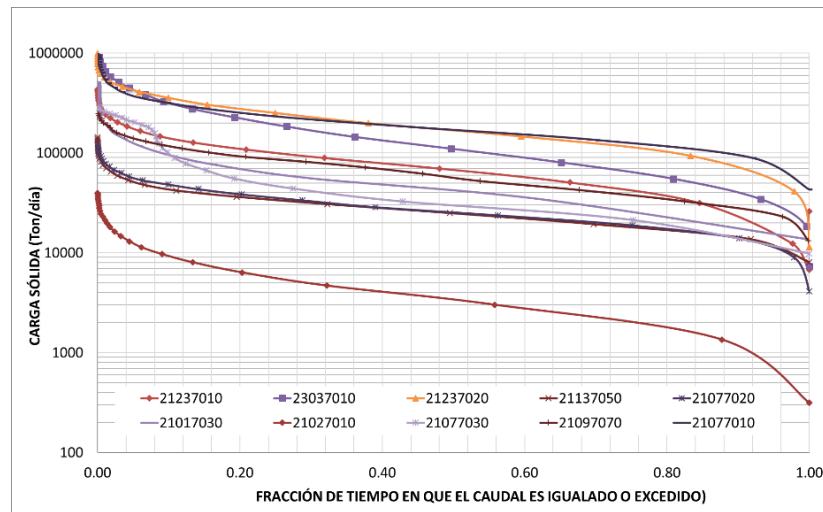
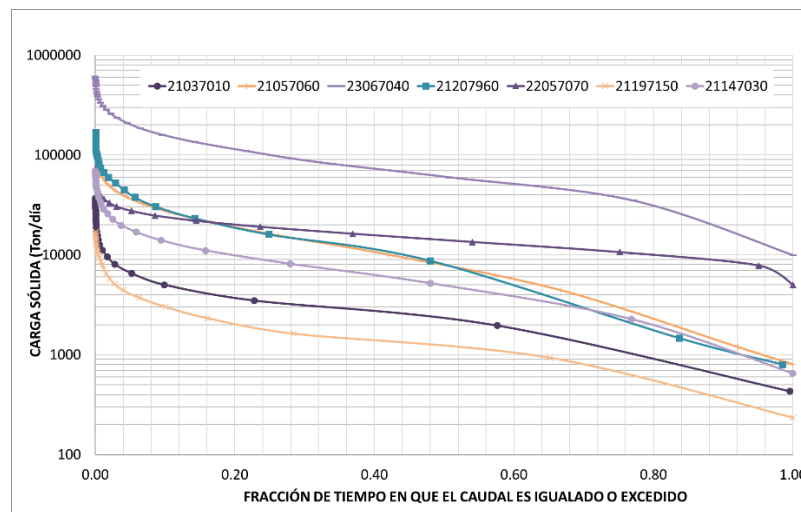


Figura 4-15: Tendencia de aforos sólidos para todas las estaciones sobre los afluentes



La agrupación anterior no muestra una tendencia agrupada del comportamiento general de los aforos, por lo que comienza a ser notorio que los parámetros elegidos no parecen ser similares para los afluentes o para el río Magdalena, pero aun así si se vislumbra algún tipo de relación para una agrupación diferente. Este tema es tratado más profundamente en el capítulo 4.4 y 5.

Figura 4-16: Curvas de duración de caudales sólidos en estaciones en el río Magdalena**Figura 4-17:** Curvas de duración de caudales sólidos en estaciones en los afluentes

Una consideración importante que se debe resaltar, es que las regresiones calculadas para correlacionar el caudal líquido con la carga sólida medida teóricamente solo son representativas y aplicables para el rango de caudales reportados en los aforos sólidos. Y debido a que los registros de caudales medios diarios empleados en la elaboración de las curvas de duración de caudales líquidos, cuentan con valores superiores e inferiores a dichos umbrales, la estimación de los valores de la carga en suspensión para los valores de caudal por fuera del rango de valores medidos, corresponden a valores extrapolados de las mediciones reales, situación que limita la confiabilidad en el estimativo de la carga anual.

Ya construidas todas las curvas, se estima entonces el área bajo las Curvas de duración de caudales sólidos (CDQS), y se relaciona el transporte promedio multianual, tal y como se muestra en la **Tabla 4-11**.

Es así cómo se identifica que de acuerdo a los registros disponibles la estación que mayor transporte de sedimentos de lavado registra es la estación Arrancaplumas (21237020) con 61231.05×10^3 Ton/año. lo cual es de esperarse al ser la estación ubicada más aguas abajo.

Ahora bien, de manera análoga a lo presentado en el numeral anterior, se analiza el comportamiento del rendimiento sólido, entendido como la relación entre el caudal sólido generado y el área de la cuenca y se agrupan los resultados en la **Tabla 4-11**.

Tabla 4-11: Resumen de Transporte promedio multianual en cada estación

ESTACIÓN	NOMBRE	TRANSPORTE PROMEDIO	RENDIMIENTO SÓLIDO	TRANSPORTE PROMEDIO MULTIANUAL	RENDIMIENTO SÓLIDO
		(Ton/día)	(Ton/día-km ²)	(10 ³ Ton/año)	(10 ³ Ton/año-km ²)
21237010	NARIÑO AUTOM	64044,28	1,33	23376,16	6,23
23037010	PTO SALGAR AUTOM	154470,28	2,73	56381,65	14,74
21237020	ARRANCAPLUMAS	167756,29	3,09	61231,05	16,33
21137050	ANGOSTURA RIO	23510,49	1,06	8581,33	2,34
21077020	PASO DEL COLEGIO	24301,69	2,05	8870,12	2,52
21037010	PTE GARCES AUTOMATICA	2354,34	2,38	859,33	0,64
21057060	PAICOL AUTOM	6079,56	1,26	2219,04	0,66
21017030	CASCADA SIMON BOLI	34734,19	24,02	12677,98	5,12
23067040	PTO LIBRE	73096,60	16,00	26680,26	10,16
21027010	PERICONGO	3878,15	1,09	1415,52	0,51
21207960	PTE PORTILLO	11491,45	2,12	4194,38	1,60
22057070	PTE COLACHE	13373,74	2,08	4881,42	1,59
21197150	LIMONAR EL	1313,34	0,54	479,37	0,17
21077030	VICHECITO	5122,67	0,43	1869,77	0,53
21147030	CARRASPOSO	51294,87	30,93	18722,63	7,80
21097070	PTE SANTANDER	63189,57	4,18	23064,19	6,41
21077010	PTE MOMICO	30992,78	2,53	11312,37	3,21

4.2.3. Caracterización morfológica y morfométrica

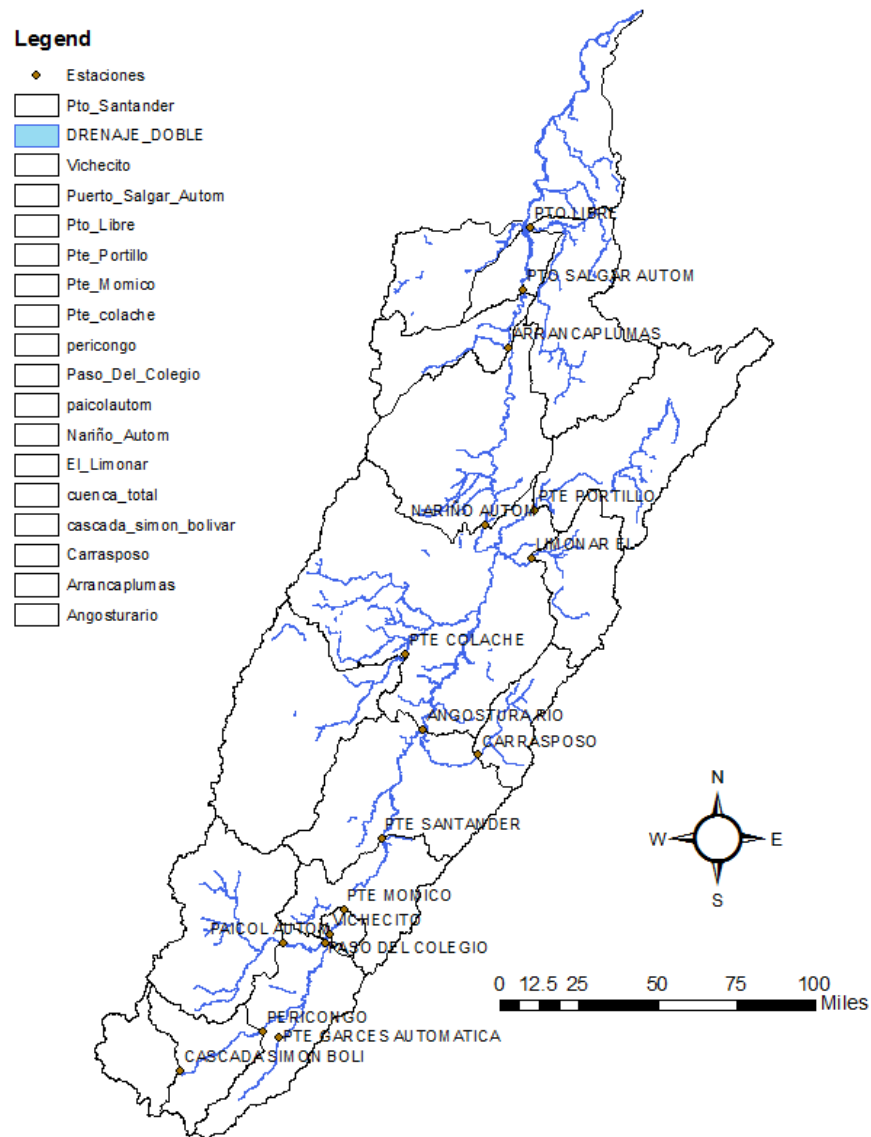
Pasando ahora a las características del terreno, se tienen entonces definidos los puntos de concentración de cada una de las cuencas conformadas hasta las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas y a partir del modelo digital del terreno y con ayuda de un sistema de información geográfico, se determinan cada uno de los parámetros Morfométricos y Morfológicos (MOR) definidos en el capítulo 3.1.

El área de la cuenca está definida como la línea que une toda la divisoria de aguas hasta el punto de concentración de la cuenca; el desnivel altitudinal se estima como la diferencia neta entre la elevación más alta y la más baja dentro de esa área; La elevación media se calcula como la cota promedio que se obtiene dentro del área de una misma cuenca, el ancho promedio de la cuenca se estima definiendo tantos ejes transversales sea posible y se estima su longitud promedio, el coeficiente de compacidad es la comparación de la forma de la cuenca con una circunferencia definido como el perímetro de la cuenca sobre el perímetro de una circunferencia que la circunscribe, la pendiente promedio de la ladera se estima a partir del plano de pendientes de toda la cuenca y estimando su valor promedio, La integral de la curva hipsométrica definida como el área abajo la curva hipsométrica que representa la acumulación de área bajo una

determinada curva de nivel, la pendiente promedio del cauce principal identificando los diferentes tramos de pendiente que existan para el recorrido del cauce y estimando su valor promedio y la relación de relieve

Todos los parámetros descritos se miden a partir del modelo digital del terreno y su manipulación en un sistema de información geográfica, donde se pueden hacer operaciones algebraicas con las propiedades de cada pixel de información. En primera instancia es importante revisar que el modelo se encuentra correctamente construido y que no presenta elementos vacíos que puedan distorsionar los resultados obtenidos. Luego el post proceso se realiza directamente sobre el programa, es posible generar tantos mapas o tablas de datos como se quieran visualizar, según el tipo de análisis.

