

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Erosión hídrica y evolución del relieve en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés, Antioquia – Colombia

Juan Daniel Ríos Arboleda

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2018

Erosión hídrica y evolución del relieve en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés, Antioquia – Colombia

Juan Daniel Ríos Arboleda

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Directora:

Ph.D., Lilian Posada García

Codirector:

M.Sc., José Humberto Caballero Acosta

Línea de Investigación:

Hidráulica y Geomorfología Fluvial

Grupo de Investigación:

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2018

Dirección del autor / Author address

*Juan Daniel Ríos Arboleda
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín
Facultad de Minas*

*E-mail: judriosar@unal.edu.co
Móvil: 311 304 27 22*

A Dios por brindarme la oportunidad

A mi Madre, a mi Padre y a mi Hermano

A la memoria de mi Abuelo

A Sary por su paciencia

A mis Maestros

*Algún día oí que los ríos arrastran la historia de los territorios que atraviesan,
aún no deja de cautivarme esa idea*

Agradecimientos

A mis Maestros LILIAN POSADA GARCÍA y HUMBERTO CABALLERO ACOSTA por sus enseñanzas, la paciencia y el apoyo constante durante este proceso investigativo. También a los estimados jurados por sus tan valiosas observaciones y sugerencias.

A Luis Fernando Carvajal y Juan Carlos Loaiza por sus invaluable consejos y aportes a mi trabajo de tesis, también a los Ingenieros Julio Zuluaga, Cesar Rodríguez y Hector Pizarro por las incontables y excelentes lecciones que aportaron a mi formación profesional. También a Verónica Botero y a Jorge Julián Vélez cada uno sabe por que.

A la Unidad de Hidrometría y Calidad Generación Energía de Empresas Públicas de Medellín (EPM), en especial a los Ingenieros Mauricio Correa y Paula Lizet Correa por la información hidrosedimentológica suministrada, su asesoría y retroalimentación.

A CORANTIOQUIA, en especial al Ingeniero Óscar Iván Giraldo de la Subdirección de Gestión Ambiental y a Diana María Londoño de la Subdirección de Planeación por la información de la Actualización y Ajuste al Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca de los Ríos Grande y Chico, necesaria para el desarrollo de mi tesis.

Al Departamento Administrativo de Planeación de la Gobernación de Antioquia por permitir el uso de la información del proyecto Cartoantioquia mediante una licencia, especialmente, al doctor Carlos Mario Montoya y al Ingeniero Néstor Raúl Pizarro.

A la Facultad de Minas, en especial, al Decano Pedro Nel Benjumea Hernández, a Nancy Arenas Castañeda, a Santiago Arango Aramburo, a Andrés Gómez Giraldo y a Ana María Patino Villa por escucharme y apoyarme durante este proceso.

Al Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología – COLCIENCIAS – por el apoyo financiero otorgado mediante el programa Jóvenes Investigadores e Innovadores 2015, lo cual viabilizo mi proyecto de tesis.

A mis compañeros: Santiago Cataño, Santiago Osorio, Alex Estupiñan, Adrián Perpiñán y especialmente a Claudia Múnera, a Natalia Bustamante, a Raúl Posada y a Santiago Noriega, cada uno sabe por qué.

Un agradecimiento especial a mis padres Angelina y Heriberto, a mi hermano Francisco, a mi tío Juan Carlos y a mi tía Gloria por su apoyo constante. **¡MIL GRACIAS!**

Resumen

En este trabajo investigativo se evalúa la relación entre las tasas de erosión hídrica potencial y las curvaturas del terreno en dos grandes cuencas que drenan el Altiplano el Altiplano de Santa Rosa de Osos (ASRO) y dos de sus importantes frentes erosivos, al oriente el río Grande y al occidental el río San Andrés.

Dichas cuencas localizadas sobre el ramal occidental de la cordillera central pertenecen a sistemas geomórficos contrastantes, con marcadas diferencias en patrones espaciales de precipitación, pendientes, coberturas vegetales y litologías.

Para estimar las potenciales tasas medias anuales de pérdida de suelo a escala de cuenca se emplearon los modelos empíricos RUSLE - Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada y EPM – Método de Erosión Potencial (Gavrilovic, 1988), además, se analizó la variación de los resultados en función de los datos de entrada en múltiples escalas espaciales, hallando una importante dependencia del factor de erosividad de la lluvia R a la resolución temporal del registro de precipitación usado para su estimación y una marcada dependencia y efectos de escala en el factor topográfico LS (longitud e inclinación de la ladera) del modelo empírico RUSLE y sus posteriores estimaciones medias de pérdida de suelo anual.

Se identifican también cambios en varios ordenes de magnitud al estimar la erosión potencial en zonas de cultivos en la cuenca del río Grande, sugiriendo esto que se deberá dar especial atención las prácticas de manejo y gestión de actividades agrícolas en dicha cuenca.

El potencial medio anual de erosión estimado (A) en cada cuenca se analizó en búsqueda de relaciones con las curvaturas del terreno (CPR) estimadas a partir de información cartográfica en la escala 1:100,000 (DEM) en 16 perfiles transversales (transeptos) sobre las cuencas, los cuales cubren todo el ancho delimitado por la divisoria, posteriormente, se extrajeron de cada una de las superficies escogidas (A , LS , R , DEM , CPR) los valores sobre estos transeptos y se evaluaron gráficamente, encontrando que el factor topográfico LS captura la variabilidad espacial del proceso erosivo.

Los resultados encontrados también sugieren que no es posible establecer relaciones de causalidad entre las tasas de erosión potencial estimadas a la escala 1:100,000, las curvaturas del terreno y el avance de los frentes de erosión de la cordillera debido al pequeño porcentaje de perfil de meteorización afectado por la erosión hídrica y a la

resolución vertical y horizontal del modelo de elevación digital (DEM) del terreno a escala 1:100,000 empleado. Un análisis con los recursos computacionales adecuados para procesar en toda el área de estudio el modelo de elevación digital (DEM) del terreno a escala 1:10,000 con resolución en el plano horizontal de 1 m y en la vertical de centímetros podría arrojar relaciones de causalidad sólidas alineadas con los niveles jerárquicos de la organización espacial de estructuras mórficas del ASRO establecida por Arias et al. (2006).

Como actividad adicional y de divulgación se realizó una presentación en la 1st World Conference on Soil and Water Conservation Under Global Change (CONSOWA 2017) - "Sustainable Life on Earth through Soil and Water Conservation, el día 15 de junio de 2017 en la ciudad de Lleida (España), evento organizado por La Universidad de Lleida (UdL) y diferentes organizaciones internaciones dedicadas a la conservación de los recursos suelo y agua.

Palabras clave: Erosión, RUSLE, EPM, Río Grande y Río San Andrés.

Abstract

In this research work, the relationship between potential water erosion rates and terrain curvatures in two large watersheds draining the Plateau of Santa Rosa de Osos (ASRO) and two of its important erosive fronts, the Grande river to the east and the San Andrés River to the west is evaluated.

These watersheds located on the western branch of the central mountain range belong to contrasting geomorphic systems, with marked differences in spatial patterns of precipitation, slopes, vegetation cover and lithology's.

To estimate the potential annual average rates of soil loss at the watersheds scale, the empirical models RUSLE - Universal Equation of Revised Soil Loss and EPM - Potential Erosion Method (Gavrilovic, 1988) were used, in addition, the variation of the results based on the input data at multiple spatial scales was analyzed, finding an important dependence of the rainfall erosivity factor R to the temporal resolution of the precipitation record used for its estimation and a marked dependence and scale effects on the topographic factor LS (length and slope of the hillside) of the RUSLE empirical model and its subsequent average estimates of annual soil loss.

Changes in several orders of magnitude are also identified when estimating potential erosion in crop areas in the Rio Grande basin, suggesting that special attention should be given to management practices and agricultural activities in said watershed.

The estimated average annual erosion potential (A) in each watershed was analyzed in search of relationships with the terrain curvatures (CPR) estimated from cartographic information in the scale 1: 100,000 (DEM) in 16 transversal profiles (transects) on the watershed, which cover the entire width delimited by the divide, subsequently, were extracted from each of the chosen surfaces (A, LS, R, DEM, CPR) the values on these transects and were evaluated graphically, finding that the factor topographic LS captures the spatial variability of the erosive process.

The results also suggest that it is not possible to establish causality relationships between the potential erosion rates estimated at the 1: 100,000 scale, the curvatures of the terrain and the advance of erosion fronts of the mountain range due to the small percentage of weathering profile affected by water erosion and the vertical and horizontal resolution of the digital elevation model (DEM) of the terrain at 1: 100,000 scale employed. An analysis with the adequate computational resources to process the digital elevation model (DEM) of the terrain at a scale of 1: 10,000 in the entire study area with resolution in the

horizontal plane of 1 m and in the vertical of centimeters could yield solid causality. aligned with the hierarchical levels of the spatial organization of morphic structures of the ASRO established by Arias et al. (2006).

As an additional activity and divulgation a presentation was made at the 1st World Conference on Soil and Water Conservation Under Global Change (CONSOWA 2017) - "Sustainable Life on Earth through Soil and Water Conservation, on June 15, 2017 in the city of Lleida (Spain), an event organized by the University of Lleida (UdL) and different international organizations dedicated to the conservation of soil and water resources.

Keywords: Erosion, RUSLE, EPM, Grande and San Andrés Rivers

Contenido

Pág.

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Justificación e importancia.....	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Estructura del documento	3
Capítulo 2. Estado del arte.....	5
2.1. Antecedentes.....	5
2.2. Definiciones	5
2.3. La erosión hídrica	7
2.4. Modelos para estimar erosión hídrica	8
2.5. Erosión hídrica en el ramal occidental de la cordillera central de Colombia.....	9
2.6. Relaciones de entrega de sedimentos (SDR).....	10
2.7. Efecto de la escala en la modelación de procesos erosivos	12
2.8. Evolución del relieve.....	14
Capítulo 3. Zona de estudio y conjunto de datos.....	16
3.1. Generalidades	16
3.2. Características de los sedimentos en el Altiplano	21
3.3. Desarrollos hidroeléctricos en la zona	22
3.3.1. Proyecto Riogrande I.....	22
3.3.2. Proyecto Riogrande II.....	23
3.3.3. Proyecto Hidromontañas	24
3.3.4. Proyectos San José de la Montaña	25
3.3.5. Proyecto La Chorrera	25
3.3.6. Proyecto San Andrés	25
3.4. Descripción del conjunto de datos	25
3.4.1. Variables hidroclimáticas.....	26
3.4.2. Modelos de elevación digital (DEMs).....	28
3.4.3. Mapa de clasificación de suelos	30
3.4.4. Mapas de coberturas vegetales y usos del suelo	30

3.4.5. Mapas de geología y geomorfología	34
3.4.6. Batimetrías del embalse del proyecto hidroeléctrico Riogrande II	38
Capítulo 4. Evaluación del potencial de erosión bruto y el suministro de sedimento fino o carga de lavado (washload)	39
4.1. Modelo RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada) .	39
4.1.1. Factor lluvia y escorrentía (R)	40
4.1.2. Factor de erodabilidad del suelo (K).....	46
4.1.3. Factor topográfico (LS)	51
4.1.4. Factor de cobertura y gestión (C).....	55
4.1.5. Factor de prácticas de manejo (P)	57
4.1.6. Relaciones de entrega de sedimento (SDR)	59
4.1.7. Resultados del modelo RUSLE	60
4.2. Modelo EPM (modelo de erosión potencial)	66
4.2.1. Factor de erodabilidad del suelo (Y).....	66
4.2.2. Factor de protección del suelo (X)	67
4.2.3. Factor de erosión y desarrollo de la red de drenaje (Φ)	68
4.2.4. Factor de temperatura (T)	69
4.2.5. Factor de precipitación (H).....	69
4.2.6. Factor de pendiente (J)	71
4.2.7. Factor de intensidad o densidad de los procesos de erosión (Z).71	
4.2.8. Resultados del modelo EPM	71
4.3. Evaluación comparativa de los modelos RUSLE Y EPM.....	73
Capítulo 5. El agua como forzador de la evolución del relieve.....	75
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	83
6.1. Conclusiones.....	83
6.2. Recomendaciones	85

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1. Compilación de relaciones de entrega de sedimento (SDR) contra el área de cuenca según reporta Walling (1983).	10
Figura 2-2: Relaciones de entrega de sedimento contra el área de la cuenca.	11
Figura 2-3: Relación esquemática entre la capacidad de transporte y el suministro de sedimento (Tomada de Julien, 2010).	11
Figura 2-4: Esquema de la carga total y los diferentes tipos de cargas de sedimento que pueden cruzar una sección transversal dada de un río (Tomada de Julien, 2010).	11
Figura 2-5: Matriz de agregación 3x3 (Tomada de Molnár y Julien, 1998).	14
Figura 3-1: Localización de cuencas hidrográficas en estudio.	16
Figura 3-2: Ejemplos de tramos aluviales en la cuenca del río Grande: a) río Grande a su paso por Entrerrios y b) río Chico cerca de las partidas a Belmira.	17
Figura 3-3: Tramos no aluviales en la cuenca del río Grande: a) Raudal el Chispero y b) cañón del Mococongo. (Fotografías tomadas por el autor).	18
Figura 3-4: Laguna Sabanas en el páramo Belmira- Santa Inés.	18
Figura 3-5: Aspecto del río San Andrés en su cuenca alta	19
Figura 3-6: Aspecto del río San Andrés en su cuenca baja	20
Figura 3-7: Aspecto de las laderas en la cuenca alta y baja del río Grande.	21
Figura 3-8: Aspecto de las laderas en la cuenca alta y media del río San Andrés (Fotografías tomada por el autor).	21
Figura 3-9: Proyectos hidroeléctricos operados por Empresas Públicas de Medellín en la cuenca del río Grande: a) Riogrande I y b) Riogrande II (Tomada de EPM, 2008).	23
Figura 3-10: Proyecto Hidromontañas operado por CELSIA en la cuenca del río Grande (Tomada de www.larepublica.co).	24
Figura 3-11: Proyectos hidroeléctricos en la cuenca del río San Andrés sin entrar en operación: a) Proyecto La Chorrera y b) Proyecto San Andrés.	25
Figura 3-12: Campo de precipitación media anual para Colombia estimado mediante KDE.	27
Figura 3-13: Mapa de temperatura estimado en función del DEM a escala 1:100,000. ..	28

Figura 3-14: Modelos de elevación digital a escala 1:100,000 y 1:25,000 de las cuencas de los ríos Grande y San Andrés.	29
Figura 3-15: Modelo de elevación digital a escala 1:10,000 de las cuencas de los ríos Grande y San Andrés y de la sub cuenca Bramadora.....	30
Figura 3-16: Tipos de suelos en la zona de estudio.	31
Figura 3-17: Coberturas y usos del suelo en la zona de estudio periodo 2000 – 2002	32
Figura 3-18: Coberturas y usos del suelo en la zona de estudio periodo 2010 – 2012.	33
Figura 3-19: Cultivos de papa en la cuenca del río Grande (CORANTIOQUIA, 2015).	33
Figura 3-20: Cultivos de tomate de árbol y aguacate en la cuenca del río Grande (CORANTIOQUIA, 2015).	34
Figura 3-21: Distribución de las coberturas de la tierra en la cuenca de los ríos Grande y Chico periodo 2010 – 2012 (CORANTIOQUIA, 2015).	34
Figura 3-22: Unidades geológicas de la zona de estudio.	35
Figura 3-23: Geología de la cuenca del río Grande (CORANTIOQUIA, 2015).	35
Figura 3-24: Geomorfología de la cuenca del río Grande (CORANTIOQUIA, 2015).	36
Figura 3-25: Geomorfología de la cuenca del río San Andrés.	37
Figura 3-26: Pendientes del área de estudio estimadas con MDTs a escala 1:100,000 y 1:25,000.	37
Figura 4-1: Localización de las estaciones hidrométricas con datos de precipitación cada 15 minutos utilizadas para estimar R.....	42
Figura 4-2: Modelo lineal para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora.....	43
Figura 4-3: Modelo logarítmico para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora.....	44
Figura 4-4: Modelo exponencial para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora.....	44
Figura 4-5: Modelo potencial para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora.....	44
Figura 4-6: Comparación de valores de R observados contra los estimados mediante cada modelo propuesto.....	45
Figura 4-7: Mapas factor R estimados con modelo potencial (a izquierda) de Pérez y Mesa (2002) y con el modelo lineal desarrollado en la presente tesis (a derecha).	45
Figura 4-8: Mapa factor R observado para la cuenca tributaria al embalse.	46
Figura 4-9: Rangos de variabilidad de las propiedades de los suelos empleados por Wischmeier y Mannering (1969).	47
Figura 4-10: Nomograma de Wischmeier et al. (1971) para el cálculo del factor de erodabilidad.	48
Figura 4-11: Índice de estabilidad T_{45} vs. contenido de materia orgánica.....	50

Figura 4-12: Mapa factor K.....	52
Figura 4-13. Factor LS para las cuencas de los ríos Grande y San Andrés a escala 1:100,000 (a izquierda) y 1:25,000 (a derecha).....	53
Figura 4-14: Factor LS en las diferentes escalas para la Subcuenca Bramadora.	54
Figura 4-15: Recortes de valores de C sugeridos por Wischmeier y Smith (1978).	56
Figura 4-16. Mapas factor C, a izquierda a escala 1:100,000 para las cuencas de los ríos Grande y San Andrés y a derecha a escala 1:10,000 para Riogrande..	57
Figura 4-17: Mapas factor P, a izquierda a escala 1:100,000 para las cuencas de los ríos Grande y San Andrés y a derecha a escala 1:10,000 para Riogrande..	58
Figura 4-18: Relaciones de entrega de sedimento obtenidas con el modelo propuesto por Jain y Kothyari (2000).	59
Figura 4-19: Tasas de erosión bruta potencial anual (Ton/ha) y de suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) estimadas con el modelo RUSLE.	61
Figura 4-20: Tasas representativas de erosión para varios usos del suelo en zonas templadas reportadas por Morris y Fan (1998).....	61
Figura 4-21: Muestras de sedimentos en el embalse Riogrande II (Agudelo et al., 2013).....	62
Figura 4-22: Distribución longitudinal esquemática de las fracciones granulométricas de sedimento a lo largo del eje de un gran embalse (Palau, 2002).	63
Figura 4-23. Suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) estimadas con el modelo RUSLE a escala 1:100,000 (a izquierda) y 1:25,000 (a derecha)....	63
Figura 4-24: Suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) para la subcuenca Bramadora estimado con las coberturas del periodo 2000-2002.	65
Figura 4-25: Suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) para la subcuenca Bramadora estimado con las coberturas del periodo 2010-2012.	65
Figura 4-26: Mapas de los factores Y (a izquierda) y X (a derecha) del modelo EPM.....	68
Figura 4-27: Mapas de los factores Φ (a izquierda) y T (a derecha) del modelo EPM. ...	70
Figura 4-28: Mapa factor H del modelo EPM.....	70
Figura 4-29: Factor Z a escala 1:100,000 (a izquierda) y 1:25,000 (a derecha).....	72
Figura 4-30: Suministro potencial medio anual de sedimento fino (m^3/km^2) estimado con el modelo EPM a escala 1:100,000 (a izquierda) y 1:25,000 (a derecha).....	72
Figura 5-1: Localización de los transectos usados en los análisis.	76
Figura 5-2: Curvatura del perfil. Fuente: http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm	76
Figura 5-3: Resultados obtenidos en transecto # 1.....	77
Figura 5-4: Resultados obtenidos en transecto # 2.....	78
Figura 5-5: Resultados obtenidos en transecto # 3.....	78

Figura 5-6: Resultados obtenidos en transecto # 4	78
Figura 5-7: Resultados obtenidos en transecto # 5.	79
Figura 5-8: Resultados obtenidos en transecto # 6.	79
Figura 5-9: Resultados obtenidos en transecto # 7.	79
Figura 5-10: Resultados obtenidos en transecto # 8.	80
Figura 5-11: Resultados obtenidos en transecto # 9.	80
Figura 5-12: Resultados obtenidos en transecto # 10.	80
Figura 5-13: Resultados obtenidos en transecto # 11.	81
Figura 5-14: Resultados obtenidos en transecto # 12.	81
Figura 5-15: Resultados obtenidos en transecto # 13.	81
Figura 5-16: Resultados obtenidos en transecto # 14.	82
Figura 5-17: Resultados obtenidos en transecto # 15.	82
Figura 5-18: Resultados obtenidos en transecto # 16.	82

Lista de tablas

Pág.

Tabla 3-1: Productos de precipitación que abarcan el territorio colombiano	26
Tabla 3-2: Relación de estaciones de precipitación utilizadas.	27
Tabla 3-3: Resumen de coberturas principales por cuenca periodo 2000 – 2002.....	31
Tabla 3-4. Datos batimétricos del embalse del proyecto Hidroeléctrico Riogrande II.....	38
Tabla 4-1: Relación de estaciones hidrométricas, valores de precipitación media y valores de erosividad observada.	43
Tabla 4-2: Coberturas CORINE Land Cover nivel tres (3) y cuatro (4), factores de cobertura y gestión (C) y de prácticas de manejo (P) anuales.....	56
Tabla 4-3: Características de los sedimentos en el embalse del proyecto Riogrande II..	62
Tabla 4-4: Estadísticas de los resultados en Ton /ha según la escala de trabajo.	64
Tabla 4-5: Factores Y y Φ asociados a diferentes materiales parentales y depositados.....	67
Tabla 4-6: Clasificación del factor Z sugerida por Zemljic (1971).....	71
Tabla 4-7: Comparación del suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) para las cuencas estudiadas hasta sus desembocaduras.	73

Capítulo 1. Introducción

1.1. Justificación e importancia

El continuo desarrollo de las geoformas sobre la corteza de la tierra conduce necesariamente a la producción y posterior redistribución de los sedimentos (Vanoni, 1975), por tanto, el conocimiento de las diversas y complejas relaciones entre la hidrología y la geomorfología adquiere gran importancia para distintos sectores como el agrícola, el de la construcción, el minero y el energético, involucrados de manera directa o indirecta en la gestión de los sedimentos.

Tradicionalmente, las relaciones hidrología-geomorfología han sido estudiadas generalmente en un sentido unidireccional, es decir, con el fin de evaluar el efecto de las características geomorfológicas sobre los regímenes hidrológicos e hidráulicos de las cuencas hidrográficas.

Actualmente, esta visión de los procesos se ha reevaluado y ha incluido en mayor medida el estudio de la retroalimentación entre ellas, de hecho, se ha encontrado que existen enlaces o acoplamientos muy fuertes entre la geomorfología y las condiciones del agua tanto superficial como subsuperficial (Verstappen, 1983). Por ejemplo, la convergencia del flujo superficial y subsuperficial en las concavidades de las vertientes promueve la solución y movimientos en masa debido a la alta presión de poros generada en estas ubicaciones (Reid y Iverson, 1992).

Una de estas relaciones es representada por los procesos erosivos detonados por el impacto de la lluvia o el movimiento del agua sobre la ladera (Lane et al., 1988), los cuales siempre están presentes en las cuencas hidrográficas debido a que son procesos naturales (Vanoni, 1975) y hacen parte de los ciclos geográficos que representan los mecanismos de evolución del paisaje o relieve. Un ejemplo típico es el modelo planteado por Davis (1899) en el cual las geoformas sufren cambios de estados, es decir, se transforman desde “jóvenes”, pasando por “maduras” hasta alcanzar los estados “viejos”. Este tipo de procesos presenta circuitos retroalimentación (Arias, 2007) que generan relaciones complejas (umbrales de estabilidad) que deberán ser entendidos para evaluar de manera acertada los procesos y sus implicaciones.

En el marco de formular relaciones claras entre estos procesos, es necesario evaluar la producción de sedimentos en las cuencas hidrográficas, más aún, en regiones húmedas tropicales de montaña como la zona Andina del territorio Colombiano, las cuales exhiben altas tasas de erosión y desgaste como sugieren los resultados de los trabajos a escala

regional en la cordillera de los Andes de Montgomery et al. (2001) y Latrubesse y Restrepo (2014) y a escala local en Antioquia los reportados por Cataño (2015).

Además, el entendimiento de los patrones espaciales de los procesos erosivos contribuye en gran medida al Planeamiento y Manejo de los Recursos Hidráulicos en las cuencas abastecedoras a los proyectos hidroeléctricos que aprovechan el gran potencial hidroenergético existente en Colombia – 56.18 GW (UPME, 2015), más aún, dado que actualmente se desarrollan y estudian nuevos proyectos no solo en zonas de altiplano como es caso de los proyectos Quebradona, Riogrande II, Miraflores, La Fe, entre otros, sino que también se ha dado viabilidad al aprovechamiento del potencial en el tramo medio del río Cauca – donde está encañonado - con el proyecto Ituango actualmente en construcción, acarreado grandes retos en cuanto a la gestión de los sedimentos.

En este trabajo investigativo se realiza la estimación de las tasas de erosión hídrica potencial y el suministro de sedimento fino o carga de lavado (washload) en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés, posteriormente, se realizan análisis multiescala para evaluar la sensibilidad de los modelos a esta variación y sus posibles implicaciones. Finalmente, se analiza si las tasas potenciales de erosión estimadas a escala 1:100,000 tienen relación directa con las curvaturas del terreno y el avance de los frentes de erosión de la cordillera.

Las cuencas de los ríos Grande y San Andrés se encuentran localizadas en el noroccidente de Antioquia y ambas tributan sus aguas y sedimentos a distintos Desarrollos Hidroeléctricos, la cuenca del río Grande abastece a los Proyectos Riogrande I y II, mientras que la cuenca del río San Andrés descarga al río Cauca ocho kilómetros aguas arriba del sitio donde se construye actualmente el Proyecto Hidroeléctrico Ituango, el cual contara con la mayor capacidad instalada del país; los tres Proyectos Hidroeléctricos son operados por el Grupo EPM, el cual es considerado el mayor generador de energía eléctrica en Colombia.

Para estimar las tasas de erosión hídrica potencial o pérdida de suelo media anual (Ton/ha-año) a escala de cuenca se emplean los modelos empíricos RUSLE - Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (Renard et al., 1997) y EPM – Método de Erosión Potencial (Gavrilovic, 1988) de manera distribuida sobre ambas cuencas, permitiendo así, evaluar espacialmente cada uno de los parámetros y resultados de los modelos, haciendo uso de la información temática y modelos de elevación digital disponibles tanto en bases de datos de uso libre como en las de diferentes entidades de carácter público vinculadas con el suministro de información para el desarrollo del proyecto como Empresas Públicas de Medellín E.S.P. – EPM, la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia – CORANTIOQUIA y el Departamento Administrativo de Planeación de la Gobernación de Antioquia).

Es necesario indicar que los modelos RUSLE y EPM son aproximaciones de carácter empírico que permiten evaluar la susceptibilidad a la erosión en escalas regionales, dado que los modelos físicamente fundamentados y estudios más detallados basados en

procesos aún se realizan en su mayoría para escalas locales como parcelas de escorrentía o predios.

También es importante mencionar que en la zona de estudio existen ambientes y /o ecosistemas únicos que deben ser estudiados y conservados como es el caso del páramo de Belmira - Santa Inés, el cual presenta un área de 10,622 hectáreas (Sarmiento et al., 2013) y se encuentra seleccionado dentro del proyecto “Páramo Andino” el cual tiene como finalidad superar los obstáculos en conservación de biodiversidad y salvaguardar los servicios hidrológicos y ambientales de los páramos andinos (Morales et al., 2007).

Otro importante ecosistema que debe ser preservado en el Altiplano de Santa Rosa de Osos es el conjunto de humedales reportados por Arias et al. (2002) y Arias (2007), donde se presenta convergencia del agua subterránea hacia el fondo plano de las concavidades de primer orden descritas por Arias (2007) y después transita como un flujo superficial laminar y abundante que contribuye en buena medida a la regulación de los caudales en la cuenca del río Grande. De esta forma, se espera que los resultados de la investigación sean útiles para la comunidad académica, empresarial y gubernamental.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Explorar la relación entre las tasas de erosión hídrica potencial y las curvaturas del terreno en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés.

1.2.2. Objetivos específicos

- Estimar las tasas de erosión hídrica en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés mediante el uso de, al menos, dos modelos de erosión superficial y pérdida de suelo a escala de cuenca.
- Relacionar las tasas de erosión estimadas con la información secundaria disponible en las cuencas, permitiendo así la validación de las estimaciones.
- Caracterizar la relación entre las tasas de erosión hídrica potencial y las curvaturas del terreno en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés.

1.3. Estructura del documento

El presente documento contiene los resultados y conclusiones de la investigación “Erosión hídrica y evolución del relieve en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés,

Antioquia – Colombia” realizada como requisito parcial para optar al título de Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos y se encuentra dividido en seis capítulos así:

El capítulo uno contiene la justificación e importancia de esta investigación, el objetivo general y los objetivos específicos.

El capítulo dos presenta en orden lógico y estructurado la revisión de literatura y estado del arte realizada, partiendo desde los antecedentes de los procesos, pasando por algunas definiciones de términos y los tipos de modelos empleados en el medio para simular dichos procesos, finalizando con una exposición de las investigaciones realizadas localmente en relación al tema.

El capítulo tres es empleado para la descripción de la zona de estudio y el conjunto de datos empleados, indicando las características generales de las cuencas hidrográficas, de los sedimentos que circulan por ellas y de los Desarrollos Hidroeléctricos construidos para aprovechar su potencial.

El capítulo cuatro contiene la implementación de los dos modelos empíricos usados para estimar las tasas de erosión hídrica potencial o pérdida de suelo media anual (Ton/kha-año), presentando una descripción detallada del método de cálculo de cada parámetro evaluado y los resultados obtenidos a través de cada modelo con su respectiva comparación.

El capítulo cinco presenta el análisis de los resultados alcanzados y la evaluación del acoplamiento entre la erosión hídrica y la evolución del relieve en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés, con énfasis en el análisis de los perfiles transversales generados a lo ancho de las cuencas de estudio y sobre el campo del parámetro o indicador geomorfológico evaluado.

El capítulo seis presenta las conclusiones de la investigación realizada y las recomendaciones para trabajos futuros que el autor considera pertinentes.

Capítulo 2. Estado del arte

2.1. Antecedentes

Históricamente las civilizaciones han buscado aprovechar el recurso hídrico para suministro, navegación o aprovechamiento hidroeléctrico, asumiendo el reto de la gestión de los sedimentos debido a que todos los ríos transportan estos materiales producto de la erosión superficial de la cuenca y la erosión de las bancas de la red de drenaje. Por tanto, los procesos de erosión, transporte y sedimentación o depositación han sido tema de investigación de ingenieros civiles y geólogos en diversidad de ambientes y geografías (Yang, 2006).

Según Vanoni (1975), la erosión, transporte y sedimentación son procesos naturales que han estado activos a lo largo del tiempo geológico (escala temporal de millones de años) y han modelado el paisaje que conocemos. MacArthur et al. (2008) retoman la distinción realizada por Vanoni (1975) en cuanto a la erosión, la cual puede ser de tipo geológica (natural) o acelerada (inducida por el hombre), ambos tipos haciendo referencia al desprendimiento o remoción de suelo, partículas de sedimento o incluso roca cuando se trata de movimientos en masa, diferenciándose principalmente estos dos grandes tipos de erosión en la escala de tiempo a la que ocurre el fenómeno.

Dada la complejidad de estos procesos, tanto para fines de conservación de ecosistemas vulnerables como para la planeación, ejecución y operación de obras civiles, el entendimiento de los procesos de erosión y sedimentación adquiere suma importancia para el desarrollo socio - económico y cultural de una nación (Yang, 2006). Hoy en día, incluso hasta organizaciones internacionales como la UNESCO invierten en investigación relacionada con la gestión eficiente de los sedimentos en búsqueda de un desarrollo sustentable de los recursos hídricos a una escala global, para cual, han emprendido la Iniciativa Internacional sobre Sedimentos - ISI, por sus siglas en inglés (<http://atl.org.mx/isi-lac/>).

2.2. Definiciones

Posada (1992) y Suárez (2001) presentan buenas definiciones de los terminos importantes que a continuación es debido mencionar para mejor comprensión de la

mecánica del proceso erosivo, sus implicaciones y el trabajo realizado en esta investigación:

- **Erosión por impacto de las gotas de lluvia:** se produce cuando las gotas de agua impactan el suelo desnudo o protegido con vegetación y tienen la capacidad de desprender y movilizar las partículas de suelo.
- **Erosión laminar:** hace referencia al desgaste o desprendimiento de un pequeño porcentaje de la capa superior del perfil de suelo (del orden de algunos milímetros por año), ocasionado por el escurrimiento difuso del agua luego de impactar sobre la superficie al precipitarse.
- **Erosión en surcos:** es producto de la concentración del flujo en pequeños canales que se van moldeando hasta formar agrupaciones que son en general de tipo semiparalelo.
- **Erosión por afloramiento de agua:** ocurre cuando la convergencia del flujo superficial y subsuperficial en las concavidades de las vertientes promueve que el agua pueda desprender partículas de suelo (Reid y Iverson, 1992) hasta formar cárcavas o cavernas.
- **Erosión interna:** se presenta cuando el flujo de agua a través del suelo puede transportar partículas formando cavernas dentro del perfil o estrato de suelo, un muy buen ejemplo de este proceso es la disolución iónica de arcillas caoliníticas reportado por Arias (2007) en la zona de estudio.
- **Erosión en cárcavas:** ocurre cuando los surcos pueden profundizarse formando canales profundos o cuando la concentración de agua están importante que la remoción de material en un sitio determinado es casi constante y muy difícil de suspender utilizando medidas de control convencionales como la siembra del vetiver.
- **Erosión fluvial o de cauces:** incluye la erosión del lecho y las bancas o taludes del canal por efecto del arrastre de partículas generado por la fuerza tractiva del agua, esta erosión puede ocasionar en quebradas y ríos la migración lateral o longitudinal del canal, socavación del lecho e incisión del valle, entre otros. Los factores claves que controlan esta dinámica son las características de los materiales que componen el canal y la hidrodinámica de la corriente. A pesar de ser un proceso natural puede ser estimulado severamente por acciones antrópicas asociadas a la explotación minera y a intervenciones mal planificadas.
- **Movimientos en masa (deslizamientos):** se produce cuando una gran masa de suelo roca se mueve por efecto de la gravedad, ya sea estimulada o no por procesos previos de carcavamiento. En general, es un proceso esporádico y se asocian en algunos casos a la saturación que reduce la fricción interna del material o aumenta la componente del peso que desencadena el movimiento, hay deslizamientos de tipo rotacional, traslacional, por caída o por flujos de lodos y escombros.

2.3. La erosión hídrica

Las cuencas hidrográficas se erosionan permanentemente debido a la acción de los procesos exógenos que actúan sobre estas, a través de sus agentes como lo son el agua, el viento, la gravedad, el hielo y los seres vivos (Vanoni, 1975). Particularmente, la erosión hídrica se produce bajo dos condiciones:

(1) Cuando el impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo excede la capacidad de este para resistir el desprendimiento (Lane et al. 1988; Merritt et al. 2003). Se han reportado datos experimentales y simulaciones numéricas que indican que tal impacto puede llegar a ejercer un esfuerzo cortante superficial de hasta 10 Pa (Hartley y Julien, 1992; Julien, 2010).

(2) Cuando la escorrentía superficial ejerce un esfuerzo cortante mayor que el esfuerzo crítico admisible por las fuerzas cohesivas del suelo (Lane et al., 1988; Merritt et al. 2003).

Las condiciones anteriores, representan bien el fenómeno que origina los tres tipos de erosión hídrica (laminar, surcos, cárcavas) en zonas de montaña (Merritt et al., 2003; Borah et al. 2008) y en zonas agrícolas con cultivos temporales (la papa por ejemplo) como ocurre en el altiplano de Santa Rosa de Osos. Una vez desprendidas las partículas de suelo (erosión laminar), se inicia la erosión en surcos donde el sedimento es transportado por la escorrentía superficial hacia los surcos o pequeñas concentraciones de flujo en la ladera (Lane et al., 1988; Borah et al. 2008).

Otros aportes considerables de sedimento son producto de la erosión en cárcavas, donde las grandes concentraciones de escorrentía actúan principalmente sobre la parte inferior y en menor medida hacia las fronteras de la cárcava (Merritt et al., 2003; Borah et al. 2008), por lo cual se conoce que su avance es de tipo remontante (Suárez, 2001) y frecuentemente los procesos de carcavamiento estimulan el desarrollo de movimientos en masa y viceversa.

Los procesos antes descritos tienen lugar en todo tipo de ambientes y fisiografías donde el suelo este expuesto, diferentes autores han reportado que en zonas de montaña y en los canales de orden menor de la cuenca este proceso es más intenso; cuando el flujo alcanza los canales de orden mayor, las orillas de los cauces también aportan sedimentos (Borah et al. 2008) y permiten el almacenamiento temporal o definitivo de algunas fracciones del sedimento erodado aguas arriba.

Julien (2010) define la producción total (A_T) de sedimentos en una cuenca hidrográfica como la suma de los aportes de las diferentes fuentes, es decir, la erosión en zonas de montaña (A_U) o erosión bruta, la erosión en cárcavas y movimientos en masa (A_G) y la erosión fluvial (A_B). Hace énfasis en que la erosión en zonas de montaña (A_U) constituye generalmente a la fuente principal de los sedimentos. La porción A_U de la producción total de sedimentos se compone del aporte de la erosión debida al impacto de las gotas

de la lluvia, la erosión en surcos, la erosión laminar, la erosión por afloramiento de agua y la erosión interna.

