

**EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DEL SUELO DE LA CUENCA DEL RÍO
COMBEIMA MEDIANTE EL MODELO RUSLE APLICANDO SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

SANTIAGO FELIPE CALDERÓN CALLEJAS



**UNIVERSIDAD DE
MANIZALES®**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2021**

**EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DEL SUELO DE LA CUENCA DEL RÍO
COMBEIMA MEDIANTE EL MODELO RUSLE APLICANDO SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

SANTIAGO FELIPE CALDERÓN CALLEJAS

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar
al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2021**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres. Gracias por el hogar que me brindaron, su amor, dedicación, enseñanza y educación. Gracias por las innumerables oportunidades que me obsequiaron.

Gracias a mi hermana y a mi hermano. Gracias por su amor y hermandad.

CONTENIDO

GLOSARIO	9
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCIÓN	14
1. ÁREA PROBLEMÁTICA.....	16
2. OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3. JUSTIFICACIÓN	19
4. REFERENTE TEÓRICO.....	20
4.1 CUENCA	20
4.1.1. Cuenca hidrográfica.....	20
4.2 SUELO.....	21
4.2.1. Importancia y funciones del suelo.....	21
4.2.2. Degradación del suelo.....	22
4.3. EROSIÓN	23
4.3.1. Erosión hídrica.....	23
4.3.2. Evolución de los modelos de estimación de Erosión Hídrica.....	24
4.4. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	25
4.4.1. Teledetección espacial	26
4.4.2. Análisis estadísticos (Método “ <i>Kriging</i> ”)......	27
4.4.3. Mapas temáticos.....	28
4.5 ANTECEDENTES.....	28
4.5.1. Afectación al bosque natural.....	28
4.5.2. Mitigación de impactos.....	29
4.5.3 Composición florística de la cuenca.....	30
4.5.4. Remociones en masa.....	31
5. METODOLOGÍA	32
5.1 INVESTIGACIÓN APLICADA	32

5.2 PROCEDIMIENTO	32
Localización	33
Geología	34
Suelos	36
Provincias climáticas.....	42
Vegetación.....	45
Evaluación de la Erosión Hídrica.....	46
Delimitación de la cuenca hidrográfica.....	47
Erosividad de las precipitaciones – Factor (R)	47
Erodabilidad del suelo – Factor (K).....	53
Influencia Longitud – pendiente – Factor (LS).....	57
Longitud del terreno de la cuenca hidrográfica del río Combeima.....	60
Cálculo del factor LS de la cuenca hidrográfica del río Combeima.	61
Cálculo del factor (C) – Efecto de la cobertura vegetal en la pérdida de suelo	63
Multiplicación de capas ráster (calculadora ráster).....	67
6. RESULTADOS.....	70
6.1. Erosión Actual.....	70
6.2. Erosión potencial.....	72
6.3. Discusión.....	75
7. CONCLUSIONES	78
8. RECOMENDACIONES.....	80
BIBLIOGRAFÍA	82

LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. MAPA DE GEOLOCALIZACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.....	34
ILUSTRACIÓN 2. UNIDADES GEOLÓGICAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.....	36
ILUSTRACIÓN 3. UNIDADES TAXONÓMICAS DE SUELO PRESENTES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA	40
ILUSTRACIÓN 4. MAPA DE PROVINCIAS CLIMÁTICAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.....	45
ILUSTRACIÓN 5. ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS EN INMEDIACIONES DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.	48
ILUSTRACIÓN 6. ERROR MEDIO CUADRÁTICO KRIGING.....	51
ILUSTRACIÓN 7. ERROR MEDIO CUADRÁTICO RADIAL BASIS FUNCTIONS.	52
ILUSTRACIÓN 8. FACTOR (R) EROSIVIDAD DE LAS PRECIPITACIONES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.	52
ILUSTRACIÓN 9. FACTOR (K) ERODABILIDAD - PARA CADA UNA DE LAS UNIDADES DE SUELO PRESENTES EN LA CUENCA DEL RÍO COMBEIMA.....	57
ILUSTRACIÓN 10. MAPA DEL FACTOR LS PARA LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.....	63
ILUSTRACIÓN 11. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE COBERTURAS NATURALES Y SEMINATURALES DE LA CUENCA.	64
ILUSTRACIÓN 12. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE MÁXIMA VEROSIMILITUD DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.	65
ILUSTRACIÓN 13. MOSAICO DE IMÁGENES SATELITALES (SENTINEL 2A).	66
ILUSTRACIÓN 14. MAPA FACTOR (C) EFECTO DE LA COBERTURA VEGETAL EN LA PÉRDIDA DE SUELO EN LA CUENCA.....	67
ILUSTRACIÓN 15. INTERFAZ DE EXTENSIÓN "MAP CALCULATOR" DE ARCGIS PRO 2.7. .	68
ILUSTRACIÓN 16. ESQUEMA DE MULTIPLICACIÓN DE CAPAS EN FORMATO RÁSTER.	69
ILUSTRACIÓN 17. EROSIÓN ACTUAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA...	70
ILUSTRACIÓN 18. EROSIÓN POTENCIAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.	73