Figura 4-18: Mapa de subcuencas hasta cada estación.



Agrupando la información de cada subcuenca en la **Tabla 4-12** es posible saber que la cuenca más grande entre las subcuencas de los cauces afluentes corresponde a la del río Saldaña Pte Colache (22057070) mientras que la subcuenca con mayor desnivel altitudinal total es la correspondiente a la estación Arrancaplumas (21237020) y Nariño Automatica (21237010) sobre el río Magdalena.

En general es posible identificar que la subcuenca con el mayor ancho promedio es la Pto Salgar Autom (23037010) y el recorrido de cauce principal cuya pendiente es más alta corresponde a la subcuenca de Cascada Simon Boli (21017030) en la parte alta del río Magdalena.

Tabla 4-12: Resumen de Parámetros Morfométricos y Morfológicos (MOR)

Parámetros Morfométricos y Morfológicos (MOR)		Área de la cuenca	Desnivel altitudinal	Elevación media	Ancho promedio de la cuenca	Coefficiente de compacidad	Pendiente promedio de la ladera	Integral Curva hipsométrica	Pendiente promedio cauce principal	Relación de relieve	Factor de Entrega
CÓDIGO	NOMBRE	Km2	M	Msnm	Km	---	%	---	%	---	---
21237010	NARIÑO AUTOM	48115.05	5000	3750	65.45	2.10	7.64	0.26	0.83	0.011	0.027
23037010	PTO SALGAR AUTOM	56512.52	5100	3825	70.90	2.10	7.19	0.46	0.71	0.009	0.026
21237020	ARRANCAPLUMAS	54343.22	5000	3750	68.12	2.06	7.34	0.37	0.68	0.009	0.026
21137050	ANGOSTURA RIO	22282	4900	3675	42.80	2.02	11.45	0.26	1.11	0.015	0.032
21077020	PASO DEL COLEGIO	11866.83	4700	3525	26.01	1.68	18.07	0.37	1.93	0.026	0.036
21037010	PTE GARCES AUTOMATICA	989.58	1800	1350	8.12	1.82	22.16	0.24	1.84	0.025	0.063
21057060	PAICOL AUTOM	4840.6	4500	3375	15.60	1.58	28.84	0.33	3.30	0.044	0.044
21017030	CASCADA SIMON BOLI	1445.97	3300	2475	9.92	1.84	33.26	0.44	4.24	0.057	0.058
23067040	PTO LIBRE	4567.44	3500	2625	17.36	1.81	20.17	0.32	0.44	0.006	0.045
21027010	PERICONGO	3543.67	3700	2775	14.00	1.66	26.42	0.22	3.07	0.041	0.047
21207960	PTE PORTILLO	5408	3500	2625	21.03	2.02	16.64	0.38	1.77	0.024	0.043
22057070	PTE COLACHE	6430.52	4100	3075	19.25	1.69	21.30	0.42	2.06	0.027	0.042
21197150	LIMONAR EL	2432.88	3700	2775	11.34	1.62	32.62	0.40	2.99	0.040	0.052
21077030	VICHECITO	11938.22	4700	3525	26.57	1.71	17.69	0.29	1.90	0.025	0.036
21147030	CARRASPOSO	1658.45	3200	2400	9.51	1.65	33.66	0.27	3.19	0.043	0.056
21097070	PTE SANTANDER	15129.38	4800	3600	30.72	1.76	15.63	0.39	2.34	0.031	0.034
21077010	PTE MOMICO	12266.86	4700	3525	27.66	1.76	16.99	0.43	1.74	0.023	0.036

Las diferencias y similitudes entre los parámetros morfológicos de las subcuencas, también son tenidos en cuenta como posibles indicadores de diferencias y similitudes entre su generación de sedimentos en suspensión.

La construcción de la curva hipsométrica da una idea del estado de evolución de la cuenca tal y como lo establece Strahler, A partir del valor del área relativa que yace bajo la curva (integral hipsométrica; valores superiores al 60 % indican desequilibrio manifiesto en el funcionamiento de la cuenca (juventud en el sentido davisiano), valores rondando el 47% representan equilibrio (madurez), e inferiores a 30% implican fase de "monadnock" (senectud).

Es así como se identifica que la mayoría de las cuencas son representativas de un paisaje de transición entre un estado de madurez a un estado senil y que representan a sí mismo un estado de cambio y evolución continuo.

En el ANEXO G. CURVAS HIPSOMÉTRICAS se presentan las gráficas correspondientes a cada uno de las estaciones y su correspondiente área bajo la curva.

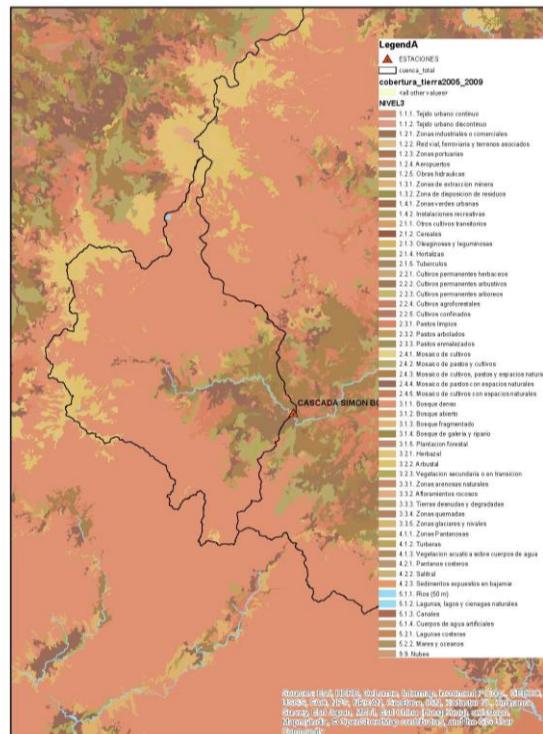
4.2.4. Caracterización de cobertura del suelo y geología para ingeniería

Posteriormente, el proceso de caracterización de cobertura y uso del suelo se ejecuta a partir de la información en formato shape y formato pdf que fue adquirida en las diferentes entidades, y requiere de un pre-proceso de digitalización de manera tal que toda la información se encuentre en los formatos requeridos y así poder ejecutarlo mencionado en el capítulo 3.4.4

Para el caso de la cobertura y uso del suelo, se cuenta con dos tipos de fuentes de información que son el mapa de cobertura del suelo elaborado por el IDEAM con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia en 2006 y los planos generados por diferentes universidades de acuerdo a la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (Servicio Geológico Colombiano, 2015) Como se mencionó antes, la discretización de cada clasificación de uso del suelo está muy ligada a la escala, por lo que para este caso de estudio se agruparon diferentes categorías a su nivel más alto y así se generaron los diferentes mapas de cobertura del suelo y geología para ingeniería en cada una de las subcuencas de interés.

El proceso de construcción de las capas en formato shape de los mapas de geologías para ingeniería incluye además la correspondiente digitalización de los mismos, ya que la información se adquiere principalmente en formato PDF. Es así como se dispone de un tiempo adicional para el pre proceso de esta información, uniendo las diferentes planchas y diligenciando los atributos según se necesita en el análisis para poder proceder con su uso. Un ejemplo de la construcción de los mapas de cobertura para una de las subcuencas se presenta en la **Figura 4-19**.

Figura 4-19: Ejemplo de Mapa de geología para ingeniería y cobertura del suelo



Teniendo el mapa de cobertura de suelo y el de geología para ingeniería, se genera un atributo adicional en cada caso donde se genera la equivalencia entre la categoría original y el valor de un Coeficiente de Susceptibilidad de erosión de cobertura de suelo (Ces) y un Coeficiente de Susceptibilidad de erosión de material geológico (Ceg) tal y como se relacionó en el capítulo 3.4.4. Esta equivalencia se logra a partir de una condición lógica que evalúa la categoría de clasificación en cada punto del mapa y le asigna su correspondiente valor.

El resultado de este ejercicio es entonces una asignación que puede ser visualizada con colores en cada capa y que puede ser operada a tener un valor numérico. Finalmente se usa la expresión (3.3) y la (3.4) y se obtiene entonces un único valor ponderado para cada una de las subcuencas. La **Tabla 4-13** resume los valores de los coeficientes estimados para cada una de las subcuencas.

Tabla 4-13: Resumen de Parámetros Coeficientes de susceptibilidad de erosión (Ces-Geg)

Parámetros Coeficientes de susceptibilidad de erosión	Coeficiente de Susceptibilidad de erosión de cobertura de suelo (Kes)	Coeficiente de Susceptibilidad de erosión de material geológico (Keg)
CÓDIGO		
21237010	0.211	0.753
23037010	0.926	0.922
21237020	0.290	0.167
21137050	0.128	0.539
21077020	0.745	0.031
21037010	0.577	0.604
21057060	0.767	0.540
21017030	0.701	0.336
23067040	0.616	0.993
21027010	0.517	0.466
21207960	0.851	0.360
22057070	0.765	0.943
21197150	0.895	0.870
21077030	0.531	0.339
21147030	0.967	0.818
21097070	0.964	0.683
21077010	0.788	0.501

(Fuente: Elaboración propia)

4.3. Etapa III – Análisis estadístico de parámetros

Dentro de este capítulo se relacionan los diferentes procesos elaborados para la construcción del modelo estadístico, partiendo de la revisión de la colinealidad de variables y la aplicabilidad del modelo de regresión simple, y posteriormente a aplicación de los modelos de regresión múltiple regresiva para las variables estimadas hasta obtener el modelo de mejor ajuste.

Estas actividades se elaboraron con la ayuda de la implementación del programa R, el cual es una plataforma de programación de libre acceso enfocada en el análisis estadístico de datos, lo cual permite el uso de módulos que agrupan funciones básicas y avanzadas de análisis de datos.

4.3.1. Revisión de colinealidad de variables

Como se mencionó en el capítulo 3.5 se ejecuta una primera etapa dentro de la cual se analiza si los parámetros que se han estimado para caracterizar cada una de las subcuencas tienen algún tipo de colinealidad entre ellas que denoten dependencia en su naturaleza y, por lo tanto, puedan afectar negativamente la construcción del modelo estadístico.

Para tal fin se construye con ayuda del programa R (R Development Core Team, 2017) la matriz de correlaciones entre variables la cual permite ver cuantitativamente mediante el coeficiente de correlación, el cual expresa el grado de relación lineal existente entre dos variables. Este análisis se realiza como verificación, a pesar que la selección de las variables se hace a partir de los resultados de trabajos previos y se incluyen variables que ya han sido utilizadas dentro de regresiones simples en otras cuencas como (Restrepo & Restrepo, 2005), (Niño, 2015) (López, Martínez, & Feria, 2014) (Chow, Maidment, & Mays, 1994) (Cubillos & Forero, 2015). Ese así como se establece que si el coeficiente de correlación arroja un valor superior al ± 0.8 , se considera con una dependencia lineal significativa y se debe eliminar la variable del análisis.