2.4. Modelos para estimar erosión hídrica

Según Lane et al. (1988) un modelo ideal para la estimación de las tasas de erosión hídrica en una cuenca hidrográfica *“debería representar los mecanismos que controlan la erosión, y los parámetros del modelo deberían estar directamente relacionados a propiedades físicas medibles”*. A pesar de esto, todos los modelos son abstracciones y representaciones simples o complejas de los procesos que ocurren en la naturaleza y generalmente los parámetros son muy difíciles o imposibles de medir directamente a escala de cuenca.

Dada la necesidad de analizar este proceso, a través de los años se han desarrollado diversidad de modelos que podrían agruparse en tipologías según una combinación de características, tales como la escala espacial, la duración, los procesos hidrológicos o las salidas del modelo (Avwunudiogba y Hudson, 2014). Desde el enfoque de la escala espacial se distinguen los modelos a escala de ladera y de cuenca, desde otro enfoque como la duración del proceso se distinguen los modelos a escala de evento y decadal.

Otros autores como Lane et al. (1988), Merritt et al. (2003) y Randle et al. (2006) han clasificado los modelos desde el enfoque de su concepción, existiendo tres tipos principales de modelos: (1) los empíricos, (2) los conceptuales y (3) los físicamente fundamentados, un ejemplo característico de cada uno de estos es respectivamente, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) descrita por Wischmeier y Smith (1978), los Gráficos Unitarios de Sedimentos propuestos por Rendon-Herrero (1978) y Williams (1978) y las ecuaciones de erosión y flujo superficial acopladas, basadas en los conceptos de flujo cinemático y procesos de erosión separables entre surcos y entresurcos como el propuesto por Foster (1982) o el modelo desarrollado por Nearing et al. (1989) en el Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica (WEPP) del departamento de agricultura de los estados unidos (USDA).

Así, cada tipo de modelo presenta una serie de ventajas y limitaciones, por ejemplo cuando nos referimos a los modelos empíricos, estos son bastante simples y caracterizan la respuesta de los procesos con base en el análisis de las observaciones (Merritt et al., 2003), pero son criticados frecuentemente por las suposiciones no realistas acerca de la física de los fenómenos que tiene lugar a escala de cuenca.

Los modelos conceptuales son capaces de representar las rutas de la escorrentía y los sedimentos como una serie de almacenamientos, pero los valores de los parámetros son típicamente obtenidos mediante la calibración contra datos observados en campo, los cuales pueden ser el caudal o las concentraciones medidas.

Producto de esta condición, los modelos conceptuales tienden a sufrir problemas con la determinación de los parámetros y en algunos casos solo se encuentran óptimos locales,

existiendo así conjuntos de parámetros mejores (Merritt et al., 2003). Más lamentable aún, es que la inexistencia de un conjunto único de parámetros representa la limitada interpretación física de tales parámetros.

Por otra parte, aunque los modelos físicamente fundamentados incorporan generalmente las ecuaciones de conservación de masa y de momentum para el flujo y de conservación de masa para el sedimento, adolecen de problemas de escala, producto de la extrapolación desde el modelo físico (parcela), ya que no existe suficiente justificación teórica que soporte que el conjunto de ecuaciones asumidas representan bien los procesos en las diferentes escalas de trabajo (Merritt et al., 2003).

En general, cualquier tipo de modelo empleado en la simulación de procesos erosivos, de transporte y sedimentación es vulnerable a las variaciones en las escalas espaciales y temporales debido a la alta complejidad y variabilidad de estos procesos, pero la adecuada implementación y análisis de los resultados de estos es el camino más recomendable en la práctica de la ingeniería fluvial.

2.5. Erosión hídrica en el ramal occidental de la cordillera central de Colombia

Algunos autores como Smith et al. (1994), Villa (2012), UNAL (2014) y Osorio (2017) han reportado tasas de erosión hídrica en cuencas que drenan el altiplano de Santa Rosa de Osos y alguno de los flancos del ramal occidental de la cordillera central de Colombia. Smith et al. (1994) evalúan la erosión en la cuenca de la quebrada Santa Bárbara en el municipio de Carolina del Príncipe, mediante un modelo empírico y dos físicamente fundamentados; Villa (2012) hace uso de dos modelos empíricos (USLE y EPM-Erosion Potential Method) para la cuenca de la quebrada la García en el municipio de Bello y también presenta la estimación del índice de erosión relativa propuesto por Integral (1985) en el estudio geomorfológico del proyecto hidroeléctrico Cañafisto.

Posteriormente, UNAL (2014) y Osorio (2017) estiman las tasas de erosión hídrica en la cuenca del río Grande hasta el sitio de presa del proyecto hidroeléctrico Riogrande II (0.728 mm/año), propiedad de Empresas Públicas de Medellín E.S.P., en el marco de la serie de estudios que realiza el generador con el fin de diseñar estrategias de manejo y conservación para la cuenca hidrográfica abastecedora del proyecto de aprovechamiento múltiple Riogrande II, ambos estudios se realizan mediante el modelo conceptual distribuido SHIA-SED, herramienta híbrida compuesta por el modelo de Simulación Hidrológica Abierta (SHIA) propuesto por Vélez (2001) y el módulo de sedimentos del modelo CASC2D-SED (Rojas, 2002) incorporado por Velásquez (2011) a los conceptos de simulación abierta de Vélez (2001).

2.6. Relaciones de entrega de sedimentos (SDR)

Como es conocido en el medio, solo una fracción del sedimento erodado (erosión bruta) dentro de la cuenca hidrográfica logra llegar a la salida de la cuenca o punto de control donde se realizan las mediciones de caudal líquido y sólido simultaneo mediante las metodologías estándar propuestas por Guy y Norman (1970), Edwards y Glysson (1988, 1999), WMO (2003), entre otros. Walling (1983) compiló datos de diferentes regiones (Figura 2-1) e informa que dicha fracción que alcanza la sección de control es conocida como el suministro de sedimentos finos o carga de lavado (washload) como más adelante Woo et al. (1986) la denominaron. El porcentaje restante de la erosión bruta es depositado y almacenado temporal o permanentemente en la base de las laderas, en la planicie de inundación o en los depósitos aluviales activos de los canales que conforman la red de drenaje.

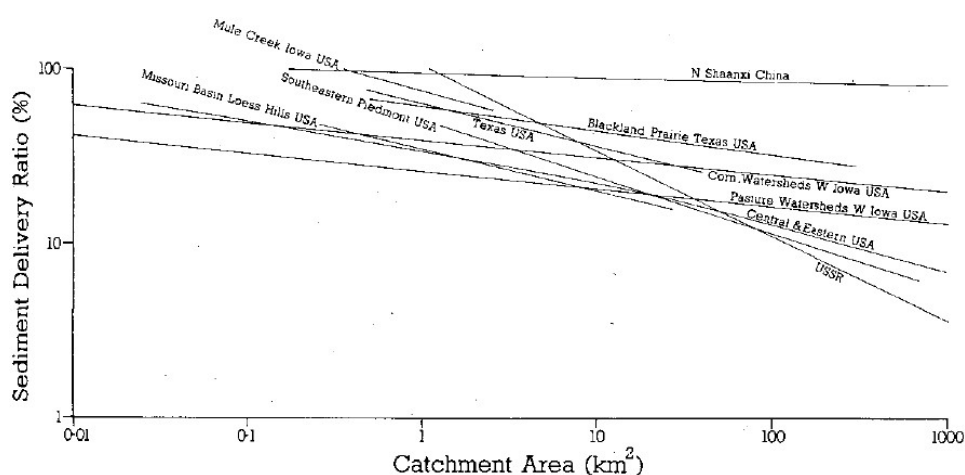


Figura 2-1. Compilación de relaciones de entrega de sedimento (SDR) contra el área de cuenca según reporta Walling (1983).

Walling (1983) también reporta una enorme variabilidad de los resultados de relaciones de entrega para diferentes geografías alrededor del planeta y por ejemplo, informa que para el Altiplano de loess en China las relaciones de entrega son cercanas al 100 %, consistente con la grave problemática de sedimentación que presenta dicha zona.

Usualmente se ha empleado el termino Relación de Entrega de Sedimentos para representar el resultado de un proceso complejo y bastante variable en espacio y tiempo, estas relaciones son definidas como “la relación entre el suministro de sedimento en una sección de una corriente ($\text{ton}/\text{km}^2\text{-año}$) y la erosión bruta de la cuenca aguas arriba del punto de medición ($\text{ton}/\text{km}^2\text{-año}$)” y han sido introducidas y analizadas por múltiples autores como Glymph (1954), Maner (1958), Boyce (1975), Walling (1983), Julien (1995), entre otros. La relación entre la entrega de sedimento y el área de la cuenca presenta generalmente un comportamiento inverso (Figura 2-2) según los resultados de Boyce (1975), que ha sido explicado por la disminución en las pendientes de las laderas y

gradientes de los canales, además de, las posibilidades de almacenamiento en los aluviones activos de las planicies de inundación (Walling, 1983).

El termino carga de lavado (washload) introducido por Woo et al. (1986) es de gran relevancia porque a partir de este se define el umbral entre lo aportado por las vertientes y lo aportado con los lechos de la red de drenaje que compone la cuenca hidrográfica (Figura 2-3), la carga de lavado viaja en suspensión o disuelta y es medible cuando se realizan aforos sólidos en las corrientes naturales (Figura 2-4).

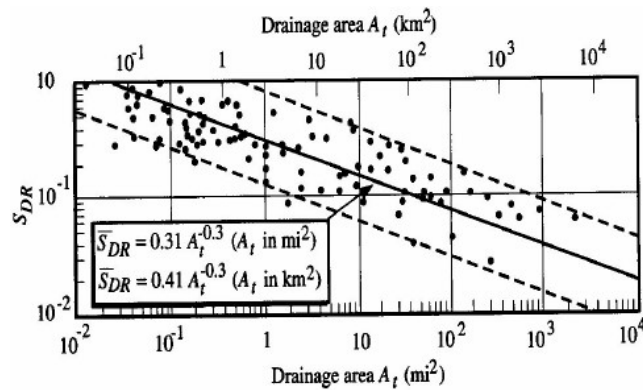


Figura 2-2: Relaciones de entrega de sedimento contra el área de la cuenca. (Modificada de Boyce, 1975).

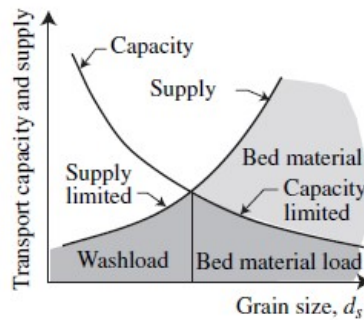


Figura 2-3: Relación esquemática entre la capacidad de transporte y el suministro de sedimento (Tomada de Julien, 2010).

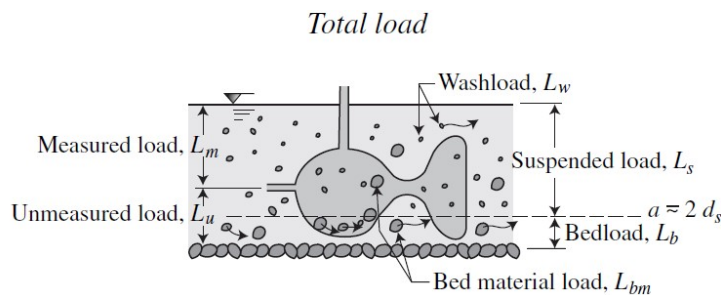


Figura 2-4: Esquema de la carga total y los diferentes tipos de cargas de sedimento que pueden cruzar una sección transversal dada de un río (Tomada de Julien, 2010).

En la actualidad existen metodologías como la de Jain y Kothyari (2000) que relaciona variables geomorfológicas e hidráulicas de las laderas como las pendientes, rutas de flujo, el tiempo de viaje del flujo superficial y una velocidad de tránsito similar a la estimada con la metodología de Manning para estimar de manera distribuida en una cuenca hidrográfica la probabilidad de que las partículas erodadas en alguna ubicación aguas arriba alcancen el canal más cercano. A continuación se realiza una breve descripción de la formulación matemática de esta:

$$SDR_i = \exp(-Yt_i) \quad (2.1)$$

Dónde: SDR_i es la relación de entrega de sedimento de la celda i ; Y es un parámetro específico de cuenca expresado en unidades de 1/hora y t_i es el tiempo de viaje del flujo superficial en horas (h) desde una celda i hasta el canal de flujo más cercano a lo largo de la ruta de flujo. El tiempo de viaje del flujo superficial desde una celda i hasta el canal de flujo más cercano a lo largo de su recorrido se calcula como:

$$t_i = \frac{l_i}{V_i} \quad (2.2)$$

Dónde: l_i es la longitud del flujo desde la celda i hasta el canal de flujo más cercano (m) y V_i es la velocidad de flujo para la celda i (m/s). Como sugiere Batista et al. (2017) el parámetro de longitud de flujo puede ser fácilmente calculado utilizando la función D8 Distance to Streams del conjunto de herramientas TauDEM 5.1.2 (Tarboton, 2014) incluidas en los software ArcGIS o en MapWindow, el modelo de elevación digital (DEM) de la cuenca y su red de drenaje asociada en formato raster, dicho algoritmo calcula la distancia horizontal desde la celda i a las corrientes guiándose en el mapa de direcciones de flujo en el sentido de mayor gradiente. La velocidad de flujo es calculada utilizando la ecuación del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos de América para el flujo de canales superficiales y poco profundos (SCS, 1975):

$$V_i = a_i S_i^{0.5} \quad (2.3)$$

Dónde: a_i es un coeficiente de rugosidad superficial para la celda i (m/s) y S_i es la pendiente en la celda i (m/m). El coeficiente a_i depende de la cobertura del suelo. Esta aproximación reduce el carácter empírico de la relación de entrega de sedimentos dado que al incluir algunas de las variables más representativas del proceso se simula de manera más precisa aquellas interrelaciones que conllevan al tránsito de los sedimentos desde las vertientes y geformas asociadas hasta los canales de la red drenaje.

2.7. Efecto de la escala en la modelación de procesos erosivos

Según Verstappen (1983), existen diferentes tipos de estudios de erosión en función de la escala, entre los cuales se pueden distinguir tres grupos principales:

Estudios de detalle, los cuales se basan en abundantes trabajos de campo y el uso de información de gran escala (1:1,000 – 1:5,000). Además, se realizan para áreas específicas de extensión limitada como granjas o zonas habitadas.

Estudios de escala media, los cuales preferiblemente cubren una o más cuencas hidrográficas completas, la escala de la información necesaria depende del tamaño de la cuenca y del objetivo del proyecto, sin embargo, escalas 1:20,000 – 1:25,000 son muy comúnmente empleadas.

Estudios de escala pequeña, están usualmente relacionados con regiones completas y el objetivo de estos es proporcionar un amplio inventario del estado de los procesos erosivos para propósitos de planificación de uso del suelo, conservación de los recursos suelo y agua, entre otros. Se emplea generalmente información a escalas 1:50,000 – 1:70,000.

Hoy en día, gracias al desarrollo de los sistemas de información geográfica, una variedad de modelos empíricos, conceptuales y físicamente fundamentados han podido ser evaluados e implementados de manera distribuida para cuencas hidrográficas completas, presentando grandes ventajas en cuanto a la posibilidad de entender los patrones espaciales de procesos tanto hidrológicos como erosivos, y a la vez, haciendo emerger nuevos desafíos en términos de modelación, por ejemplo, la evaluación de la precisión de estos modelos en relación a la resolución espacial de los datos de entrada.

Por tanto, desde los años ochenta se encuentran en la literatura trabajos como el de Julien y Frenette (1987), enfocados en el análisis del efecto de la escala espacial en la modelación de los procesos erosivos, otros autores como Quinn et al. (1991); Zhang y Montgomery (1994) y Beven (1995) analizan los efectos de la escala en los procesos hidrológicos de escorrentía superficial.

Posteriormente, Molnár y Julien (1998) emplean el modelo USLE para la estimación de tasas de erosión en dos cuencas en Mississippi con tamaños de celda variando desde 30 x 30 m a 6 x 6 km, encontrando que, los grandes tamaños de celda tienden a subestimar las tasas de erosión y concluyen su investigación planteando un factor de corrección para los cálculos cuando el tamaño de celda supera los 100 x 100 m. Estos factores de corrección obtenidos son similares a los resultados expuestos por Julien y Frenette (1987) para una zona geográfica diferente.

En general, estos trabajos se han enfocado en el remuestreo o agregación de los datos desde la resolución inicial (detallada) hasta una resolución final (gruesa), mediante matrices cuadradas de agregación (Figura 2-5), presentándose así, la remoción de parte de la variabilidad natural del proceso.

Rojas (2002) en su tesis doctoral también evalúa el efecto de la escala espacial en las tasas de erosión estimadas, esta vez, empleando el modelo conceptual y físicamente fundamentado CASC2D-SED desarrollado en la Universidad del estado de Colorado y que permite simular procesos hidrológicos y erosivos de manera distribuida y continúa,

encontrando interesantes relaciones entre las tasas de erosión bruta anual y el tamaño de celda del modelo de elevación digital empleado.

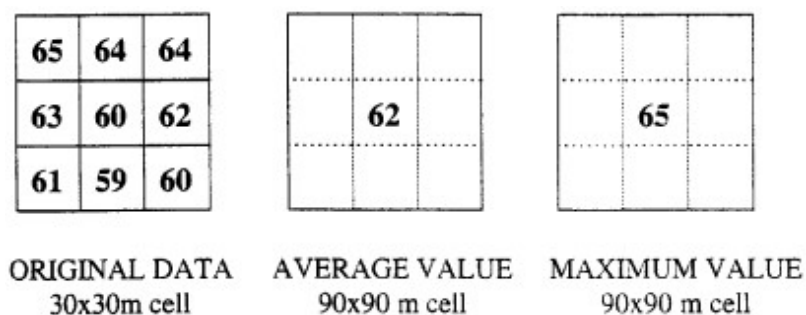


Figura 2-5: Matriz de agregación 3x3 (Tomada de Molnár y Julien, 1998).

Más recientemente, Cataño (2015) critica la robustez de estos modelos conceptuales y físicamente fundamentados de manera distribuida por su dependencia a la resolución espacial de la información de entrada y la escases de información en nuestro medio, para mostrar las bondades de su modelo conceptual agregado para estimaciones en cuencas no instrumentadas.

En el trabajo aquí presentado se evalúa la sensibilidad de los resultados de los modelos empíricos RUSLE Y EPM a la escala espacial y/o tamaño de celda del modelo de elevación digital empleado al igual que el efecto de la escala en la cartografía temática de coberturas vegetales y usos del suelo con leyenda Corine Land Cover de 1:100,000 (hasta nivel tres) a 1:10,000 (hasta nivel cuatro) donde pequeños polígonos de cultivos se encuentran mapeados. El caso de estudio seleccionado fueron las cuencas de los ríos Grande y San Andrés en el departamento de Antioquia.

2.8. Evolución del relieve

En la literatura se encuentran desde la época de los setenta algunos modelos computacionales físicamente fundamentados que usan una malla de celdas para representar el relieve (paisaje) y la red de drenaje, como el propuesto por Anhert (1976). Estos modelos pretenden simular la evolución del relieve mediante el cambio de las elevaciones de cada celda por efecto de la erosión hídrica (Coulthard, 2001).

La evolución del relieve (paisaje) es bastante compleja debido a la gran cantidad de procesos que actúan en un amplio rango de escalas espaciales y temporales. Por ejemplo, la ubicación exacta de una sección de río trenzado puede resultar irrelevante al considerar miles de años de agradación del valle, pero muy importante cuando se mira en escalas de tiempo más cortas, por ejemplo, para la construcción de un puente (Coulthard, 2001).

Otros investigadores como Lowman y Barros (2014) analizan la evolución del relieve o las geoformas con métodos estadísticos y enfocados especialmente en relación entre la

distribución altitudinal y densidad de los canales de primer orden y la precipitación, concluyendo acerca de un vínculo directo entre el clima y la erosión fluvial en varias cuencas de Perú y Bolivia. También plantean una metodología muy interesante para el análisis de la evolución en función de los regímenes hidrogeomórficos por bandas de elevación en la cuenca.

Por otro lado, Tucker y Bras (1998) analizan la morfología de las cuencas y la densidad de drenaje en función de su relación con los procesos de ladera y aseguran que estos alteraran tanto la apariencia visual del paisaje como la relación entre la pendiente y el área contribuyente. Concluyen su trabajo con la obtención de expresiones para las relaciones entre densidad de drenaje y factores como la lluvia y la erosión media, aclarando que no necesariamente describen que ocurriría en respuesta a cambios en esos factores a corto plazo, pero que un análisis mediante modelos de elevación digital de alta resolución combinado con dataciones de las características geomórficas podría resolverlo.

Además, indican como la curva área contribuyente – pendiente de la ladera o vertiente presenta una rotación característica que refleja la transición entre colinas convexas y valles cóncavos, muy útil en el análisis de los procesos de ladera dominantes (erosión difusa o concentrada). Esta tendencia también ha sido reportada por Tarboton et al. (1991), Montgomery y Foufoula-Georgiou (1993) y Willgoose (1994).

Howard (1994) al igual que Whipple y Tucker (1999) analizan la evolución del relieve mediante el uso de leyes de potencia de las corrientes o capacidad de transporte, las cuales son representaciones de los procesos físicos que controlan la erosión. Estos también llamados modelos de incisión fluvial han sido ampliamente usados para analizar las interacciones entre clima y topografía en áreas tectónicamente activas que presentan orogenia.

El análisis de estos procesos en escalas de tiempo más cortas (por ejemplo 10^2 años) es útil para la planificación de los recursos naturales, en la gestión del riesgo, y para la ejecución y operación de proyectos civiles. En la presente tesis no se implementaron los tipos de modelos descritos anteriormente por que el objetivo consistía en generar los patrones regionales de erosión potencial y analizar su relación con las curvaturas del terreno, encontrado durante el proceso un marcado efecto de las escalas espacio temporales en la modelación de este proceso en zonas de latitudes tropicales. Sin embargo, es necesario describir como la comunidad científica mundial avanza en temas de análisis del relieve.

Por último, es necesario indicar que los perfiles longitudinales de las corrientes y el análisis hipsométrico también son una herramienta muy importante en el estudio del relieve pero no permiten evaluar el objetivo buscado aquí dado que se han desarrollado para analizar procesos en que el forzador tectónico es el dominante.

Capítulo 3. Zona de estudio y conjunto de datos

3.1. Generalidades

Las cuencas de los ríos Grande y San Andrés se encuentran localizadas en el noroccidente de Colombia (Figura 3-1), sobre el ramal occidental de la cordillera central de los Andes Colombianos, la cual a partir del nacimiento del río Medellín en la cuchilla de San Miguel (2400 m.s.n.m.) se amplía dando origen al valle de Aburrá (González, 1996) y a los altiplanos antioqueños llamados por Noriega (2016) como superficies de erosión preservadas en jurisdicción de los municipios de Yarumal, Santa Rosa de Osos, Angostura y Amalfi, con altitudes entre 2200 y 2700 m.s.n.m. y reportadas en la literatura como SI por Page y James (1981) y Bustos et al. (2013), Pre-Honda de Page (1986) y Altiplanos de Santa Rosa de Osos (ASRO), de Rionegro y del Nordeste por Arias (1995) y Arias (1996) como lo menciona Noriega (2016).

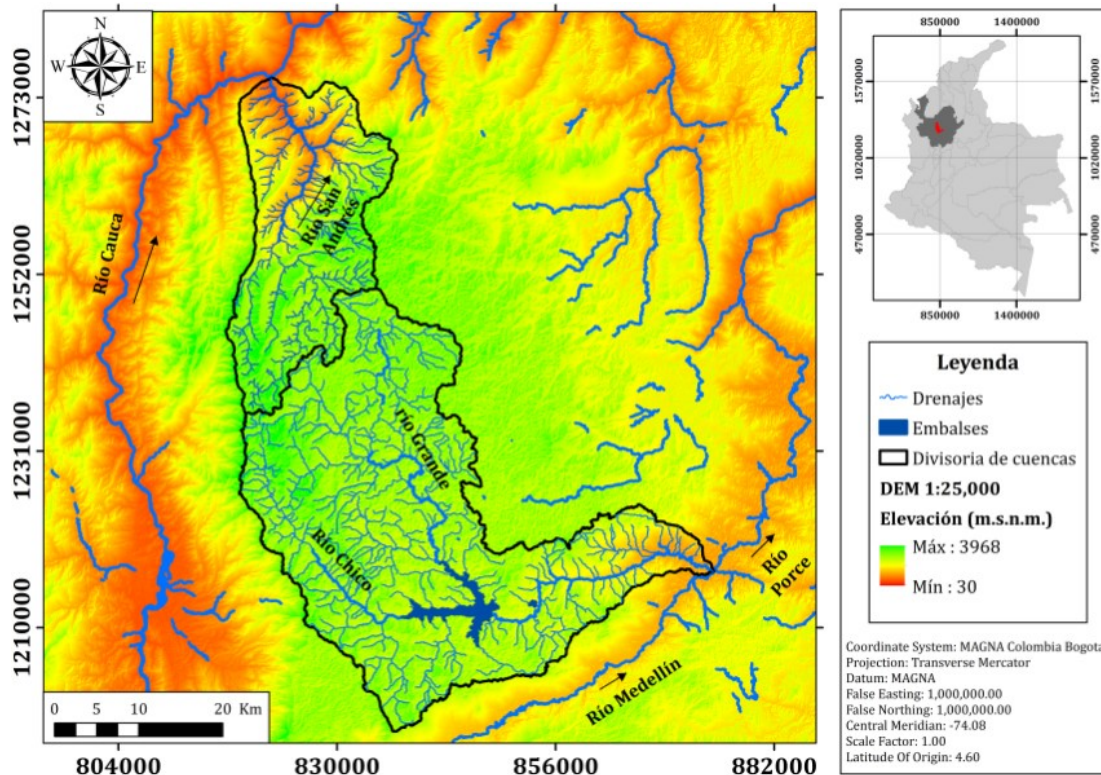


Figura 3-1: Localización de cuencas hidrográficas en estudio.

Las cuencas hidrográficas en estudio drenan parte del Altiplano de Santa Rosa de Osos (ASRO) que separa los valles interandinos de los ríos Cauca y Porce (CORANTIOQUIA, 2015). El río San Andrés drena hacia el norte para entregar sus aguas directamente al río Cauca ocho kilómetros aguas arriba del Proyecto Hidroeléctrico Ituango, el río Grande por el contrario, drena predominante hacia el sur hasta del sitio de presa del Proyecto de Aprovechamiento Múltiple Riogrande II donde gira al nororiente para entregar sus aguas al río Medellín y juntos formar el río Porce que muchos kilómetros aguas abajo en el sector llamado Dos Bocas desemboca al río Nechí.

Ambas cuencas presentan un área de drenaje importante hasta su desembocadura, el río Grande drena 1279.86 Km² y el río San Andrés drena 498.21 Km² (áreas medidas sobre cartografía a escala 1:25,000). El nacimiento del río Grande se encuentra en el Alto de San Bernardo (por encima de los 28000 m.s.n.m.) al norte de la cuenca en la vereda que lleva el mismo nombre y pertenece al corregimiento de Aragón del municipio de Santa Rosa de Osos, en su recorrido hasta el embalse del Proyecto Riogrande II, el río Grande drena áreas de los municipios de Santa Rosa de Osos, Entrerríos y Donmatías, en los cuales presenta tramos con características tanto aluviales (Figura 3-2) como no aluviales, por ejemplo, el raudal El Chispero en el límite entre Entrerríos y Santa Rosa de Osos (Figura 3-3) y el cañón del Mocerongo en Donmatías (Figura 3-3), donde existe un gran organal con características similares a los descritos por Botero (1963).



Figura 3-2: Ejemplos de tramos aluviales en la cuenca del río Grande: a) río Grande a su paso por Entrerríos y b) río Chico cerca de las partidas a Belmira (Fotografías tomadas por el autor).

Es necesario indicar que cuando se hace referencia a tramos aluviales de un río estos corresponden a los cuales donde el lecho está compuesto por un sustrato aluvial, es decir, una combinación aleatoria de fracciones de tamaño tipo bloque de roca transportado, gravas, arenas, limos y arcillas que son producto de la dinámica fluvial – arrastre, sedimentación y re-movilización de material del lecho. Por el contrario, cuando se hace referencia a tramos no aluviales de un río estos corresponden a los cuales donde el lecho está compuesto por roca fresca aflorando y en contacto permanente con el flujo de agua (caudal) que circula por el cauce de forma superficial o subsuperficial

entre los espacios vacíos que dejan los grandes bloques. Los lechos no aluviales generalmente están asociados a lineamientos de falla o a contactos entre dominios geológicos.



Figura 3-3: Tramos no aluviales en la cuenca del río Grande: a) Raudal el Chispero y b) cañón del Mocerongo. (Fotografías tomadas por el autor).

Al noroccidente de la cuenca del río Grande se localiza el páramo de Belmira- Santa Inés, donde nacen importantes afluentes como el río Chico que drena con dirección predominante hacia el sur y las quebradas Quebradona y Candelaria con orientación hacia el nororiente, Morales et al. (2007) afirman que *“esta estrella fluvial, relativamente pequeña, surte de agua a 64,000 personas de once municipios aledaños, así como a una población de cerca de un millón de personas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá”*. A los 3123 m.s.n.m. aproximadamente se encuentra la laguna Sabanas (Figura 3-4), la cual es un ecosistema de suma importancia dentro de este paramo andino.



Figura 3-4: Laguna Sabanas en el páramo Belmira- Santa Inés. (Fotografía tomada por el autor).

Por otro lado, el río San Andrés nace en el Alto de Mora (3100 m.s.n.m. aproximadamente), con la confluencia de cuatro quebradas: Mora, Cimbra, Vargas y El Muerto, en el primer tramo tiene dirección predominante suroeste – noreste (Burbano y Bustamante, 2004), en su recorrido atraviesa los municipios de San José de la Montaña, San Andrés de Cuerquia y Toledo, recibiendo en su orden, los aportes de las quebradas San Pedro, San José y Santa Inés.

Según Noriega (2016), la cuenca del río San Andrés comienza en la cima de las superficies de erosión más antiguas (Pre-A), luego atraviesa la traza de la falla espíritu Santo para finalmente desembocar en el río Cauca, recorriendo así, dos bloques o paquetes de roca importantes. En términos litológicos como lo menciona Noriega (2016), *“el bloque oriental está compuesto por rocas metamórficas y metasedimentarias del complejo Cajamarca de edad Permo-Triásica, que constituye la roca caja del Batolito Antioqueño (BA) y sus cuerpos satélites, mientras que el bloque occidental reúnen rocas metamórficas de medio grado, potencialmente pertenecientes al Complejo Puquí o presunto terreno Panzenú.*

En la cuenca alta, el río San Andrés presenta un patrón de alineamiento en planta sinuoso mientras recorre el extremo norte del Altiplano, allí la corriente presenta una baja pendiente longitudinal y un amplio valle, exhibiendo en las orillas grandes bloques de roca de tamaño métrico (Figura 3-5) dada su geometría suavizada y cuasi uniforme.



Figura 3-5: Aspecto del río San Andrés en su cuenca alta (Fotografías tomada por el autor).

Es importante anotar la relevancia que implica una buena caracterización del origen de los bloques de tamaño métrico observados, dado que en algunas ocasiones los profesionales tienden a describir estos como “carga fluvial”, por tanto una primera aproximación y buena práctica consiste en la determinación de la forma de dichos bloques, la cuales pueden ser de tipo redondeado y suave por efecto de la meteorización química y del proceso erosivo fluvial como los de la Figura 3-5 derecha, indicando que pueden ser bloques aflorantes de un substrato en perfil de meteorización. Los bloques también pueden ser de tipo anguloso y corresponder a material transportado de modo

gravitacional desde las vertientes laterales que se acumula en el lecho como ocurre con en los organales (Figura 3-3 derecha).

Además, los grandes bloques también pueden asociarse a procesos de exhumación y levantamientos de la corteza generando incertidumbre a la hora de determinar el verdadero origen, por tanto, se deben también ejecutar estudios de datación como los de Noriega (2016) y caracterización de propiedades mineralógicas de estos materiales, para determinar sus diferentes edades y características, permitiendo así, la localización espacio temporal de las fuentes.

Por otro lado, la cuenca baja del río San Andrés presenta un valle estrecho y en forma de “V”, con laderas que superan los 45 grados de inclinación y favorecen el desarrollo de los procesos erosivos tanto a media ladera como en la base de las vertientes que entran en contacto con el canal principal del río (Figura 3-6).



Figura 3-6: Aspecto del río San Andrés en su cuenca baja
(Fotografías tomada por el autor).

El río San Andrés en su cuenca baja presenta un patrón de alineamiento en planta trenzado y exhibe una gran carga de sedimentos, la cual es aprovechada por mineras localizadas en el corregimiento el Valle del municipio de Toledo. Además, el Consorcio Integral (2007) citando los estudios de Woodward - Clyde Consultants reporta en el Estudio de Impacto Ambiental - Línea Base del proyecto Hidroeléctrica Pescadero Ituango la existencia de deslizamientos hacia la cuenca baja del río San Andrés y los define como un *“movimiento complejo de 3 km de largo y 700 m ancho que incluye dos grandes movimientos y algunos pequeños que se han unido”*

Por su parte, las vertientes en la parte alta de la cuenca del río Grande (tributaria al embalse de Riogrande II) exhiben un relieve colinado equialtitudinal (Figura 3-7a) característico de la zona central del ASRO ampliamente documentado por Arias et al. (2000). Mientras que en la parte baja de la cuenca las vertientes son muy largas (Figura 3-7b) y asociadas a los frentes de erosión como reportan Arias et al. (2000). En el caso del río San Andrés, las laderas en la cabecera son de tipo colinado (asociadas al Altiplano) y fuertemente intervenidas por actividades agrícolas (Figura 3-8a), pero

exhiben mayor incisión por los cauces (Figura 3-8b) en comparación con las laderas de la cuenca del río Grande. Hacia la cuenca media del río San Andrés se observan laderas rectas de gran longitud afectadas tanto por erosión laminar como por socavación en las orillas del canal principal (Figura 3-6).



Figura 3-7: Aspecto de las laderas en la cuenca alta y baja del río Grande.
(Fotografías tomada por el autor).



Figura 3-8: Aspecto de las laderas en la cuenca alta y media del río San Andrés
(Fotografías tomada por el autor).

3.2. Características de los sedimentos en el Altiplano

Como indica Arias et al. (2000) en la parte interna y más extensa del altiplano (zona V) los procesos erosivos aportan a la red de drenaje una carga fina de arcillas, limos y arenas; que en general el transporte fluvial tiene la capacidad de evacuar eficientemente para las fracciones de tamaño más finas (arcillas y limos) quedando una fracción de arenas cuarzosas como carga activa de fondo que es apreciable en los canales que

componen la red de drenaje y en la densidad de los sedimentos acumulados en el embalse (Tabla 4-3) reportada por Agudelo et al. (2013).

La porción de la fracción de arenas que no es movilizada por la escorrentía superficial y luego por el flujo concentrado en los canales al igual que un porcentaje de las arcillas se acumula en la base de las vertientes de las colinas y en las concavidades de primer orden reportadas y ampliamente documentadas por Arias (2007). En general, este es el comportamiento dominante que permite la estructura geomorfológica de la cuenca del río Grande tributaria al embalse del proyecto de Aprovechamiento Múltiple Riogrande II.

Un escenario muy diferente se tiene en la cuenca el río san Andrés donde los procesos de erosión o remoción en masa son dominantes y la escorrentía superficial y concentrada en los canales tiene la capacidad de evacuar gran parte de las fracciones de tamaño menor (arcillas, limos y arenas), quedando solo una porción menor de las arenas y la fracción grueso granular compuesta por las gravas que forman grandes depósitos aluviales en el canal principal y en la confluencia con sus tributarios hacia la cuenca baja.

3.3. Desarrollos hidroeléctricos en la zona

Tanto en la cuenca del río Grande como en la del río San Andrés existen proyectos que aprovechan el potencial hidroenergético disponible gracias a la orografía y recursos hídricos de la región. Los proyectos Quebradona o Riogrande I, Riogrande II e Hidromontañitas aprovechan las aguas del río Grande y el río Chico, mientras que los proyectos PCH San Andrés, PCH La Chorrera y las Centrales Hidroeléctricas de San José de la Montaña (micro y pequeña), entre otros que se encuentran en etapa de prefactibilidad y factibilidad, aprovechan el recurso hídrico del río San Andrés y sus afluentes. Además, el caudal del río San Andrés será aprovechado ocho kilómetros aguas abajo de su desembocadura en el río Cauca por el Proyecto Hidroeléctrico Ituango. A continuación se realiza una breve descripción de las características principales de estos proyectos:

3.3.1. Proyecto Riogrande I

Se encuentra localizado en jurisdicción de los municipio de Santa Rosa de Osos y Donmatías, cuenta con una capacidad instalada (CI) de 75 MW distribuida en tres unidades tipo Francis de eje vertical, actualmente, la central Mocorongo o Riogrande I de tipo superficial opera como una planta menor con una sola unidad (EPM, 2008), cuenta con una presa de tierra de 27 m de altura conocida como Quebradona o Riogrande I, la cresta se encuentra en la cota 2098 m.s.n.m., tiene una longitud de 110 m y un ancho de ocho m (Figura 3-9a).