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. METODOLOGÍA APLICADA DURANTE EL PROCESO DEL CÁLCULO DE EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL Y ACTUAL DE LA CUENCA.	32
TABLA 2. CONFORMACIÓN DE UNIDADES GEOLÓGICAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA [36].	35
TABLA 3. UNIDADES TAXONÓMICAS Y GÉNEROS DE SUELO PRESENTES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICAS DEL RÍO COMBEIMA [39].	38
TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE CALDAS. PISOS TÉRMICOS [40].	41
TABLA 5. GRADO DE HUMEDAD – MÉTODO LANG [40].	41
TABLA 6. PROVINCIAS CLIMÁTICAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA [42].	44
TABLA 7. VALORES DE PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL Y MEDIA ANUAL DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS EN INFLUENCIA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.	49
TABLA 8. ÍNDICE MODIFICADO DE FOURNIER [44]. PARA CADA UNA DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.	50
TABLA 9. CLASES DE EROSIVIDAD EN LA PRECIPITACIÓN [20].	53
TABLA 10. VALORES DEL FACTOR (K) ERODABILIDAD SEGÚN TEXTURA DEL SUELO Y PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA [47].	54
TABLA 11. VALORES DE ERODABILIDAD, FACTOR (K) DE LAS UNIDADES DE SUELO PRESENTES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.	56
TABLA 12. RANGO DE PENDIENTES DEL TERRENO Y PORCENTAJE DE EXTENSIÓN EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.	60
TABLA 13. VALOR DE "R" PARA CADA UNA DE LAS COBERTURAS NATURALES O SEMINATURALES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.	61
TABLA 14. VALOR DEL SUBFACTOR "L" PARA CADA UNO DE LOS RANGOS DE PENDIENTE EXISTENTES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.	62
TABLA 15. VALOR DE "LS" PARA CADA UNO DE LOS RANGOS DE PENDIENTE PRESENTES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COMBEIMA.	62
TABLA 16. FACTOR (C) PARA DISTINTOS TIPOS DE COBERTURA NATURAL Y SEMINATURAL [51].	66
TABLA 17. EXTENSIÓN (HA) DEL TERRENO AFECTADA POR LA EROSIÓN HÍDRICA ACTUAL Y, CLASIFICADA POR RANGOS (TON*HA*AÑO) EN LA CUENCA.	71
TABLA 18. EXTENSIÓN (HA) DEL TERRENO AFECTADA POR LA EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL Y, CLASIFICADA POR RANGOS (TON*HA*AÑO) EN LA CUENCA.	74

LISTA DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. EXTENSIÓN (HA) DEL TERRENO AFECTADA POR LA EROSIÓN HÍDRICA ACTUAL Y, CLASIFICADA POR RANGOS (TON*HA*AÑO) EN LA CUENCA.....	72
GRÁFICA 2. EXTENSIÓN (HA) DEL TERRENO AFECTADA POR LA EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL Y, CLASIFICADA POR RANGOS (TON*HA*AÑO) EN LA CUENCA.....	74

GLOSARIO

Cuenca hidrográfica: Es una unidad geográfica e hidrológica. Está compuesta por drenajes naturales siendo uno de ellos el principal y siendo esta acotada por los bordes o también llamadas cuchillas; al ser drenaje, como su palabra lo indica, este drena de manera natural hacia otra superficie de agua o el océano. En una cuenca hidrográfica no sólo existen aspectos naturales, también podemos encontrar el factor socioeconómico.