Tabla 4-14: Matriz de correlaciones de variables

Sigla	T1	T2	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15
T1	1																
T2	0.45	1															
X1	-0.65	0.65	1														
X2	0.14	0.54	0.54	1													
X3	0.25	-0.62	0.57	0.51	1												
X4	-0.66	-0.25	0.62	0.54	-0.36	1											
X5	0.35	0.57	0.35	-0.3	0.45	0.65	1										
X6	0.62	-0.52	0.57	0.67	-0.61	0.52	0.44	1									
X7	-0.54	0.57	-0.61	0.54	-0.35	0.41	0.14	0.42	1								
X8	-0.52	0.65	-0.64	0.34	-0.31	0.57	0.52	0.21	0.51	1							
X9	-0.49	-0.45	0.62	-0.63	0.74	0.35	0.25	0.22	0.41	0.31	1						
X10	0.51	0.53	-0.54	0.35	0.31	-0.41	0.25	-0.36	0.51	0.57	0.26	1					
X11	0.25	-0.27	0.35	0.43	0.62	0.56	0.64	0.34	0.15	0.25	0.68	0.61	1				
X12	-0.7	0.72	0.65	0.51	-0.25	0.62	0.35	0.51	0.54	0.5	0.61	0.35	0.52	1			
X13	-0.53	0.5	-0.41	-0.49	0.59	0.53	-0.34	0.65	0.54	0.5	0.66	0.38	0.59	0.76	1		
X14	0.15	0.51	0.49	0.75	0.64	0.18	0.35	0.54	0.31	0.26	0.37	0.68	0.34	0.16	0.18	1	
X15	-0.53	0.5	-0.41	-0.49	0.59	0.53	-0.34	0.65	0.54	0.5	0.66	0.38	0.59	0.51	0.54	0.31	1

(Fuente: Elaboración propia)

Parámetros sedimentológicos (SED): Carga de lavado (T_1); Rendimiento sólido (T_2); **Parámetros Hidrológicos (HID):** Precipitación media anual multianual (X_1); Caudal Medio Multianual (X_2) Rendimiento hídrico / Escorrentía específica (X_3); **Parámetros Morfométricos y Morfológicos (MOR):** Área de la cuenca (X_4); Desnivel altitudinal (X_5); Elevación media (X_6); Ancho promedio de la cuenca (X_7); Coeficiente de compacidad (X_8); Pendiente promedio de la ladera (X_9); Integral Curva hipsométrica (X_{10}); Pendiente promedio cauce principal (X_{11}); Relación de relieve (X_{12}); Factor de entrega (X_{13}). **Parámetros de cobertura de del suelo y geología para ingeniería (CUG):** Factor Susceptibilidad de erosión de cobertura de suelo (X_{14}), Factor Susceptibilidad de erosión de material geológico (X_{15}).

Se construye entonces la **Tabla 4-14** que representa la matriz y se puede observar que todos los valores calculados con las pruebas estadísticas en ningún caso se encuentran coeficientes de correlación superiores al límite establecido. Estos resultados validan entonces que las variables representativas que fueron utilizadas en estudios anteriores realmente no tienen una interdependencia significativa entre ellas para la cuenca del río Magdalena de la misma manera en que se obtuvo para las subcuencas del río Cauca. Bajo esta premisa se decide que todas las variables pueden ser incluidas dentro del análisis de regresión.

La construcción de la matriz de correlación se realiza haciendo uso de herramientas de análisis estadístico como lo es el R el cual es un entorno y lenguaje de programación con un enfoque al análisis estadístico. Dentro de programa existen diferentes alternativas de procedimientos estadísticos entre las que se encuentra la construcción de la matriz de dispersión, que es una representación gráfica de la colinealidad entre las variables de manera complementaria a la matriz de correlación.

Esta imagen resulta cómoda de leer al mostrar los gráficos de dispersión de los datos a manera matricial y la línea de la función de distribución de cada variable en la diagonal. En el ANEXO G. MATRIZ DISPERSIÓN DE VARIABLES se presenta dicha gráfica, donde es posible notar que en efecto hay algunas relaciones entre variables de carácter lineal, que a pesar de estar por debajo del umbral establecido puede generar algún tipo de desviación en el modelo. Adicionalmente se encuentra que no todas las variables tienen una distribución normal evidente como es requisito para la aplicación del modelo de regresión múltiple, por lo que se debe mantener presente este hecho al momento de analizar los resultados obtenidos.

4.3.2. Construcción de regresiones regresivas

La etapa final de este Trabajo Final de Maestría, se construye el modelo estadístico que permite estimar la carga de sedimento de lavado dentro de las subcuencas seleccionadas en la cuenca del río Magdalena a partir de los parámetros que fueron estimados para la caracterización de cada una de ellas, generando el mejor ajuste estadístico y, por lo tanto, representando de la manera más precisa posible las condiciones naturales. Se aplica entonces la técnica tradicional de regresiones regresivas múltiples, las cuales conforman un modelo de la forma expresada en la ecuación (3.5) la cual, al aplicar la regla de los logaritmos permite representar un modelo de la forma

$$\begin{aligned}
 T &= C \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \cdot X_3^{\beta_3} \cdot \dots \cdot X_n^{\beta_n} \\
 \ln(T) &= \ln(C \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \cdot X_3^{\beta_3} \cdot \dots \cdot X_n^{\beta_n}) \\
 \ln(T) &= \ln(C) + \ln(X_1^{\beta_1}) + \ln(X_2^{\beta_2}) + \ln(X_3^{\beta_3}) + \dots + \ln(X_n^{\beta_n}) \\
 \ln(T) &= \ln(C) + \beta_1 \ln(X_1) + \beta_2 \ln(X_2) + \beta_3 \ln(X_3) + \dots + \beta_n \ln(X_n)
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Dentro de los análisis de regresión múltiple se estima el R^2 que expresa el porcentaje de variación de la variable de respuesta que explica su relación con una o más variables predictoras. Por lo general, mientras mayor sea el R^2 , mejor será el ajuste del modelo a sus datos. El R^2 siempre se encuentra entre 0 y 100%. El R^2 , también se conoce como el coeficiente de determinación o determinación múltiple (en la regresión lineal múltiple).

Sin embargo, siendo una regresión múltiple se recomienda la verificación del R^2_{ajustado} que representa el porcentaje de variación en la variable de respuesta que es explicado por su relación con una o más variables predictoras, ajustado para el número de predictores en el modelo. Este ajuste es importante porque el R^2 de cualquier modelo siempre aumentará cuando se agregue un nuevo término. Puede parecer que un modelo con más términos tiene un mejor ajuste porque incluye más términos. Para la construcción de este modelo, y siguiendo la línea planteada en el trabajo elaborado en el río Cauca, (Niño, 2015) se proponen dos alternativas generales que incluyen la utilización de la totalidad de los parámetros estimados en cada subcuenca para calcular:

- 1) Carga de lavado (T_1) en (10^3 Ton/Año)
- 2) Rendimiento sólido (T_2) en (10^3 Ton/Año-km²)

Ambas alternativas se evalúan mediante la construcción de regresiones regresivas partiendo de la totalidad de las variables estudiadas y evaluando las pruebas estadísticas bajo las pruebas de hipótesis para así seleccionar consecutivamente las variables que menos aporte le dan al modelo estadístico y así encontrar un conjunto de un grupo de algunas de ellas que tenga un ajuste razonable.

Se presentan entonces los resultados obtenidos de la construcción de las regresiones regresivas.

Regresiones regresivas para la Carga de lavado (T_1)

Es así como se realiza el proceso de construcción de regresiones regresivas teniendo como variable independiente la Carga de lavado (T_1), partiendo de las 15 variables independientes y eliminando consecutivamente la variable cuyo estadístico se encuentre fuera del valor aceptado.

Se probaron más de 20 combinaciones de eliminación de variables de acuerdo a los resultados de los estadísticos en cada iteración, sabiendo que la estabilidad del modelo varía con cualquier eliminación, hasta encontrar una secuencia óptima que favoreciera y mejorara el resultado estadístico. Tras la primera iteración con la totalidad de las variables se encuentra que existen varias de ellas que parecen no aportar ningún valor dentro del modelo, por lo que el valor del estadístico es anulado y estimado como "NUM" en el programa. Por esta razón se eliminan estos valores inicialmente, luego de haber comprobado que no existe ninguna variación en el estadístico ni en el coeficiente de determinación

A continuación, se relaciona el proceso de eliminación de variables a manera muestra, ya que en el ANEXO H. REGRESIONES REGRESIVAS se relaciona la totalidad de la información estadística obtenida en cada iteración.

Iteración 1	p-Value	R²ajustado
T1 ~ X1+X2+X3+X4+X5+X6+X7+X8+X9+X10+X11+X12+X13+X14+X15	0.006544	0.7921
Iteración 2	p-Value	R²ajustado
T1 ~ X1+X2+X4+X5+X6+X7+X8+X9+X10+X11+X12+X13+X14+X15,	0.006544	0.7921
Iteración 3	p-Value	R²ajustado
T1 ~ X1+X2+X4+X5+X7+X8+X9+X10+X11+X12+X13+X14+X15	0.006544	0.7921
Iteración 4	p-Value	R²ajustado
T1 ~ X1+X2+X4+X5+X7+X9+X10+X11+X12+X13+X14+X15	0.006544	0.7921
Iteración 5	p-Value	R²ajustado
T1~X1+X2+X4+X5+X7+X10+X11+X12+X13+X14+X15	0.006544	0.7921
Iteración 6	p-Value	R²ajustado
T1~X1+X2+X4+X5+X7+X10+X11+X13+X14+X15	0.006544	0.7921
Iteración 7	p-Value	R²ajustado
T1~X1+X2+X4+X5+X7+X10+X11+X13+X14	0.004401	0.7726
Iteración 8	p-Value	R²ajustado
T1~X1+X2+X4+X5+X7+X10+X11+X14	0.004401	0.7726
Iteración 10	p-Value	R²ajustado
<u>T1~X1+X2+X4+X5+X7+X10+X11</u>	0.002515	0.7628

Regresiones regresivas para Rendimiento sólido (T_2)

Es así como se realiza el proceso de construcción de regresiones regresivas teniendo como variable independiente Rendimiento sólido (T_2) partiendo de las 15 variables independientes y eliminando consecutivamente la variable cuyo estadístico se encuentre fuera del valor aceptado.

De igual manera que en el caso anterior, se evaluaron más de 20 combinaciones de eliminación de variables hasta encontrar una secuencia óptima que favoreciera y mejorara el resultad estadístico. En este caso se presenta la misma situación reportada anteriormente, en la cual se identifican en primera instancia parámetros que no parecen no aportar ningún valor dentro del modelo, por lo que el valor del estadístico es anulado. Por esta razón se eliminan estos valores inicialmente, luego de haber comprobado que no existe ninguna variación en el estadístico ni en el coeficiente de determinación

A continuación, se relaciona el proceso de eliminación de variables a manera muestra, ya que en el ANEXO H. REGRESIONES REGRESIVAS se relaciona la totalidad dela información estadística obtenida en cada iteración.