El embalse con un volumen útil de 0.54 Mm³ y un volumen total de 1.93 Mm³ es alimentado por la quebrada Quebradona y una desviación del río Grande para caudal promedio a la entrada de 13.9 m³/s. El vertedero, se encuentra ubicado en el estribo

derecho y es de tipo canal abierto sin compuertas y excavado en roca, tiene capacidad para evacuar 150 m³/s mediante un azud de 26 m de ancho y con cota de vertimiento en los 2095 m.s.n.m.

Además, la presa fue la primera experiencia en construcción de presas de tierra sobre suelos residuales del Batolito Antioqueño (EPM, 2008) y cuenta con una descarga de fondo con capacidad para 65 m³/s mediante un conducto de sección circular de 2.44 m de diámetro y 271 m de longitud. El proyecto fue construido por Suracon Ltda. (Colombia) durante el periodo 1956 - 1958.



Figura 3-9: Proyectos hidroeléctricos operados por Empresas Públicas de Medellín en la cuenca del río Grande: a) Riogrande I y b) Riogrande II (Tomada de EPM, 2008).

3.3.2. Proyecto Riogrande II

El proyecto Riogrande II cuenta con una gran área de influencia que incluye los municipios de Santa Rosa de Osos, Entrerriós, Belmira, San Pedro de los Milagros y Donmatías, además de unas pequeñas áreas de los municipios de Sopetran, Olaya y Liborina. El sitio de presa se ubica en límites de Santa Rosa de Osos y Don Matías. Este proyecto fue concebido bajo la visión del aprovechamiento múltiple, del cual hacen parte

las centrales La Tasajera y Niquía con capacidades efectivas de 306 y 19 MW respectivamente y la planta de potabilización Manantiales con una capacidad de seis metros cúbicos por segundo, que abastece de agua potable a los usuarios de una parte importante del Valle de Aburrá (EPM, 2008).

La presa Riogrande II es de tierra con 65 m de altura y la más reciente de ese tipo construida por EPM, la cresta se encuentra en la cota 2280.5 m.s.n.m., tiene una longitud de 460 m y un ancho de 10 m (Figura 3-9). Según los datos de diseño, el embalse tenía un volumen útil de 138.96 Mm³ y un volumen total de 240.58 Mm³, siendo alimentado por los ríos Grande y Chico y las quebradas Don Diego, Las Animas y Orobajo, para caudal promedio a la entrada de 33.4 m³/s (EPM, 2008).

El vertedero es de tipo canal abierto sin compuertas y excavado en roca con revestimiento en concreto y deflector en salto de esquí aguas abajo, tiene capacidad para evacuar 2040 m³/s mediante un azud de 40 m de ancho y con cota de vertimiento en los 2270 m.s.n.m.

La presa Riogrande II fue concebida empleando toda la experiencia disponible en Antioquia en cuanto a diseño y construcción de presas de tierra. Además, cuenta con una descarga de fondo con capacidad para 53 m³/s mediante un conducto de sección circular de 3.5 m de diámetro y 896 m de longitud (EPM, 2008). El proyecto fue construido por Cubiertas y Mzov S.A. (España) Torno S.P.A. (Italia) durante el periodo 1985 – 1988.

3.3.3. Proyecto Hidromontañas

El proyecto se encuentra ubicado en jurisdicción de los municipios de Don Matías y Santa Rosa de Osos, es operado por CELSIA S.A. E.S.P., la cual hace parte del holding de inversiones del Grupo ARGOS, el proyecto aprovecha el caudal del río Grande en su cuenca media para una capacidad instalada total de 19.9 MW a filo de agua (CELSIA, 2016). La captación se realiza mediante una estructura tipo azud con rejilla (Figura 3-10), para luego conducir el caudal desviado hacia la margen derecha donde se localizan las obras de remoción de sedimentos y conducción a la casa de máquinas subterránea (Ramírez, 2011). El proyecto fue construido durante el periodo 2009 – 2012.



Figura 3-10: Proyecto Hidromontañas operado por CELSIA en la cuenca del río Grande (Tomada de www.larepublica.co).

3.3.4. Proyectos San José de la Montaña

La Central Hidroeléctrica San José de la Montaña S.A.S. E.S.P., aprovecha el caudal del río San Andrés (3.78 m³/s) en el municipio de San Andrés de Cuerquia, mediante una pequeña central con una capacidad instalada de 1.1 MW y una sola unidad tipo Francis de eje vertical, adicional a la existente con capacidad de 0.4 MW y de propiedad del municipio de San José de la Montaña (GEN+, 2016). La construcción del proyecto se finalizó en el año 2016.

3.3.5. Proyecto La Chorrera

Se encuentra localizado en el municipio de San Andrés de Cuerquia y aprovecha las aguas de la quebrada La Chorrera, de la cual toma su nombre. Presenta un caudal de diseño de 1.5 m³/s y un salto neto de 1149.39 m, para generar una potencia de 14.36 MW (Hydrocsa, 2017) mediante dos unidades tipo Pelton de eje horizontal (Figura 3-11).

3.3.6. Proyecto San Andrés

Se encuentra localizado en el municipio de San Andrés de Cuerquia y aprovecha las aguas del río San Andrés, del cual toma su nombre. Presenta un caudal de diseño de cinco metros cúbicos por segundo y un salto neto de 535 m, para generar una potencia de 20 MW (Hydrocsa, 2017) mediante dos unidades tipo Pelton de eje horizontal (Figura 3-11). Se encuentra en etapa de factibilidad.



Figura 3-11: Proyectos hidroeléctricos en la cuenca del río San Andrés sin entrar en operación: a) Proyecto La Chorrera y b) Proyecto San Andrés.

(Tomada de Hydrocsa, 2017).

3.4. Descripción del conjunto de datos

Para evaluar los procesos erosivos en las cuencas hidrográficas de los ríos Grande y San Andrés (Figura 3-1) fue necesario recopilar un conjunto de datos compuesto por

información de propiedad de diferentes entidades de carácter público (EPM, CORANTIOQUIA y la Gobernación de Antioquia), ante las cuales se realizaron las respectivas gestiones para obtenerla. La información restante, ha sido obtenida de bases de datos de uso libre publicadas en internet por diferentes entidades, tanto nacionales como internacionales. Así, el conjunto de datos recopilado comprende información hidroclimática, modelos de elevación digital (DEMs), un mapa de clasificación de suelos, un mapa de coberturas vegetales para el periodo 2000-2002 y otro para el periodo 2010-2012, ortofotos, cartografía vectorial y mapas de geología y geomorfología; además de, información sedimentológica compuesta por los levantamientos batimétricos del embalse del proyecto Hidroeléctrico Riogrande II.

3.4.1. Variables hidroclimáticas

Para el análisis del ciclo del sedimento (producción, transporte y depositación) y su acoplamiento o influencia en la evolución del relieve (paisaje), son de vital importancia las variables hidroclimáticas (precipitación, caudal, entre otras), dado que éstas se emplean en la caracterización de las dinámicas de los procesos y en la estimación de parámetros que deben suministrarse a los modelos de simulación o predicción.

▪ Precipitación

Luego de analizar y evaluar los diferentes datos y productos de precipitación distribuida en el espacio, que abarcan el territorio colombiano (Tabla 3-1), desde los enfoques de la resolución espacial y temporal, además de, la información con la que se generaron y los periodos que pretenden ser evaluados mediante el modelo de erosión, se decidió emplear el campo de precipitación media anual para Colombia (Figura 3-12) estimado por Álvarez (2007) y presentado por Álvarez et al., (2008) mediante el algoritmo geoestadístico del Kriging con deriva externa (KDE), el cual exhiben errores absolutos medios y errores cuadráticos medios menores en comparación con los otros campos de precipitación disponibles, además, preserva diversas características físicas del fenómeno de la precipitación en Colombia y poseen la mejor resolución espacial (4 km) que se encuentra para este tipo de productos.

Tabla 3-1: Productos de precipitación que abarcan el territorio colombiano (Modificada de Urrea et al., 2016).

Referencia	Producto	Res. espacial	Res. Temporal	Periodo	Extensión espacial	Datos intrínsecos	Cobertura
Funk et al., (2015)	CHIRPS V2.0	0.050°	Diaria	1981 - presente	Lat [-50°,50°] Lon [-180°,180°]	Satélites Estaciones	Tierra
Hurtado y Mesa (2009)	MHN	0.083°	Mensual	1975 - 2006	Lat [-5°, 15°] Lon [-80°,-65°]	Satélites Estaciones	Océano Tierra
Álvarez et al., (2008)	PMA	0.036°	Anual	1958 - 2007	Lat [-5°,13°] Lon [-80°,-66.5°]	Satélites Estaciones	Océano Tierra

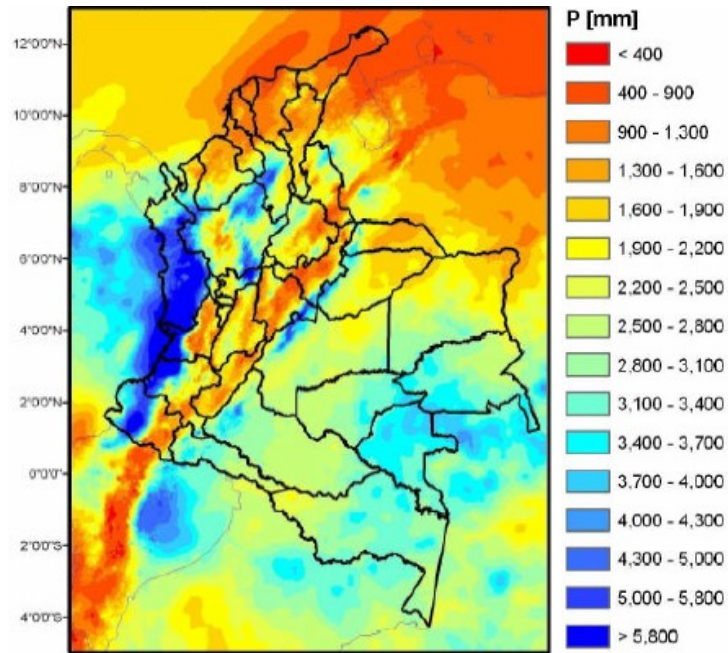


Figura 3-12: Campo de precipitación media anual para Colombia estimado mediante KDE (Tomada de Álvarez et al., 2008).

Por otro lado, la información de precipitación puntual utilizada corresponde a una selección de aguaceros representativos según la metodología de Wischmeier y Smith, 1978 para el periodo 2002-2009 y con resolución temporal de 15 minutos, la cual fue suministrada por la Unidad de Hidrometría y Calidad Generación de Energía de Empresas Públicas de Medellín (EPM) en 14 estaciones hidrométricas de las cuales se emplearon 11 (Tabla 3-2) en el presente estudio. Solo la estación Santa Bárbara se encuentra por fuera de la zona de estudio.

Tabla 3-2: Relación de estaciones de precipitación utilizadas.

Código	Estación	Este	Norte	Elevación	Municipio
1107009	Santa Bárbara	778583.0	1200390.0	2595	Urrao
2701055	Aragón	836011.2	1242044.0	2630	Santa Rosa de Osos
2701072	El Gómez	825938.1	1237267.1	2675	Belmira
2701073	Mediana	839072.9	1202236.9	2620	San Pedro de los Milagros
2701074	Belmira	824164.0	1222419.1	2520	Bello
2701075	Entrerriós	840353.0	1218023.9	2285	Entrerriós
2701094	San Bernardo	834593.2	1249007.0	2740	San José de la Montaña
2701095	Presa Riogrande II	848327.0	1211410.9	2280	Donmatías
2701101	Alto de La Sierra	831921.0	1217957.0	2750	Belmira
2701116	El Tururo	834413.0	1221217.0	2450	Entrerriós
2701706	RG-7 El Botón	835488.1	1229097.0	2470	Santa Rosa de Osos

▪ Temperatura

Para estimar esta variable en ambas cuencas de estudio se empleó la expresión propuesta por Cenicafé para la región Andina (Ecuación 3.1) en función de la altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), la cual es descrita por Vélez et al. (2000). Se recurrió a esta parametrización debido a la inexistencia de una buena densidad espacial de estaciones meteorológicas que recopilen datos de temperatura en la cuenca del río San Andrés, muy posiblemente asociado a las difíciles condiciones de orden público que se presentaban en la zona. El campo de temperatura obtenido al emplear el modelo de elevación digital (DEM) a escala 1:100,000 se muestra en Figura 3-13.

$$T = 29.42 - 0.0061H \quad (3.1)$$

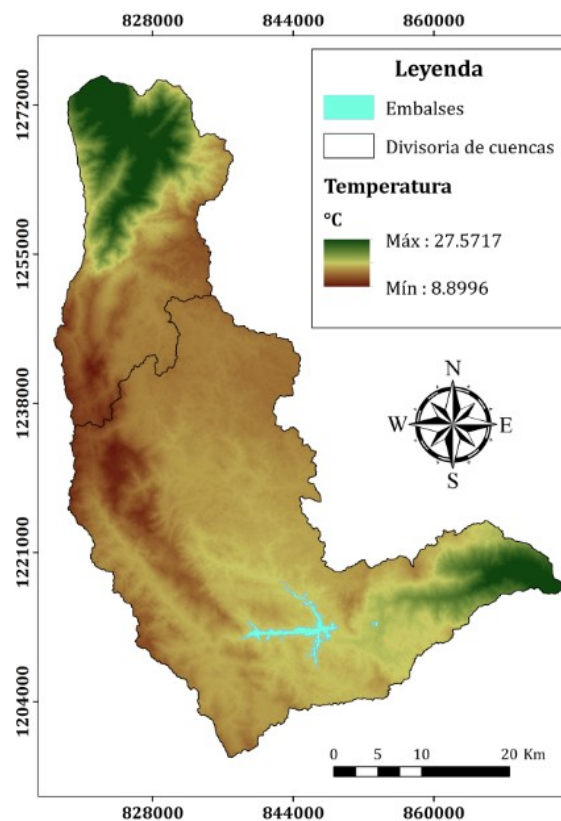


Figura 3-13: Mapa de temperatura estimado en función del DEM a escala 1:100,000.

3.4.2. Modelos de elevación digital (DEMs)

Los modelos de elevación digital de las cuencas de los ríos Grande y San Andrés en diferentes escalas (1:100.000, 1:25.000 y 1: 10.000) se presentan en la Figura 3-14 y Figura 3-15 y a continuación se describen sus principales características y el origen de la información:

1) DEM con resolución espacial de 30 x 30 m o escala cartográfica 1:100.000 producto de la misión ASTER GDEM V2 (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Global Digital Elevation Model, Version 2), realizada en conjunto por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) de Japón y la Administración Nacional Aeronáutica y Espacial de los Estados Unidos (NASA) y disponible en <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4.html>.

2) DEM con resolución espacial de 12.5 x 12.5 m o escala cartográfica 1:25.000 producto de la misión ALOS (Advanced Land Observing Satellite) de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (Rosenqvist et al., 2007), las imágenes con las cuales se generó el DEM corresponden a las capturadas por el sensor PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), las cuales se encuentran disponibles en la base de datos de Alaska Satellite Facility - <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>.

3) DEM con resolución espacial de 1 x 1 m o escala cartográfica 1: 10.000 producto del convenio No. 4085 de 2009 - Cartografía Digital del Departamento de Antioquia, el cual tuvo como objeto, “aunar esfuerzos para generar una base cartográfica digital (a escalas 1:2.000, 1:5.000 y 1:10.000) del Departamento de Antioquia”, el acceso a esta información fue posible gracias a la licencia otorgada por el Departamento Administrativo de Planeación de la Gobernación de Antioquia.

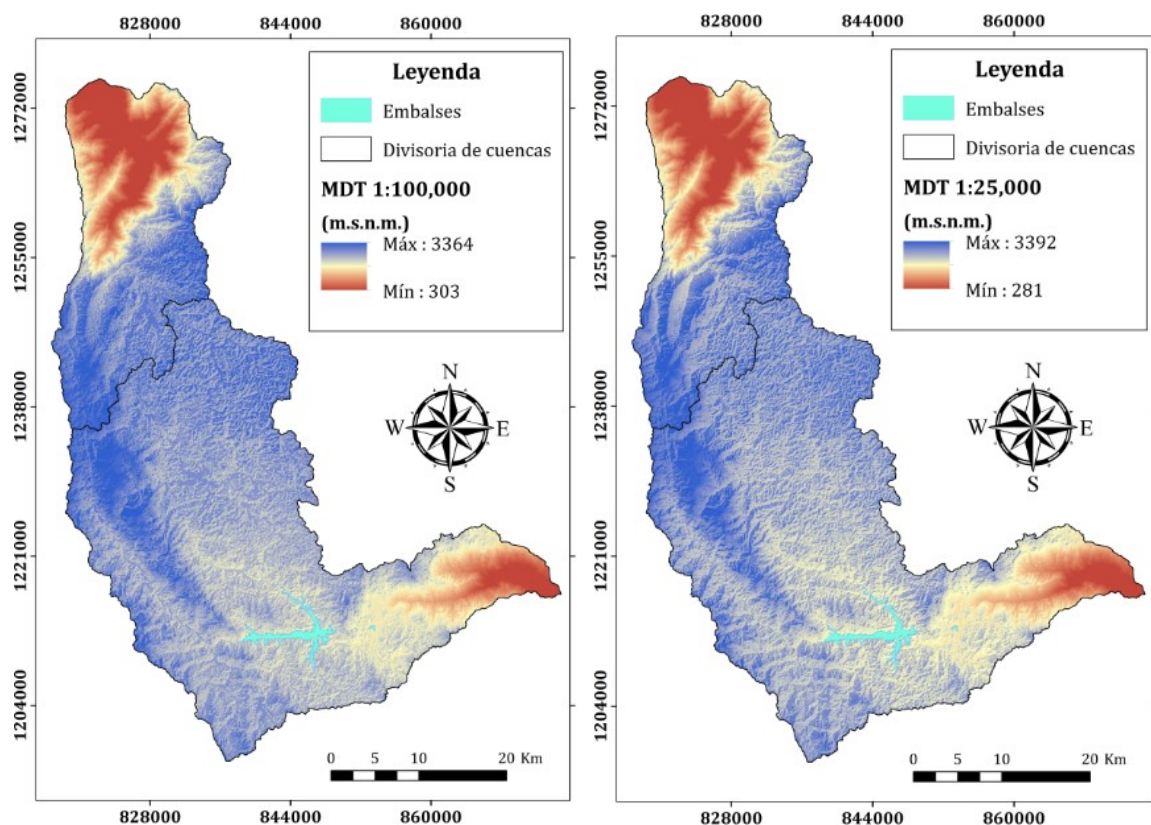


Figura 3-14: Modelos de elevación digital a escala 1:100,000 y 1:25,000 de las cuencas de los ríos Grande y San Andrés.

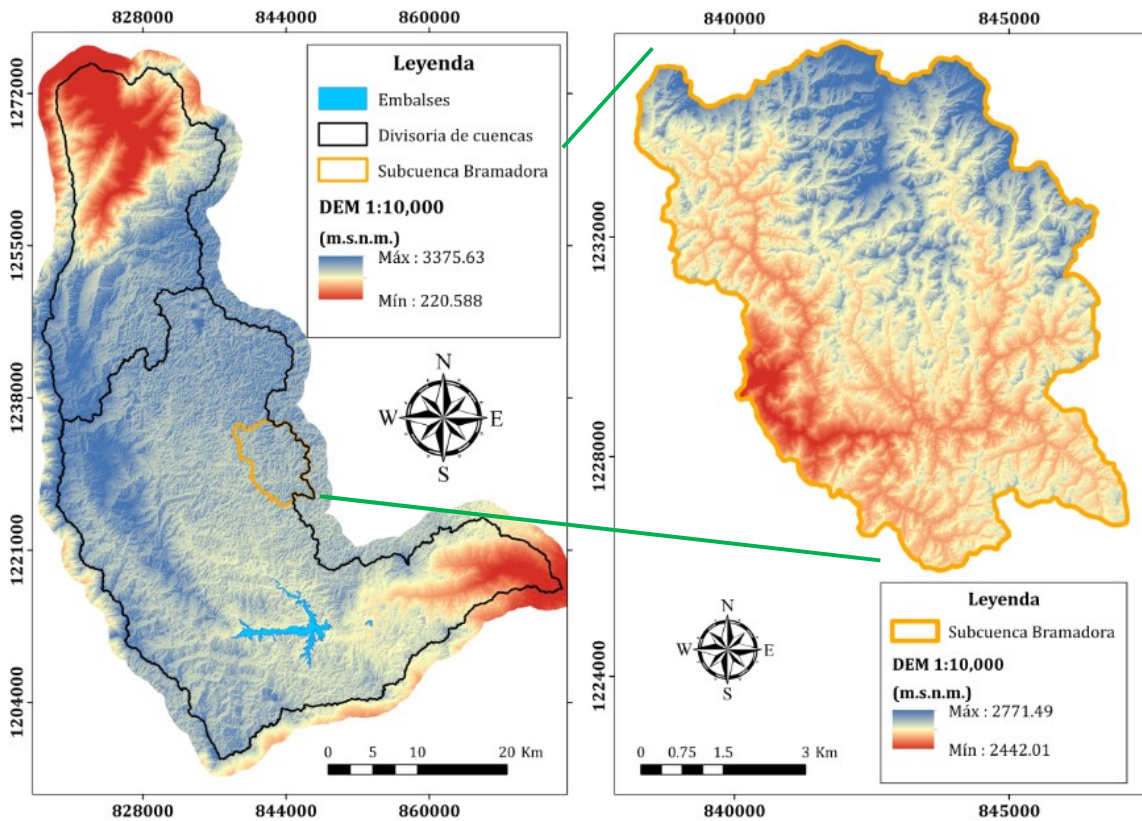


Figura 3-15: Modelo de elevación digital a escala 1:10,000 de las cuencas de los ríos Grande y San Andrés y de la sub cuenca Bramadora.

Es necesario indicar que en la Figura 3-15 se muestra el modelo de elevación digital de la subcuenca de la quebrada Bramadora a escala 1:10,000 debido a que esta se seleccionó para el análisis de los proceso erosivos a esa escala como se describirá en detalle en el capítulo de implementación de los modelos.

3.4.3. Mapa de clasificación de suelos

El mapa de unidades de suelo empleado para los análisis fue el correspondiente al Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia a escala 1:100.000 (IGAC, 2007), de donde también fue posible extraer información de propiedades de los perfiles de suelos que componen cada unidad cartográfica de suelo. Los diferentes tipos de suelos que se encuentran en las cuencas de estudio se presentan en la Figura 3-16.

3.4.4. Mapas de coberturas vegetales y usos del suelo

Para realizar el análisis se adquirió el mapa de Coberturas de la Tierra línea base (periodo 2000 - 2002) cuenca Magdalena – Cauca (Figura 3-17) disponible en la página:

http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas, dicho mapa fue obtenida mediante la adopción, adaptación y unificación para Colombia de la metodología CORINE Land Cover (escala 1:100.000), realizada por los institutos IDEAM, IGAC, SINCHI, IAvH, INVEMAR; CORMAGDALENA y la UAESPNN. A continuación en la Tabla 3-3 se presenta un resumen de las áreas correspondientes a las coberturas representativas en cada cuenca.

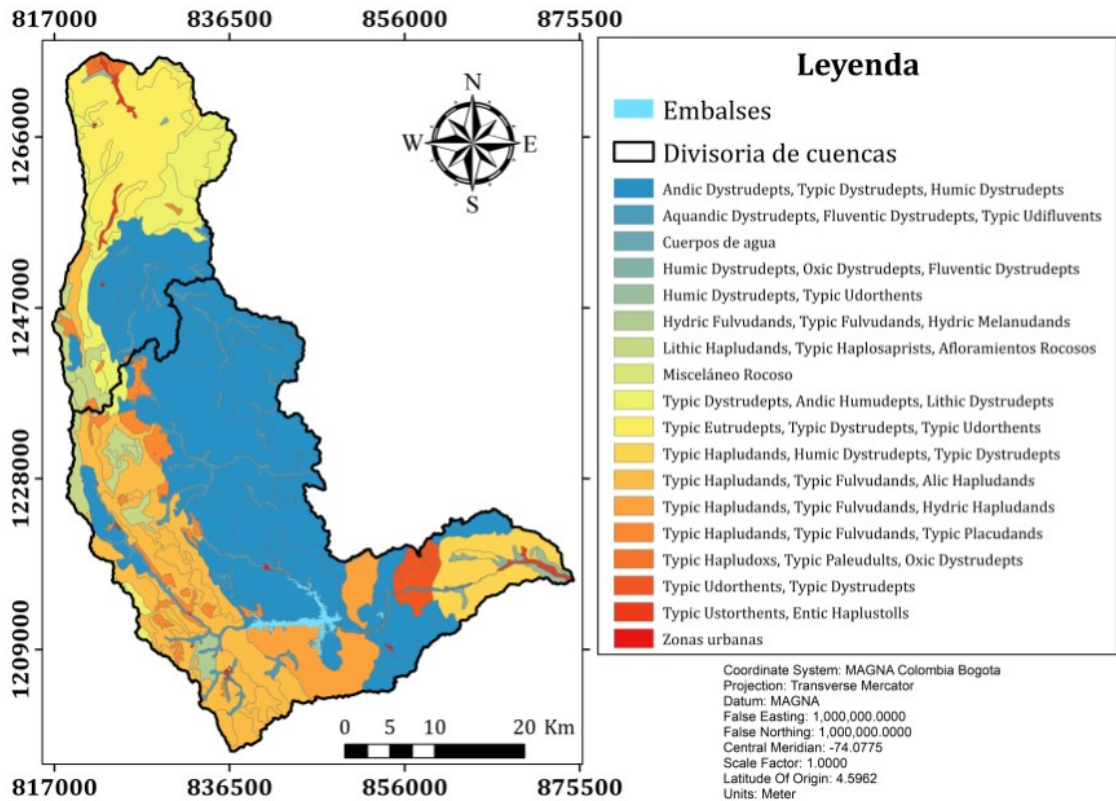


Figura 3-16: Tipos de suelos en la zona de estudio.

Tabla 3-3: Resumen de coberturas principales por cuenca periodo 2000 – 2002.

Cobertura (Km ²) / Cuenca	Río Grande	Río San Andrés	Río Grande	Río San Andrés
	Áreas en Km ²		Porcentaje del área total	
Pastos	854.25	256.23	66.75	51.43
Bosques	245.53	145.78	19.18	29.26
Cultivos	164.76	95.18	12.87	19.10

La nomenclatura de coberturas del suelo utilizada en el programa europeo CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100,000 se basa en las siguientes premisas:

- Los dos primeros niveles de la nomenclatura europea deben ser respetados. El tercer nivel es el nivel que puede adaptarse, pudiéndose llegar hasta un cuarto nivel si la resolución de la información base y la extensión de las unidades a mapear lo permite.

- Las componentes de esta nomenclatura deben poder ser distinguidas con los productos de sensores remotos que van a utilizarse (imágenes Landsat ETM).
- Los diferentes ítems deberán designar unidades de territorio con unas dimensiones mínimas acordes con este sensor. Se fijó como superficie mínima de mapeo 25 ha y una anchura mínima de 50 metros en elementos lineales.

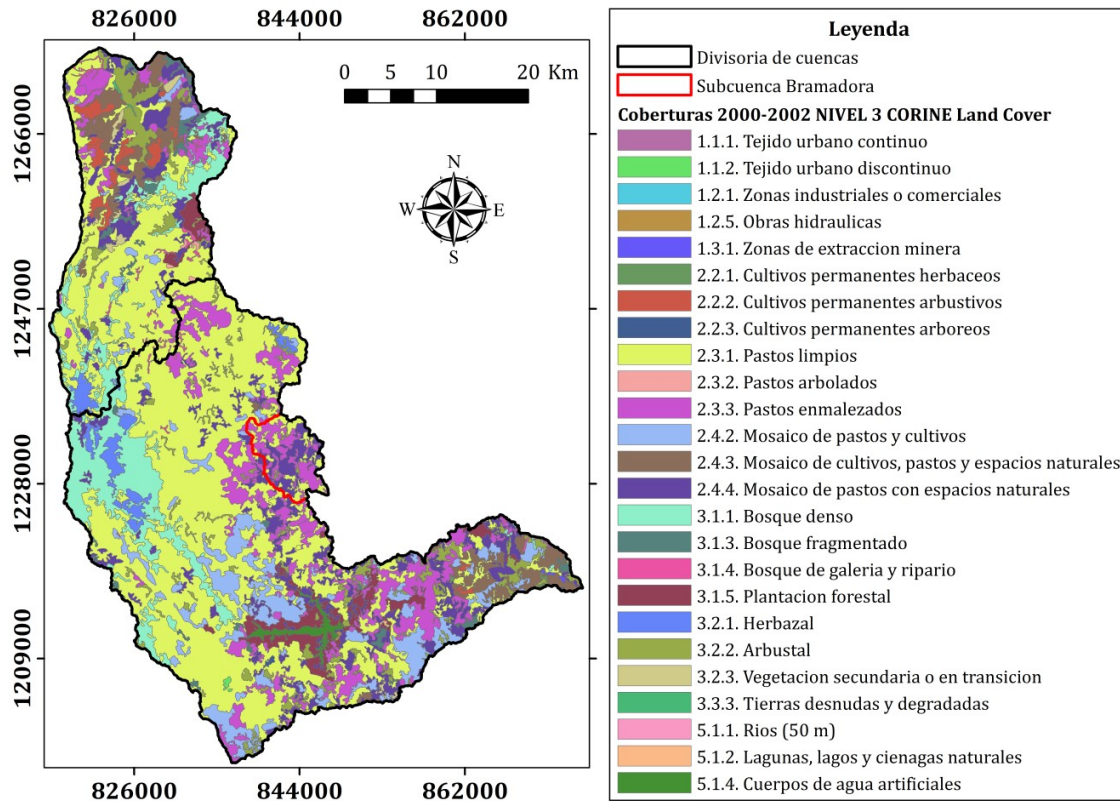


Figura 3-17: Coberturas y usos del suelo en la zona de estudio periodo 2000 – 2002

De la información cartográfica de la Actualización y Ajuste al Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca de los Ríos Grande y Chico (CORANTIOQUIA, 2015) suministrada por la Subdirección de Planeación de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia – CORANTIOQUIA, se extrajo el mapa de Coberturas y Usos del Suelo a escala 1:10,000 de la cuenca del río Grande para el periodo 2010 – 2012 que fue elaborado siguiendo la metodología CORINE Land Cover.

En la Figura 3-18 se muestra el mapa de coberturas para el periodo 2010-2012 en nivel cuatro donde es importante mencionar que el cultivo transitorio de papa (Figura 3-19) se encuentra distribuido por toda la cuenca (excepto en el cañón de Mocerongo) en cambio los cultivos permanentes arbustivos como el café, el tomate de árbol y el aguacate (Figura 3-20) se concentran en la zona de influencia del embalse sobre laderas con pendientes que oscilan entre el 14 y 40 por ciento. En la Figura 3-21 se presenta la distribución en porcentaje de cada cobertura.

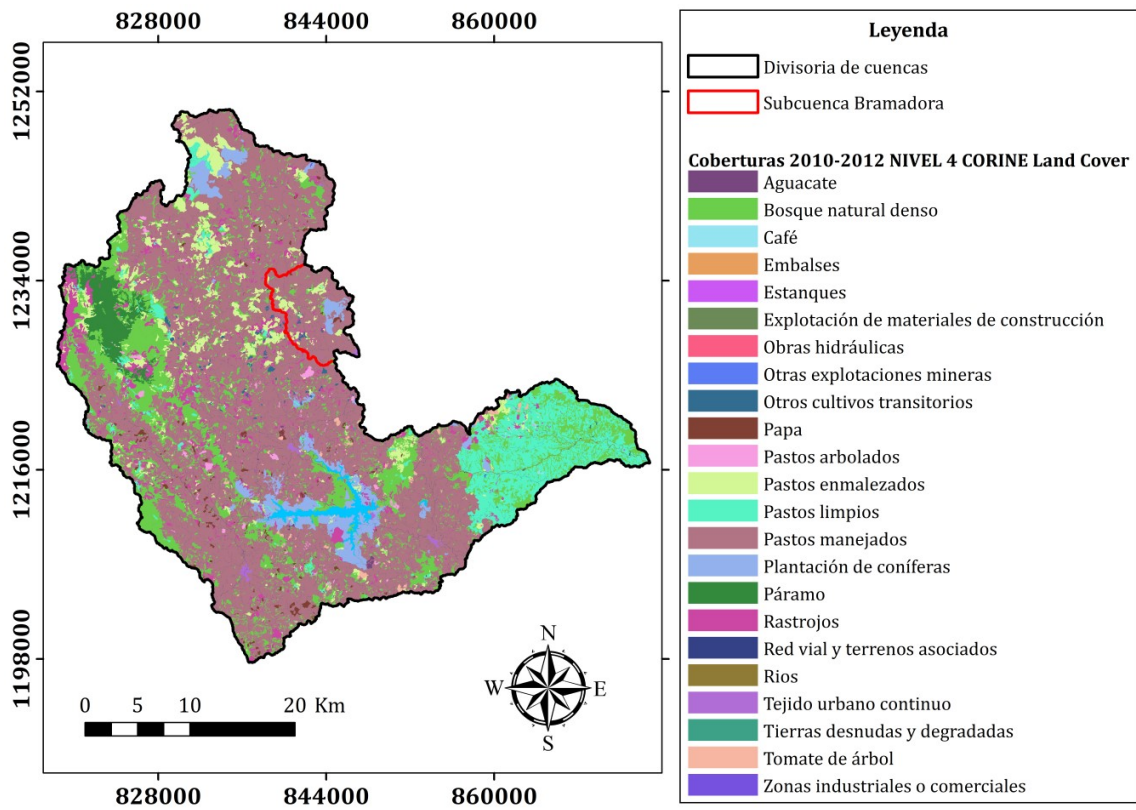


Figura 3-18: Coberturas y usos del suelo en la zona de estudio periodo 2010 – 2012.



Figura 3-19: Cultivos de papa en la cuenca del río Grande (CORANTIOQUIA, 2015).



Figura 3-20: Cultivos de tomate de árbol y aguacate en la cuenca del río Grande (CORANTIOQUIA, 2015).

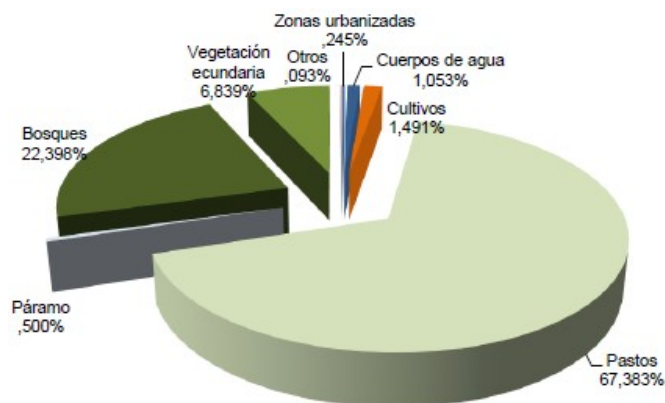


Figura 3-21: Distribución de las coberturas de la tierra en la cuenca de los ríos Grande y Chico periodo 2010 – 2012 (CORANTIOQUIA, 2015).

3.4.5. Mapas de geología y geomorfología

A continuación en la Figura 3-22 se presenta el mapa de unidades geológicas de la zona de estudio, el cual fue extraído del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia a escala 1:100.000 (IGAC, 2007) y en la Figura 3-23 el mapa de geología de la Actualización y Ajuste al Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca de los Ríos Grande y Chico.

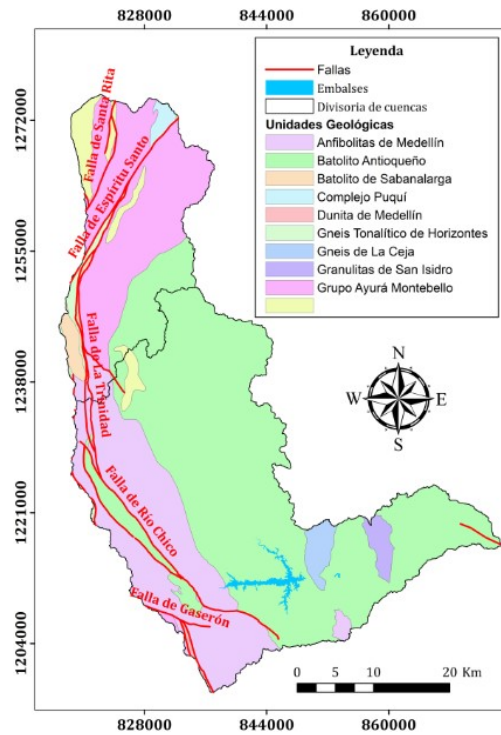


Figura 3-22: Unidades geológicas de la zona de estudio.

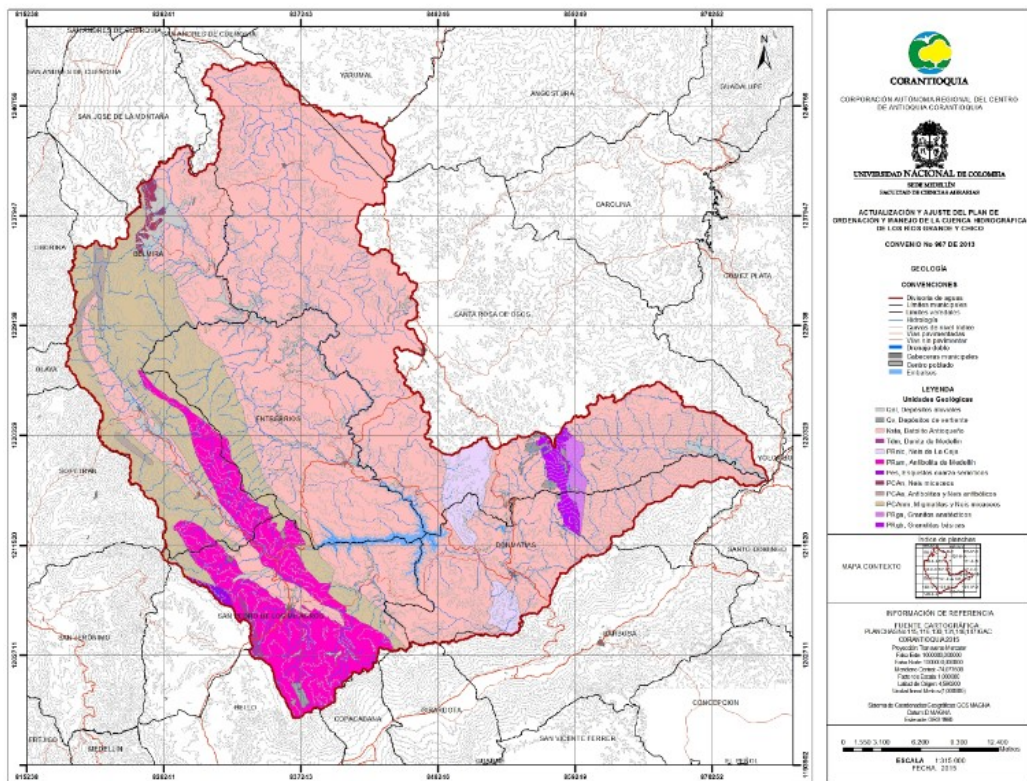


Figura 3-23: Geología de la cuenca del río Grande (CORANTIOQUIA, 2015).

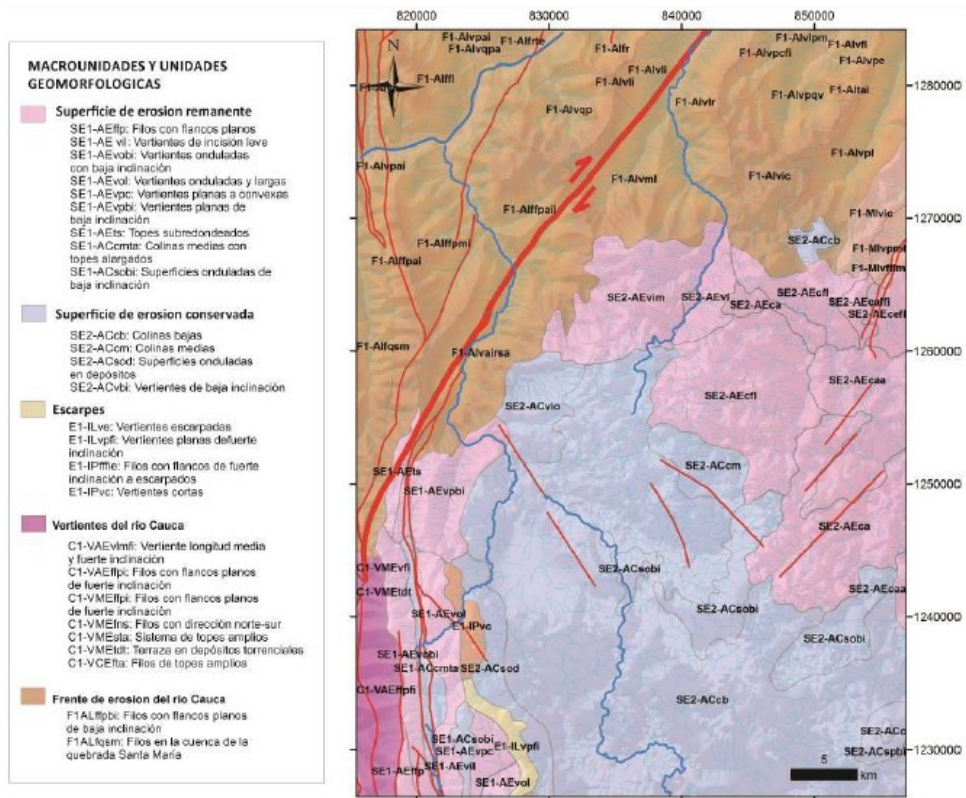


Figura 3-25: Geomorfología de la cuenca del río San Andrés.

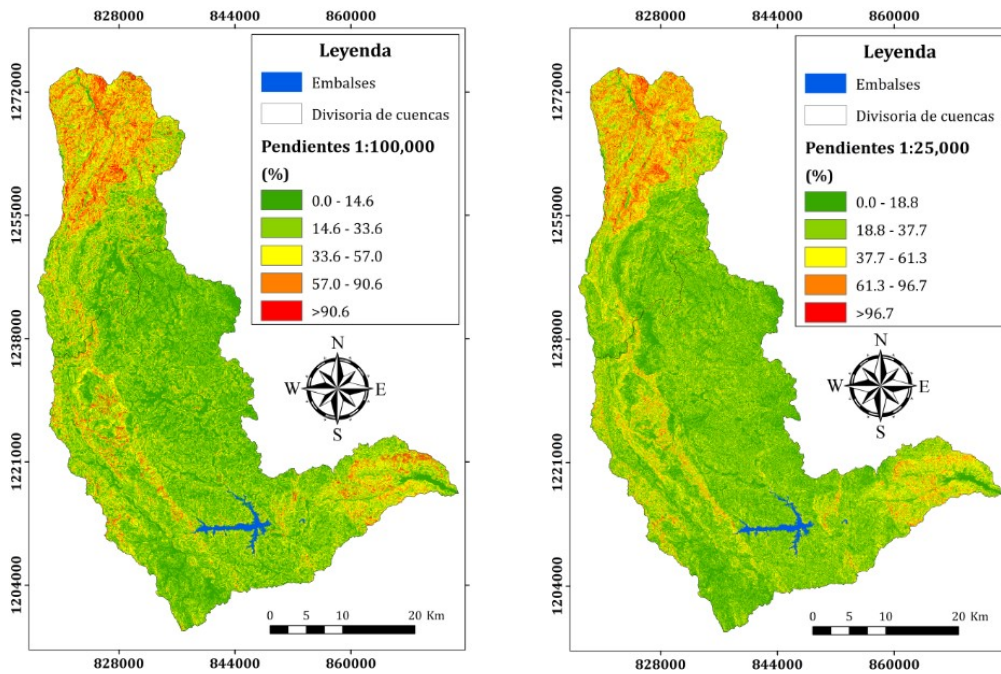


Figura 3-26: Pendientes del área de estudio estimadas con MDTs a escala 1:100,000 y 1:25,000.

3.4.6. Batimetrías del embalse del proyecto hidroeléctrico Riogrande II

Los volúmenes disponibles del embalse para cada una de las cinco batimetrías realizadas en los años 2001, 2003, 2006, 2008 y 2010, fueron obtenidos del reporte realizado por Osorio (2017). Adicionalmente, de los archivos batimétricos suministrados por la Unidad de Hidrometría y Calidad Generación Energía de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P, se estimaron las elevaciones mínimas y promedias en el fondo del embalse para cada época (Tabla 3-4).

También es necesario indicar que se intentó utilizar el valor inicial de capacidad del embalse reportando en los diseños (240.58 Mm^3) para ampliar el periodo de análisis, pero dicho valor no es comparable debido a que no fue estimado mediante batimetría, sino a partir de cartografía de la cual se desconoce la escala espacial, lo que acarrearía la inclusión de un porcentaje de incertidumbre adicional no cuantificable ni aceptable.

Tabla 3-4. Datos batimétricos del embalse del proyecto Hidroeléctrico Riogrande II.

Año	Mes	Hmín (msnm)	Hprom (msnm)	Volumen de agua (Mm^3)	Volumen de sedimento (Mm^3)
2001	Octubre	2221.28	2249.87	241.82	
2003	Diciembre	2221.55	2249.95	240.84	0.98
2006	Junio	2221.55	2250.29	238.88	1.95
2008	Septiembre	2221.99	2250.30	238.92	-0.03
2010	Agosto	2220.90	2250.22	236.61	2.30

El reporte batimétrico del año 2008 no es consistente con los demás registros, por lo tanto, se consultó al personal de la Unidad de Hidrometría y Calidad Generación Energía de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. en búsqueda de alguna causa, una vez surtido este proceso de retroalimentación con la experiencia de los profesionales de dicha unidad se logró concluir que dicho valor atípico en el registro batimétrico puede atribuirse a la incertidumbre de todo el proceso de obtención de los volúmenes.

El proceso de batimetría empleado era la medición de un número considerable de transeptos levantados con ecosonda mono-haz y un sistema de GPS con corrección diferencial en tiempo real, para el cual se aceptan errores de estimación en el volumen de sedimentos de hasta el 10%.

Capítulo 4. Evaluación del potencial de erosión bruto y el suministro de sedimento fino o carga de lavado (washload)

4.1. Modelo RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada, presentada por Renard et al. (1997) en el Manual de Agricultura No. 703 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América es un modelo de predicción de pérdida de suelo promedio anual (A, en tons/ha/año), que conserva los seis factores originales del modelo USLE (Wischmeier y Smith, 1978), publicado en el Manual de Agricultura No. 537 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, sin embargo, el modelo RUSLE incorporó nuevas maneras de cálculo de los factores y el análisis de nuevos datos de calibración y validación que no estuvieron disponibles cuando el Manual de Agricultura No. 537 fue completado, aumentando así el rango de aplicación del modelo.

De esta forma, el modelo RUSLE se compone de los siguientes seis factores: el factor Lluvia y Escorrentía (R), el factor de Erodabilidad del Suelo (K), los factores de Longitud e Inclinación de la Pendiente (LS), el factor de Cobertura y Gestión (C) y el factor de Prácticas de Manejo (P).

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (4.1)$$

Dentro de las mejoras incorporadas a los factores, se destaca la revisión y desarrollo de algoritmos para reflejar la relación de erosión de surcos a entre surcos en los factores topográficos de Longitud e Inclinación de la Pendiente (LS).

Esta ecuación de pérdida de suelo fue desarrollada para permitir planes de conservación, investigación científica y la evaluación de la susceptibilidad a la erosión en muchas localidades y condiciones que no han sido directamente representadas en la investigación original, esto es posible dada la sencillez del modelo y requerimientos de información.

Para la evaluación del proceso erosivo de manera distribuida en el espacio, se recurrió a la metodología utilizada por Khosrowpanah et al. (2007) en el proyecto de desarrollo de

un modelo de erosión potencial de suelo basado en sistemas de información geográfica, financiado por el Departamento del Interior de los Estados Unidos de América, la Oficina de Estadística y Planeación de Guam y la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA). El software SIG empleado fue ArcGis 10.4 el cual es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.

El conjunto de datos e información que ha permitido realizar la presente investigación se encuentra descrito en el numeral 3.4 del presente documento, además, a continuación se presenta la descripción de cada uno de los factores del modelo y los resultados obtenidos para cada uno.

4.1.1. Factor lluvia y escorrentía (R)

El valor numérico empleado para el factor lluvia y escorrentía (R) o erosividad de la lluvia en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada debe acoplar el efecto del impacto de la lluvia e información relativa sobre la cantidad y tasa de escorrentía probablemente asociada con la lluvia. Por tanto, el índice de erosividad de la lluvia ($E I_{30}$) presentado por Wischmeier (1959) para la ecuación universal de pérdida de suelo ha mostrado ser el más apropiado y está definido como el producto de la energía cinética total (E) por la máxima intensidad en 30 minutos (I_{30}) para una lluvia dada.

Dado que para el cálculo de este factor se requiere información de lluvia a una resolución temporal bastante detallada (de menos de 30 minutos), la cual es en general escasa en el territorio Colombiano excepto en cuencas tributarias a los embalses operados por los generadores de energía o donde las condiciones de orden público han permitido que se genere un registro continuo, a través de la historia los investigadores del tema en el país han buscado relacionar la erosividad (R) de la lluvia con variables que sean obtenidas más fácilmente y con menor resolución temporal.

Por tanto, para el territorio Colombiano Pérez y Mesa (2002) realizaron significativos aportes en cuanto a la evaluación de la erosividad de la lluvia de manera puntual y distribuida, para esta última, propusieron dos tipos de modelos o regresiones (una lineal y otra potencial) en función de la precipitación promedio anual o multianual. Su trabajo se basó en el análisis de las estimaciones de erosividad con datos de precipitación a resolución temporal de 22.5 minutos en seis estaciones operadas por Empresas Públicas de Medellín (EPM) y la desagregación mediante cascadas aleatorias a 22.5 minutos de lluvia a resolución horaria (estaciones CENICAFE) y diaria (estaciones IDEAM), para un conjunto total de 140 estaciones.

Se empleó la regresión potencial (ecuación 4.2) propuesta por Pérez y Mesa (2002) para estimar el mapa del factor R (Figura 4-7 izquierda) en función del campo de precipitación promedio multianual elaborado por Álvarez (2007) mediante el algoritmo geoestadístico del Kriging con deriva externa (KDE).

$$R = 0.00001193 PMA^{1.70148} \quad (4.3)$$

Donde R es el factor de erosividad medio anual de la lluvia [(KJ/m²) (mm/hora)] y PMA es la precipitación promedio anual o multianual (mm/hora). Es necesario aclarar que los valores estimados fueron multiplicados por 10 para su presentación en la Figura 4-7 en unidades de MJ-mm/ha-h-año.

Al comparar el valor medio estimado (56.33 MJ-mm/ha-h-año) para el área de estudio con la regresión potencial (ecuación 4.4) propuesta por Pérez y Mesa (2002) contra los valores reportados en la literatura por Hoyos et al. (2005) para la zona cafetera Colombiana (10,409.00 a 15,975.00 MJ-mm/ha-h-año), Yin et al. (2015) para el Altiplano de loess en China (781.90 a 8258.50 MJ-mm/ha-h-año), Panagos et al. (2015) para el continente europeo (51.4 a 6228.8 MJ-mm/ha-h-año) y Panagos et al. (2017) a escala global (media igual a 2190 MJ-mm/ha-h-año), se identifica que el valor medio estimado para las cuencas de estudio muy inferior al esperado para una zona tropical.

Por tanto, se solicitó a Empresas Públicas de Medellín (EPM) el suministro de información de precipitación con una mejor resolución temporal (15 minutos) con el fin de realizar la estimación de la erosividad y generar un nuevo modelo a partir de datos con mejor resolución temporal que no estuvieron disponibles cuando Pérez y Mesa (2002) propusieron su modelo de tipo potencial, la solicitud realizada fue amablemente atendida por la Unidad de Hidrometría y Calidad Generación de Energía con la entrega de una selección de aguaceros representativos según la metodología de Wischmeier y Smith (1978) para el periodo 2002-2009 en 14 estaciones hidrométricas de las cuales se emplearon 11 (Tabla 3-2) en el presente estudio, 10 dentro de la cuenca del río Grande tributaria al embalse del proyecto de Aprovechamiento Múltiple Riogrande II (Figura 4-1) y una por fuera de la zona de estudio.

Con dicha información se realizó el cálculo de la erosividad de la lluvia (R) siguiendo el procedimiento descrito por Wischmeier y Smith (1978) y por Renard et al. (1997):

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} (EI_{30})_k \quad (4.5)$$

Donde R es el factor de erosividad medio anual de la lluvia (MJ-mm/ha-h-año), n es el número de años del registro de datos, m_j es el número de eventos erosivos de un año dado j y EI₃₀ es el índice de erosión de la lluvia de un solo evento k. La erosividad del evento EI₃₀ (MJ-mm/ha-h) se define como:

$$EI_{30} = (\sum_{r=1}^t e_r v_r) I_{30} \quad (4.6)$$

Donde e_r es la energía unitaria de la lluvia (MJ/ha-mm) y v_r es la cantidad de precipitación (mm) acumulada durante cada intervalo de tiempo r del registro del aguacero representativo. I₃₀ es la intensidad máxima de la precipitación en 30 minutos para cada evento. La energía unitaria de la lluvia (e_r) se calcula para cada intervalo de tiempo de la siguiente manera:

$$e_r = 0.119 + 0.0873 \log_{10} i_r \quad (4.7)$$

Donde i_r es la intensidad de la lluvia (mm/h) durante cada intervalo de tiempo r del registro del aguacero representativo.

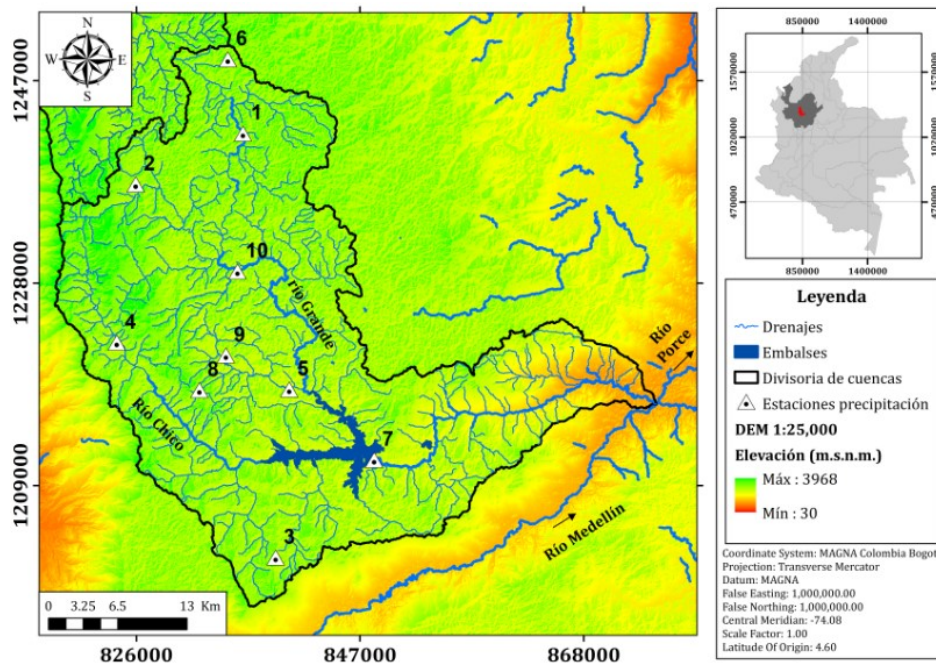


Figura 4-1: Localización de las estaciones hidrométricas con datos de precipitación cada 15 minutos utilizadas para estimar R.

Una vez estimada la erosividad (R) para cada una de las estaciones (Tabla 4-1) se obtuvo un valor promedio de 4176.49 MJ-mm/ha-h-año que es consistente con el orden de magnitud de los valores reportados en la literatura (Hoyos et al, 2005; Yin et al, 2015; Panagos et al, 2015 y Panagos et al, 2017).

Dado que la mayoría de las estaciones empleadas (excepto Santa Bárbara) se encuentran dentro de la cuenca del río Grande tributaria al embalse del proyecto de Aprovechamiento Múltiple Riogrande II (Figura 4-1), se generaron cuatro tipos de modelos (lineal, logarítmico, exponencial y potencial) para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación media multianual (Figura 4-2 a Figura 4-5) con el fin de poder conocer la erosividad en toda la zona de estudio (cuencas de los ríos Grande y San Andrés hasta su desembocadura).

De los modelos presentados se observa que el de tipo lineal tiene un mejor rendimiento o capacidad predictiva que los demás y cuenta con un coeficiente de determinación $R^2=0.7184$ (Figura 4-2). También es necesario indicar que cada modelo presenta un límite de aplicación inferior, es decir, el modelo lineal es aplicable para precipitaciones medias multianuales (PMA) mayores a 1013 mm/año, el logarítmico para PMA mayores a 1186 mm/año, el potencial para PMA mayores a 10 mm/año y el exponencial es aplicable en todo rango pero con una capacidad de predicción limitada.

Tabla 4-1: Relación de estaciones hidrométricas, valores de precipitación media y valores de erosividad observada.

#	Código	Estación	Municipio	Precipitación media (mm/año)	Erosividad-R (MJ-mm/ha-h-año)
0	1107009	Santa Bárbara	Urrao	2061.90	5399.23
1	2701055	Aragón	Santa Rosa de Osos	1887.53	4278.92
2	2701072	El Gómez	Belmira	2032.17	5159.12
3	2701073	Mediana	San Pedro de los Milagros	1751.27	3733.28
4	2701074	Belmira	Bello	1782.23	4303.41
5	2701075	Entrerriós	Entrerriós	1781.73	3317.62
6	2701094	San Bernardo	San José de la Montaña	1867.19	3853.75
7	2701095	Presa Riogrande II	Donmatías	1948.00	4200.19
8	2701101	Alto de La Sierra	Belmira	1757.34	3409.38
9	2701116	El Tururo	Entrerriós	1805.61	4396.30
10	2701706	RG-7 El Botón	Santa Rosa de Osos	1766.97	3890.20

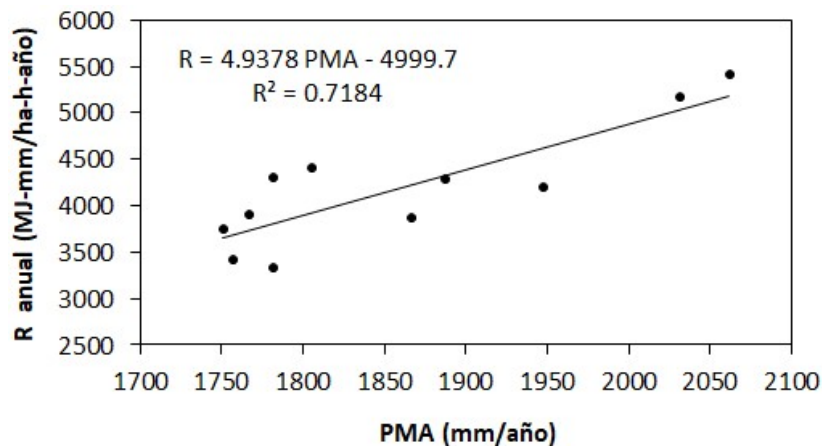


Figura 4-2: Modelo lineal para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora.

En la Figura 4-6 se observa la comparación entre los valores estimados por cada uno de los modelos desarrollados contra los valores observados, allí es posible observar que los modelos lineal y logarítmico presentan mejor capacidad predictiva que los modelos exponencial y potencial, los cuales además se han de ver muy afectados por valores extremos.

Finalmente, en la Figura 4-7 se muestran los mapas o campos del factor de erosividad de la lluvia (R) estimados con modelo potencial (a izquierda) de Pérez y Mesa (2002) y con el modelo lineal desarrollado en la presente tesis (a derecha).

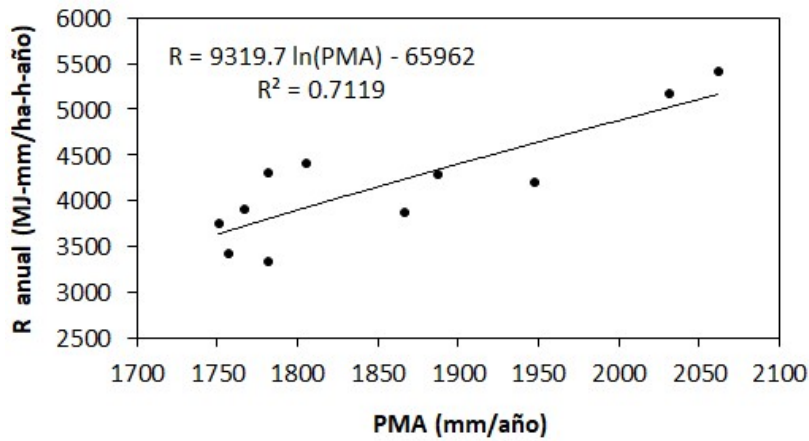


Figura 4-3: Modelo logarítmico para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora.

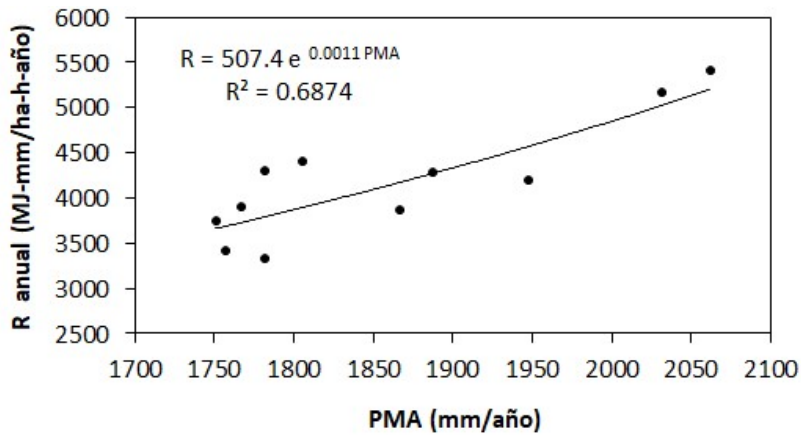


Figura 4-4: Modelo exponencial para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora.

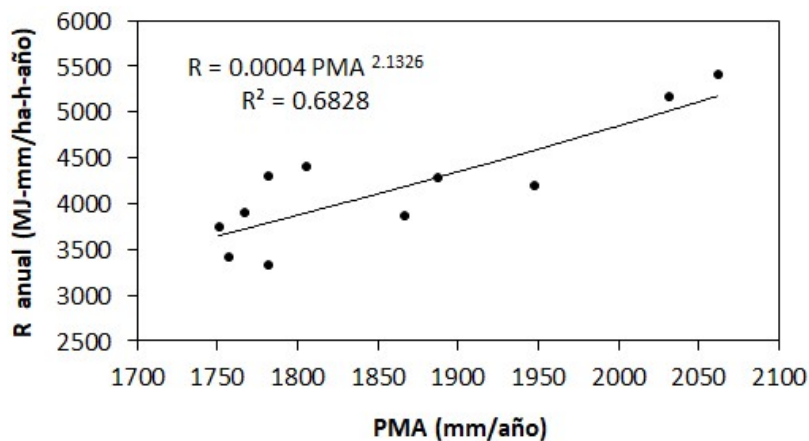


Figura 4-5: Modelo potencial para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora.

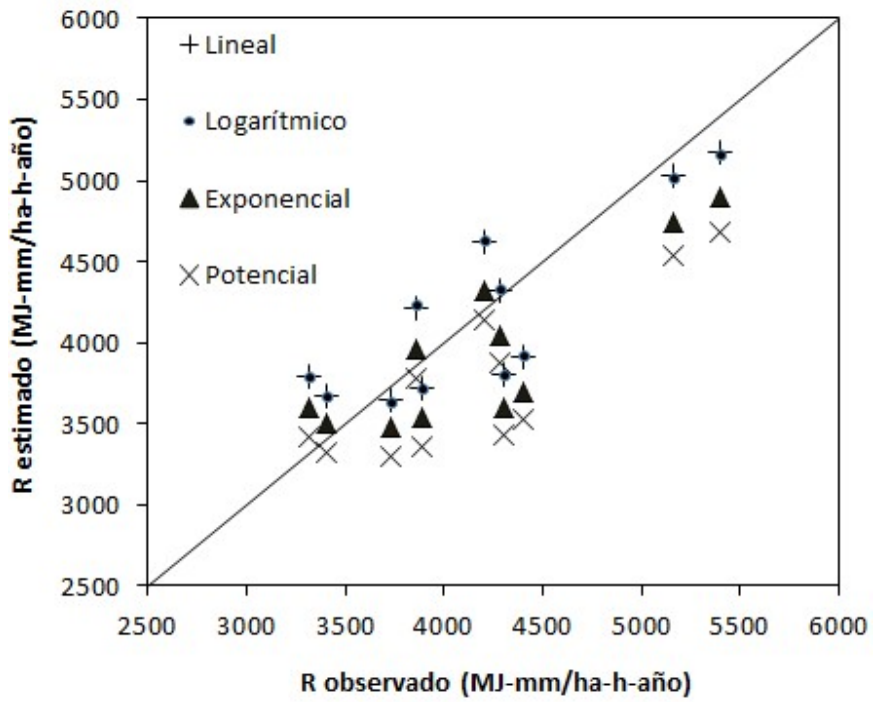


Figura 4-6: Comparación de valores de R observados contra los estimados mediante cada modelo propuesto.

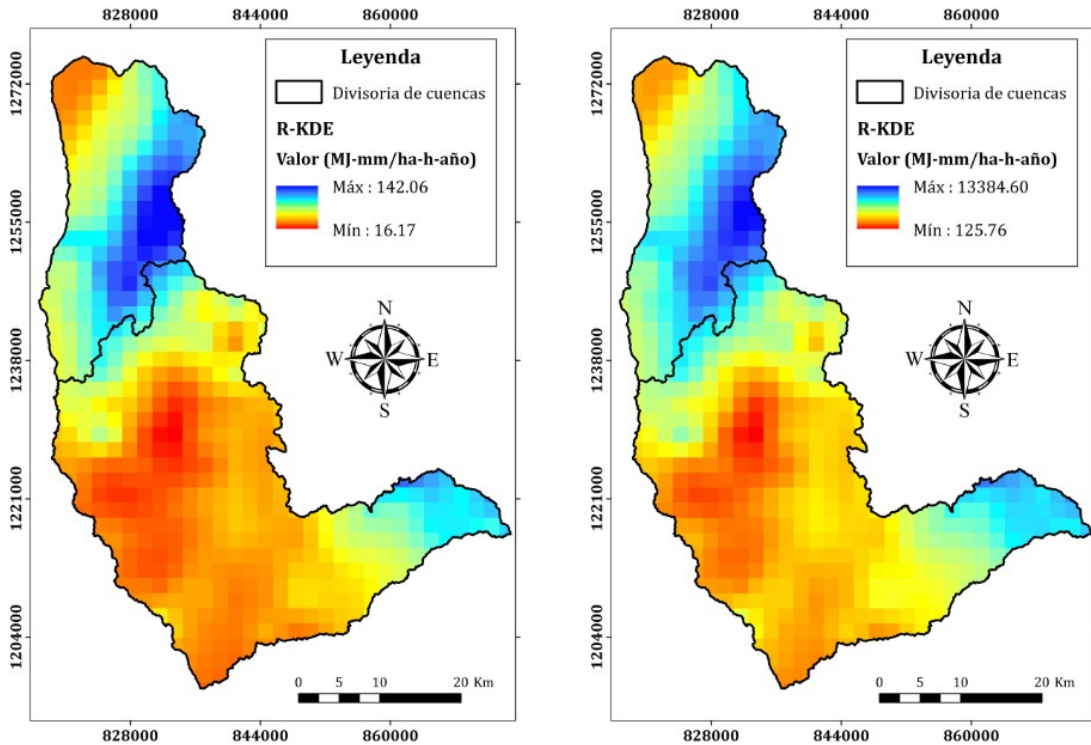


Figura 4-7: Mapas factor R estimados con modelo potencial (a izquierda) de Pérez y Mesa (2002) y con el modelo lineal desarrollado en la presente tesis (a derecha).

Por último, se realizó la interpolación mediante el método IDW de los valores de erosividad obtenidos en cada una de las estaciones dentro de la cuenca del río Grande tributaria al embalse del proyecto de Aprovechamiento Múltiple Riogrande II (Tabla 4-1) para estimar el campo o mapa de erosividad observada (Figura 4-8) y poder evaluar posteriormente la relación de entrega de sedimentos finos o carga de lavado (washload).

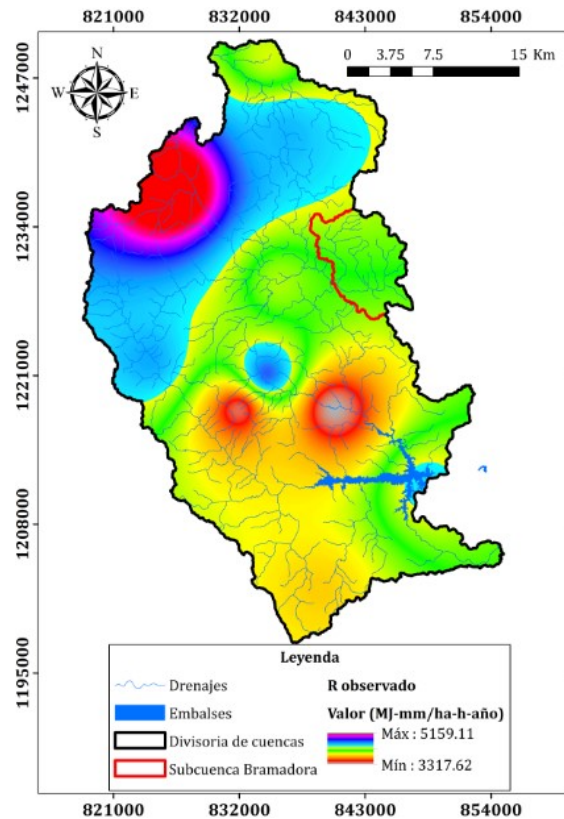


Figura 4-8: Mapa factor R observado para la cuenca tributaria al embalse.

4.1.2. Factor de erodabilidad del suelo (K)

El factor de erodabilidad del suelo (K) es la tasa de pérdida de suelo por unidad del índice de erosión de la lluvia ($E_{I_{30}}$) y representa las propiedades intrínsecas de cada tipo de suelo, de las cuales depende si estos son más o menos erodables en un escenario bajo las mismas condiciones climáticas, de coberturas vegetales y morfometría de las laderas (inclinación y longitud de la pendiente). Además, el factor K es un parámetro agrupado que representa un valor anual integrado de la reacción del perfil del suelo al proceso de desprendimiento y transporte del suelo por las gotas de lluvia y el flujo superficial (Renard et al., 1997).

Las primeras estimaciones de erodabilidad fueron realizadas por Olson et al. (1963) para varios suelos en Indiana y por Barnett et al. (1965) para suelos en Georgia y Carolina del Sur, posteriormente, Wischmeier y Mannering (1969) evalúan la relación entre las

propiedades del suelo y la erodabilidad para 55 diferentes tipos de suelos de Corn Belt al oeste de los Estados Unidos, los cuales presentaban un rango de variabilidad en materia orgánica entre 0.9 y 5.5 % con media de 2.2 % (Figura 4-9), concluyendo acerca de la importante interrelación entre la materia orgánica y la arcilla, entre otras relaciones importantes entorno a la erodabilidad del suelo.

Variable	Range in values		Mean value
	Least	Greatest	
Sand content (> .05 mm), percent*	5.0	64.0	22.3
Silt content (.05-.002 mm), percent*	24.3	81.0	58.0
Clay ratio†	8	71	25.2
Organic-matter content, percent‡	0.9	5.5	2.2
Aggregation index §	.1	1.1	0.4
Suspension percentage, initial¶	2.7	17.2	8.5
Suspension percentage, after 30 min rain	3.1	17.6	10.3
Soil moisture, 0-13 cm, % by weight	9.5	30.1	18.1
Bulk density, 0-5 cm (g/cc)	1.0	1.5	1.2
Bulk density, B horizon	1.0	1.7	1.4
Percent slope	3.2	14.5	8.3
Surface soil pH, coded	1	5	4.1
Soil structure, plow layer, coded	1	4	2.5
Thickness of granular material, inches	0	13	7.3
Runoff, initial 6.4-cm rain, cm	.4	4.5	2.7
Runoff, initial + wet run, 9.7-cm rain	1.6	6.6	4.7
Runoff, total, 12.7-cm rain	3.3	9.3	7.0
Soil loss, initial, metric tons/ha	.8	49.4	17.5
Soil loss, initial + wet	5.0	72.5	29.5
Soil loss, total	10.7	98.1	43.0

Figura 4-9: Rangos de variabilidad de las propiedades de los suelos empleados por Wischmeier y Mannering (1969).

Más adelante, Wischmeier et al. (1971) presentan un nomograma (Figura 4-10) para el cálculo de la erodabilidad del suelo en función del porcentaje de limo (Φ de 0.002 mm a 0.050 mm) más arena muy fina (Φ de 0.050 mm a 0.100 mm), el porcentaje de arena (Φ de 0.100 mm y 2.000 mm), el contenido de materia orgánica (hasta el 4.0 %), la estructura y permeabilidad del suelo.