Iteración 1	p-Value	R²_{ajustado}
T2~X1+X2+X3+X4+X5+X6+X7+X8+X9+X10+X11+X12+X13+X14+X15	0.02195	0.6957
Iteración 3	p-Value	R²_{ajustado}
T2~X1+X2+X3+X5+X7+X8+X9+X10+X11+X12+X13+X14+X15	0.02195	0.6957
Iteración 4	p-Value	R²_{ajustado}
T2~X1+X2+X3+X5+X7+X9+X11+X12+X13+X14+X15	0.03023	0.6112
Iteración 7	p-Value	R²_{ajustado}
<u>T2~X1+X2+X3+X5+X7+X11+X14+X15</u>	0.03023	0.6112
Iteración 8	p-Value	R²_{ajustado}
T2~X1+X2+X3+X5+X7+X11+X14	0.02617	0.6608

Es así como se obtienen entonces dos ecuaciones, una para la Carga de lavado (T_1), y otra para el Rendimiento sólido (T_2) la cuales representan, con un ajuste razonable, el comportamiento de la producción de sedimentos en las subcuencas del río Magdalena.

$$T_1 = 1.87x10^5 \cdot X_1^{-4.9021} \cdot X_2^{1.6389} \cdot X_4^{-10.0419} \cdot X_5^{10.2312} \cdot X_7^{11.4964} \cdot X_{10}^{4.0842} \cdot X_{11}^{-2.6529} \quad (4.2)$$

$$\text{Valor del ajuste } R^2_{\text{ajustado}} = 0.7628$$

$$T_2 = 3.38x10^{-3} \cdot X_1^{-3.5985} \cdot X_2^{-11.8046} \cdot X_3^{13.5560} \cdot X_5^{10.8386} \cdot X_7^{18.3175} \cdot X_{11}^{-2.3985} \cdot X_{14}^{1.5847} \quad (4.3)$$

$$\text{Valor del ajuste } R^2_{\text{ajustado}} = 0.6608$$

Parámetros sedimentológicos (SED): Carga de lavado (T_1); Rendimiento sólido (T_2); **Parámetros Hidrológicos (HID):** Precipitación media anual multianual (X_1); Caudal Medio Multianual (X_2) Rendimiento hídrico / Escorrentía específica (X_3); **Parámetros Morfométricos y Morfológicos (MOR):** Área de la cuenca (X_4); Desnivel altitudinal (X_5); Elevación media (X_6); Ancho promedio de la cuenca (X_7); Coeficiente de compacidad (X_8); Pendiente promedio de la ladera (X_9); Integral Curva hipsométrica (X_{10}); Pendiente promedio cauce principal (X_{11}); Relación de relieve(X_{12}); Factor de entrega(X_{13}). **Parámetros de cobertura de del suelo y geología para ingeniería (CUG):** Factor Susceptibilidad de erosión de cobertura de suelo (X_{14}), Factor Susceptibilidad de erosión de material geológico (X_{15}).

4.4. Etapa IV – Análisis de resultados

En el desarrollo de la Determinación de correlaciones entre parámetros hidroclimáticos y físicos, y la carga de lavado en algunas subcuencas del Río Magdalena, se construyeron 2 ecuaciones paramétricas que permiten predecir la Carga de lavado (T_1), y para el Rendimiento sólido (T_2) medio anual.

Con la intención de establecer la calidad de los resultados generados por las ecuaciones paramétricas construidas en el capítulo anterior, se ejecuta un análisis general de los resultados obtenidos desde varios puntos de vista. A continuación, se enuncian los enfoques de los diferentes análisis realizados:

- Verificación de calidad de pronóstico de modelos paramétricos obtenidos para el río Magdalena: Se comparan los valores de Carga de lavado (T_1), y para el Rendimiento sólido (T_2) estimados mediante las ecuaciones 4.2-4.3 y los valores estimados a partir de las mediciones de caudal sólido realizadas directamente sobre los cauces en las estaciones del IDEAM, con el ánimo de establecer el grado de confiabilidad existente en los valores pronosticados por el modelo paramétrico construido en este Trabajo Final de Maestría. En este punto se evalúa la pertinencia de la aplicación de las ecuaciones 4.2-4.3 en futuros proyectos.
- Comparación de la estructura del modelo paramétrico del río Magdalena y el río Cauca. Dado que existe un ejercicio simular ejecutado para algunas subcuencas del río Cauca, se analiza posteriormente la estructura de las ecuaciones construidas en este Trabajo Final de Maestría en un tramo del río Magdalena con la estructura de las ecuaciones construidas para el caso del río Cauca, con el ánimo de establecer si existen similitudes entre las variables resultantes como representativas, los coeficientes o los exponentes de los modelos paramétricos construidos en ambas cuencas, cumpliendo con uno de los objetivos específicos del trabajo.
- Análisis de los parámetros representativos en el modelo paramétrico del río Magdalena y en modelo del río Cauca: Tras la revisión de la estructura de los modelos paramétricos, se profundiza la comparación de las variables utilizadas para la construcción de ambos modelos. Dado que la metodología de selección de parámetros y la definición misma de los parámetros a usar en el caso del río Magdalena no fue exactamente la misma utilizada en el caso del río Cauca, se comentan las diferencias de aplicación y las limitaciones que estas diferencias involucran en los resultados. En este punto, también se incluye una comparación de las magnitudes de los parámetros que sean comparables entre ambos ejercicios de aplicación, con el ánimo de identificar si existen condiciones propias de las subcuencas utilizadas que expliquen las diferencias encontradas.
- Análisis de la generalización de los pronósticos de carga de lavado de los modelos paramétricos construidos en el río Magdalena y en el río Cauca: Tras establecer todas las similitudes y diferencias estructurales de los modelos paramétricos construidos tanto para el río Magdalena como para el río Cauca, se evalúan las ecuaciones encontradas en las cuencas contrarias, como un ejercicio de validación de la generalización de los modelos. Esta verificación se realiza con la intención de establecer si los modelos de una cuenca son aplicables a una cuenca diferente a la utilizada para la construcción y comentar las oportunidades de investigación sobre estos resultados.

4.4.1. Verificación del pronóstico de los modelos paramétricos obtenidos para el río Magdalena

El primer análisis de resultados se enfoca en conocer el comportamiento de los valores “pronosticados” a partir de los modelos paramétricos construidos en este Trabajo Final de Maestría, contra los valores “medidos” en las estaciones hidrológicas seleccionadas en las subcuencas del río Magdalena, en busca de evaluar el funcionamiento y bondad de ajuste de la predicción de dichos modelos. Para tal fin se utilizan las ecuaciones que se presentan a continuación.

$$T_1 = 1.87 \times 10^5 \cdot P_{mma}^{-4.9021} \cdot Q_{mma}^{1.6389} \cdot A_c^{-10.0419} \cdot H_t^{10.2312} \cdot An_p^{11.4964} \cdot I_{Hips}^{4.0842} \cdot S_{cp}^{-2.6529} \quad (4.4)$$

$$T_2 = 3.38 \times 10^{-3} \cdot P_{mma}^{-3.5985} \cdot Q_{mma}^{-11.8046} \cdot R_h^{13.5560} \cdot H_t^{10.8386} \cdot An_p^{18.3175} \cdot S_{cp}^{-2.3985} \cdot K_{es}^{1.5847} \quad (4.5)$$

- T_1 Carga de lavado (miles de Ton/Año)
- T_2 Rendimiento sólido (Miles de Ton/Año-Km²)
- P_{mma} Precipitación media anual multianual (mm/Año)
- Q_{mma} Caudal Medio Multianual (m³/s-Año)
- A_c Área de la cuenca (Km²)
- H_t Desnivel Altitudinal (m)
- An_p Ancho promedio de la cuenca (Km)
- I_{Hips} Integral Curva hipsométrica (–)
- S_{cp} Pendiente promedio cauce principal (%)
- R_h Rendimiento hídrico / Escorrentía específica (m³/s- Km²)
- K_{es} Factor Susceptibilidad de erosión de cobertura de suelo

Estas ecuaciones corresponden a las correlaciones obtenidas a través del método de regresiones regresivas cuyo estadístico de aceptación $R^2_{ajustado}$ presentó el mejor ajuste con la menor cantidad de variables y, por lo tanto, se reconocen como las expresiones que mejor estiman los valores de producción de sedimento de carga de lavado, con las variables independientes citadas.

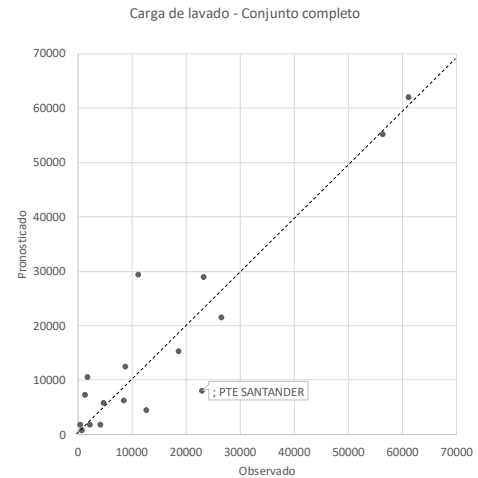
Es así, como se construyen las gráficas que se presentan a continuación, donde se utilizan las ecuaciones (4.14) y (4.15) propuestas en este Trabajo Final de Maestría para estimar los valores de Carga de lavado (T_1), y el Rendimiento sólido (T_2) y hacer la correspondiente comparación contra los valores efectivamente medidos en cada una de las subcuencas.

Estas graficas se construyen con la intención de ver más claramente el significado de la bondad de ajuste corresponde a cada una de las ecuaciones anteriores, pero revisando simultáneamente el ajuste del valor estimado de cada una de las estaciones utilizadas y de esta manera, establecer con más certeza cuál es la desviación del resultado.

Para la primera ecuación que estima la Carga de lavado (T_1) medido en MilesTon/Año (4.14) a partir de los valores estimados en la caracterización de las subcuencas, obteniendo lo mostrado en la siguiente figura.

Figura 4-20: Comparación Pronóstico de Carga de Lavado (T_1) en río Magdalena y afluentes

COD	ESTACIÓN	CORRIENTE	MEDIDO 10 ³ Ton/Año	PRONOSTICADO 10 ³ Ton/Año
21237010	NARIÑO AUTOM	MAGDALENA	23376,160	28943,718
23037010	PTO SALGAR AUTOM	MAGDALENA	56381,652	55112,207
21237020	ARRANCAPLUMAS	MAGDALENA	61231,045	61951,542
21137050	ANGOSTURA RIO	MAGDALENA	8581,330	6225,838
21077020	PASO DEL COLEGIO	MAGDALENA	8870,116	12466,466
21017030	CASCADA SIMON BOLI	MAGDALENA	12677,980	4476,000
21027010	PERICONGO I	MAGDALENA	1415,524	7228,998
21077030	VICHECITO	MAGDALENA	1869,772	10478,064
21097070	PTE SANTANDER	MAGDALENA	23064,191	8046,010
21077010	PTE MOMICO	MAGDALENA	11312,365	29383,445
21037010	PTE GARCES AUTOMATICA	SUAZA	859,334	717,634
21057060	PAICOL AUTOM	PAEZ	2219,037	1815,515
23067040	PTO LIBRE	NEGRO	26680,260	21455,823
21207960	PTE PORTILLO	BOGOTA	4194,3775	1769,352
22057070	PTE COLACHE	SALDANA	4881,415	5758,092
21197150	LIMONAR EL	SUMAPAZ	479,369	1792,534
21147030	CARRASPOSO	CABRERA	18722,626	15299,552

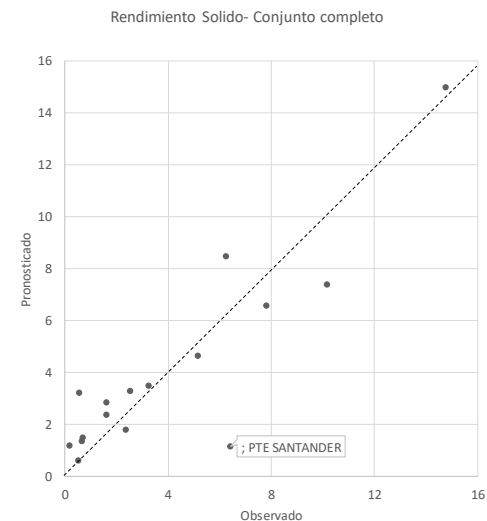


La **Figura 4-20** muestra con claridad que los valores estimados se encuentran dispersos alrededor de la línea de armonía (Equivalencia exacta), pero manteniendo una dispersión alrededor del valor medido, que corresponde al ajuste estadístico de $R^2_{ajustado}=0.7628$ obtenido en la construcción de la correlación.