Hacia el final de la década del setenta Wischmeier y Smith (1978) presentan el Manual de Agricultura No. 537 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, en el cual se reportan más valores cuantitativos y de referencia para el factor de erodabilidad (K) que fueron determinados experimentalmente en parcelas de escorrentía natural para algunos tipos de suelos pertenecientes a 49 sitios en el territorio norteamericano, adicional a esto, formularon una expresión numérica para el cálculo del factor K en función de la textura del suelo (porcentajes de arena, limo y arcilla en la capa superficial del suelo), el contenido de materia orgánica, la estructura del suelo y su permeabilidad. Expresión aplicable cuando el porcentaje de limo no excede el 70 %:

$$100 K = 2.1 M^{1.14} (10^{-4}) (12 - a) + 3.25 (b - 2) + 2.5 (c - 3) \quad (4.8)$$

Donde M = (% limo + % de arena muy fina)*(100 - % arcilla)

a = % de materia orgánica

b = código de estructura del suelo

c = clase de permeabilidad

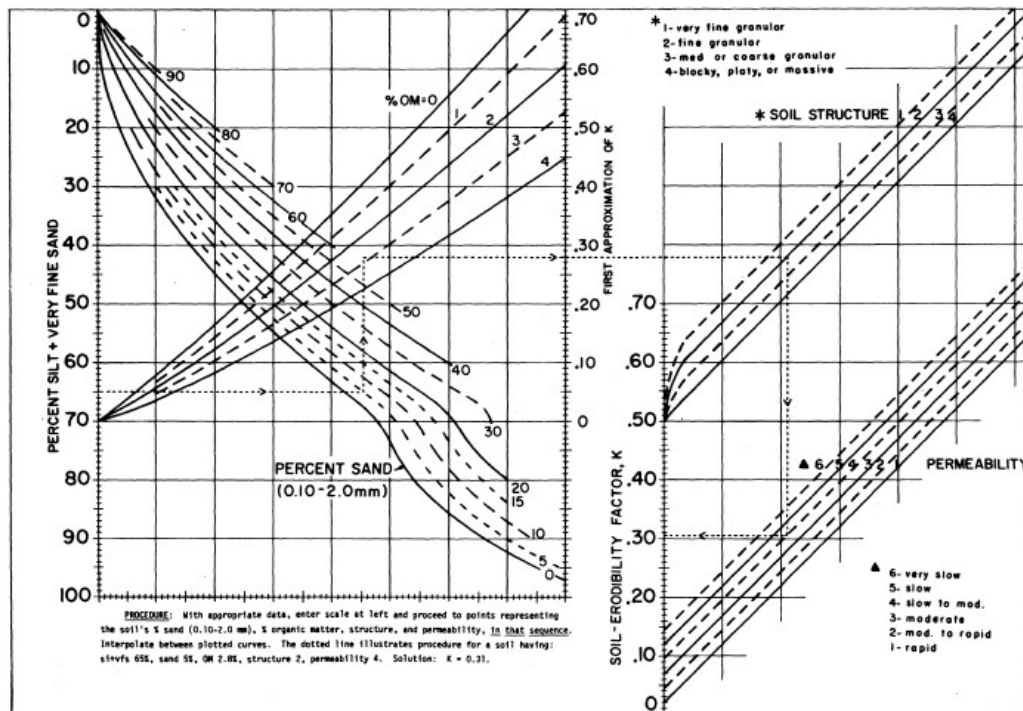


Figura 4-10: Nomograma de Wischmeier et al. (1971) para el cálculo del factor de erodabilidad.

Dicho código de estructura del suelo (b) recibe valores de uno (1) para la estructura muy fino granular, dos (2) para la estructura fina granular, tres (3) para la estructura media o gruesa granular y cuatro (4) para la estructura con bloques o masiva. Por su parte, la clase de permeabilidad recibe valores de seis (6) para permeabilidad muy lenta (conductividad hidráulica - CH menor que 1 mm/h), cinco (5) para permeabilidad lenta (CH entre 1 y 5 mm/h), cuatro (4) para permeabilidad moderada (CH entre 5 y 15 mm/h), tres (3) para permeabilidad moderadamente rápida (CH entre 15 y 50 mm/h), dos (2) para permeabilidad rápida (CH entre 50 y 150 mm/h) y uno (1) para permeabilidad muy rápida (CH mayor que 150 mm/h).

Posteriormente, Renard et al. (1997) presentan en el Manual de Agricultura No. 703 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América otras relaciones entre el factor K y diferentes propiedades del suelo, permitiendo así, una evaluación más sistemática y la expansión del rango de aplicación del modelo.

Finalmente el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, 2001) informa en el manual de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada Versión 2 (RUSLE2) que el nomograma de erodabilidad del suelo (Wischmeier et al., 1971) no debe aplicarse a suelos de origen volcánico (como los de Hawaii), **suelos orgánicos como la turba**, subsuelos (horizonte C o material parental), **oxisoles**, suelos arcillosos de baja actividad, suelos calcáreos y suelos con alto contenido de mica.

Por tanto, para la estimación del factor de erodabilidad del suelo (K) se evaluó la disponibilidad de datos de propiedades del suelo tanto físicas (granulometría o textura) como químicas (porcentaje de carbono y materia orgánica) en toda la extensión del área de estudio (cuencas de los ríos Grande y San Andrés hasta sus respectivas desembocaduras). La información base empleada fue el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia a escala 1:100.000 (IGAC, 2007), del cual se extrajo información valiosa tanto del documento como de los anexos, los cuales incluyen el mapa y las tablas de propiedades de los perfiles de suelos que componen cada unidad cartográfica de suelo.

Inicialmente se realizó el cálculo del factor K utilizando la ecuación presentada por Wischmeier y Smith (1978) encontrando que para las unidades cartográficas de suelo representadas por perfiles modales con porcentajes de materia orgánica (% M.O.) mayores al doce por ciento (12.0 %) la expresión numérica arroja valores negativos, una de esas unidades con mayores contenidos de materia orgánica es la Asociación Llano Largo con un porcentaje de 71.5 %. Dicho resultado ratifica la sugerencia del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, 2001) y restringe el uso de la expresión numérica presentada por Wischmeier y Smith (1978) para algunas zonas de montaña tropicales donde los suelos presentan altos contenidos de materia orgánica como se da en los páramos.

Arias et al. (2000) reportan que para el caso de El Vergel (sector dentro de la cuenca del río Grande), se obtuvieron valores muy altos de materia orgánica teniendo en cuenta que las texturas de los suelos son gruesas y predominantemente franco-arenosas con contenidos de arena superiores al 60% y en algunos casos incluso mayores al 80%. Además, Arias et al. (2000) también indican que lo determinado en los ensayos de laboratorio como arenas pueden ser *“grumos o unidades de materiales cementados muy seguramente por la materia orgánica o por los complejos Fehumus principalmente, aunque no se descarta la posibilidad de que participen los óxidos de Fe; estos grumos fueron observados al microscopio y son muy abundantes en aquellos horizontes que contienen cenizas volcánicas y humus”*.

Morgan (2005) también reporta que los compuestos orgánicos presentan una acción cementante sobre los agregados de los suelos, este efecto puede estar relacionado con sus cantidades totales, con la composición de los mismos o con los productos resultantes de la humificación. Algunos autores como Montenegro (1991) sugieren que los resultantes del proceso de la humificación de suelos constituyen los principales agentes cementantes y de conservación de la estructura de los suelos tropicales.

La situación descrita anteriormente también se presenta en latitudes extratropicales, por ejemplo, Douglas y Goss (1982) analizan y evalúan el comportamiento de la estabilidad y el contenido de materia orgánica de los agregados de cinco suelos superficiales del sur de Inglaterra bajo diferentes métodos de cultivo y cobertura de pastos, encontrando que a medida que aumenta el contenido de materia orgánica (hasta el 12%) el índice de estabilidad T_{45} (después de agitar durante 45 minutos) de los agregados del suelo

también aumenta significativamente como se aprecia en la Figura 4-11, sin embargo, para suelos con valores más altos de materia orgánica como los que se presentan en muchas zonas del trópico el comportamiento de la estabilidad de los agregados no es aún muy clara ni tampoco extensamente reportada en la literatura.

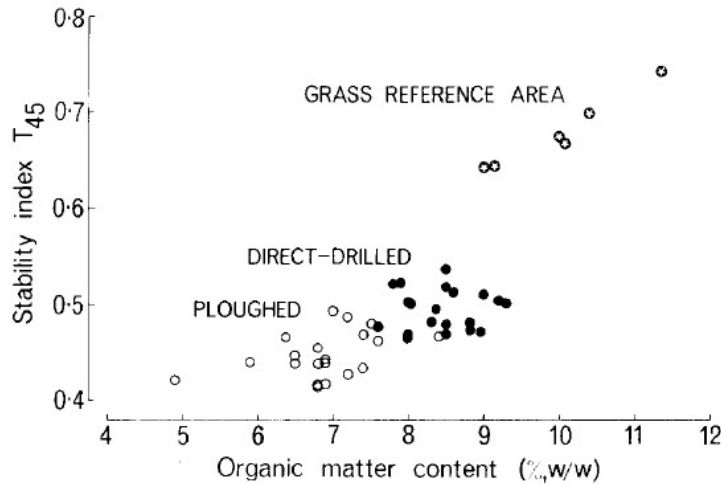


Figura 4-11: Índice de estabilidad T_{45} vs. contenido de materia orgánica.
(tomada de Douglas y Goss, 1982)

Dadas las condiciones descritas anteriormente se decidió emplear la metodología para el cálculo del factor de erodabilidad del suelo (K) propuesta por Sharply y Williams (1990) para el modelo EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator) que tiene la capacidad de predecir el impacto de la erosión en la productividad del suelo, además, dicho modelo permite simular diferentes procesos como erosión laminar, el crecimiento de las plantas y sus interrelaciones, al igual que algunas evaluaciones económicas entorno al costo que representa la erosión de los suelos. Su implementación requiere de un volumen de información base importante.

El factor de erodabilidad (K) para la capa superior del suelo según la propuesta de Sharply y Williams (1990) está dado por la ecuación 4.9:

$$K_{USLE} = f_{sand} * f_{clsi} * f_{orgc} * f_{hisa} \quad (4.10)$$

Donde f_{sand} es un factor que reduce la erodabilidad de suelos con alto contenido de arenas gruesas, f_{clsi} es un factor que reduce la erodabilidad de suelos con alta relación arcilla-limos, f_{orgc} es un factor que reduce la erodabilidad de suelos con alto contenido de carbono orgánico y f_{hisa} es un factor que reduce la erodabilidad de suelos con contenidos muy altos de arena. Dichos factores pueden ser estimados con las siguientes expresiones:

$$f_{sand} = \left[0.2 + 0.3 \exp \left(-0.0256 SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \right) \right] \quad (4.11)$$

$$f_{clsi} = \left(\frac{SIL}{CLA+SIL} \right)^{0.3} \quad (4.12)$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.25 C}{C + \exp(3.72 - 2.95 C)} \right) \quad (4.13)$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 SN1}{SN1 + e^{(-5.51 + 22.9 SN1)}} \right) \quad (4.14)$$

Donde SAN, SIL, CLA y C son los contenidos en porcentaje (%) de arena (Φ de 0.050 mm a 2.000 mm), limo (Φ de 0.002 mm a 0.050 mm), arcilla ($\Phi < 0.002$ mm) y carbono orgánico presentes en el suelo, además, $SN1 = 1 - SAN/100$. La ecuación 4.15 permite al factor K variar entre 0.1 y 0.5 en unidades inglesas (Ton-acre-h / 100 acre-ft-ton-in).

Una vez calculado el factor de erodabilidad del suelo (K) en función de sus propiedades incluidas en la metodología de Sharply y Williams (1990) para cada unidad cartográfica de suelo existente en la zona y documentada en el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia a escala 1:100.000 (IGAC, 2007) se procedió a asignar estos a cada polígono obteniéndose la Figura 4-12, de la cual es importante resaltar que se encuentra presentada en unidades del sistema internacional – USI (Ton-h / MJ-mm) resultante de dividir la estimación de K en unidades inglesas - UI por 7.59 como sugiere Renard et al. (1997).

También es importante indicar que a las asociaciones Guadua y Rionegro que presentaban suelos completamente orgánicos según el perfil modal correspondiente se les asigno un valor de K de 0.5 (UI) o 0.066 (USI) para representar su vulnerabilidad a la erosión. Por otro lado, a los polígonos de cuerpos de agua, zona urbana y misceláneo rocoso (al noreste de la cuenca del río San Andrés) se les asigno un valor de K de 0.

Además, se observa que el rango de valores presentado en la Figura 4-12 (0.000 a 0.066) es consistente con los valores reportados por Wang et al. (2013) en la publicación donde compara los valores observados y estimados de erodabilidad del suelo en China (concentrados en el rango de 0.015 a 0.035) con base en un gran conjunto de datos de erosión y suelos existente en ese territorio.

4.1.3. Factor topográfico (LS)

El factor topográfico (LS) combina los efectos de los factores de longitud (L) e inclinación (S) de las laderas sobre el proceso erosivo, en otras palabras, el efecto de la morfología que conforma las cuencas hidrográficas. En general, al incrementarse la longitud de las laderas, tanto la erosión total como la erosión por unidad de área aumenta debido a la acumulación progresiva de escorrentía en la dirección de mayor gradiente, análogamente, los incrementos en inclinación de las laderas se traducen en aumentos de velocidad y erosividad de la escorrentía (Kim, 2006).

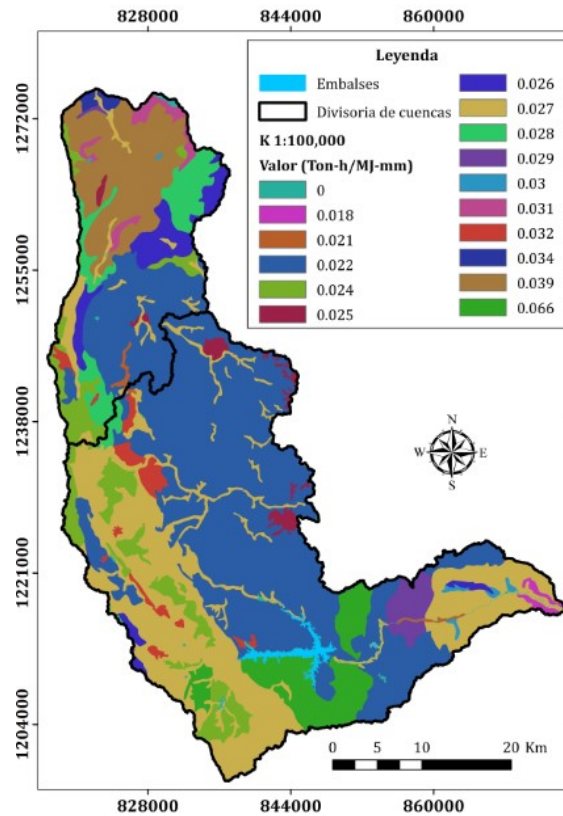


Figura 4-12: Mapa factor K.

A continuación se describe la parametrización empleada por el modelo RUSLE (Renard et al., 1997) para el cálculo de los factores L y S, donde los datos de las parcelas de escorrentía usados para la estimación del factor de longitud de la ladera (L) han mostrado que la erosión promedio varía con este de la siguiente forma:

$$L = \left(\frac{\lambda}{72.6}\right)^m \quad (4.16)$$

Donde, 72.6 es la longitud de la parcela de escorrentía unitaria en pies usada para el desarrollo del modelo RUSLE, m es un exponente variable y estrechamente ligado con la relación β de erosión en surcos a entresurcos (principalmente causado por el impacto de las gotas de lluvia).

Para la estimación del factor de inclinación de la ladera (S), el modelo RUSLE presenta un gran avance con respecto al modelo USLE, dado que permite la estimación de dicho factor tanto para pendientes menores al nueve por ciento (9 %) como para pendientes mayores o iguales a dicho valor, haciendo este modelo aplicable a las cuencas de estudio (Riogrande y San Andrés), donde las pendientes en algunos casos superan el noventa por ciento (> 90 %). A continuación se presenta la parametrización empleada por el modelo para la estimación del factor de inclinación de la ladera (S):

$$S = 10.8 \operatorname{sen} \theta + 0.03 \quad S < 9 \% \quad (4.17)$$

$$S = 16.8 \operatorname{sen} \theta - 0.50 \quad S \geq 9 \% \quad (4.18)$$

Debido a la extensión del área de estudio en la cual las cuencas del río Grande y el río San Andrés ocupan áreas respectivamente de 1279.86 km² y 498.21 km², se obtuvieron los campos de los factores L, S y LS del modelo RUSLE para las escalas 1:100,000 y 1:25,000 (Figura 4-13) empleado los modelos de elevación digital descritos en el numeral 3.4 del presente documento en formato ASCII y el programa en C++ desarrollado por Van Remortel et al. (2004) el cual después de ser compilado para ser ejecutado sobre el sistema operativo Windows es mucho más eficiente para el procesamiento de datos espaciales que su predecesor, el programa en AML (Arc Macro Language) desarrollado por Van Remortel et al. (2001) y algunos de los algoritmos incluidos en el paquete Whitebox GAT desarrollado por el Dr. John Lindsay del departamento de Geografía de la universidad de Guelph (Guelph, ON, Canada).

Es necesario indicar que con el fin de extender los análisis a una tercera escala más detallada (1:10,000), se realizaron todas las gestiones necesarias para tener acceso al modelo de elevación digital (DEM) con resolución espacial de 1 x 1 m o escala cartográfica 1:10.000 producto del convenio No. 4085 de 2009 - Cartografía Digital del Departamento de Antioquia, el cual tuvo como objeto, “aunar esfuerzos para generar una base cartográfica digital (a escalas 1:2.000, 1:5.000 y 1:10.000) del Departamento de Antioquia”. El acceso a esta información fue posible gracias a la licencia otorgada por el Departamento Administrativo de Planeación de la Gobernación de Antioquia.

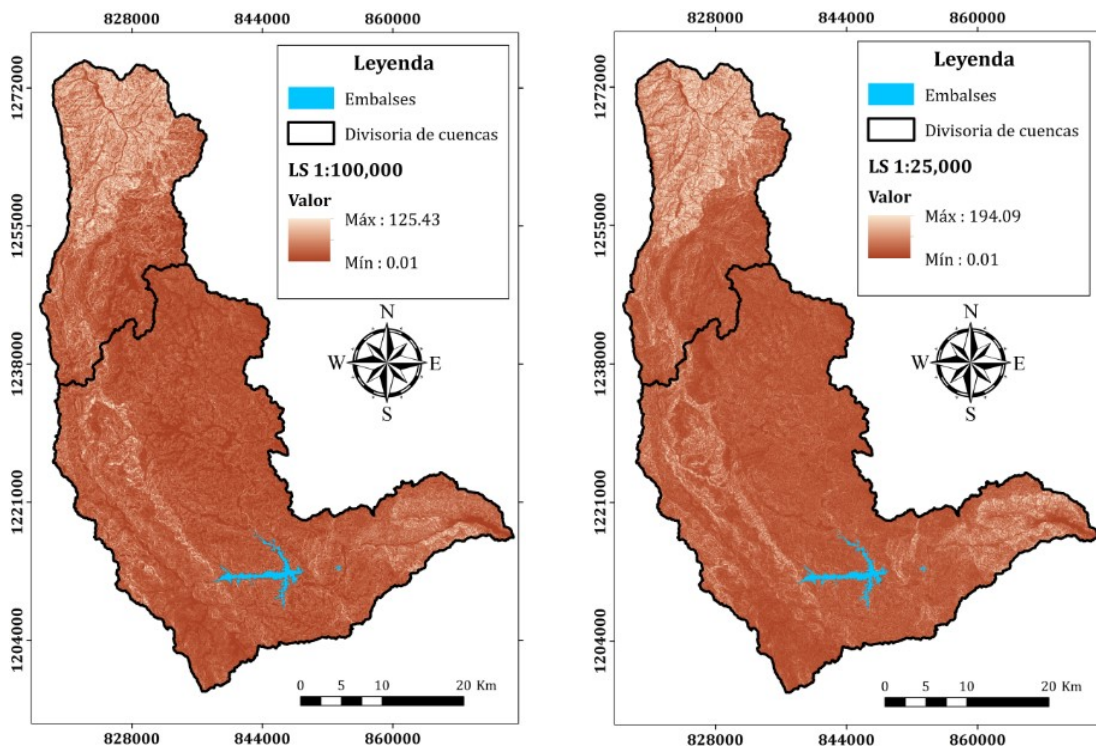


Figura 4-13. Factor LS para las cuencas de los ríos Grande y San Andrés a escala 1:100,000 (a izquierda) y 1:25,000 (a derecha).

Una vez obtenida la información se procedió con su procesamiento, durante el cual se identificaron zonas con datos nulos, las cuales no fue posible reemplazar con la información de los modelos de elevación digital (DEMs) en las otras resoluciones espaciales debido a diferencias en elevación, lo que implicaba la generación de falsas discontinuidades en la superficie estimada e incluso de sesgo en los posteriores resultados, en especial, en la superficie de direcciones de flujo y en las de longitud e inclinación de las laderas.

Además, debido a las características (resolución radiométrica de 32 bits) y volumen de información del modelo de elevación digital a escala 1:10.000, el cual proporciona las elevaciones hasta el detalle de decimas de metro, no fue posible procesarlo para el área entera de estudio con el programa en C++ desarrollado por Van Remortel et al. (2004), por tanto, se seleccionó la subcuenca correspondiente a la quebrada Bramadora, la cual no presentaba datos nulos y por su pequeña extensión permitió ser procesada con los recursos computacionales disponibles, obteniéndose los resultados que se muestran en la Figura 4-14 (a: 1:100,000; b: 1:25,000; c: 10,000).

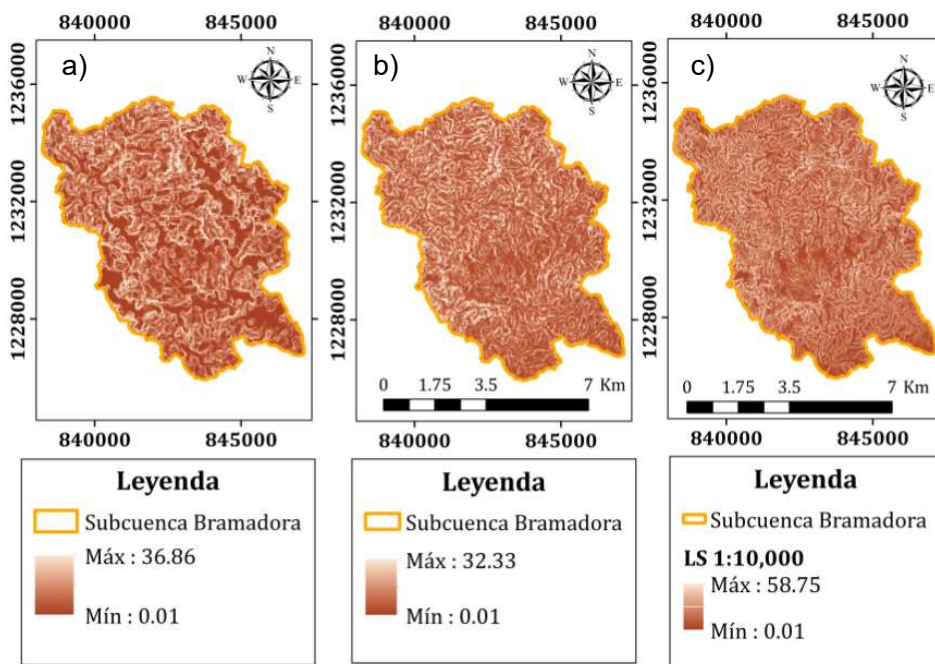


Figura 4-14: Factor LS en las diferentes escalas para la Subcuenca Bramadora.

Por último, en búsqueda de completar la evaluación del proceso erosivo a la escala 1:10,000 para las cuencas enteras se contactó al profesor Kenneth McGwire perteneciente a la División de Ciencias de la Tierra y del Ecosistema del Instituto de Investigación del Desierto de Nevada (USA), experto en la aplicación de los sistemas de información geográficos (GIS) y sensores remotos a un amplio rango de casos de estudio en ecología, para iniciar una investigación cooperativa con el fin de procesar el modelo de elevación digital a escala 1:10,000 de la zona de estudio, proceso que aún está activo debido al gran coste computacional requerido. Finalmente es necesario indicar que no se

consideró la inclusión de factores de corrección por no uniformidad de la ladera y cambios en el tipo de suelo y vegetación debido a que las escalas espaciales trabajadas reducen de forma importante estos efectos en la evaluación pixel a pixel, por ejemplo, para la escala 1:100,000 (resolución de pixel de 30.0 m) con seguridad podrán presentarse no uniformidades de la ladera y cambios en la vegetación sin embargo no es la tendencia general gracias a las amplias zonas homogéneas que se presentan dentro del Altiplano de Santa Rosa como la superficie de erosión SI descrita por Page y James (1981).

Además, para las restantes dos resoluciones 1:25,000 (resolución de pixel de 12.5 m) y 10,000 (resolución de pixel de 1.0 m), la longitud original de ladera (72.6 pies o 22.1 m) considerada para el desarrollo, calibración y validación del modelo es mayor que la dimensión del pixel en la dirección de mayor gradiente de la ladera, por tanto, no se requerirán factores de corrección en estas escalas espaciales de trabajo. Por último podría indicarse que en conclusión, la escala de trabajo recomendada para los análisis es 1:25,000 o resolución de pixel de 12.5 m debido a la disponibilidad de información de uso libre para toda la extensión de la nación y el relativo buen rendimiento del programa en C++ desarrollado por Van Remortel et al. (2004) para el cálculo de los campos de los factores L, S y LS del modelo RUSLE en esta escala. No se considera mejor la escala 1:10,000 debido a las dificultades ilustradas anteriormente.

4.1.4. Factor de cobertura y gestión (C)

El factor de cobertura y gestión (C) cuantifica el efecto de las interrelaciones entre las coberturas del suelo y las prácticas de gestión sobre la pérdida de suelo media anual. Dicho factor ha sido estimado por Wischmeier y Smith (1978) como la relación entre la pérdida de suelo en una parcela cultivada bajo condiciones específicas y la pérdida de suelo en una parcela similar cultivada en barbecho y con labranza continua.

Este factor presenta un rango de variación entre cero (0) y uno (1), representando los valores cercanos a cero suelos menos vulnerables a la erosión y los valores cercanos a uno suelos más propensos al proceso. El mapa del factor de cobertura y gestión (C) para la zona de estudio se construyó asignando a cada cobertura presentada el nivel tres de la leyenda CORINE Land Cover del Mapa de Coberturas de la Tierra línea base (2000-2002) cuenca Magdalena – Cauca un valor de C representativo, los cuales se extrajeron de los sugeridos por Wischmeier y Smith (1978) en las tablas 8 a 12 de su publicación (Figura 4-15), Renard et al. (1997), Morgan (2005), CIAT (2012), entre otros. Además, con base en las coberturas para el periodo 2010-2012 producto de la Actualización y Ajuste al Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca de los Ríos Grande y Chico se estimó también el campo del factor C, que para este caso presenta mayor variabilidad debido al detalle de la escala 1:10,000 que permite exponer coberturas hasta el nivel cuatro (resaltadas en Tabla 4-2) de la leyenda CORINE Land Cover. A continuación en la Tabla 4-2 se presenta el tipo de cobertura y su factor C asociado y en la Figura 4-16 los campos del factor C estimados para cada periodo.

TABLE 9.—Mulch factors and length limits for construction slopes¹

Type of mulch	Mulch Rate	Land Slope	Factor C	Length limit ²
	Tons per acre	Percent		
None	0	all	1.0	—
Straw or hay,	1.0	1-5	0.20	200
tied down by	1.0	6-10	.20	100
anchoring and				
tacking	1.5	1-5	.12	300
equipment ³	1.5	6-10	.12	150
Do.	2.0	1-5	.06	400

TABLE 11.—Factor C for undisturbed forest land¹

Percent of area covered by canopy of trees and undergrowth	Percent of area covered by duff at least 2 in deep	Factor C ²
100-75	100-90	.0001-.001
70-45	85-75	.002-.004
40-20	70-40	.003-.009

¹ Where effective litter cover is less than 40 percent or canopy cover is less than 20 percent, use table 6. Also use table 6 where woodlands are being grazed, harvested, or burned.

² The ranges in listed C values are caused by the ranges in the specified forest litter and canopy covers and by variations in effective canopy heights.

TABLE 10.—Factor C for permanent pasture, range, and idle land¹

Vegetative canopy Type and height ²	Percent cover ²	Type ¹	Cover that contacts the soil surface					
			Percent ground cover					
			0	20	40	60	80	95+
No appreciable canopy		G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		W	.45	.24	.15	.091	.043	.011
Tall weeds or short brush with average drop fall height of 20 in	25	G	.36	.17	.09	.038	.013	.003
		W	.36	.20	.13	.083	.041	.011
drop fall height of 20 in	50	G	.26	.13	.07	.035	.012	.003
		W	.26	.16	.11	.076	.039	.011

TABLE 12.—Factor C for mechanically prepared woodland sites

Site preparation	Mulch cover ¹	Soil condition ² and weed cover ³							
		Excellent		Good		Fair		Poor	
		NC	WC	NC	WC	NC	WC	NC	WC
Percent									
Disked, raked, or bedded ⁴	None	0.52	0.20	0.72	0.27	0.85	0.32	0.94	0.36
	10	.33	.15	.46	.20	.54	.24	.60	.26
	20	.24	.12	.34	.17	.40	.20	.44	.22
	40	.17	.11	.23	.14	.27	.17	.30	.19
	60	.11	.08	.15	.11	.18	.14	.20	.15
	80	.05	.04	.07	.06	.09	.08	.10	.09

Figura 4-15: Recortes de valores de C sugeridos por Wischmeier y Smith (1978).

Tabla 4-2: Coberturas CORINE Land Cover nivel tres (3) y cuatro (4), factores de cobertura y gestión (C) y de prácticas de manejo (P) anuales.

Código	Leyenda	Factor C	Factor P
1.1.1	Tejido urbano continuo	0.001	0.001
1.1.2	Tejido urbano discontinuo	0.001	0.001
1.2.1	Zonas industriales o comerciales	0.001	0.001
1.2.2	Red vial, ferroviaria y terceros asociados	0.003	1.000
1.2.5	Obras hidráulicas	0.001	0.001
1.3.1	Zonas de extracción minera	0.700	1.000
2.1.1	Otros cultivos transitorios	0.400	0.700
2.1.5.1	Papa	0.600	0.700
2.2.1	Cultivos permanentes herbáceos	0.300	0.500
2.2.2	Cultivos permanentes arbustivos	0.100	0.500
2.2.2.2	Café	0.100	0.500
2.2.2.6	Tomate de árbol	0.100	0.500
2.2.2.7	Aguacate	0.100	0.500
2.2.3.	Cultivos permanentes arbóreos	0.050	0.500
2.3.1	Pastos limpios y manejados	0.020	0.200
2.3.2	Pastos arbolados	0.020	0.100
2.3.3	Pastos enmalezados	0.020	0.200
2.4.2	Mosaico de pastos y cultivos	0.150	0.300
2.4.3	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0.020	0.200
2.4.4	Mosaico de pastos con espacios naturales	0.010	0.150
3.1.1	Bosque denso	0.001	0.010

Código	Leyenda	Factor C	Factor P
3.1.2	Bosque abierto y rastrojos	0.005	0.100
3.1.3	Bosque fragmentado	0.010	0.100
3.1.4	Bosque de galería y ripario	0.005	0.150
3.1.5	Plantación forestal	0.015	0.002
3.2.1	Herbazal y vegetación de páramo	0.001	0.250
3.2.2	Arbustal	0.002	0.250
3.2.3	Vegetación secundaria o en transición	0.005	0.250
3.3.3	Tierras desnudas y degradadas	0.700	1.000
5.1.1	Ríos (50 m)	0.000	0.000
5.1.2	Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0.000	0.000
5.1.4	Cuerpos de agua artificiales	0.000	0.000

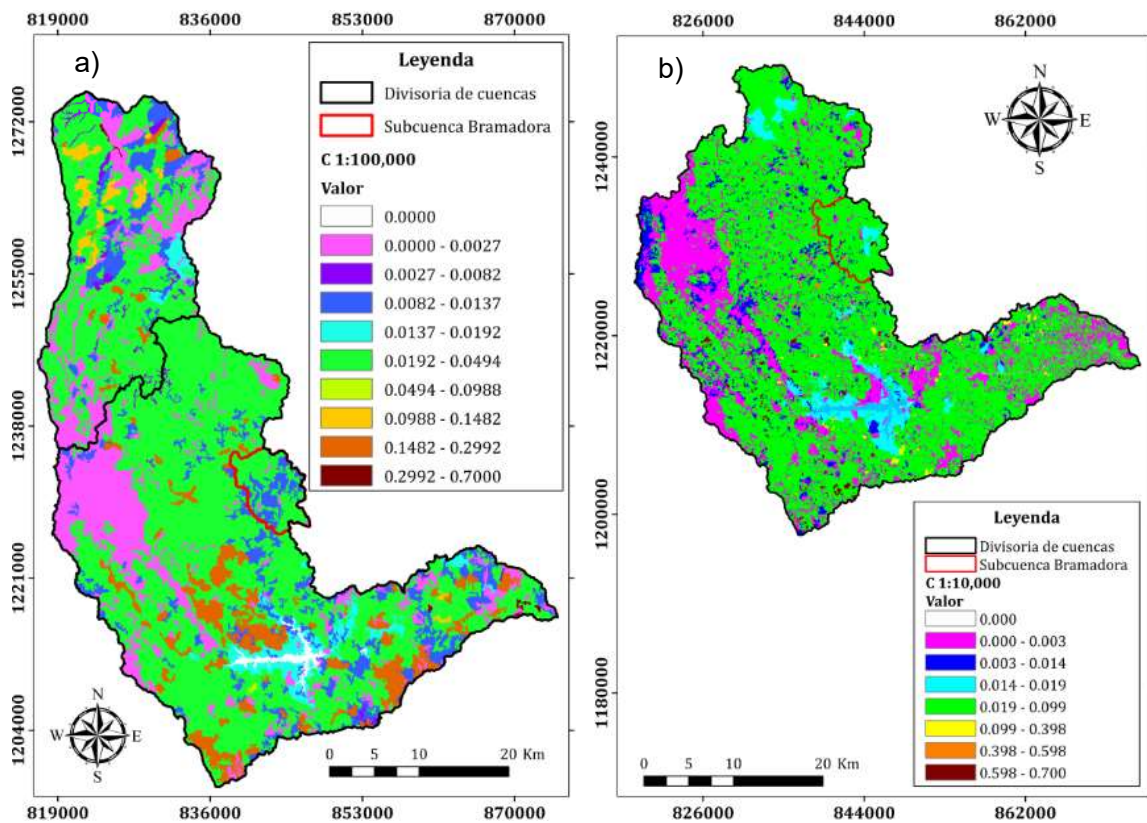


Figura 4-16. Mapas factor C, a izquierda a escala 1:100,000 para las cuencas de los ríos Grande y San Andrés y a derecha a escala 1:10,000 para Riogrande.

4.1.5. Factor de prácticas de manejo (P)

El factor de prácticas de manejo (P) en el modelo RUSLE se define como la relación entre la pérdida de suelo con una práctica de manejo o soporte específica y la pérdida de suelo asociada a laderas con labranza y siembra de tipo descendente o en la dirección

del mayor gradiente (Renard et al., 1997). Las tres prácticas de manejo de cultivo más importantes son la labranza en contornos (contouring), el cultivo en franjas siguiendo contornos (stripcropping) y los sistemas de terrazas (terracing), complementadas cada una de estas con la estabilización de los canales de evacuación de escorrentía superficial (Wischmeier y Smith, 1978), además, en Colombia se usa habitualmente para los cultivos permanentes arbustivos la siembra al tresbolillo.

La implementación de buenas prácticas manejo disminuye la erosión ya que modifica el patrón de flujo, la dirección de la escorrentía superficial y reduce la cantidad y tasa de escorrentía. En tierras secas o en áreas de pastizales las prácticas orientadas a perturbar o escarificar el suelo en cercanía al contorno que resultan en el almacenamiento de humedad y la reducción de la escorrentía superficial también se utilizan como buenas prácticas de manejo (Renard et al., 1997).

Wischmeier y Smith (1978) también indican que el factor P es usado para la planificación de la conservación del suelo en zonas de cultivo y rara vez tenido en cuenta durante la construcción en áreas de expansión y desarrollo, por tanto, P generalmente será igual a 1.0 para estas zonas. Para los otros tipos de coberturas presentes en las cuencas de estudio los factores de prácticas de manejo (Tabla 4-2) se extrajeron de los valores sugeridos por Wischmeier y Smith (1978) en las tablas 13 a 15 de su publicación, Renard et al. (1997), Morgan (2005), CIAT (2012), entre otros. En la Figura 4-17 se presentan los campos del factor P estimados para las coberturas presentes en cada periodo y escala.

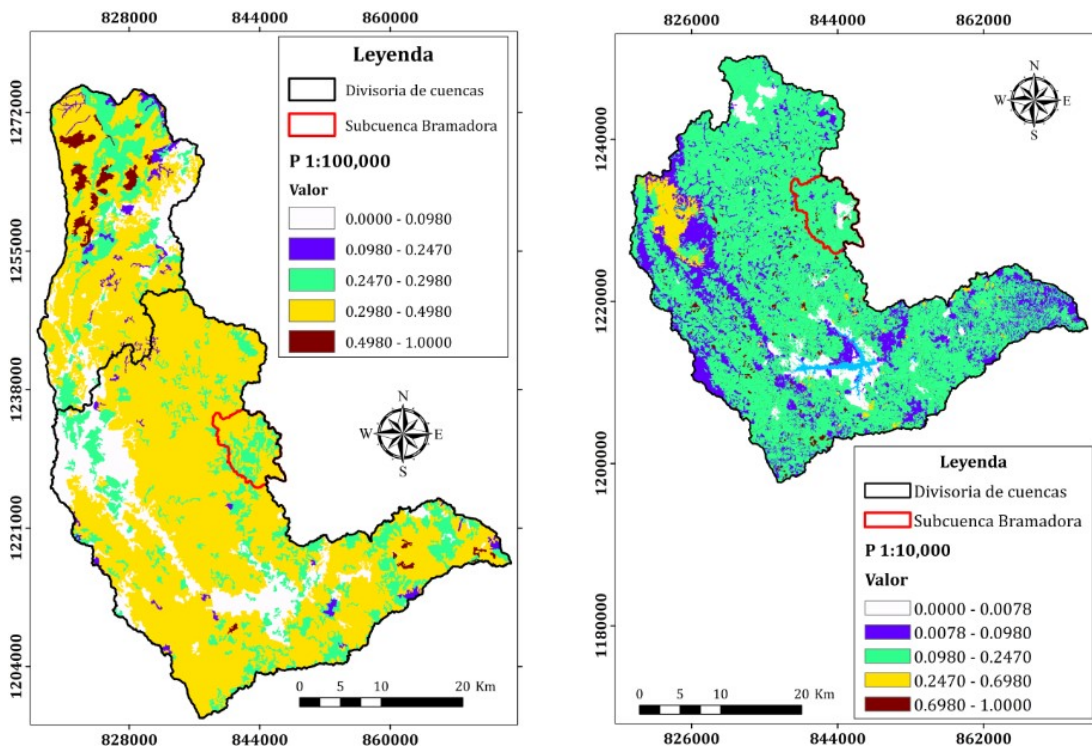


Figura 4-17: Mapas factor P, a izquierda a escala 1:100,000 para las cuencas de los ríos Grande y San Andrés y a derecha a escala 1:10,000 para Riogrande.

Por último, es necesario indicar que debido a la variación intraanual que presentan los factores C y P producto de la rotación de los cultivos y los ciclos de vida de las plantas (Wischmeier y Smith, 1978; Renard et al., 1997; Morgan, 2005; entre otros), las tasas de erosión que se estimaran posteriormente se consideran promedios anuales potenciales.

4.1.6. Relaciones de entrega de sedimento (SDR)

Se estimaron tanto de manera agregada para toda la cuenca según la expresión propuesta por Boyce (1975) en función del área de cuenca hasta el sitio de presa del proyecto Riogrande II (1036.73 km²) como de manera distribuida pixel a pixel mediante el Modelo Distribuido de Entrega de Sedimentos propuesto por Jain y Kothyari (2000), el cual relaciona variables geomorfológicas e hidráulicas de las laderas como las pendientes, rutas de flujo, el tiempo de viaje del flujo superficial y una velocidad de transito similar a la estimada con la metodología de Manning para canales abiertos, para calcular la probabilidad de que partículas erodadas en alguna ubicación aguas arriba alcancen el canal más cercano. Dicha metodología ha sido aplicada exitosamente a una subcuenca del río Paraná de más de 15,000 km² en el territorio Brasileño por Batista et al. (2017).

La aproximación agregada en función del área de cuenca (Boyce 1975) arrojo un resultado que sugiere que solo el 5.1 % del sedimento erodado en la cuenca podría ser considerado como el suministro, por otro lado, la aproximación distribuida pixel a pixel (Figura 4-18) sugiere que en la vecindad de la red de drenaje la relación de entrega es cerca al 100 % y decrece de manera abrupta hacia las laderas alcanzando valores cercanos al 0.0 %.

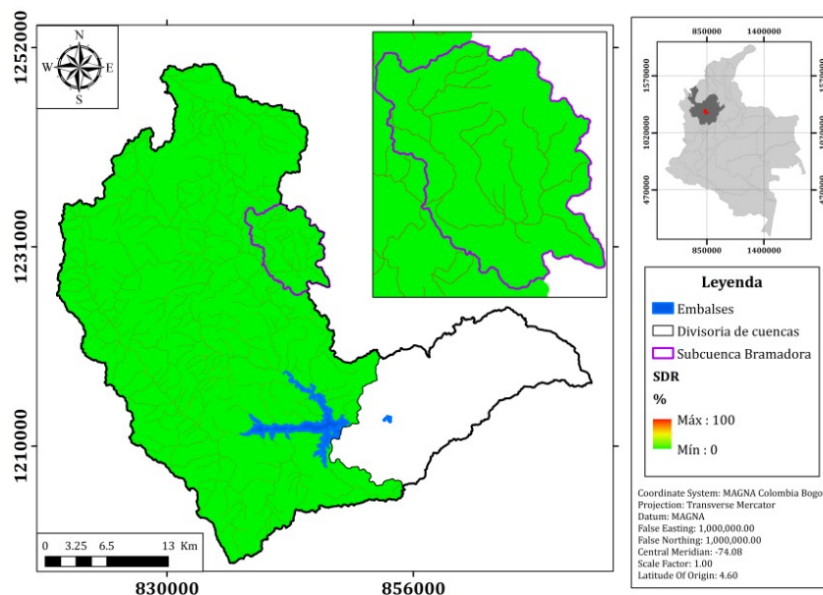


Figura 4-18: Relaciones de entrega de sedimento obtenidas con el modelo propuesto por Jain y Kothyari (2000).

Una vez calculado el valor medio sobre el área de la cuenca hasta el sitio de presa del proyecto Riogrande II se obtuvo que la relación de entrega es del aproximadamente el 1.5 %, valor que será usado para el cálculo del suministro de sedimento fino o carga de lavado (washload).

4.1.7. Resultados del modelo RUSLE

Una vez realizada la estimación de parámetros del modelo empírico RUSLE (Renard et al., 1997) se procedió con el cálculo de las tasas de erosión bruta, en primera instancia para la cuenca del río Grande hasta el sitio de presa del proyecto Riogrande II utilizando el campo del factor R observado (Figura 4-8).

De lo cual se obtuvo una producción potencial de sedimentos o erosión bruta media anual (A) de 942.88 Ton/ha-año (Figura 4-19 izquierda) que es consistente con el reporte de erosión de Jansen Luis, Pierre Y. Julien, Lariyah M. Sidek y Soo Huey Teh presentado en Eslamian (2014) para las cuencas de montaña tropicales tributarias al embalse de Ringlet en Malasia donde se estimó que los valores superan las 100 Ton/ha-año o 10,000 Ton/km²-año.

Además, al comparar los resultados de la Figura 4-19 izquierda contra los resultados presentados por Villa (2012) para una cuenca en Antioquia con características un poco similares a las aquí trabajadas es posible evidenciar que existe una importante dependencia de los resultados del modelo RUSLE a la resolución temporal de la información de lluvia a partir de la cual se estime el factor de erosividad R.

Por otro lado, al multiplicar el mapa o campo potencial de erosión bruta media anual (A) estimado por el valor medio (1.5 %) del campo de relaciones de entrega de sedimento calculado con la metodología de Jain y Kothyari (2000), se obtiene un suministro medio de sedimento fino anual de sedimento de 14.14 Ton/ha-año o 1,414 Ton/km²-año (Figura 4-19 derecha), valor es comparable con las tasas representativas de erosión reportadas Morris y Fan (1998) para diferentes usos del suelo en zonas templadas (Figura 4-20) y con las simulaciones de Unal (2014) y Osorio (2017), en la cual para las cuencas abastecedoras al sitio de presa se obtuvo un volumen de 1.21 Mm³ para el periodo 2001-2003, que traducido a producción en toneladas por hectárea arroja un valor medio anual cercano a 7.99 Ton/ha.

En búsqueda de solo revisar si el suministro de sedimento fino anual o carga de lavado (washload) obtenida al aplicar el modelo empírico RUSLE y el Modelo Distribuido de Entrega de Sedimentos propuesto por Jain y Kothyari (2000) se encuentra dentro del orden de magnitud del volumen acumulado en el embalse (0.98 Mm³/año) durante el periodo comprendido entre octubre de 2001 y diciembre de 2003 (2.17 años). , se procedió a convertir el suministro potencial por unidad de área (14.14 Ton/ha-año) a suministro potencial total anual multiplicando por el área de la cuenca hasta el sitio de presa (1036.73 km²), obtenido un valor de 1.466 Mton/año.

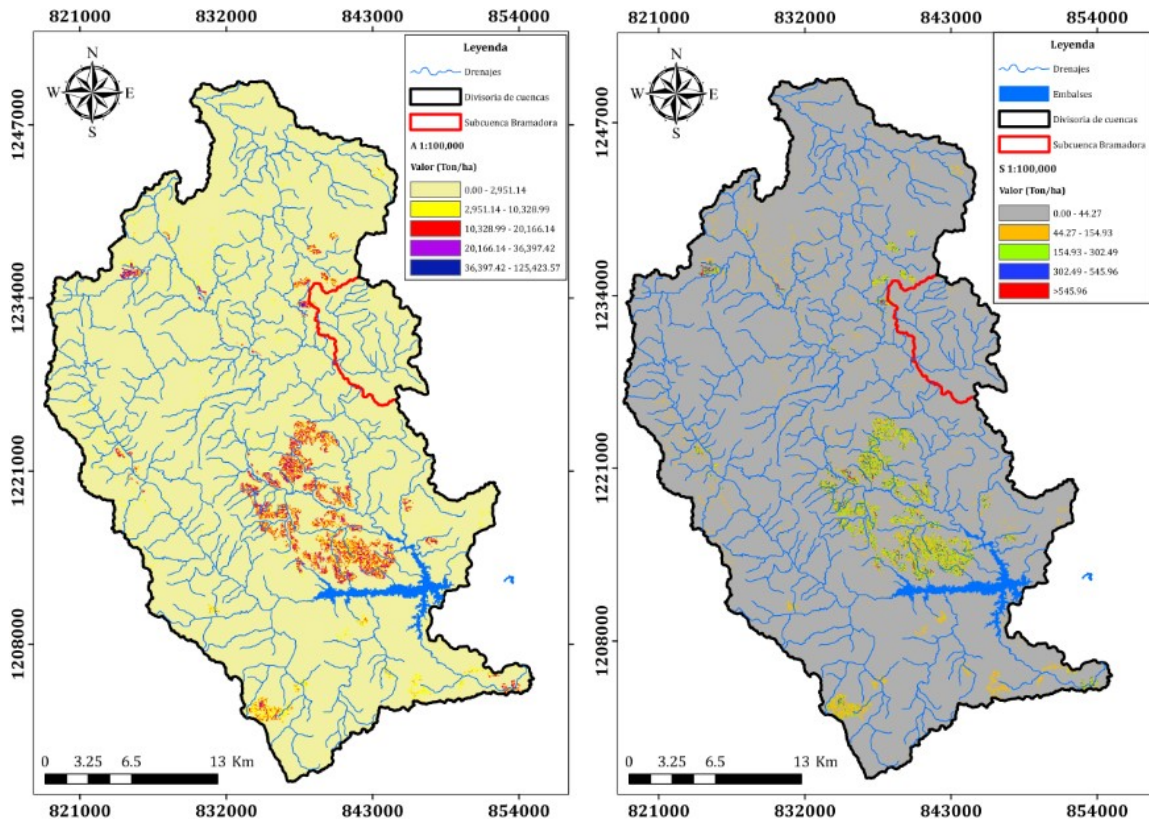


Figura 4-19: Tasas de erosión bruta potencial anual (Ton/ha) y de suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) estimadas con el modelo RUSLE.

Land use	Erosion rate		Relative erosion rate
	short tons/mi ² /yr	t/km ² /yr	(forest = 1)
Forest	24	8	1
Grassland	240	84	10
Abandoned surface mines	2,400	840	100
Cropland	4,800	1,680	200
Harvested forest	12,000	4,200	500
Active surface mines	48,000	16,800	2,000
Construction sites	48,000	16,800	2,000

Figura 4-20: Tasas representativas de erosión para varios usos del suelo en zonas templadas reportadas por Morris y Fan (1998).

Al dividir el suministro potencial total obtenido anteriormente por la densidad seca de los sedimentos en el embalse (Tabla 4-3) se halla un suministro potencial volumétrico de 1.070 Mm³/año al cual es necesario descontar entre 1 y 18% producto del material que viaja disuelto y no es sedimentable en el embalse según las estimaciones de Osorio (2017). Dicho material disuelto proviene en gran medida del proceso de disolución iónica de arcillas caoliníticas reportado por Arias (2007).

A pesar de que el suministro potencial volumétrico estimado (1.070 Mm³/año) se encuentra en el orden de magnitud del volumen acumulado en el embalse durante el

periodo 2001-2003 ($0.98 \text{ Mm}^3/\text{año}$) no es posible concluir acerca de la bondad de los resultados del modelo frente a los levantamientos batimétricos dado que el modelo RUSLE es una herramienta que permite estimar la “erosión potencial anual” y solo tiene en cuenta la erosión laminar, sin incluir la producción y el posible suministro asociado con los movimientos en masa y la dinámica fluvial – arrastre, sedimentación y re-movilización de material del lecho, además de los posibles almacenamientos temporales o permanentes de la carga de lavado (washload) en la planicie de inundación o de las arenas en los depósitos aluviales activos (barras e islas) de los canales que conforman la red de drenaje.

Tabla 4-3: Características de los sedimentos en el embalse del proyecto Riogrande II.

Densidad húmeda (kg/m^3)	2413.47
Humedad (%)	76.25
Densidad seca (kg/m^3)	1369.34
Peso unitario seco (KN/m^3)	13.43

La densidad seca del sedimento presentada en la Tabla 4-3 fue estimada a partir de los datos de humedad (%) y densidad húmeda reportados por Agudelo et al. (2013). Esta densidad seca de los sedimentos en el embalse es grande en comparación con los valores medios reportados por Morris y Fan (1998) para diferentes embalses, situación que es atribuible a la localización de los tres muestreos de sedimentos realizados al inicio de cada uno de los brazos del embalse (Figura 4-21), donde la sedimentación selectiva (sorting) producto de la disminución de la velocidad del flujo y de la capacidad de transporte genera a lo largo del eje de cualquier embalse un gradiente granulométrico decreciente (Figura 4-22) en dirección a la presa (Palau, 2002).

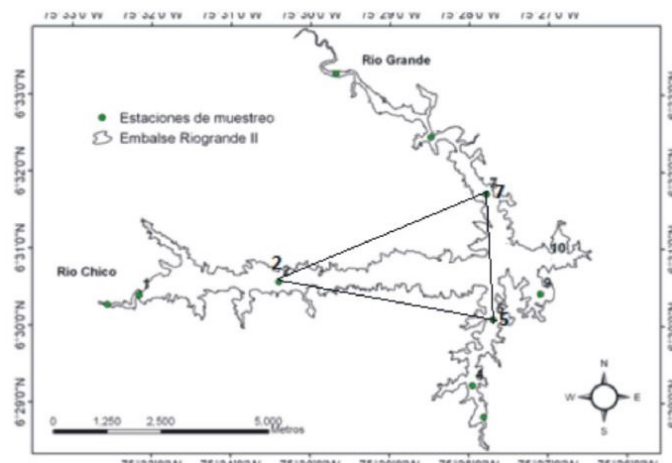


Figura 4-21: Muestreos de sedimentos en el embalse Riogrande II (Agudelo et al., 2013).

Dicho gradiente granulométrico decreciente comienza en las colas o brazos del embalse donde se depositan los materiales más densos (gravas y gravillas) y termina en la vecindad de la presa donde se sedimentan los materiales más livianos (limos y arcillas), que generalmente ocupan o colmatan el volumen muerto de diseño del embalse.

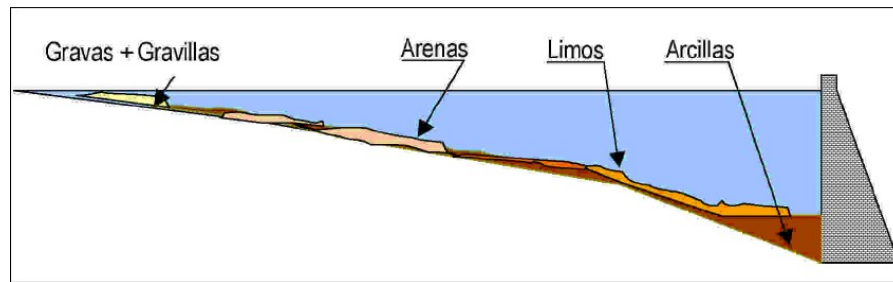


Figura 4-22: Distribución longitudinal esquemática de las fracciones granulométricas de sedimento a lo largo del eje de un gran embalse (Palau, 2002).

Finalmente, para extender el análisis a la zona de estudio completa se estimaron las tasas promedio anual de erosión potencial bruta (A) y el suministro promedio potencial anual (S) para las cuencas del ríos Grande y San Andrés (Figura 4-23) empleando el mapa o campo del factor de erosividad de la lluvia (R) calculado con el modelo de tipo lineal desarrollado en la presente tesis (Figura 4-7 derecha), la metodología descrita anteriormente y los campos de LS estimados para las escalas 1:100.000 y 1:25.000.

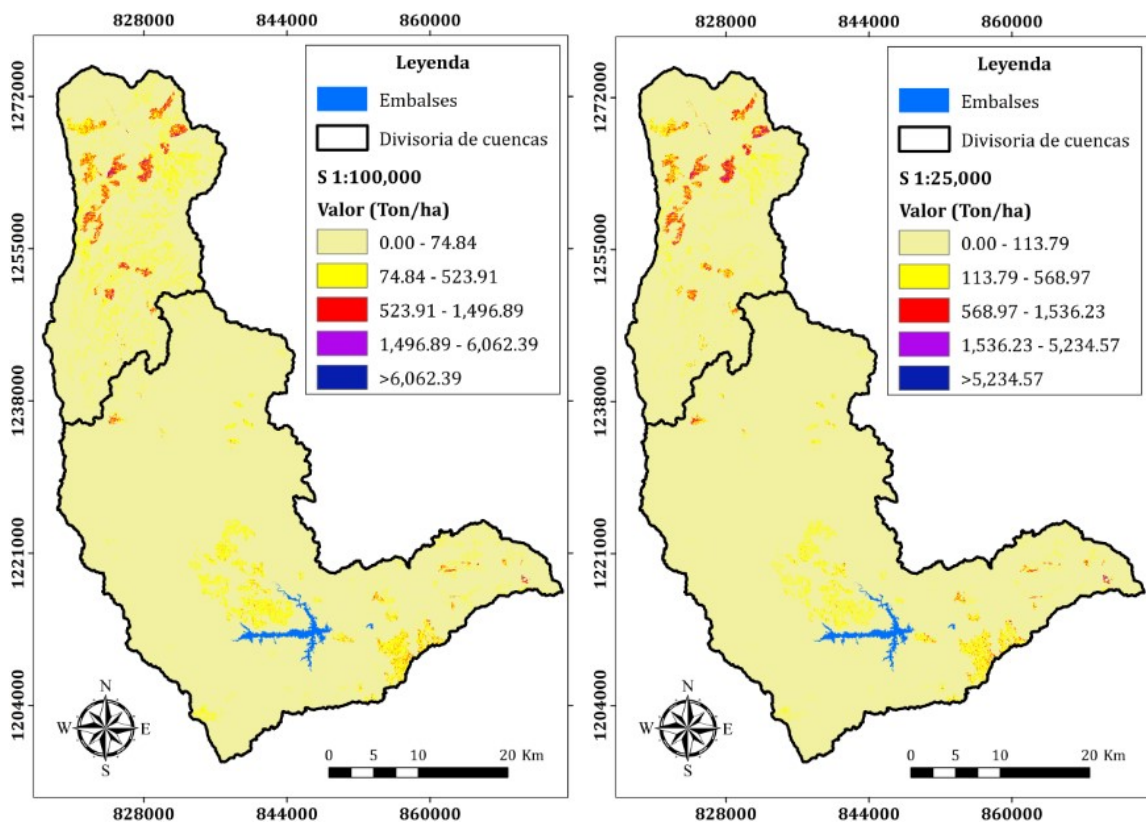


Figura 4-23. Suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) estimadas con el modelo RUSLE a escala 1:100,000 (a izquierda) y 1:25,000 (a derecha).

En la Figura 4-23 es posible observar que para ambas escalas de trabajo (1:100,000 y 1:25,000) el suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) estimado con el

modelo RUSLE para la mayor parte de la extensión de las dos cuencas no supera las 115 Ton/ha, resultado consistente con lo presentado para la cuenca del río Grande por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT, 2012).

Además, luego de realizar las estadísticas básicas a los campos de suministro potencial de sedimento fino anual se observa que el valor medio estimado aumenta al mejorar la escala o resolución cartográfica de 1:100.000 a 1:25.000 (Tabla 4-4), situación asociada a que los modelos de elevación digital (DEMs) más finos detallan mejor las pendientes del terreno y no suavizan o generalizan tanto la topografía real del terreno. Los valores extremos no exhiben este mismo comportamiento o tendencia creciente debido a unos valores atípicos u outliers que presenta el DEM a escala 1:100.000 hacia la base del valle del río San Andrés en la cuenca baja cerca al corregimiento del Valle de Toledo.

Tabla 4-4: Estadísticas de los resultados en Ton /ha según la escala de trabajo.

Escala / Parámetro	Media	Desviación estándar
1:100,000	30.77	122.94
1:25,000	34.31	129.15

Por otro lado, al evaluar el suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) estimado para la subcuenca de la quebrada Bramadora (cuenca alta del río Grande) utilizando el campo del factor R observado, las coberturas vegetales y usos del suelo para del periodo 2000-2002 y los tres diferentes modelos de elevación digital (DEMs) a escalas - 1:100,000 - 1:25,000 - 1:10,000 - se observa una tendencia generalizada al aumento en la media y valores extremos de los resultados y algunos cambios menores en los patrones espaciales (Figura 4-24), situación similar a la observada para toda el área de estudio.

Dicho análisis multiescala efectuado para la subcuenca de la quebrada Bramadora arrojó valores medios anuales de 9.00 Ton /ha para la escala 1:100,000 y 10.77 Ton /ha para la escala 1:10,000. Esta tendencia general al incremento en los valores medios y máximos de la producción y el suministro de sedimentos con el aumento de la resolución de la información cartográfica empleada para las estimaciones hace emerger una importante línea de investigación en la cual se estimen los factores correctores necesarios para estimar tasas de erosión con modelos de elevación digital (DEMs) a escalas no tan detalladas que puedan cubrir mayores áreas.

Empleando las coberturas a escala 1:10,000 del periodo 2010-2012 que diferencian hasta tipos de cultivos (papa, café, tomate de árbol y aguacate) se realizó un análisis multiescala más para la subcuenca de la quebrada Bramadora (Figura 4-25), el cual mostró la misma tendencia general al aumento en los valores medios (29.40 a 32.21 Ton/ha de escala 1:100,000 a 1:10,000) y un marcado aumento en las zonas donde se localizan los cultivos transitorios como la papa. En las demás zonas de la subcuenca analizada los valores estimados continúan estando en un rango admisible.

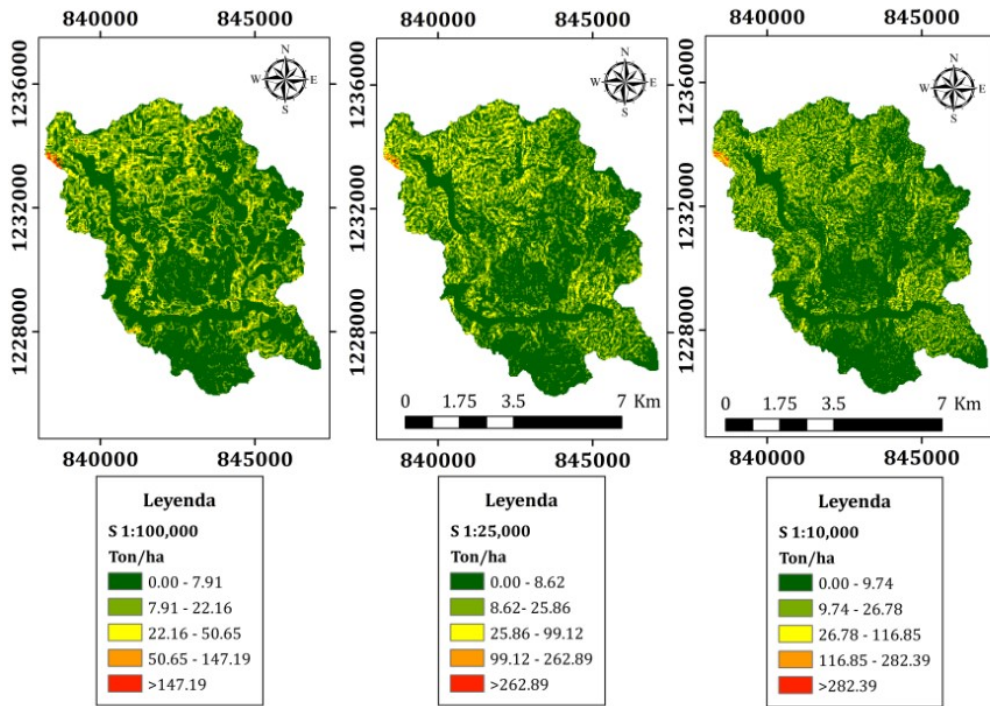


Figura 4-24: Suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) para la subcuenca Bramadora estimado con las coberturas del periodo 2000-2002.

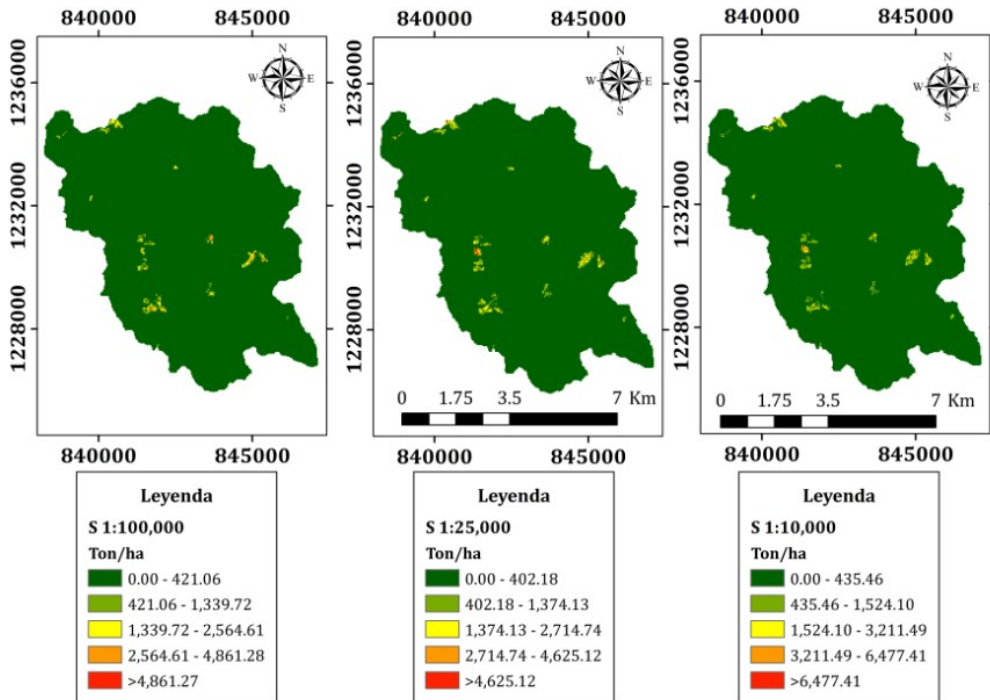


Figura 4-25: Suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) para la subcuenca Bramadora estimado con las coberturas del periodo 2010-2012.

4.2. Modelo EPM (modelo de erosión potencial)

El modelo de Erosión Potencial (EPM), más conocido como el método de Gavrilovic (Gavrilovic, 1962; 1970, 1972) y sus posteriores modificaciones es un modelo de concepción empírica de origen Serbio el cual ha sido ampliamente usado para predecir la pérdida de suelo en países europeos, tal es el caso de los trabajos pioneros conducidos por Gavrilovic (1988) para cuencas torrenciales y más recientemente Efthimiou et al. (2016), para el territorio colombiano se cuenta con el trabajo de Villa (2012).

Este modelo considera seis factores o variables independientes que explican la producción de sedimentos en una cuenca hidrográfica (Efthimiou et al., 2016), el primer factor considera las propiedades del suelo heredadas de los materiales parentales que yo subyacen y de los que materiales depositados por la dinámica eólica o fluvial (factor de erodabilidad del suelo - y), el segundo tiene en cuenta el tipo y distribución del uso del suelo (factor de protección del suelo - x), el tercero considera el grado de erosión o incisión que presenta la cuenca (factor de erosión y desarrollo de la red de drenaje - Φ), el cuarto y el quinto consideran los efectos del clima sobre el proceso erosivo (factor de temperatura - t y factor de precipitación - h) y el sexto refleja las características topográficas de las laderas (factor pendiente - J). La parametrización (W) que permite el cálculo del suministro potencial medio anual de sedimentos finos o carga de lavado (washload) en metros cúbicos por kilómetro cuadrado (m^3/km^2) se presenta a continuación:

$$W = T * H * \pi * \sqrt{Z^3} \quad (4.19)$$

Donde, Z es denominado coeficiente de rendimiento o factor de intensidad o densidad de los procesos de erosión y es estimado mediante la siguiente expresión:

$$Z = X * Y * (\Phi + \sqrt{J}) \quad (4.20)$$

Por otro lado, Efthimiou et al. (2016) reporta que el modelo ha sido implementado en diversidad de geografías entre las cuales se encuentran Serbia (Gavrilovic, 1988), Croacia (Petras et al., 2005), Eslovenia (Zemljic, 1971), Alemania (De Cesare et al., 1998), Italia (Fanetti y Vezzoli, 2007; De Vente et al., 2006), Argentina (Rafaelli et al., 1998), Bélgica (De Vente y Poesen, 2005) y Grecia (Emmanouloudis y Filippidis, 2002; Emmanouloudis et al., 2003; Stefanidis et al., 1998; Kalinderis et al., 2009), proporcionando resultados satisfactorios para la estimación de la pérdida media anual de suelo en cuencas hidrográficas. La implementación distribuida en el espacio se logró empleando el software ArcGis 10.4.

4.2.1. Factor de erodabilidad del suelo (Y)

Este factor depende directamente de las propiedades del suelo heredadas de los materiales parentales que yo subyacen y de los que materiales depositados por la

dinámica eólica (cenizas volcánicas) o fluvial (material aluvial) presentes en las cuencas hidrográficas de estudio y puede ser descrito como el valor inverso de la resistencia del suelo a la erosión detonada por la precipitación (Efthimiou et al. 2016), sus valores al igual que los del factor K del modelo RUSLE son estimados en laboratorio o mediante parcelas de escorrentía, sin embargo, el rango de variación del coeficiente de erodabilidad del suelo en el modelo EPM de Gavrilovic (1988) es mayor, presentando valores desde 0.2 para roca dura y resistente a la erosión hasta 2.0 para sedimentos finos y sin resistencia a la erosión, según los valores reportados por Efthimiou et al. (2016) y Bagherzadeh y Daneshvar (2011).

En el presente trabajo investigativo se asignaron los valores del coeficiente Y o factor de erodabilidad del suelo (Tabla 4-5) en función de las diferentes unidades de suelos desarrollados a partir de los materiales parentales y materiales depositados por la dinámica eólica (cenizas) o fluvial (material aluvial) a lo largo y ancho de las cuencas de estudio (Figura 3-22). El rango de variación de este factor se puede obtener de las publicaciones originales de Gavrilovic y de la tabla de valores sugeridos por Efthimiou et al. (2016), el mapa o campo final del factor Y estimado se presenta a continuación en la Figura 4-26.

Tabla 4-5: Factores Y y Φ asociados a diferentes materiales parentales y depositados.

Materiales parentales y depositados que dieron origen al suelo	Factor Y	Factor Φ
Granodioritas y rocas duras + ceniza volcánica	0.4	0.3
Esquistos y rocas débiles	1.2	0.7
Gneises	1.1	0.5
Peridotitas	0.6	0.4
Depósitos aluviales	1.6	0.8

4.2.2. Factor de protección del suelo (X)

Los valores numéricos para este factor dependen de las coberturas vegetales y los usos del suelo en la cuenca que se esté analizando, por ejemplo, Efthimiou et al. (2016) y Villa (2012) reportan un rango de variación de este parámetro entre 0.05 y 1.00, correspondiendo los valores menores a zonas con buena cobertura vegetal como bosques mixtos y densos y los mayores asociados a sitios sin cobertura vegetal como áreas mineras.

Por otro lado, es necesario indicar que este parámetro es muy similar al factor de cobertura y gestión (C) del modelo RUSLE que cuantifica el efecto de las interrelaciones entre las coberturas del suelo y las prácticas de gestión sobre la pérdida de suelo media anual, por tanto, para el presente trabajo investigativo se empleó casi el mismo campo o superficie de valores estimado para el factor C del modelo RUSLE (Figura 4-26 derecha), variando este en el valor de 0.4 asignado para los pastos según sugiere el rango presentado por Efthimiou et al. (2016). Además, dado que el mapa de coberturas vegetales y usos del suelo disponible para el periodo 2000-2002 a escala 1:100,000 y

con leyenda Corine Land Cover no permite distinguir entre tipos de cultivos (papa, café, tomate de árbol y aguacate, entre otros) por la extensión de estos en las cuencas y el área mínima mapeable a esa escala, las tasas de producción estimadas con el este modelo también se consideran potenciales.

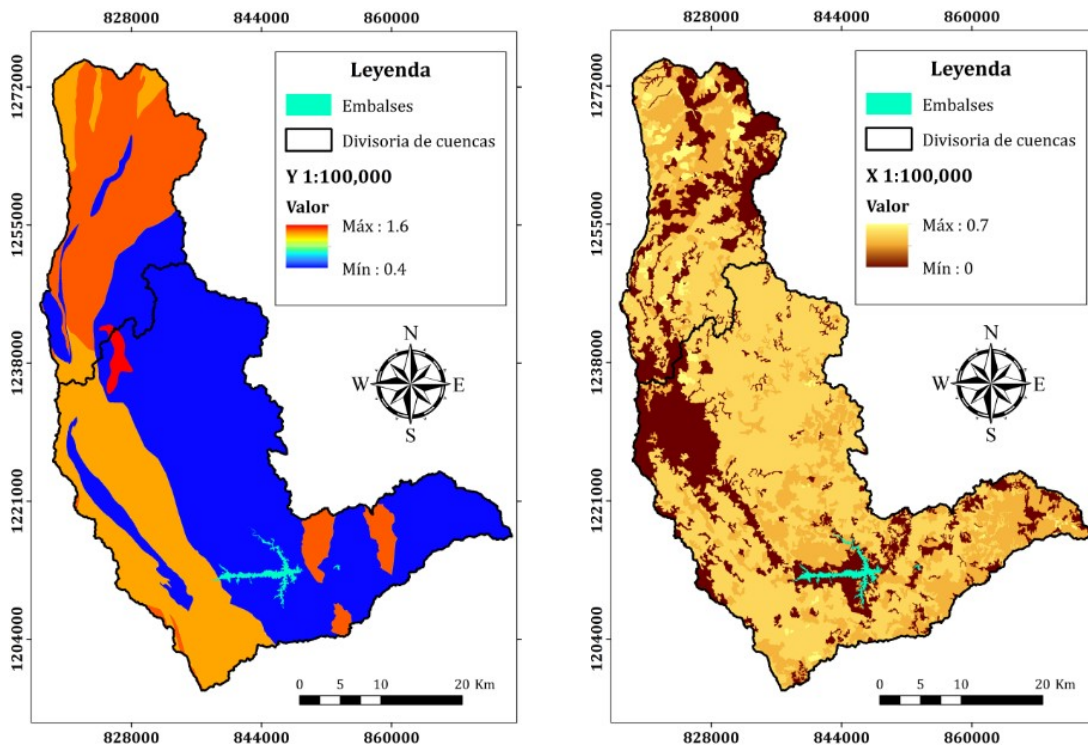


Figura 4-26: Mapas de los factores Y (a izquierda) y X (a derecha) del modelo EPM.

4.2.3. Factor de erosión y desarrollo de la red de drenaje (Φ)

El factor Φ o factor de erosión y desarrollo de la red de drenaje representa el grado de expresión en el terreno de los procesos erosivos sobre la cuenca y es caracterizado visualmente mediante trabajos de campo (Efthimiou et al. 2016). Dicho valor presenta un rango de 0.1 a 1.0, donde los valores cercanos a 0.1 representan cuencas hidrográficas con procesos erosivos leves mientras que los valores cercanos a 1.0 corresponden a cuencas con procesos activos en el 100 % del área.