Se repite entonces el ejercicio elaborado en el caso anterior con la construcción de una gráfica que relacione los valores medidos y los valores pronosticados con la segunda ecuación que estima el Rendimiento sólido (T_2) medido en Ton/Año-km² (4.15) a partir de los valores estimados en la caracterización de las subcuencas, obteniendo lo mostrado en la **Figura 4-21**.

Figura 4-21: Comparación Pronóstico Rendimiento Sólido (T_2) en río Magdalena y afluentes

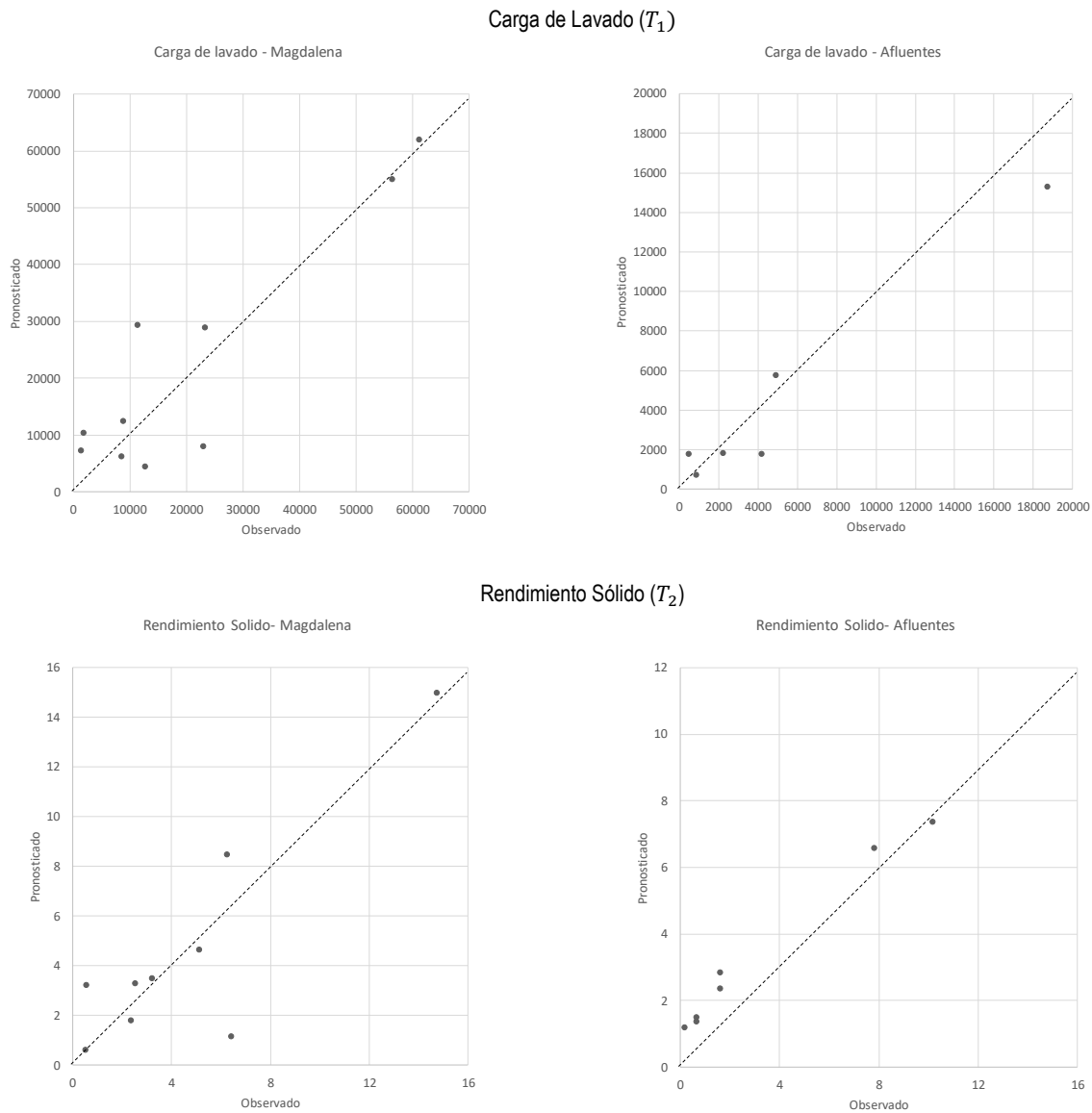
COD	ESTACIÓN	CORRIENTE	MEDIDO 10 ³ Ton/Año.Km ²	PRONOSTICADO 10 ³ Ton/Año.Km ²
21237010	NARIÑO AUTOM	MAGDALENA	6,23	8,46
23037010	PTO SALGAR AUTOM	MAGDALENA	14,74	14,99
21237020	ARRANCAPLUMAS	MAGDALENA	16,32	14,73
21137050	ANGOSTURA RIO	MAGDALENA	2,33	1,78
21077020	PASO DEL COLEGIO	MAGDALENA	2,5	3,27
21017030	CASCADA SIMON BOLI	MAGDALENA	5,12	4,63
21027010	PERICONGO I	MAGDALENA	0,510	0,61
21077030	VICHECITO	MAGDALENA	0,53	3,24
21097070	PTE SANTANDER	MAGDALENA	6,40	1,16
21077010	PTE MOMICO	MAGDALENA	3,20	3,49
21037010	PTE GARCES AUTOMATICA	SUAZA	0,63	1,37
21057060	PAICOL AUTOM	PAEZ	0,65	1,49
23067040	PTO LIBRE	NEGRO	10,16	7,38
21207960	PTE PORTILLO	BOGOTA	1,59	2,84
22057070	PTE COLACHE	SALDANA	1,58	2,36
21197150	LIMONAR EL	SUMAPAZ	0,17	1,19
21147030	CARRASPOSO	CABRERA	7,80	6,58



Para este caso se encuentra que al graficar los datos correspondientes a la comparación entre los valores medidos y los valores pronosticados por la ecuación (4.3), una dispersión de datos baja y se hace evidente una concentración de la mayoría de los puntos sobre la línea de 45°. Esto contradice el ajuste del modelo estadístico de $R^2_{ajustado} = 0.6608$, que fue inferior al obtenido para el caso de la Carga de Lavado (T_1)

A partir de los resultados de las gráficas anteriores, surge la inquietud si existen tendencias diferentes en cuanto a la agrupación de los datos que puedan ser analizadas independientemente, por lo que se proponen dos agrupaciones distintas para comprobar una primera versión de esta hipótesis, las cuales son agrupar afluentes y estaciones en el río Magdalena. Este ejercicio se hace con la aplicación de las mismas ecuaciones (4.14) y (4.15). Para ver los resultados de esa agrupación se construyen las gráficas que se presentan en la **Figura 4-22**.

Figura 4-22: Comparación Pronostico (T_1) y (T_2) separados por cauce principal y afluentes



Cuando se discriminan los valores correspondientes para el cauce del río Magdalena y las de sus afluentes, es posible notar que la dispersión de los valores pronosticados versus los valores calculados es mayor para las cuencas del río Magdalena, mientras que se nota una mayor homogeneidad en el caso de los afluentes para ambos factores.

En este punto se ratifica la necesidad de evaluar si existe alguna agrupación diferente de datos que pueda representar mejor las tendencias de producción de sedimentos en un grupo de subcuencas. Para comprobarlo, se plantea un ejercicio adicional a los objetivos de este Trabajo Final de Maestría en el cual se busca un criterio que pudiera ser eficiente para agrupar los datos. Los criterios evaluados son:

- Se valora la tendencia evidenciada en la **Figura 4-22** respecto a un mejor ajuste de la tendencia para los afluentes, los cuales tienen áreas más pequeñas con respecto a las áreas de la cuenca principal.
- Se revisa la información utilizada en el trabajo del río Cauca (Niño, 2015) donde los tamaños de las cuencas son más homogéneos entre sí y se encuentran repartidos dentro del rango de datos más uniformemente.

En la **Tabla 4-15** se muestran los subgrupos utilizados

Tabla 4-15: Agrupación por área de cuencas para análisis paramétrico

	CÓDIGO	NOMBRE	CORRIENTE	ÁREA
< 10.000km ²	21037010	PTE GARCES AUTOMATICA	SUAZA	989,58
	21017030	CASCADA SIMON BOLI	MAGDALENA	1445,97
	21147030	CARRASPOSO [21147030]	CABRERA	1658,45
	21197150	LIMONAR EL [21197150]	SUMAPAZ	2432,88
	21027010	PERICONGO [21027010]	MAGDALENA	3543,67
	23067040	PTO LIBRE [23067040]	NEGRO	4567,44
	21057060	PAICOL AUTOM [21057060]	PAEZ	4840,6
	21207960	PTE PORTILLO [21207960]	BOGOTA	5408
	22057070	PTE COLACHE [22057070]	SALDANA	6430,52
> 10.000km ²	21077020	PASO DEL COLEGIO	MAGDALENA	11866,83
	21077030	VICHECITO [21077030]	MAGDALENA	11938,22
	21077010	PTE MOMICO [21077010]	MAGDALENA	12266,86
	21097070	PTE SANTANDER	MAGDALENA	15129,38
	21137050	ANGOSTURA RIO	MAGDALENA	22282
	21237010	NARIÑO AUTOM	MAGDALENA	48115,05
	21237020	ARRANCAPLUMAS	MAGDALENA	54343,22
	23037010	PTO SALGAR AUTOM	MAGDALENA	56512,52

En este punto se hace evidente que la diferencia de esta selección con respecto a la separación por cauce principal y afluentes es solo la inclusión de dos puntos adicionales a este segundo grupo, pero la construcción de los modelos paramétricos si es diferente dando que la regresión se ajustará únicamente a la distribución de los datos de cada grupo.

De acuerdo a los criterios anteriores, se elige el criterio de dividir el conjunto de las 17 subcuencas utilizadas para este análisis en el río Magdalena en dos grupos, separando de las cuencas con áreas menores de 10.000km² y áreas mayores de 10.000km². y generando nuevos subconjuntos de datos en busca de dos ecuaciones para cada caso, una para la Carga de Lavado (T_1) y Rendimiento sólido (T_2). Se hace uso de la misma metodología planteada en los numerales 3.5.1 y 4.4, implementando el programa R para la construcción de las regresiones múltiples y así encontrar la combinación de variables que mejor $R^2_{ajustado}$ arrojen.

Carga de Lavado (T_1) cuencas A < 10.000km²

$$T_1 = -51.70 \cdot X_4^{0.0022} \cdot X_5^{0.0085} \cdot X_7^{-2.417} \cdot X_8^{34.5} \cdot X_{11}^{-3.46} - R^2_{ajustado}=0.4628 \quad (4.6)$$

Carga de Lavado (T_1) cuencas A > 10.000km²

$$T_1 = 1.98 \cdot X_4^{0.42} \cdot X_5^{-1.085} \cdot X_7^{-1.41} \cdot X_8^{10.5} \cdot X_{11}^{-0.46} \quad - R^2_{ajustado}=0.3721 \quad (4.7)$$

Rendimiento sólido (T_2). cuencas A < 10.000km²

$$T_2 = -11.68 \cdot X_2^{0.009} \cdot X_5^{0.008} \cdot X_7^{-0.76} \cdot X_{10}^{-1.65} \cdot X_{14}^{-1.45} \quad - R^2_{ajustado}=0.5365 \quad (4.8)$$

Rendimiento sólido (T_2). cuencas A > 10.000km²

$$T_2 = -9.65 \cdot X_2^{0.19} \cdot X_5^{1.5} \cdot X_7^{-0.72} \cdot X_{10}^{2.63} \cdot X_{14}^{-0.45} \quad - R^2_{ajustado}=0.5851 \quad (4.9)$$

Los modelos paramétricos anteriores, los cuales fueron elaborados con los subconjuntos de datos divididos por áreas, no arrojan resultados de ajuste del $R^2_{ajustado}$ superiores al 0.58 , lo que representa un pobre ajuste del modelo para la estimación de los valores del transporte sólido tanto en su forma de carga de lavado como de rendimiento. Sin embargo, se logran obtener ecuaciones con las mismas variables para los dos casos evaluados (áreas menores de 10.000km² y áreas mayores de 10.000km²) para la Carga de Lavado (T_1) y el Rendimiento sólido (T_2) respectivamente relevantes con variaciones en sus exponentes, siendo un indicio de que estadísticamente si resulta ser más homogéneo.

Otro punto importante es el hecho de que los subconjuntos generados cuentan con menos de 10 datos cada uno como se presentó en la **Tabla 4-15**, lo que no es muy conveniente para hacer un análisis estadístico y deja la incertidumbre respecto a su confiabilidad. De aquí la necesidad de no descartar un procedimiento similar de agrupación de datos con criterios diferentes a la cuenca de pertenencia en los futuros trabajos sobre el tema.

4.4.2. Comparación de la estructura del modelo paramétrico del río Magdalena y el río Cauca

Desde otro punto de vista, se comparan las estructuras de las ecuaciones resultantes de los modelos paramétricos obtenidos tanto para el caso del río Magdalena como para el caso del río Cauca.

A continuación, se muestran nuevamente las ecuaciones estimadas en este Trabajo Final de Maestría para un tramo del río Magdalena

$$T_1 = 1.87 \times 10^5 \cdot P_{mma}^{-4.9021} \cdot Q_{mma}^{1.6389} \cdot A_c^{-10.0419} \cdot H_t^{10.2312} \cdot An_p^{11.4964} \cdot I_{Hips}^{4.0842} \cdot S_{cp}^{-2.6529} \quad - R^2_{ajustado}=0.7628 \quad (4.10)$$

$$T_2 = 3.38 \times 10^{-3} \cdot P_{mma}^{-3.5985} \cdot Q_{mma}^{-11.8046} \cdot R_h^{13.5560} \cdot H_t^{10.8386} \cdot An_p^{18.3175} \cdot S_{cp}^{-2.3985} \cdot K_{es}^{1.5847} \quad - R^2_{ajustado} = 0.6608 \quad (4.11)$$

T_1 Carga de lavado (miles de Ton/Año)

T_2 Rendimiento sólido (Miles de Ton/Año-Km²)

P_{mma} Precipitación media anual multianual (mm/Año)

Q_{mma} Caudal Medio Multianual (m³/s-Año)

A_c Área de la cuenca (Km²)

H_t Desnivel Altitudinal (m)

An_p Ancho promedio de la cuenca (Km)

I_{Hips} Integral Curva hipsométrica (–)

S_{cp} Pendiente promedio cauce principal (%)

R_h Rendimiento hídrico / Escorrentía específica (m³/s- Km²)

K_{es} Factor Susceptibilidad de erosión de cobertura de suelo

De acuerdo a lo reportado en el trabajo del río Cauca, (Niño, 2015) se construyeron finalmente 4 ecuaciones que representan los modelos evaluados con los mejores resultados estadísticos. Estas ecuaciones se presentan a continuación

$$P_s = 2.317 \times 10^{13} \cdot A_C^{1.336} \cdot F_F^{-0.538} \cdot L_{FS}^{17.994} \cdot P_{mam}^{-0.963} \cdot K_{SDR}^{0.614} \quad R^2_{ajustado} \ 0.99 \quad (4.12)$$

$$R_s = 1.746 \times 10^{14} \cdot S_o^{1.966} \cdot A_{agr.}^{-6.419} \cdot P_{mam}^{2.824} \cdot R_H^{2.466} \cdot K_{SDR}^{-0.734} \quad R^2_{ajustado} \ 0.84 \quad (4.13)$$

$$R_s = 6.183 \times 10^{-4} \cdot C_T^{-10.456} \cdot A_{Bosq.}^{4.195} \cdot X_a^{-0.743} \cdot RQ_{5/2.33}^{2.88} \cdot K_{SDR}^{-1.332} \quad R^2_{ajustado} \ 0.81 \quad (4.14)$$

$$P_s = 2.254 \times 10^{-6} \cdot S_o^{4.091} \cdot R_{Re}^{-1.624} \cdot RQ_{MAM/2.33}^{-1.052} \cdot K_{SDR}^{-0.736} \quad R^2_{ajustado} \ 0.97 \quad (4.15)$$

Donde

A_C :	Área de drenaje de la cuenca -Km ²
F_F :	Factor de Forma (-)
C_T :	Coefficiente de Torrencialidad (-)
L_{FS} :	Longitud promedio de flujo superficial (Km)
S_o :	Pendiente promedio de la cuenca (%)
R_{RE} :	Relación de relieve (-)
$A_{Bosq.}$:	Porcentaje de área de bosques y parcialmente intervenidos (%)
$A_{Agr.}$:	Porcentaje de área agrícola (%)
X_a :	Factor de cobertura (según metodología de Gavrilovic) (-)
P_{mam} :	Precipitación media anual multianual (mm/año)
R_H :	Rendimiento hídrico (l/s/km ²)
$RQ_{MAM/2.33}$:	$Q_{MAM} / Q_{Tr 2.33}$ (-)
$RQ_{5/2.33}$:	$Q_{Tr 5} / Q_{Tr 2.33}$ (-)
K_{SDR} :	Factor de Entrega (Según propuesta de la ASCE, 1975) (-)

Iniciando con la comparación de la estructura de los modelos paramétricos, se encontró que en el caso de las subcuencas de río Cauca se logró construir ecuaciones con 4 y 5 variables independientes para pronosticar la producción de sedimento con un $R^2_{ajustado}$ mayor a 0.85. Sin embargo, en el caso del río Magdalena fue necesario mantener dentro de la ecuación 7 variables independientes para obtener los coeficientes de correlación más altos posibles, los cuales no superan un $R^2_{ajustado}$ 0.78. De acuerdo a lo visto en el comportamiento de la correlación, la dispersión de los datos requiere la inclusión de más variables independientes para hacer el esfuerzo de ajustar los resultados, lo cual no funciona con exactitud.

Siguiendo con la comparación de los modelos paramétricos, se evidenció que los coeficientes $R^2_{ajustado}$ reportados para los modelos construidos en las subcuencas del río Cauca presentan valores entre 0.81-0.99 en las 4 ecuaciones reportadas, mientras que para las cuencas del río Magdalena se estimaron coeficientes de correlación de 0.66 y 0.76. Esto es un indicio de que las variables consideradas para la construcción del modelo son más dispersas en el segundo caso, lo que dificulta la consolidación de un modelo predictivo de alta efectividad. Es importante resaltar que este bajo nivel de ajuste del modelo también puede reflejar alguna restricción respecto a la naturaleza de distribución normal de algunas de las variables seleccionadas para este análisis, tal y como se menciona en el capítulo 4.3.1

Al revisar en los coeficientes que reportan las ecuaciones anteriores, se identificó con claridad la gran diferencia que existe entre los órdenes de magnitud de los coeficientes estimados para las variables del mismo tipo. Estas diferencias en los coeficientes pueden representar la variación matemática asociada al ajuste del modelo, el cual es particular en cada caso y la dispersión de los valores de las variables independientes utilizadas. Dado que para el caso de las ecuaciones (4.12) y (4.4) las cuales usan variables compatibles tanto en el caso del Río Magdalena como en el de Cauca, se esperaría que este valor fuera de un orden más cercano, pero no es el caso.

De manera análoga se revisa la concordancia de los exponentes que fueron obtenidos para el caso de las ecuaciones (4.12) y (4.2), las cuales usan variables compatibles y se evidencia que los valores, magnitudes y signos son diferentes en cada caso, sin ninguna relación aparente.

Es así, como se concluye que las estructuras de las ecuaciones de los modelos paramétricos obtenidas en el caso del Río Magdalena y en el caso del de Cauca no son similares en su estructura. Esta diferencia se le atribuye a dos criterios principalmente: Diferencias en el comportamiento estadístico del conjunto de datos seleccionados y diferencias en las definiciones de los parámetros utilizados para la construcción de los modelos. En el numeral 4.4.3 se profundizan estos aspectos.

4.4.3. Análisis de los parámetros representativos en el modelo paramétrico del río Magdalena y en modelo del río Cauca

Como parte del análisis de los resultados obtenidos en este Trabajo Final de Maestría, se hace una revisión de los parámetros que son incluidos como parámetros representativos en las ecuaciones generadas por los modelos paramétricos para el caso del Río Magdalena y en el caso del de Cauca, en busca de algún indicio sobre la razón de las diferencias en su estructura.

Desde el punto de vista conceptual, la selección de los parámetros para la construcción del modelo fue distinta en ambos proyectos, incluyendo en el caso del río Cauca un total de 46 parámetros iniciales, los cuales fueron estimados y evaluados hasta dejar un total de 33 parámetros que fueron incluidos dentro del proceso de regresiones regresivas. Por otro lado, en el caso del río Magdalena, se limitó el conjunto de parámetros a explorar a un conjunto de 17 desde el inicio, partiendo de la hipótesis de no incluir parámetros que hubieran sido descartados en otros procesos similares efectuados en trabajos previos.

Esta diferencia inicial tiene incidencia directa sobre la construcción de los modelos, dado que al no evaluarse exactamente el mismo conjunto de parámetros no se mantiene la homogeneidad y se limita su comparación. Sin embargo, esto se previó desde el inicio de la estructuración de este Trabajo Final de Maestría y hace parte de los criterios del mismo.

Profundizando ahora en las magnitudes mismas de los parámetros utilizados para la construcción de las correlaciones, se evidenció que para el río Cauca, la ecuación (4.13) el Rendimiento Hídrico tiene unidades de $l/s\text{-Km}^2$, mientras que ese mismo parámetro en el caso del río Magdalena se estimó con unidades de $m^3/s\text{-Km}^2$. Esta diferencia afecta sin duda la construcción de la regresión múltiple y por lo tanto los valores de los exponentes y coeficientes obtenidos en el modelo predictivo.