Por otro lado, de la superposición de los resultados del modelo RUSLE (Figura 4-23), el mapa de unidades cartográficas de suelos (Figura 3-16) y el mapa de las unidades geológicas de las cuencas de estudio (Figura 3-22), se identifica que las zonas más vulnerables a la erosión corresponden a los terrenos donde se han desarrollado suelos a partir de rocas del Grupo Ayurá Montebello (esquistos cloríticos, grafiticos, etc.) en la cuenca del río San Andrés, materiales fuertemente influenciados por el efecto de la falla Espíritu Santo donde se observan incluso milonitas como reporta Noriega (2016) y Arias (1981) para otros sectores de la misma falla. Por lo anterior, se procedió a asignar un

valor de 0.7 a los suelos desarrollados a partir de esquistos del Grupo Ayurá Montebello y 0.8 a los depósitos y llanuras aluviales que por su génesis son los más propensos a la disección por parte de la escorrentía superficial y concentrada, por último, a los suelos desarrollados a partir de granodioritas (Batolito Antioqueño y de Sabanalarga) en combinación con cenizas volcánicas en el área de estudio se les asignó un valor de 0.3 (Tabla 4-5). El mapa resultante de muestra en la Figura 4-27 izquierda.

4.2.4. Factor de temperatura (T)

En la formulación original del método de Gavrilovic y sus posteriores modificaciones y aplicaciones en el continente europeo (Gavrilovic, 1988), posiblemente este factor tenga una gran relevancia debido a los importantes gradientes de temperatura que se presentan entre las estaciones, a pesar de esto, en el presente trabajo investigativo no se considera muy relevante, dado que en las latitudes tropicales donde se localiza el territorio colombiano los gradientes de temperatura a escala anual no son muy importantes, sin desconocer que a escala diaria si presentan una variabilidad relevante.

Por otro lado, es necesario indicar que este factor se estimó con base en el campo de temperatura calculado a partir del modelo de elevación digital a escala 1:100,000 y mostrado en la Figura 3-13. La expresión utilizada para el cálculo del mapa del factor T (Figura 4-27) se presenta a continuación:

$$T = \sqrt{\left(\frac{t^o}{10} + 0.1\right)} \quad (4.21)$$

La variable temperatura adquiere una importancia relevante en la evaluación del proceso de erosión de suelos cuando se consideran perturbaciones como los incendios forestales, dado que las altas temperaturas generadas por estos pueden llegar a producir pérdidas en el contenido de carbono orgánico como reportan Moreno et al. (2005), el cual aporta a la estabilidad de los agregados del suelo.

4.2.5. Factor de precipitación (H)

Esta variable introduce el efecto del forzador analizado (la lluvia), mediante su inclusión en el modelo como la precipitación media anual (mm), para el presente caso se empleó el campo de precipitación descrito en el numeral 3.4.1 (variables hidroclimáticas del conjunto de datos), la capa respectiva que se incluyó en el análisis se muestra a continuación en la Figura 4-28, allí es posible apreciar que los mayores valores de precipitación se presentan hacia la cuenca del río San Andrés (alcanzando un máximo alrededor de 3723 mm anuales). Además, en la Figura 4-28 se observan fuertes gradientes de precipitación asociados a las zonas encañonadas en ambas cuencas, en el río Grande hacia el sureste y en el río San Andrés hacia noroccidente.

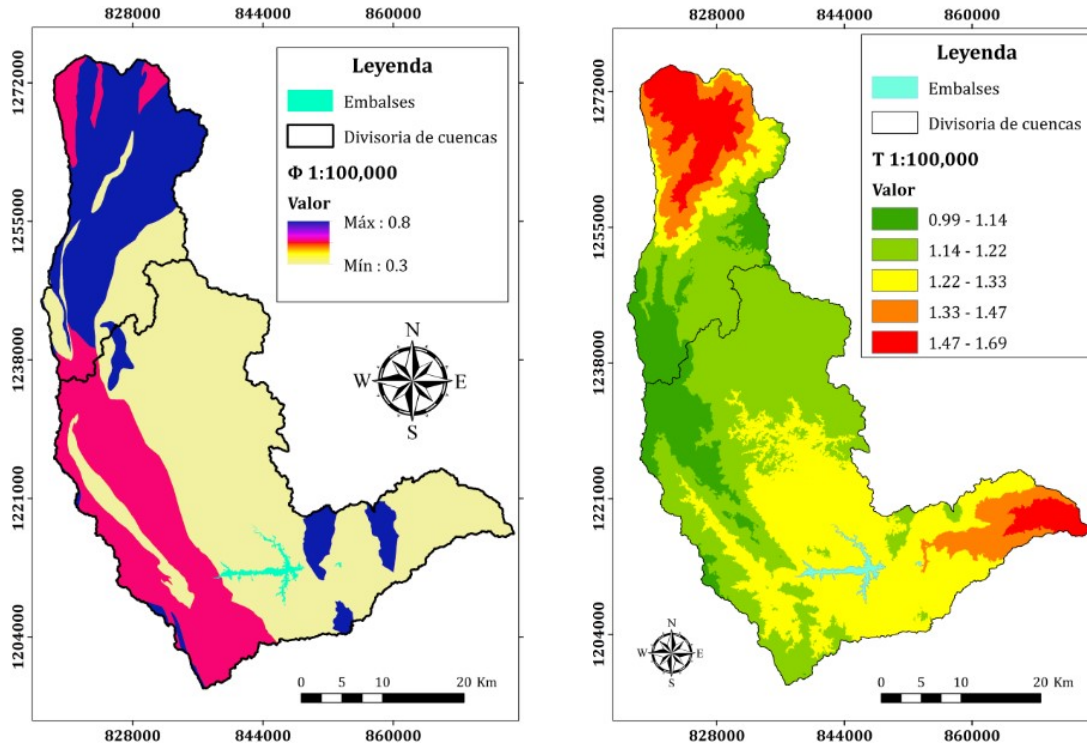


Figura 4-27: Mapas de los factores Φ (a izquierda) y T (a derecha) del modelo EPM.

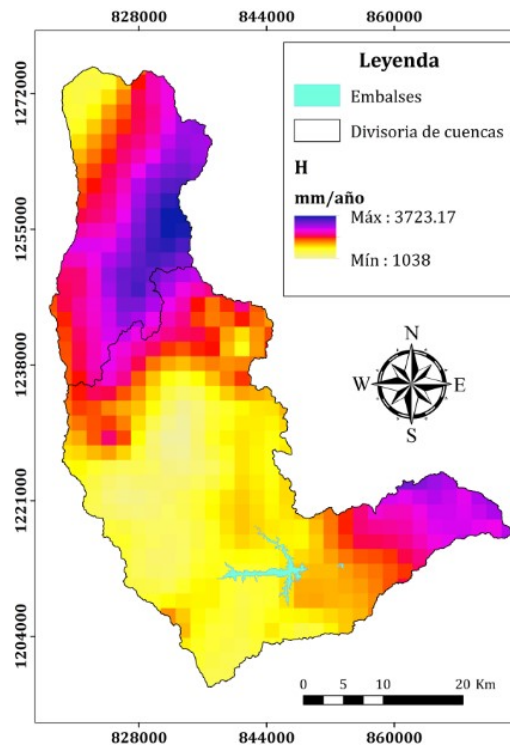


Figura 4-28: Mapa factor H del modelo EPM.

4.2.6. Factor de pendiente (J)

El factor J corresponde a la pendiente promedio de la cuenca en porcentaje (%), y refleja una de las características topográficas de las laderas donde se produce el sedimento, para su implementación de manera distribuida sobre toda el área de estudio se usaron los mapas de pendientes estimados a partir de los modelos de elevación digital (Figura 3-26).

4.2.7. Factor de intensidad o densidad de los procesos de erosión (Z)

Posterior a la estimación de los factores independientes se procedió con el cálculo del factor Z o coeficiente de rendimiento, el cual representa una medida de la intensidad o densidad de los procesos de erosión y puede ser estimado mediante la ecuación 4.7 presentada anteriormente. Zempljic (1971) realiza una clasificación de este factor o coeficiente de rendimiento del modelo de erosión potencial en función de la severidad del proceso, los rangos se presentan a continuación en la Tabla 4-6. Los mapas estimados del factor Z y reclasificados según los valores sugeridos por Zempljic (1971) para las escalas 1:100,000 y 1:25,000 (variando factor J) se presentan a continuación en la Figura 4-29.

Tabla 4-6: Clasificación del factor Z sugerida por Zempljic (1971).

Intensidad de la erosión	Factor Z
Muy bajo	<0.19
Bajo	0.20 - 0.40
Moderado	0.41 - 0.70
Alto	0.71 - 1.00
Muy alto	>1.00

4.2.8. Resultados del modelo EPM

Una vez realizada la estimación de parámetros del modelo empírico EPM (Gavrilovic, 1962; 1970, 1972), se evaluó el proceso erosivo usando la expresión de la ecuación 4.6 a dos diferentes escalas espaciales (1:100,000 y 1:25,000), mediante el uso de los modelos de elevación digital descritos en numeral 3.4.2 (Figura 3-14) y conservando las demás capas constantes pero remuestreadas a la segunda escala. A continuación en la Figura 4-30 se presentan los resultados obtenidos, donde es posible apreciar que al mejorar la resolución espacial de la información cartográfica los valores estimados de erosión media anual (m^3/km^2) presentan un aumento, situación similar a la encontrada con la aplicación del modelo RUSLE.

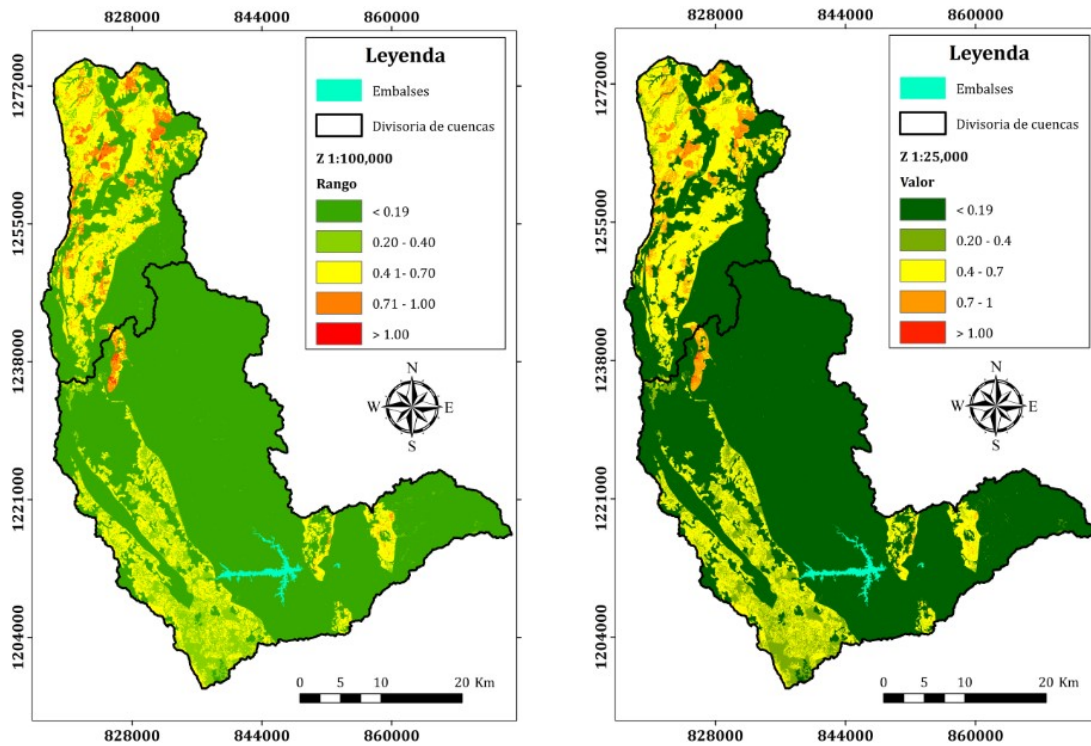


Figura 4-29: Factor Z a escala 1:100,000 (a izquierda) y 1:25,000 (a derecha).

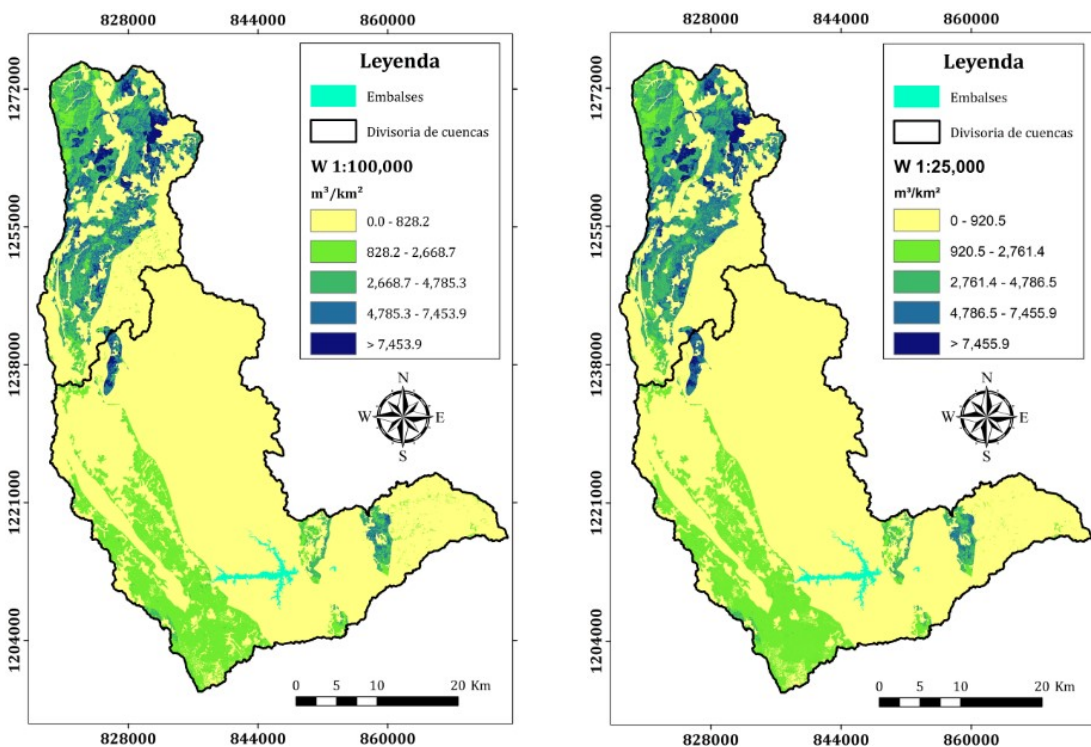


Figura 4-30: Suministro potencial medio anual de sedimento fino (m^3/km^2) estimado con el modelo EPM a escala 1:100,000 (a izquierda) y 1:25,000 (a derecha).

Por último, para la escala 1:100,000 es necesario indicar que al transformar el suministro potencial medio anual de sedimento fino de $1077.31 \text{ m}^3/\text{km}^2$ para toda la zona de estudio (Figura 4-30) a toneladas por hectárea se obtiene un valor de 14.75 Ton/ha-año, consistente con lo reportado por CIAT (2012) en la zona. Para la escala 1:25,000 al efectuar el mismo procedimiento se obtiene un valor de 15.41 Ton/ha-año, situación que exhibe el mismo comportamiento identificado al simular con el modelo RUSLE cuando se mejora la escala cartográfica del modelo digital de terreno utilizado para el cálculo de las pendientes y los subfactores de los modelos que dependen de estas.

4.3. Evaluación comparativa de los modelos RUSLE Y EPM

A continuación se presenta en la Tabla 4-7 un análisis comparativo por cuencas y escalas del suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) utilizando los campos o mapas de la Figura 4-23. Allí se observa nuevamente la tendencia general al aumento en los valores estimados con la mejora de la escala cartográfica y valores más altos de erosión (dos veces más severos) en la cuenca del río San Andrés que en la del río Grande, resultados consistentes con los procesos erosivos identificados en dicha cuenca (Figura 3-6 y Figura 3-8), la estructura del relieve que presenta laderas más largas e inclinadas y una mayor precipitación promedio anual al suroriente de la cuenca (parte alta) en jurisdicción de los municipios de San Andrés de Cuerquia, Santa Rosa de Osos y Yarumal (corregimiento de Ochalí).

Tabla 4-7: Comparación del suministro potencial de sedimento fino anual (Ton/ha) para las cuencas estudiadas hasta sus desembocaduras.

Modelo		RUSLE*		EPM	
Cuenca	Escala	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Río Grande	1:100,000	17.72	75.53	7.50	12.63
	1:25,000	21.07	82.57	8.11	13.04
Río San Andrés	1:100,000	64.36	194.28	33.41	36.39
	1:25,000	68.37	201.06	34.19	36.60

* El campo o mapa del factor R empleado corresponde al estimado con el modelo lineal de la Figura 4-2.

Es interesante anotar que los valores estimados por el modelo RUSLE son más superiores a los estimados por el modelo EPM sin embargo se consideran mucho más razonables dado a la gran cantidad de posibles almacenamientos temporales o permanentes para el sedimento que se observan en las cuencas de estudio, por ejemplo, en la cuenca del río grande Arias et al. (2000) y Arias et al. (2002) reportan que en la zona colinada del Vergel existen un gran número de depósitos de escorrentía antiguos y

recientes al igual que depósitos aluviales antiguos y recientes ambos de espesores importantes.

Además, en la parte baja de ambas cuencas se observan grandes depósitos aluviales consistentes por ejemplo con el reporte de terrazas aluviales en el río San Andrés por parte del Consorcio Integral (2007) en el Estudio de Impacto Ambiental - Línea Base del proyecto Hidroeléctrica Pescadero Ituango. Históricamente estos depósitos aluviales han sido explotados en búsqueda de oro o materiales de construcción, condición que se ve actualmente en el corregimiento del valle de Toledo donde se aprovechan los depósitos aluviales del río San Andrés para extraer agregados para las diferentes obras del proyecto Ituango, también en la subcuenca de la quebrada Matanzas tributaria por la margen izquierda del río San Andrés se observan grandes depósitos.

Capítulo 5. El agua como forzador de la evolución del relieve

En este capítulo se describen los análisis realizados en cuanto al rol que juegan los procesos de erosión laminar detonados por el agua en la evolución de los frentes de erosión de la cordillera, para lo cual se emplearon dos de los campos o mapas de los parámetros del modelo RUSLE a escala 1:100,000, el del Factor lluvia y escurrimiento – R adimensionalizado al dividir por la media y el del Factor topográfico – LS que es adimensional, además de, el mapa potencial de erosión bruta estimado (A) en escala 1:100,000 adimensionalizado como el factor R. También se recurrió al modelo de elevación digital (DEM) del terreno con las elevaciones divididas por ocho para que fueran comparables con las demás variables de análisis y el mapa de la curvatura del terreno en el sentido del mayor gradiente.

Sobre las superficies mencionadas anteriormente se hicieron 16 transeptos a lo ancho de las cuencas en sitios representativos (Figura 5-1) y posteriormente se generaron perfiles transversales (Figura 5-3 a Figura 5-18) que contuvieran la elevación del terreno (geoformas y pendientes), las tasas potenciales de erosión estimadas y adimensionalizadas (A) y las demás variables mencionadas anteriormente. No se incluyeron los factores de cobertura y gestión (C), de prácticas de manejo (P) y de erodabilidad del suelo (K) por que el objetivo era evaluar la relación entre las tasas de erosión potenciales y la curvatura del terreno en el sentido del mayor gradiente, además, el rango de variación de K en los resultados encontrados es pequeño (0.000 a 0.066) y C y P corresponden a una elección del modelador más no a variables medidas.

El mapa de la curvatura del terreno (CPR) en el sentido del mayor gradiente fue estimado a partir del modelo de elevación digital (DEM) del terreno a escala 1:100,000 usando la herramienta para el cálculo de curvatura incluida en el software ArcGis 10.4 (Figura 5-2), donde un valor negativo (a) indica que la superficie es convexa hacia arriba en esa celda y un perfil o valor positivo (b) indica que la superficie es cóncava arriba en esa celda. Un valor de cero indica que la superficie es lineal (c) y no presenta ningún tipo de concavidad.

De los perfiles transversales se identifica que hacia la cuenca del río San Andrés se presentan los valores máximos del factor de erosividad de la lluvia (R), situación que combinada a las altas pendientes favorece los procesos erosivos y la incisión o disección

del paisaje relicto presente allí. Sin embargo, la variabilidad observada a lo ancho de las cuencas en muchos de los perfiles generados (Figura 5-9 a Figura 5-18) es pequeña o casi nula y muy posiblemente este asociada a la resolución espacial del campo de precipitación usado, situación que podría mejorar para investigaciones futuras debido a implementación de redes de monitoreo con sensores como el radar meteorológico del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá - SIATA, que captura variables meteorológicas de manera distribuida en el espacio. Además, es posible identificar en los perfiles (Figura 5-3 a Figura 5-18) que la variabilidad espacial del proceso erosivo es capturada por el factor topográfico (LS).

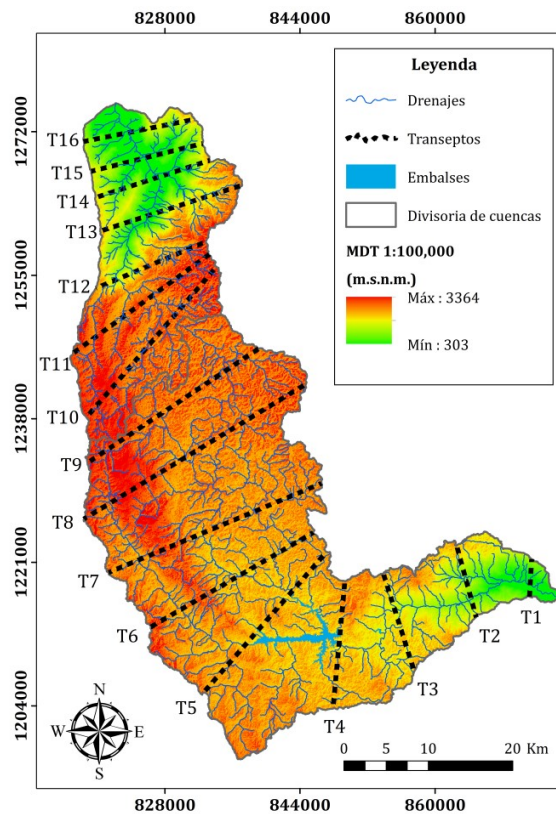


Figura 5-1: Localización de los transeptos usados en los análisis.

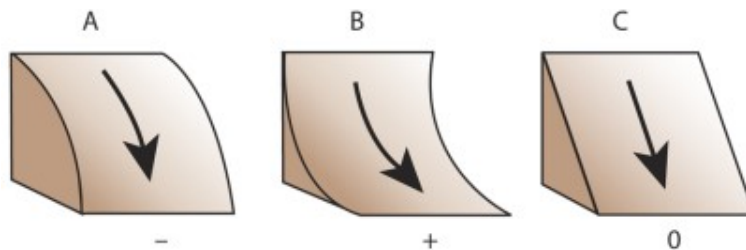


Figura 5-2: Curvatura del perfil. Fuente:

<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>

Por otro lado, en la mayor parte de los transeptos ubicados sobre el altiplano de Santa Rosa de Osos (Figura 5-6 a Figura 5-11) las tasas de erosión potencial anual no son tan elevadas y el relieve relativo que correspondiente a la superficie de erosión SI descrita por Page y James (1981), Arias (1995), Arias (1996) y Arias et al. (2002) no presenta grandes magnitudes y la disección e incisión no presenta un estado acelerado como los observados hacia la cuenca del río San Andrés donde en algunos casos los valores máximos de erosión (Figura 5-14 y Figura 5-18) coinciden con los puntos de mayor incisión sobre la ladera y perfiles convexos en los transeptos analizados.

Finalmente, es necesario indicar que no es posible establecer relaciones de causalidad entre las tasas de erosión potencial estimadas a la escala 1:100,000, las curvaturas del terreno y el avance de los frentes de erosión de la cordillera debido a que la erosión hídrica tiene lugar en la primera capa de suelo y en lugares severamente afectados hasta en la capa subyacente incluyendo solo un pequeño porcentaje de los perfiles de meteorización desarrollados en la zona de estudio que sumado a que el modelo de elevación digital (DEM) del terreno a escala 1:100,000 con resolución en el plano horizontal de 30 m y en la vertical de 1 m no captura la variabilidad necesaria de los perfiles de terreno en el sentido vertical para analizar la evolución que presenta microtopografía producto de la erosión hídrica

Además, en el plano horizontal tampoco se captura la variabilidad necesaria dado que a dicha escala predominan las concavidades semicirculares de primer orden encajadas en los flancos de las colinas del altiplano de Santa Rosa de Osos (ASRO) descritas por Arias et al. (2002) y Arias (2007) con tamaños entre 0.2 y 5.0 hectáreas. Un análisis con los recursos computacionales adecuados para procesar en toda el área de estudio el modelo de elevación digital (DEM) del terreno a escala 1:10,000 con resolución en el plano horizontal de 1 m y en la vertical de centímetros podría arrojar relaciones de causalidad sólidas alineadas con los niveles jerárquicos de la organización espacial de estructuras mórficas del ASRO establecida por Arias et al. (2006).

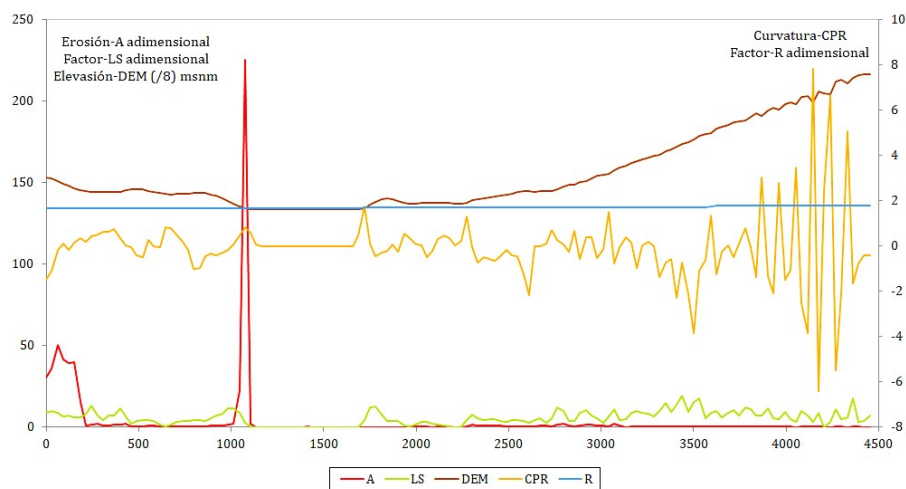


Figura 5-3: Resultados obtenidos en transecto # 1.

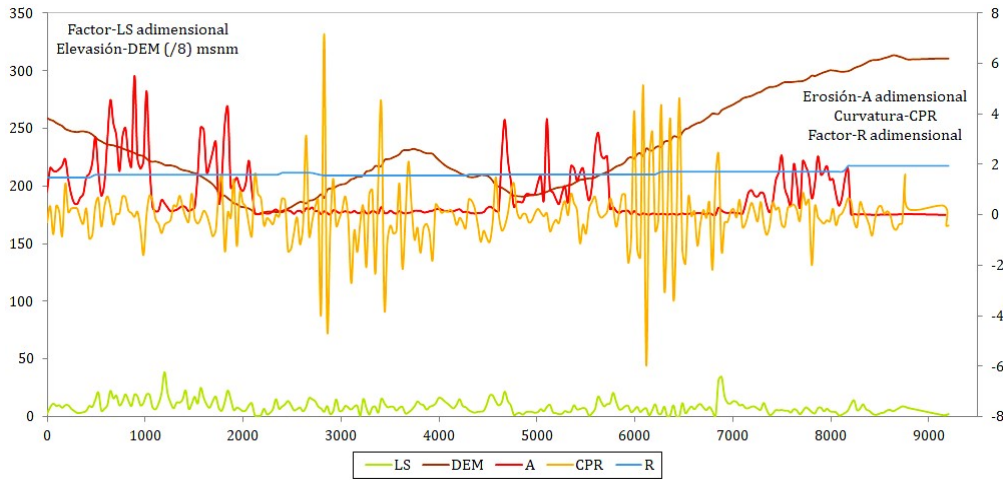


Figura 5-4: Resultados obtenidos en transecto # 2.

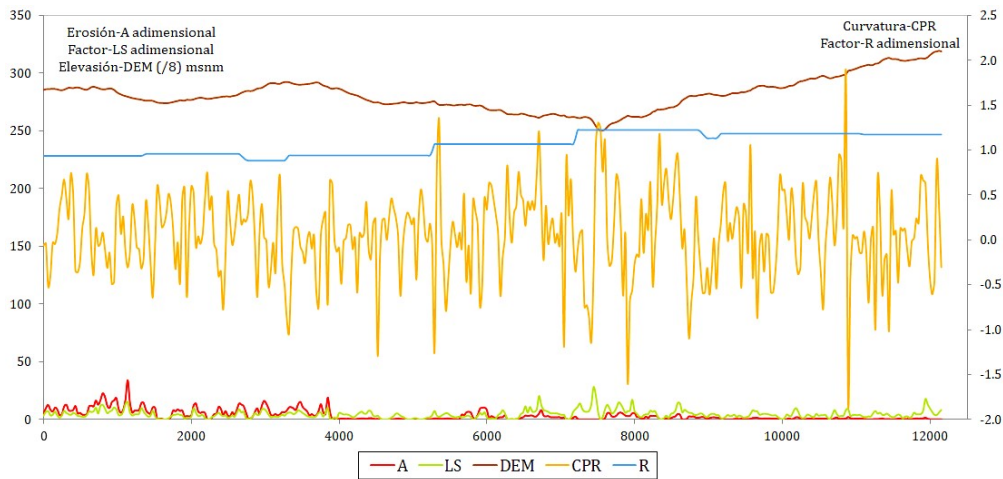


Figura 5-5: Resultados obtenidos en transecto # 3.

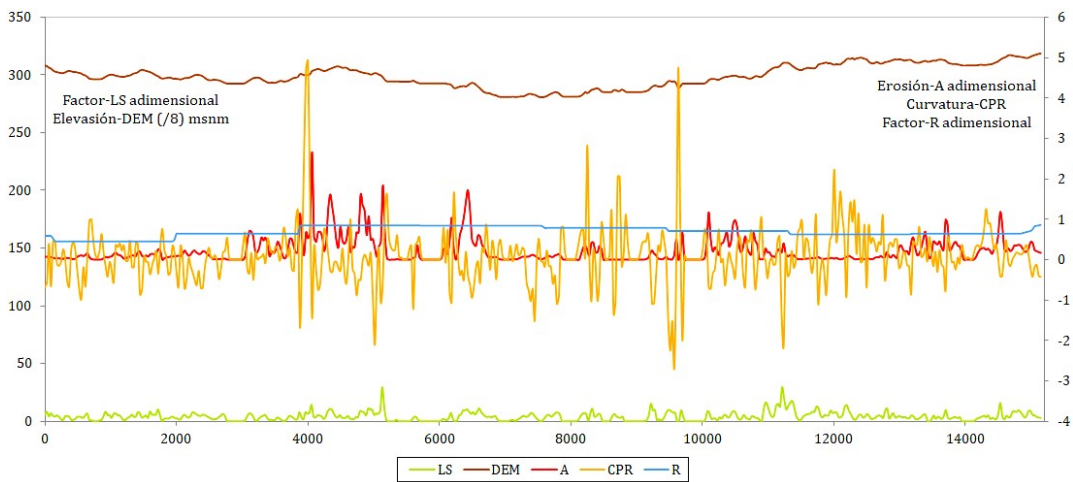


Figura 5-6: Resultados obtenidos en transecto # 4

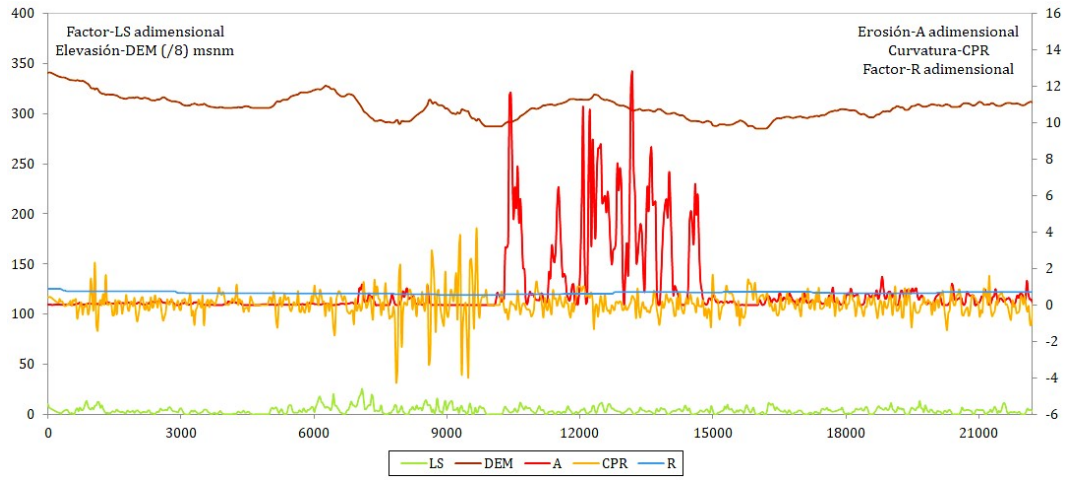


Figura 5-7: Resultados obtenidos en transecto # 5.

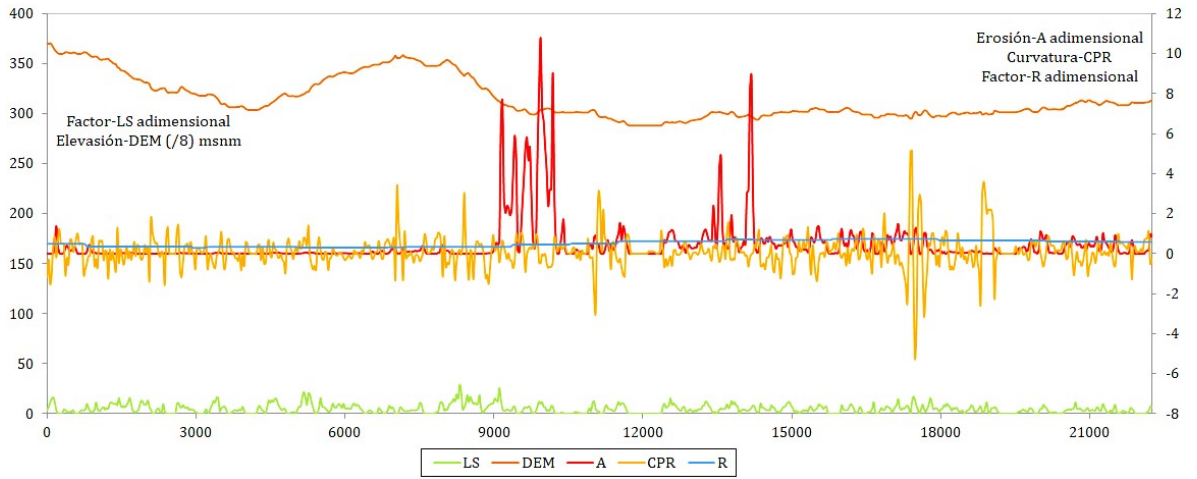


Figura 5-8: Resultados obtenidos en transecto # 6.



Figura 5-9: Resultados obtenidos en transecto # 7.



Figura 5-10: Resultados obtenidos en transecto # 8.

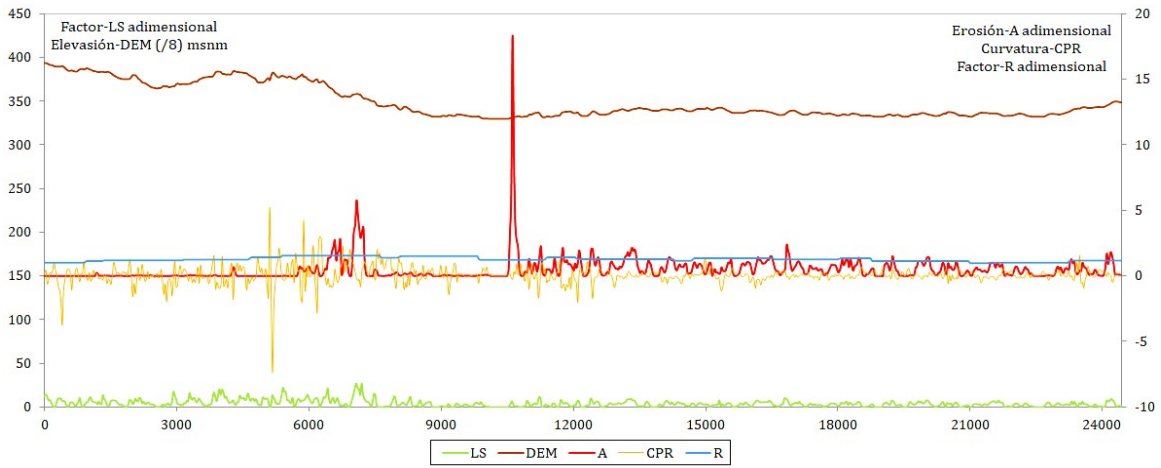


Figura 5-11: Resultados obtenidos en transecto # 9.