En un enfoque diferente del análisis, se revisaron las diferencias y similitudes existentes entre los comportamientos y magnitudes de los parámetros sedimentológicos; morfométricos y morfológicos; cobertura de suelo y e hidrológicos estimados para cada caso, los cuales se resumen en la **Tabla 4-16**

Tabla 4-16: Parámetros de subcuencas en el río Magdalena y en el Río Cauca

Parámetros Subcuencas del río Magdalena									
CÓDIGO	X ₁ Precipitación media anual multianual	X ₂ Caudal medio multianual	X ₄ Área de la cuenca	X ₅ Desnivel altitudinal	X ₇ Ancho promedio de la cuenca	X ₁₀ Integral Curva hipsométrica	X ₁₁ Pendiente promedio cauce principal	CoefCal	T ₁ Carga de lavado
21237010	1,250	1,148.64	48,115	5,000.00	65.45	0.26	0.83	0.3430	23,376.16
23037010	1,695	1,612.22	56,513	5,100.00	70.90	0.46	0.71	0.0596	57,186.85
21237020	1,360	1,366.94	54,343	5,000.00	68.12	0.37	0.68	0.0402	61,231.05
21137050	1,454	629.94	22,282	4,900.00	42.80	0.26	1.11	0.2550	8,581.33
21077020	1,784	434.29	11,867	4,700.00	26.01	0.37	1.93	0.0002	9,301.53
21037010	1,135	43.30	990	1,800.00	8.12	0.24	1.84	0.0562	770.62
21057060	1,679	172.92	4,841	4,500.00	15.60	0.33	3.30	0.0046	3,675.89
21017030	2,446	78.85	1,446	3,300.00	9.92	0.44	4.24	0.0119	12,677.98
23067040	2,354	107.15	4,567	3,500.00	17.36	0.32	0.44	0.5655	26,680.26
21027010	1,248	156.11	3,544	3,700.00	14.00	0.22	3.07	0.1404	1,415.52
21207960	1,384	41.58	5,408	3,500.00	21.03	0.38	1.77	0.1847	4,194.38
22057070	1,739	269.86	6,431	4,100.00	19.25	0.42	2.06	0.2479	4,996.16
21197150	2,198	46.08	2,433	3,700.00	11.34	0.40	2.99	1.0796	479.37
21077030	1,876	666.72	11,938	4,700.00	26.57	0.29	1.90	0.1714	1,869.77
21147030	1,035	53.59	1,658	3,200.00	9.51	0.27	3.19	0.0006	18,655.66
21097070	1,325	491.43	15,129	4,800.00	30.72	0.39	2.34	0.0263	23,064.19
21077010	1,210	436.34	12,267	4,700.00	27.66	0.43	1.74	0.0005	43,054.57
Parámetros Subcuencas del río Cauca									
26067010	2,195.30	289.50	8,578.30	3,683.00	66.20	0.29	0.94	0.0848	3,177.30
26107070	1,845.40	394.20	16,287.60	3,719.60	65.60	0.26	0.58	0.5360	6,332.00
26177030	1,843.80	542.30	20,520.80	3,832.70	67.20	0.24	0.44	0.0140	11,016.20
26167070	1,875.70	678.20	24,537.40	4,521.00	68.40	0.25	0.47	0.0144	13,443.20
26187110	1,892.10	695.70	26,412.10	4,539.00	65.10	0.25	0.44	0.0200	15,440.90
26207080	1,993.00	886.60	30,925.40	4,739.00	68.70	0.25	0.43	0.0100	20,047.90
26237040	2,015.40	1,073.20	37,353.60	5,142.10	61.40	0.33	0.37	0.0235	40,443.20
26247030	2,052.20	1,216.00	37,970.60	5,170.00	61.30	0.33	0.36	0.0228	50,747.15
26247020	2,146.40	1,413.30	40,930.90	5,238.20	57.30	0.33	0.34	0.1306	43,163.75
26047070	1,693.70	38.00	1,543.78	3,309.70	18.13	0.38	3.11	0.8850	1,109.08
26147140	2,009.70	28.30	840.62	2,300.50	12.09	0.37	2.26	0.1640	371.39
26167060	2,033.70	8.20	184.55	2,981.00	5.97	0.37	6.61	0.2200	149.29
26187040	2,527.70	43.60	1,031.46	2,983.00	16.48	0.52	3.47	0.0160	443.40
26197030	2,933.70	56.40	1,108.62	3,260.50	23.75	0.39	3.40	0.0800	614.46
26217010	2,024.00	7.40	316.74	2,809.00	15.36	0.51	6.67	1.8140	364.20
26237020	1,804.60	3.80	192.87	2,509.30	10.26	0.57	7.41	1.5570	17.58

Carga de lavado (T_1); Precipitación media anual multianual (X_1); Caudal Medio Multianual (X_2); Área de la cuenca (X_4); Desnivel altitudinal (X_5); Ancho promedio de la cuenca (X_7); Integral Curva hipsométrica (X_{10}); Pendiente promedio cauce principal (X_{11}).

Haciendo una comparación general de los valores reportados en la **Tabla 4-16**, se nota una diferencia en las magnitudes y rangos generales de los valores encontrados para el conjunto de parámetros que es comparable entre los dos estudios ejecutados en el río Cauca y el río Magdalena. Sin embargo, en los siguientes párrafos se calculan los valores mínimos, máximos, promedio y mediana de los parámetros para profundizar en su análisis.

En el área sedimentológica se comparan en primera instancia los valores medidos en cada una de las subcuencas para la Carga de Lavado en Miles Ton/Año, notando en la **Tabla 4-17** que los valores promedio de la totalidad de las

estaciones se encuentran en un orden de magnitud no muy distante, pero claramente las subcuencas del río Cauca tienen una producción de sedimento de lavado menor comparativamente con las subcuencas del río Magdalena. Sin embargo, a pesar de que el valor promedio no es muy diferente para ambas cuencas, la mediana si evidencia una clara concentración de valores de producción de sedimentos mayores en el caso del subconjunto de subcuencas del río Magdalena. Esta dispersión de valores afecta de manera directa la construcción del modelo estadístico.

Tabla 4-17: Comparación de variación de Carga de Sedimentos de Lavado.

T_1 Carga de lavado	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Magdalena	479.37	61231.05	17718.31	9301.53
Cauca	17.58	50747.15	12930.06	4754.65

Adicionalmente, y para complementar el análisis del comportamiento sedimentológico, se extrajeron los valores de la pendiente de la curva de calibración de Caudal Líquido y Caudal Sólido, para tener una idea de la relación de dichos valores. Se identifica que para la cuenca del río Magdalena los coeficientes de la curva de calibración son más bajos que los valores obtenidos para la cuenca del río Cauca, lo que se entiende como una evidencia de que la dispersión entre los valores de caudal líquido y caudal sólido reportados en los aforos es mayor en el río Magdalena. Dado que la curva de calibración es utilizada para el cálculo de la Carga de Sedimentos de Lavado, su ajuste incide directamente en la bondad del ajuste estadístico en la construcción del modelo paramétrico.

Tabla 4-18: Comparación de variación de coeficientes de curva de calibración

CoefCal	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Magdalena	0.0002	1.0796	0.1875	0.0596
Cauca	0.0100	1.8140	0.3495	0.0824

Desde el punto de vista hidrológico se compararon los valores de la Precipitación media multianual y el Caudal Promedio Multianual en ambas cuencas. En la **Tabla 4-19** se muestran los estadísticos básicos que dan un indicio acerca de las diferencias en las magnitudes de la precipitación media multianual estimada para las subcuencas de cada proyecto. De acuerdo a los resultados, se notó que las subcuencas seleccionadas en el caso del río Magdalena tienen un registro de precipitación de menores magnitudes que las de las subcuencas del río Cauca.

Siendo la precipitación el inicio del ciclo de la escorrentía dentro de una cuenca, resulta relevante preguntarse si una agrupación de cuencas enfocada a la homogeneidad de los valores de precipitación podría arrojar mejores valores resultados a la hora de la construcción del modelo paramétrico. Esta pregunta se retoma en el numeral 5.

Tabla 4-19: Comparación de variación de Precipitación media Multianual

X_1 Precipitación media anual multianual	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Magdalena	1035.00	2446.00	1598.35	1454.00
Cauca	1693.70	2933.70	2055.40	2012.55

De igual manera, se revisa el comportamiento de los valores de Caudal Promedio Multianual obtenidos para los subconjuntos de subcuencas estudiados en ambos trabajos y presentados en la **Tabla 4-20**, encontrando que los valores promedios cada subconjunto de datos resultan ser muy cercanos, pero que los rangos y la concentración de los datos es distinta para ambas cuencas. Teniendo en cuenta que los parámetros de carga de sedimentos de lavado se estiman en valores promedios, se considera que el hecho de que los valores de caudal promedio multianual sean similares es apropiado para su agrupación en un análisis paramétrico.

Tabla 4-20: Comparación de variación de Caudal Promedio Multianual

X_2 Caudal medio multianual	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Magdalena	41.58	1612.22	456.23	269.86
Cauca	3.80	1413.30	460.92	341.85

Pasando a las variables relacionadas con las características topográficas del terreno, se compararon los valores estimados del área de la cuenca, desnivel altitudinal, ancho promedio de la cuenca, integral de la curva hipsométrica y pendiente promedio del cauce principal. En general, La cuenca del río Magdalena presenta los rangos más amplios para todas las variables y los valores más altos en la mayoría de los casos. Las áreas de las cuencas tienen un promedio prácticamente igual, pero las subcuencas del Cauca tienen mayor cantidad valores altos, mientras que, en el Magdalena, más cuencas son más pequeñas.

En este punto se retoma el concepto de homogeneidad de las cuencas y en concordancia con los resultados obtenidos en el numeral 4.4.1, se debería evaluar la opción de buscar cuencas cuyos valores de mediana con respecto a las áreas estuvieran más cercanos al promedio, para asegurar que existe una mayor homogeneidad entre ellas y así poder analizar el efecto de esta agrupación en la construcción del modelo paramétrico. Esta pregunta se retoma en el numeral 5.

Las subcuencas del Magdalena también tienen desniveles altitudinales más amplios y por lo tanto climas y vegetaciones nativas más variadas en toda su extensión, mientras que las cuencas del río Cauca parecen ser más anchas en general, lo que da un indicio de una menor concentración de caudal.

Adicionalmente se identifica que el grado de evolución de ambos sistemas está en un proceso de transición a un estado senil y pero que en el caso de las subcuencas del río Magdalena, los cauces tienen una pendiente más alta, lo que podría significar velocidades más altas y capacidades de transporte más altas dentro del cauce.

La **Tabla 4-21**, **Tabla 4-22**, **Tabla 4-23**, **Tabla 4-24** y **Tabla 4-25** muestran los valores estadísticos representativos de lo mencionado.

Tabla 4-21: Comparación de variación de área de la cuenca

X_4 Área de la cuenca	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Magdalena	989.58	56512.52	15515.95	6430.52
Cauca	184.55	40930.90	15545.96	12432.95

Tabla 4-22: Comparación de variación de Desnivel Altitudinal

X_5 Desnivel altitudinal	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Magdalena	1800.00	5100.00	4129.41	4500.00
Cauca	2300.50	5238.20	3796.10	3701.30

Tabla 4-23: Comparación de variación de Ancho promedio de la cuenca

X_7 Ancho promedio de la cuenca	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Magdalena	8.12	70.90	28.49	21.03
Cauca	5.97	68.70	42.70	59.30

Tabla 4-24: Comparación de variación de Integral de la curva Hipsométrica

X_{10} Integral curva hipsométrica	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Magdalena	0.22	0.46	0.34	0.37
Cauca	0.24	0.57	0.35	0.33

Tabla 4-25: Comparación de variación de Pendiente Promedio del cauce principal

X_{11} Pendiente promedio del cauce principal	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Magdalena	0.44	4.24	2.01	1.90
Cauca	0.34	7.41	2.33	0.76

Como conclusión de este aspecto del análisis de resultados, se encontró que existen diferencias en los conceptos de selección de parámetros, en la magnitud y rangos de valor de las variables seleccionadas como relevantes, que tienen un impacto directo en la construcción de los modelos paramétricos.

4.4.4. Análisis de la generalización de los pronósticos de carga de lavado de los modelos paramétricos construidos en el río Magdalena y en el río Cauca

Como análisis final, se evalúan las ecuaciones obtenidas de los modelos paramétricos construidos para el caso del río Magdalena y del río Cauca en las cuencas contrarias, con el ánimo de conocer cómo es el pronóstico de carga de lavado y rendimiento sólido generado por dichas ecuaciones en cuencas diferentes. Al hacer dicha evaluación y teniendo presente que ya se establecieron diferencias entre los parámetros considerados relevantes entre los dos ejercicios, se utiliza la información reportada en ambos trabajos y se aplican las ecuaciones.