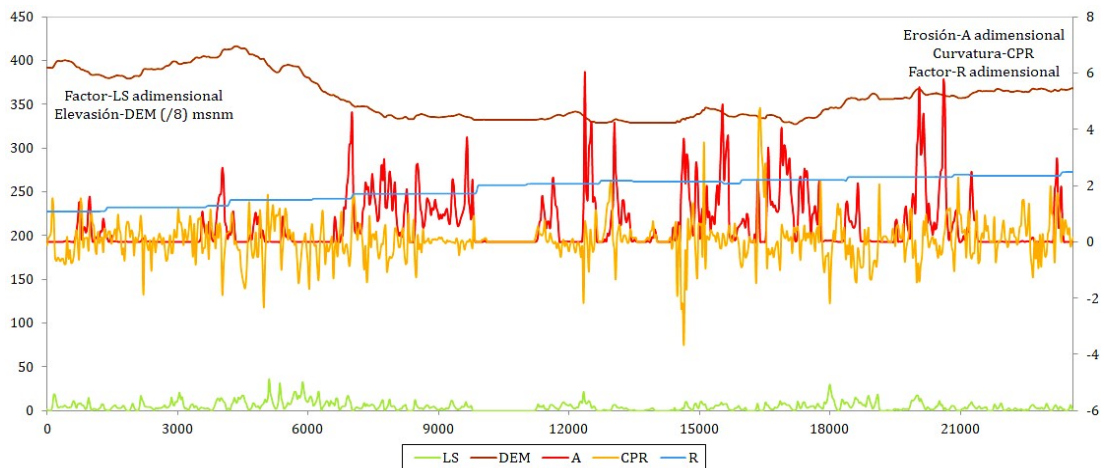


Figura 5-12: Resultados obtenidos en transecto # 10.

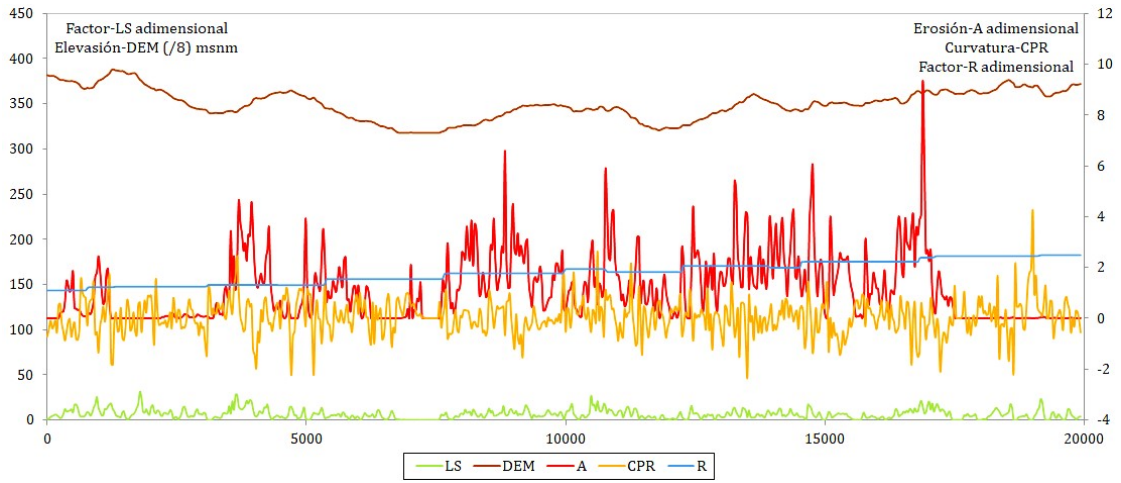


Figura 5-13: Resultados obtenidos en transecto # 11.

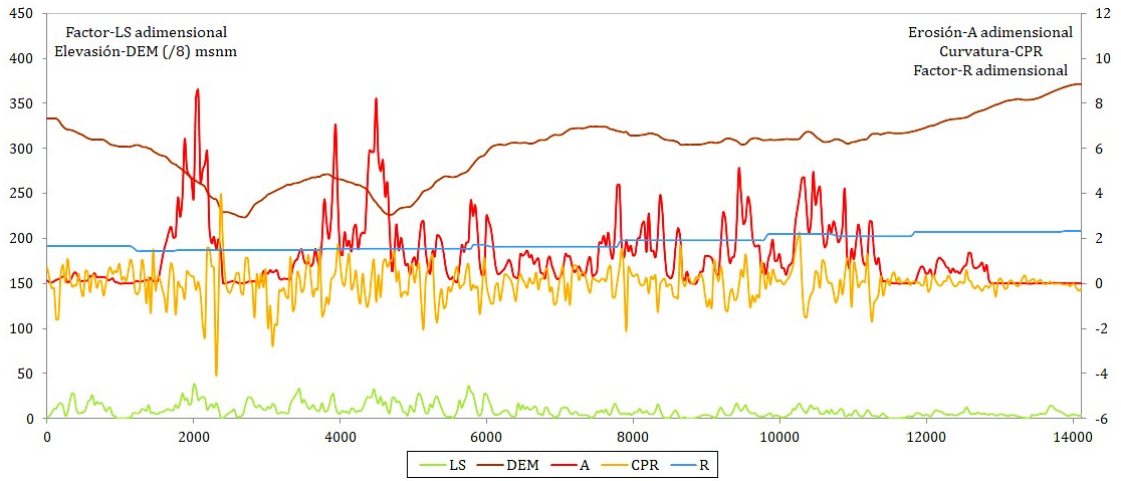


Figura 5-14: Resultados obtenidos en transecto # 12.

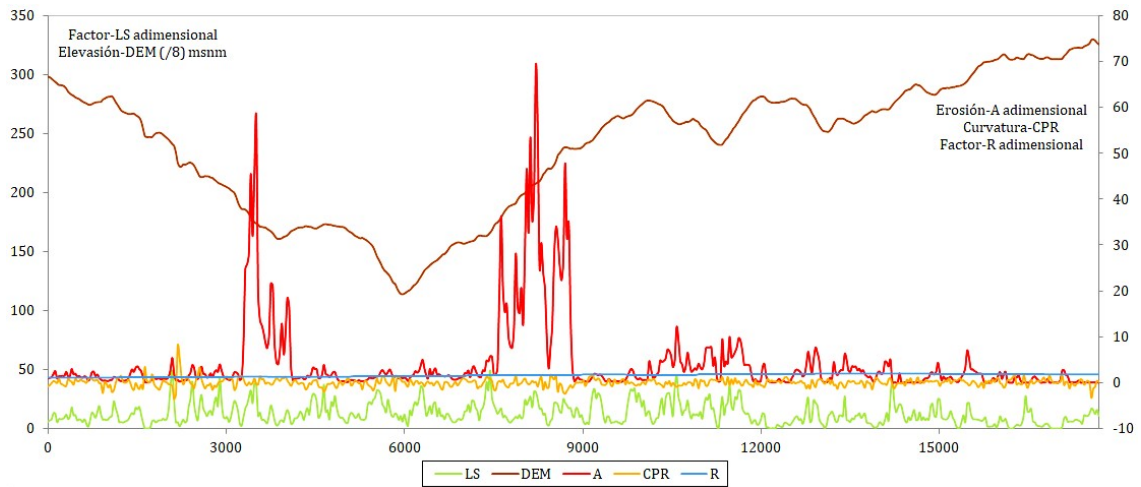


Figura 5-15: Resultados obtenidos en transecto # 13.

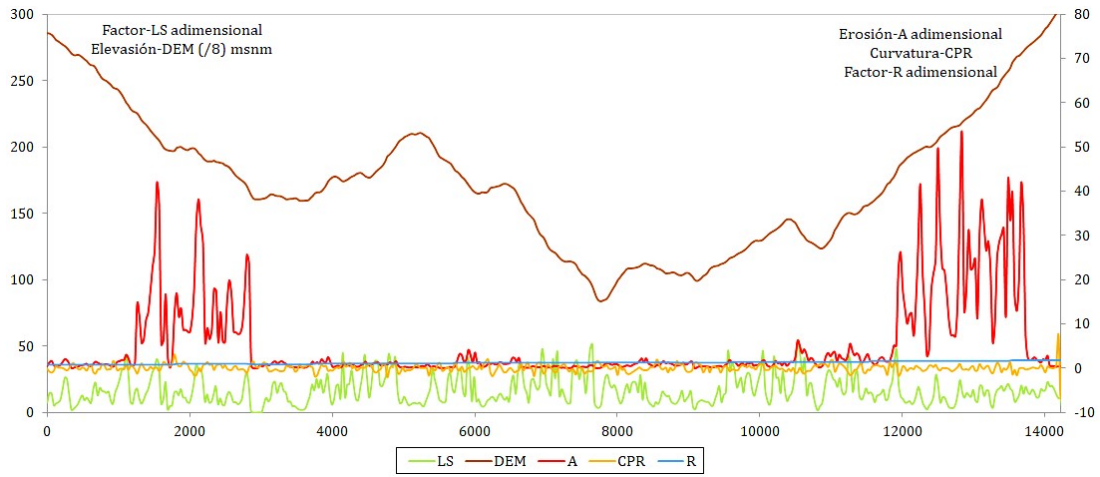


Figura 5-16: Resultados obtenidos en transecto # 14.

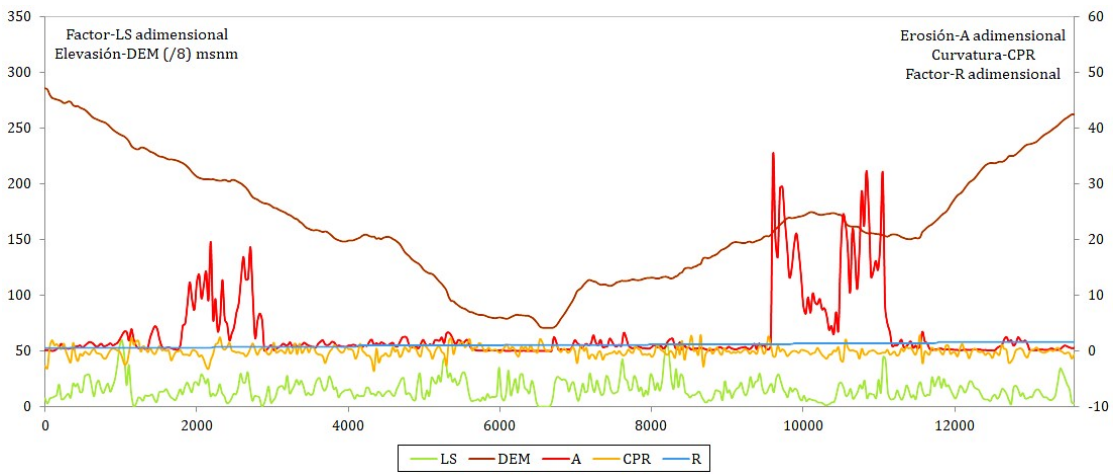


Figura 5-17: Resultados obtenidos en transecto # 15.

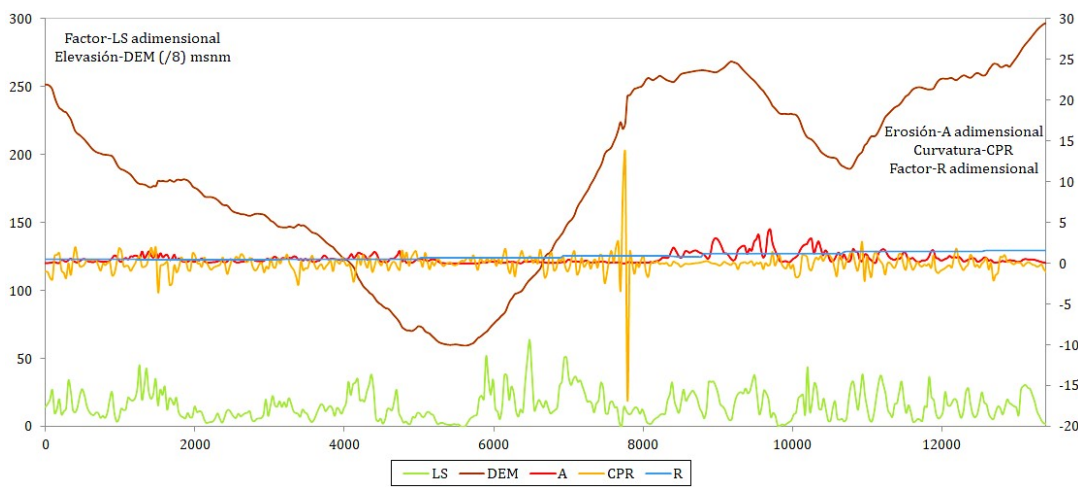


Figura 5-18: Resultados obtenidos en transecto # 16.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Se emplearon los modelos empíricos RUSLE - Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (Renard et al., 1997) y EPM – Método de Erosión Potencial (Gavrilovic, 1988) de manera distribuida sobre las cuencas de los ríos Grande y San Andrés utilizando dos escalas espaciales de trabajo para evaluar el potencial de erosión bruto anual y el suministro de sedimento fino o carga de lavado (washload) a la red de drenaje.
- Durante la evaluación realizada con el modelo RUSLE se identificó que las estimaciones de erosividad de la lluvia generadas con el modelo de Pérez y Mesa (2002) son muy inferiores a los valores reportados por diferentes autores de la comunidad científica mundial al realizar el cálculo del factor R a partir de registros de precipitación con resolución temporal menor a 30 minutos, por tanto, en la presente tesis se desarrolló un modelo de tipo lineal para estimar R en función de la precipitación promedio multianual utilizando los datos con resolución temporal de 15 minutos suministrados por Empresas Públicas de Medellín E.S.P. El efecto de escala impuesto por la resolución temporal de los datos de lluvia sugiere que los aguaceros o tormentas más intensas son las responsables de la mayor parte de la erosión de los suelos y la producción de sedimento fino o carga de lavado (washload).
- En las unidades cartográficas de suelo representadas por perfiles modales con porcentajes de materia orgánica (% M.O.) mayores al doce por ciento (12.0 %) no es aplicable la expresión numérica presentada por Wischmeier y Smith (1978) para el cálculo del factor de erodabilidad del suelo (K).
- No es posible concluir acerca de la bondad de los resultados del modelo RUSLE frente a los levantamientos batimétricos del proyecto de Aprovechamiento Múltiple

Riogrande II debido a que dicho modelo es una herramienta que permite estimar la “erosión potencial anual” y solo tiene en cuenta la erosión laminar, sin incluir la producción y el posible suministro asociado con los movimientos en masa y la dinámica fluvial – arrastre, sedimentación y re-movilización de material del lecho, además de los posibles almacenamientos temporales o permanentes de la carga de lavado (washload) en la planicie de inundación o de las arenas en los depósitos aluviales activos (barras e islas) de los canales que conforman la red de drenaje.

- Al realizar las estadísticas básicas a los campos de suministro potencial de sedimento fino anual se observa que el valor medio estimado aumenta al mejorar la escala o resolución cartográfica de 1:100.000 a 1:25.000, situación asociada a que los modelos de elevación digital (DEMs) más finos detallan mejor las pendientes del terreno y no suavizan o generalizan tanto la topografía real del terreno.
- En la subcuenca de la quebrada Bramadora, analizada en tres escalas de trabajo (1:100,000; 1:25,000; 1:10,000) se observa que tanto para el periodo 2000-2002 como para el periodo 2010-2012, el suministro potencial de sedimento fino anual incrementa al cambiar de la escala 1:100,000 a la escala 1:10,000, evidenciándose una fuerte dependencia de los resultados a la escala espacial de la información cartográfica de topográfica, coberturas vegetales y usos del suelo. En la escala 1:10,000 donde son visibles diferentes tipos de cultivos (papa, café, tomate de árbol y aguacate) de pequeña extensión presentes en la cuenca del río Grande se observa un incremento de varios órdenes de magnitud en el suministro potencial de sedimento fino anual estimado, resaltando la importancia del factor de prácticas de manejo (P) en el modelo RUSLE.
- Se consideran más razonables las estimaciones del modelo RUSLE debido a la gran cantidad de posibles almacenamientos temporales o permanentes para el sedimento que se observan en las cuencas de estudio, sin embargo, siempre es debido recordar que la modelación en una herramienta útil para la toma de decisiones pero no captura por completo la variabilidad natural.
- No es posible establecer relaciones de causalidad entre las tasas de erosión potencial estimadas a la escala 1:100,000, las curvaturas del terreno y el avance de los frentes de erosión de la cordillera debido al pequeño porcentaje de perfil de

meteorización afectado por la erosión hídrica y a la resolución vertical y horizontal del modelo de elevación digital (DEM) del terreno a escala 1:100,000 empleado. Un análisis con los recursos computacionales adecuados para procesar en toda el área de estudio el modelo de elevación digital (DEM) del terreno a escala 1:10,000 con resolución en el plano horizontal de 1 m y en la vertical de centímetros podría arrojar relaciones de causalidad sólidas alineadas con los niveles jerárquicos de la organización espacial de estructuras mórficas del ASRO establecida por Arias et al. (2006).

6.2. Recomendaciones

- El acceso a los datos recolectados en parcelas de escorrentía que se ubican en los diferentes municipios de la cuenca del río Grande permitiría la validación espacial de las estimaciones de producción potencial de sedimentos en las vertientes.
- Un trabajo extensivo acerca de índices y métricas del paisaje para el análisis cuantitativo de la geomorfología es requerido.

Bibliografía

- Agudelo, D. M., Flórez, M. T., López, C., & Palacio, J. (2013). Influencia de las condiciones fisicoquímicas del sedimento y la interfase agua - sedimento en la transferencia experimental del O,O - DIETIL O - 3,5,6 TRICLORO - 2 - PIRIDINIL FOSFOROTIATO (CLORPIRIFOS) y el 3,5,6 TRICLORO - 2 - PIRIDINOL (TCP), en el emb. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12(23), 13–22.
- Álvarez, O. (2007). *Cuantificación de la incertidumbre en la estimación de campos hidrológicos. Aplicación al balance hídrico de largo plazo.*
- Álvarez, O. D., Vélez, J. I., & Poveda, G. (2008). Nuevos campos de precipitación promedia anual para Colombia. In *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica* (p. 15). Cartagena de Indias, Colombia.
- Arias, A. (1981). Actividad cuaternaria de la falla Espíritu Santo. *CIAF*, 6(1–3), 16.
- Arias, A. (1995). El relieve de la zona central de Antioquia: Un palimpsesto de eventos tectónicos y climáticos. *Revista Facultad de Ingeniería de La Universidad de Antioquia*, 10, 9–24.
- Arias, A. (1996). Altiplanos y Cañones en Antioquia: una mirada genética. *Revista Facultad de Ingeniería de La Universidad de Antioquia*, 12, 84–96.
- Arias, A. (2007). Las concavidades de primer orden: expresión del mecanismo activo de modelado en el Altiplano de Santa Rosa de Osos. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 20.
- Arias, A., Gonzáles, H., & Arias, G. (2000). *Historia del relieve y los suelos del Altiplano de Santa Rosa de Osos-Antioquia-Región el Vergel. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales y Ecología. CORANTIOQUIA. Medellín.*
- Arias, A., González S., L. H., Zapata H., R., Arias L., G., & Loaiza U., J. C. (2002). *Comportamiento y estructuras del relieve y los suelos en el altiplano de Santa Rosa de Osos (Antioquia).*
- Arias, A., Parra, L. N., Cabrera, K. R., & Gonzales, L. H. (2006). *Cartografía del relieve en el altiplano de Santa Rosa de Osos.*
- Awwunudiogba, A., & Hudson, P. F. (2014). A review of soil erosion models with special reference to the needs of humid tropical mountainous environments. *European Journal of Sustainable Development*, 3(4), 299–310.

- <https://doi.org/10.14207/ejsd.2014.v3n4p299>
- Bagherzadeh, A., & Daneshvar, M. R. M. (2011). Sediment yield assessment by EPM and PSIAC models using GIS data in semi-arid region. *Front. Earth Sci.*, 5(2), 207–216.
- Barnett, A. P., Rogers, J. S., Holladay, J. H., & Dooley, A. E. (1965). Soil Erodibility Factors for Selected Soils in Georgia and South Carolina. *Transactions of the ASAE*, 8(3), 393. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.40527>
- Batista, P. V. G., Silva, M. L. N., Silva, B. P. C., Curi, N., Bueno, I. T., Acérbi Júnior, F. W., ... Quinton, J. (2017). Modelling spatially distributed soil losses and sediment yield in the upper Grande River Basin - Brazil. *CATENA*, 157, 139–150. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.025>
- Beven, K. (1995). Linking parameters across scales: Subgrid parameterizations and scale dependent hydrological models. *Hydrological Processes*, 9(5–6), 507–525. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090504>
- Borah, D., Krug, E., & Yoder, D. (2008). Watershed Sediment Yield. In *Sedimentation Engineering* (pp. 827–858). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784408148.ch17>
- Botero, G. (1963). Anales de la Facultad Nacional de Minas, Medellín, Numero 57, 101. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/53408/>
- Boyce, R. C. (1975). Sediment routing with sediment delivery ratios. In *present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*.
- Burbano, L. A. O., & Bustamante, G. de J. (2004). *Oferta hídrica del área de manejo especial "sistema de páramos y bosques altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño."* Medellín. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/6283/>
- Bustos, X., Bermúdez, M. A., Toro, G. M., Bernet, M., Rojas, O., & Marín, M. I. (2013). Caracterización de superficies de erosión mediante geomorfología cuantitativa, Altiplano Antioqueño, Cordillera Central de Colombia. *Terra Nueva Etapa*, XXIX(46), 43–67.
- Cataño, S. (2015). *Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en Antioquia*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/50573/>
- CELSIA. (2016). Centrales Hidroeléctricas. Retrieved from <http://www.celsia.com/centrales-hidroelectricas>
- CIAT. (2012). *Modelación hidrológica de las cuencas abastecedoras de los embalses la Fe, Riogrande II y Piedras Blancas, departamento de Antioquia*.
- Consorcio Integral. (2007). Caracterización del medio abiótico del área de influencia del proyecto. In *Estudio de Impacto Ambiental-Línea Base del proyecto Hidroeléctrica Pescadero Ituango* (p. 233).
- CORANTIOQUIA. (2015). *Actualización y ajuste plan de ordenación y manejo de la*

- cuenca de los ríos Grande y Chico. Informe técnico Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia -CORANTIOQUIA*. Medellín, Colombia.
- Davis, W. M. (1899). The Geographical Cycle. *The Geographical Journal*, 14(5), 481–504. <https://doi.org/10.2307/1774538>
- Douglas, J. T., & Goss, M. J. (1982). Stability and organic matter content of surface soil aggregates under different methods of cultivation and in grassland. *Soil and Tillage Research*, 2(2), 155–175. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-1987\(82\)90023-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-1987(82)90023-X)
- Edwards, T. K., & Glysson, G. D. (1988). Field methods for measurement of fluvial sediment. In *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 3, chapter C2* (p. 118). Reston, Virginia.
- Efthimiou, N., Likoudi, E., Panagoulia, D., & Karavitis, C. (2016). Comparative analysis of soil erosion estimation between the EPM and the RUSLE model using GIS techniques assessment of soil susceptibility to erosion using the epm and rusle models: the case of Venetikos river catchment. *Global NEST Journal*, 18.
- Efthimiou, N., Lykoudi, E., Panagoulia, D., & Karavitis, C. (2016). Assessment of soil susceptibility to erosion using the EPM and RUSLE models: the case of Venetikos river catchment. *Global NEST Journal*, 18(1), 164–179. Retrieved from <https://journal.gnest.org/journal-paper/assessment-soil-susceptibility-erosion-using-epm-and-rusle-models-case-venetikos-river>
- EPM. (2008). *Ingeniería de presas en Empresas Públicas de Medellín*.
- Eslamian, S. (Ed.). (2014). *Handbook of Engineering Hydrology*. Boca Raton: CRC Press.
- Foster, G. R. (1982). Modelling erosion process. In C. T. Hann, H. P. Johnson, & D. L. Brakensick (Eds.), *Hydrological modeling of a small watershed* (pp. 295–380). St Joseph, Michigan, USA: American Society of Agricultural Engineers.
- Gavrilovic. (1962). A method for estimating the average annual quantity of sediments according to the potency of erosion. *Faculty of Forestry*, 26, 151–168.
- Gavrilovic. (1970). Modern ways of calculating the torrential sediment and erosion mapping. In: Erosion, Torrents and Alluvial Deposits. In *Yugoslav Committee for International Hydrological decade* (pp. 85–100). Belgrade.
- Gavrilovic. (1972). *Engineering of Torrents and Erosion*. Belgrade.
- Gavrilovic, Z. (1988). The use of an empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. Wallingford, England.
- GEN+. (2016). La Central Hidroeléctrica San José de la Montaña. Retrieved from <http://www.genmas.com.co/206-la-central-hidroeléctrica-san-josé-de-la-montaña>

- Glymph, L. M. (1954). Studies of sediment yield from watersheds. *IAHS Publ* 37, 178–191.
- González, H. (1996). *Mapa geológico del Departamento Antioquia. Geología, recursos minerales y amenazas potenciales. Memoria Explicativa. Ingeominas.*
- Guy, H. P., & Norman, V. W. (1970). *Field methods for measurement of fluvial sediment: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 3, chapter C2.* Retrieved from <http://pubs.usgs.gov/twri/03c02-1970/report.pdf>
- Hartley, D. M., & Julien, P. Y. (1992). Boundary shear stress induced by raindrop impact. *Journal of Hydraulic Research*, 30(3), 341–359. <https://doi.org/10.1080/00221689209498923>
- Howard, A. D. (1994). A detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water Resources Research*, 30(7), 2261–2285. <https://doi.org/10.1029/94WR00757>
- Hoyos, N., Waylen, P. R., & Jaramillo, Á. (2005). Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Journal of Hydrology*, 314(1), 177–191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.014>
- Hydrocsa. (2017). Proyecto La Chorrera. Retrieved from <http://www.hydrocsa.com/proyectos/pch-la-chorrera.html>
- IGAC. (2007). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento de Antioquia.* Bogotá.
- Integral. (1985). *Proyecto Hidroeléctrico Cañafisto, Estudio Geomorfológico.* Medellín.
- Jain, M. K., & Kothyari, U. C. (2000). Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS. *Hydrological Sciences Journal*, 45(5), 771–786. <https://doi.org/10.1080/02626660009492376>
- Julien, P. (1995). *Erosion and Sedimentation.* Cambridge University Press.
- Julien, P. (2010). *Erosion and Sedimentation (2nd Ed).* Cambridge University Press.
- Julien, & Frenette. (1987). Macroscale analysis of upland erosion. *Hydrological Sciences Journal*, 32(3), 347–358. <https://doi.org/10.1080/02626668709491193>
- Khosrowpanah, S., Heitz, L. F., Wen, Y., & Park, M. (2007). *Developing a gis-based soil erosion potential model of the ugum watershed.*
- Kim, H. S. (2006). *Soil erosion modeling using RUSLE and GIS on the Imha watershed, south Korea.* Colorado State University.
- Lane, L. J., Shirley, E. D., & Singh, V. P. (1988). Modelling erosion on hillslopes. In M. G. Anderson (Ed.), *Modelling Geomorphological Systems* (pp. 287–308). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Latrubesse, E. M., & Restrepo, J. D. (2014). Sediment yield along the Andes: continental budget, regional variations, and comparisons with other basins from orogenic

- mountain belts. *Geomorphology*, 216, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.007>
- Lowman, L. E. L., & Barros, A. P. (2014). Investigating links between climate and orography in the central Andes: Coupling erosion and precipitation using a physical-statistical model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(6), 1322–1353. <https://doi.org/10.1002/2013JF002940>
- MacArthur, R., Neill, C., Hall, B., Galay, V., & Shvidchenko, A. (2008). Overview of Sedimentation Engineering. In *Sedimentation Engineering* (pp. 1–20). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784408148.ch01>
- Maner, S. B. (1958). Factors affecting sediment delivery rates in the red hills physiographic area. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 39(4), 669–675. <https://doi.org/10.1029/TR039i004p00669>
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., & Jakeman, A. J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18(8–9), 761–799. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00078-1)
- Molnár, D. K., & Julien, P. Y. (1998). Estimation of upland erosion using GIS. *Computers & Geosciences*, 24(2), 183–192. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004\(97\)00100-3](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004(97)00100-3)
- Montenegro, G. H. (1991). Interpretación de las propiedades Físicas del Suelo (Textura, Estructura, Densidad, Aireación, etc.). In *Seminario-Taller "Fundamentos para la interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego."* Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Montgomery, D. R., Balco, G., & Willett, S. D. (2001). Climate, tectonics, and the morphology of the Andes. *Geology*, 29(7), 579–582.
- Montgomery, D. R., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Channel network source representation using digital elevation models. *Water Resources Research*, 29(12), 3925–3934. <https://doi.org/10.1029/93WR02463>
- Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., ... Cárdenas, L. (2007). *Atlas de páramos de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C.
- Moreno, J. M. et al. (2005). *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. MIMAM 2005*. Retrieved from http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/plan-nacional-adaptacion-cambio-climatico/evaluacion-preliminar-de-los-impactos-en-espana-del-cambio-climatico/eval_impactos.aspx
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation, 3rd Edition*.
- Morris, G. L., & Fan, J. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook*. McGraw-Hill Book Co., New York.

- Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., & Finkner, S. C. (1989). A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 32(5), 1587–1593.
- Noriega, S. (2016). *Geomorfología tectónica del noroccidente de la Cordillera Central, Andes del Norte - Colombia*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/52383/>
- Olson, T. C., Mannering, J. V., & Johnson C.B. (1963). The erodibility of some Indiana soils. *Proc. Indiana Acad. Sci.*, 72, 319–324.
- Osoño, S. (2017). *Simulación de sedimentos mediante un modelo hidrológico distribuido utilizando información indirecta*. Universidad Nacional de Colombia.
- Page, W. D. (1986). *Seismic geology and seismicity of northwestern Colombia: Reporte para Integral Ltda, ISA y Woodward Clyde Consultants*.
- Page, W. D., & James, M. E. (1981). The Antiquity of the erosion surfaces and the Late Cenozoic deposits near Medellín, Colombia: implications to tectonics and erosion rates. *Rev. CIAF*, 6(1–3), 421–454.
- Palau Ybars, A. (2002). La sedimentación en embalses. Medidas preventivas y correctoras. In *I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente* (p. 10). Madrid.
- Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., Rousseva, S., ... Alewell, C. (2015). Rainfall erosivity in Europe. *Science of The Total Environment*, 511, 801–814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Jae Lim, K., ... Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, 7(1), 4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
- Pérez, J. D., & Mesa, O. J. (2002). Estimación del factor de erosividad de la lluvia en Colombia. In *XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología* (p. 12). Medellín.
- Posada, L. (1992). *Hidráulica Fluvial. Universidad Nacional de Colombia, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas. Medellín*.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., & Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5(1), 59–79. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106>
- Ramírez, C. Z. (2011). *Evaluación del comportamiento de la competencia en la actividad de generación de energía en el mercado mayorista colombiano, bajo condiciones de oligopolio = Performance evaluation of competition in the power generation business in the wholesale market in*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/4756/>
- Randle, T. J., Yang, C. T., & Joseph Daraio. (2006). Erosion and Reservoir Sedimentation. In *Erosion and sedimentation manual* (p. 94). US Department

- Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver CO.
- Reid, M. E., & Iverson, R. M. (1992). Gravity-driven groundwater flow and slope failure potential: 2. Effects of slope morphology, material properties, and hydraulic heterogeneity. *Water Resources Research*, 28(3), 939–950. <https://doi.org/10.1029/91WR02695>
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703.
- Rendon-Herrero, O. (1978). Unit sediment graph. *Water Resources Research*, 14(5), 889–901. <https://doi.org/10.1029/WR014i005p00889>
- Rojas, R. (2002). *GIS-based upland erosion modeling, geovisualization, and grid size effects on erosion simulations with CASC2D-SED*. Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo.
- Rosenqvist, A., Shimada, M., Ito, N., & Watanabe, M. (2007). ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.901027>
- Sarmiento, C., Cadena, C., Sarmiento, M., Zapata, J., & León, O. (2013). *Aportes a la conservación estratégica de los páramos de Colombia: Actualización de la cartografía de los complejos de páramo a escala 1:100.000*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia.
- SCS (Soil Conservation Service). (1975). *Urban hydrology for small watersheds. Technical release n. 55*. Soil Conservation Service United States Department of Agriculture, Washington DC, USA.
- Sharply, A. N., & Williams, J. R. (1990). *EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator I, model documentation*. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin, No. 1768.
- Smith, R. A., Mesa, O. J., Botero E., A., & Vélez, J. I. (1994). Evaluación de las metodologías utilizadas para la definición de prioridades en cuencas hidrográficas y su aplicación a la cuenca de la quebrada Santa Barbara (Carolina, Antioquia). *Avances En Recursos Hidráulicos*, 2, 69–90.
- Suárez Díaz, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Universidad Industrial de Santander, (UIS).
- Tarboton, D. G. (2014). TauDem 5.1.2: terrain analysis using digital elevation models. Retrieved from <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/downloads.html>
- Tarboton, D. G., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, 5(1), 81–100. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>

- Tucker, G. E., & Bras, R. L. (1998). Hillslope processes, drainage density, and landscape morphology. *Water Resources Research*, 34(10), 2751–2764. <https://doi.org/10.1029/98WR01474>
- UNAL. (2014). *Simulación Hidrológica y de Sedimentos de las Cuencas Abastecedoras del Embalse Río Grande II*. Medellín.
- UPME. (2015). *Atlas Potencial Hidroenergético de Colombia*.
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. J. (2016). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el periodo 1981-2014. In *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica* (p. 12). Lima, Perú.
- USDA. (2001). *Revised Universal Soil Loss Equation Version 2*.
- Van Remortel, R. D., Hamilton, M., & Hickey, R. J. (2011). Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of DEM elevation data. *Cartography*, 30(1), 27–35.
- Van Remortel, R. D., Maichle, R. W., & Hickey, R. J. (2004). Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable. *Computers & Geosciences*, 30(9–10), 1043–1053. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2004.08.001>
- Vanoni. (1975). *Sedimentation Engineering, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54*. Reston, Virginia 20191: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784408230>
- Velásquez, N. (2011). *No Title Simulación de Sedimentos a partir de un Modelo Conceptual y Distribuido No Lineal*. Universidad Nacional de Colombia.
- Vélez, J. I. (2001). *Desarrollo de un Modelo Hidrológico Conceptual y Distribuido Orientado a la Simulación de Crecidas*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Vélez, J. I., Poveda, G., & Mesa, O. J. (2000). *Balances Hidrológicos de Colombia, Serie del Posgrado en Recursos Hidráulicos, No. 16*.
- Verstappen, H. T. (1983). *Applied geomorphology: geomorphological surveys for environmental development*. Amsterdam; New York: Elsevier: Distributors for the U.S. and Canada, Elsevier Science Pub. Co., 1983.
- Villa, S. (2012). *Modelación de la erosión hídrica a escala de cuenca en la zona alta de la quebrada La García del municipio de Bello - Antioquia*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.
- Walling, D. E. (1983). The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 65(1), 209–237. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
- Wang, B., Zheng, F., & Römken, M. J. M. (2013). Comparison of soil erodibility factors in USLE, RUSLE2, EPIC and Dg models based on a Chinese soil erodibility database. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 63(1), 69–79. <https://doi.org/10.1080/09064710.2012.718358>

- Whipple, K. X., & Tucker, G. E. (1999). Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B8), 17661–17674. <https://doi.org/10.1029/1999JB900120>
- Willgoose, G. (1994). A statistic for testing the elevation characteristics of landscape simulation models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B7), 13987–13996. <https://doi.org/10.1029/94JB00123>
- Williams, J. R. (1978). A sediment graph model based on an instantaneous unit sediment graph. *Water Resources Research*, 14(4), 659–664. <https://doi.org/10.1029/WR014i004p00659>
- Wischmeier, W. H. (1959). A Rainfall Erosion Index for a Universal Soil-Loss Equation1. *Soil Science Society of America Journal*, 23, 246–249. <https://doi.org/10.2136/sssaj1959.03615995002300030027x>
- Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., & Cross, B. V. (1971). soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26, 189–193.
- Wischmeier, W. H., & Mannering, J. V. (1969). Relation of Soil Properties to its Erodibility1. *Soil Science Society of America Journal*, 33, 131–137. <https://doi.org/10.2136/sssaj1969.03615995003300010035x>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting Soil Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. USDA Agricultural Handbook No. 537.
- WMO. (2003). *World Meteorological Organization operational hydrology report no. 47 manual on sediment management and measurement*.
- Woo, H., Julien, P., & Richardson, E. (1986). Washload and Fine Sediment Load. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(6), 541–545. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1986\)112:6\(541\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:6(541))
- Yang, C. T. (2006). Introduction. In C. T. Yang (Ed.), *Erosion and sedimentation manual* (p. 6). US Department Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver CO.
- Yin, S., Xie, Y., Liu, B., & Nearing, M. A. (2015). Rainfall erosivity estimation based on rainfall data collected over a range of temporal resolutions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 4113–4126. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-19-4113-2015>
- Zemljic, M. (1971). Calculation of sediment load. Evaluation of vegetation as anti-erosive factor. In *proceedings of the international symposium Interpraevent*. Villach (Australia).
- Zhang, W., & Montgomery, D. R. (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research*, 30(4), 1019–1028. <https://doi.org/10.1029/93WR03553>