Resulta evidente que, al aplicar las ecuaciones encontradas para estimar la carga de lavado o carga sólida, los valores obtenidos en todos los casos tienen magnitudes irreales para valores de transporte de sedimentos promedio en una cuenca y difieren completamente de los valores originales estimados con base en las mediciones en cada estación y manera y arrojan valores incoherentes en ambos casos con cifras por encima de $3.22E+50$.

Igualmente, para el caso de pronosticar el rendimiento sólido de las subcuencas, se obtienen valores con magnitudes sin sentido, entendiendo que la estructura de los modelos paramétricos arroja resultados en Miles de Ton/Año, lo que debería generar valores de rangos inferiores a las 100 Miles de Ton/Año, de acuerdo a las mediciones.

Esta situación se mantiene tanto al evaluar los parámetros de las cuencas del río Magdalena en las ecuaciones del río Cauca como al evaluar los parámetros de las cuencas del río Cauca en las ecuaciones del río Magdalena.

Este ejercicio se elabora con el ánimo de ver si la proyección de los valores de carga sólida y rendimiento sólido se ajusta en alguna medida, sin embargo, los resultados obtenidos no se ajustan de ninguna. De acuerdo a lo anterior, tanto las ecuaciones construidas para el río Magdalena como las construidas para el río Cauca solo pueden ser usadas en las subcuencas que fueron usadas para su construcción, limitando su aplicación en cuencas diferentes ya que no se obtienen resultados que represente el comportamiento real de la producción de sedimentos.

5. Conclusiones y recomendaciones

La aplicación de la metodología de regresiones múltiples para la construcción de un modelo paramétrico de correlación a partir de variables independientes que representan las características hidrológicas, de uso de suelo y geología para ingeniería, morfométricas y morfológicas para predecir la magnitud de la carga sólida producida para el caso de algunas subcuencas del río Magdalena, arrojó resultados con un coeficiente de determinación $R^2_{ajustado} = 0.7628$ y 0.6608 en su implementación para estimar la T_1 Carga de lavado (miles de Ton/Año) y el T_2 Rendimiento sólido (Miles de Ton/Año-Km²) respectivamente. Por lo tanto, se valida parcialmente que la producción de sedimentos es resultado de la interacción continua diferentes variables hidrológicas, de uso de suelo, morfométricas y morfológicas en procesos que ocurren a nivel de la cobertura terrestre como parte del ciclo hidrológico.

Para el caso de las subcuencas del río Magdalena, este Trabajo Final de Maestría evidenció que, de un conjunto inicial de 17 parámetros elegidos del conjunto evaluado en estudios anteriores, los parámetros de P_{mma} Precipitación media anual multianual (mm/Año), Q_{mma} Caudal Medio Multianual (m³/s-Año), A_c Área de la cuenca (Km²), H_t Desnivel Altitudinal (m), An_p Ancho promedio de la cuenca (Km), I_{Hips} Integral Curva hipsométrica (--), S_{cp} Pendiente promedio cauce principal (%), R_h Rendimiento hídrico / Escorrentía específica (m³/s- Km²), K_{es} Factor Susceptibilidad de erosión de cobertura de suelo (Kes) son relevantes para estimar tanto la T_1 Carga de lavado (miles de Ton/Año) como el T_2 Rendimiento sólido (Miles de Ton/Año-Km²).

Los modelos paramétricos construidos en el presente documento, presentan mejores resultados en el pronóstico de el T_2 Rendimiento sólido (Miles de Ton/Año-Km²) para las subcuencas seleccionadas, logrando reproducir más fielmente los datos medidos en un mayor número de estaciones a pesar de que el valor del coeficiente de determinación $R^2_{ajustado}$ es menor para la totalidad del conjunto de datos. Aun así, los ajustes presentados para la T_1 Carga de lavado (miles de Ton/Año) también son aceptables.

De acuerdo a los análisis del autor, puede existir una tendencia de mejor ajuste en el pronóstico de la T_1 Carga de lavado (miles de Ton/Año) y el T_2 Rendimiento sólido (Miles de Ton/Año-Km²) para grupos de cuencas cuyas áreas sean más homogéneas entre sí, es decir, para cuencas con tamaños similares. Para comprobar lo anterior se generan dos subconjuntos de con menos de diez datos diferenciados entre las subcuencas con áreas menores de 10.000km² y áreas mayores de 10.000km², y se construyen regresiones paramétricas con cada uno, pero las regresiones obtenidas para estos casos arrojan coeficientes de determinación $R^2_{ajustado}$ entre 0.37 y 0.58, los cuales no son considerados suficientes para hacer uso de estas expresiones en la estimación de cargas de lavado. Se cree que la reducida cantidad de datos influye negativamente en el análisis estadístico.

Se considera relevante el revisar a profundidad en futuros trabajos, la idea de hacer agrupaciones de datos de diferentes cuencas que comportan uno o varios parámetros similares entre ellos, que permita establecer otro tipo de relación entre los comportamientos de las cuencas y se recomienda tener en cuenta el área como posible factor de interés.

Dado que existe un ejercicio previo similar ejecutado para algunas subcuencas del río Cauca (Niño, 2015), se compararon las estructuras de los modelos paramétricos obtenidos de las regresiones regresivas con las obtenidas en el presente Trabajo Final de Maestría para el caso del río Magdalena. La comparación evidencia diferencias en los parámetros relevantes, coeficientes y exponentes de las ecuaciones, lo cual es muestra de la diferencia en el comportamiento sedimentológico de las cuencas, de la diferencia conceptual en la definición de los parámetros relevantes, de la diferencia de las magnitudes de los diferentes parámetros involucrados y de las diferencias propias de las unidades de las variables involucradas en el proceso de regresiones múltiples.

Respecto al punto anterior, se considera relevante resaltar que los criterios de selección de los parámetros relevantes es una limitante para la comparación de los resultados. Se debe preferir en trabajos posteriores usar exactamente los mismos criterios de selección para minimizar incertidumbres.

Como parte de los análisis, se revisaron los resultados obtenidos en el caso del río Cauca, donde los ajustes reportados para los modelos paramétricos obtenidos fueron mejores que los obtenidos en el caso del río Magdalena, encontrando que en general, las cuencas del río Cauca presentan dispersiones menores en las curvas de calibración de caudales líquidos y sólidos, áreas más pequeñas en general y valores de parámetros agrupados en rangos más pequeños. Con esto en mente, se recomienda para futuras investigaciones no limitar inicialmente la selección de cuencas a su pertenencia a una misma cuenca principal, sino utilizar diferentes cuencas que tengan datos sedimentológicos pero cuyas áreas puedan ser agrupadas en rangos específicos y así construir correlaciones para cada grupo. Posteriormente, se puede plantear la exploración de otros tipos de agrupaciones de datos, pudiendo generar modelos estadísticos para subconjuntos con usos del suelo similares o comportamientos climáticos que se identifiquen como homogéneos.

Se concluye de todo lo anterior, que los modelos paramétricos estimados para cada caso no son adecuados para la predicción de la producción de sedimentos de lavados en una cuenca y que se debe profundizar en los criterios de selección de parámetros y agrupación de cuencas para la construcción de dichos modelos, en busca de una mejor predicción del transporte.

6. Bibliografía

- Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena. (2007). *Atlas Cuenca Del Río Grande De La Magdalena*. Cartagena: CORMAGDALENA.
- Cubillos, C. E., & Forero, G. (2015). ¿Qué se puede decir del efecto de la erosión en la cuenca sobre el Río Magdalena?. Análisis de la variación temporal de la carga de sedimentos medida en el Río Magdalena (Sector: Puerto Salgar - La Gloria). *Avances en Recursos Hidráulicos - Número 12*, 103-118.
- GISAT. (2017). *Gisat*. Obtenido de Products - Digital Elevation Model: <http://www.gisat.cz/content/en/products/digital-elevation-model>
- Huggett, R. J. (2007). *FUNDAMENTALS OF GEOMORPHOLOGY*. Londres: Routledge Taylor & Francis Group.
- IDEAM. (2017). *IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de Solicitud de información: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>
- 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*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales; Instituto Geográfico Agustín Codazzi; Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena.
- IGAC. (2017). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Obtenido de Geoportal IGAC: <http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/MapasdeColombia/Descargas>
- Institute for Transportation at Iowa State University. (6 de Enero de 2017). *SUDAS, Statewide Urban Design and Specifications*. Obtenido de <http://www.iowasudas.org>
- López, Á. A., Martínez, L. E., & Fera, J. J. (2014). Parámetros hidrológicos y tensores en la dinámica fluvial: estudio de cuencas del caribe colombiano. *Ingeniería y Desarrollo. Universidad del Norte. Vol. 32 N° 2*, 218-241.
- López, E. (1998). Tratamiento de la colinealidad en regresión múltiple. *Psicothema Vol 10, N° 2*, 491-507.
- Michigan State University. (2017). *High Impact Targeting HIT*. Obtenido de <http://www.iwr.msu.edu/hit2/>

- Niño, O. (2015). Identificación de correlaciones entre la carga de lavado y algunos parámetros geomorfológicos y de uso de suelo en la cuenca del río Cauca. *Trabajo final de maestría*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.
- Ordóñez, J. I. (2015). El Río Magdalena y su navegabilidad. En F. N. Fescol, *Para donde va el río Magdalena? Riesgos sociales, ambientales y economicos del proyecto de Navegabilidad*.
- R Development Core Team. (Febrero de 2017). *The R Project for Statistical Computing*. Obtenido de <https://www.r-project.org/>
- Restrepo, J. C., & Restrepo, J. D. (2005). Efectos naturales y antrópicos en la producción de sedimentos de la cuenca del río Magdalena. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Serie A: Matemáticas*, 239-254.
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. *Colección de guías y manuales*. Bogotá, Colombia: Convenio especial de cooperación Universidad Nacional de Colombia - Servicio Geológico Colombiano.
- SGC. (2017). *Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de Servicios de información al ciudadano: <http://www2.sgc.gov.co/Servicios-de-informacion-al-ciudadano/Tramites-y-servicios.aspx>
- SICAT. (2017). *Sistema de información para el inventario, catalogación, valoración y administración de la información técnico-científica*. Obtenido de Consulta básica: <http://aplicaciones1.sgc.gov.co/sicat/html/ConsultaBasica.aspx>
- SIG-OT. (2017). *Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial*. Obtenido de Mapas temáticos predefinidos - Nacional: http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/frames_pagina.aspx
- Sommerlot, A., Nejadhashemi, A., Woznicki, S., & Giri, S. (2013). Evaluating the capabilities of watershed-scale models in estimating sediment yield at field-scale. *Journal of Environmental Management* 127, 228-236. Obtenido de www.elsevier.com/locate/jenvman
- Texas A&M University. (2017). *SWAT*. Obtenido de Soil And Water Assessment Tool: <http://swat.tamu.edu/>
- UNESCO. (2009). *Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile*. Roberto Pizarro, Carolina Morales, Leonardo Vega, Claudio Olivares, Rodrigo Valdés, Francisco Balocchi. Talca, Chile: Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI-LAC).
- UNESCO. (2010). *Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas*. Daniel Brea, Francisco Balocchi. Talca, Chile: Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI-LAC).
- USDA. (2017). *United States Department of Agriculture*. Obtenido de <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/oxford-ms/national-sedimentation-laboratory/watershed-physical-processes-research/research/rusle2/>