Deforestación: Es el cambio de una cobertura natural provista de vegetación dada la eliminación de estos individuos. Este proceso puede realizarse de manera natural o antrópica.

Erosión: Es el cambio, desprendimiento o modelado de una superficie por efecto del rozamiento de otra. En nuestro caso, es el desprendimiento de partículas de suelo por efecto del agua. Existen diferentes tipos de erosión, estos pueden ser naturales o antrópicos.

Estaciones hidro-climatológicas: Es un conjunto de instrumentos de medición ubicados en una misma zona, con el fin de medir fenómenos atmosféricos de una región específica. La cantidad de sus instrumentos puede variar, así como los fenómenos que son capaces de medir. En nuestro caso, utilizamos mediciones de pluviómetros.

Geoestadística: Es una rama de la estadística que se encarga de la modelación y el análisis de la variación geográfica de fenómenos. Debido a que estos fenómenos poseen una componente espacial, la geoestadística nos puede brindar datos referidos a locaciones en las cuales es imposible obtener datos o simplemente estos no existen.

Imagen ráster: Es una imagen cuya información está contenida en un conjunto de celdas del mismo tamaño. Estas celdas se encuentran ordenadas en filas y columnas. Cada celda posee un valor, Este mismo valor puede pertenecer a un mismo grupo de celdas. Dentro de una imagen ráster podemos encontrar un sin número de celdas con distinto valor.

Mapa temático: Son elaborados con el fin de ilustrar uno o varios aspectos de una región específica. En el pueden ser graficados aspectos físicos, sociales, ambientales, económicos, políticos, seguridad, etc.

Pendiente: Es la inclinación o desnivel con respecto a un plano horizontal o el ángulo que forma una línea horizontal con el plano tangente de la superficie del terreno.

Pluviómetros: Esta herramienta cuantifica la cantidad de precipitación que ha caído en una zona o región, en una cantidad de tiempo. Generalmente la medida arrojada por este instrumento de medición en milímetros (mm).

Precipitación: Es un fenómeno que hace parte del ciclo hidrológico del agua. Esta se encuentra en estado gaseoso en la atmósfera y dadas algunas condiciones en la atmósfera como vientos, diferencias de presión y temperatura, el vapor se condensa, formando gotas de agua para después precipitarse a la superficie terrestre u océanos por efecto de la gravedad.

Plataforma satélite: Como su nombre lo indica, es una superficie cuyo objetivo el albergar o contener objetos. Esta es lanzada desde la superficie terrestre con ayuda de un vehículo con la propulsión necesaria para vencer la gravedad de la tierra. Al salir a las capas más lejanas de nuestra atmósfera (dependiendo del uso de los elementos que vaya a transportar la plataforma), adquiere su objetivo final, el cual es seguir una ruta alrededor de nuestro planeta (órbita).

Remoción en masa: Es como su nombre lo indica, el movimiento de inclinación de una masa de suelo, tierra o roca. Estos movimientos son cuesta abajo por efecto de la gravedad y pueden ser causados por otros factores.

Sensor: Es una herramienta, dispositivo o sentido (ser vivo) que capta magnitudes o algunas variaciones de su entorno. Estos pueden estar anclados o no a algunas plataformas.

Sistemas de información Geográfica: Es un conjunto de herramientas de análisis las cuales nos permiten realizar relaciones espaciales de las diferentes temáticas que se estudian a nivel mundial. Mediante estos sistemas podemos realizar toma de información, realizar su organización, procesamiento, análisis y finalmente, toma de decisiones.

RESUMEN

En el presente trabajo, se evaluaron mediante los sistemas de información geográfica (SIG) y el modelo de erosión RUSLE, la erosión hídrica potencial y actual de la cuenca hidrográfica del río Combeima. Para realizar el análisis, se recolectó información secundaria, siendo esta sometida a procesos matemáticos y estadísticos. Esta información comprende datos de ocho estaciones hidroclimatológicas ubicadas en la zona, características de los suelos y sus horizontes diagnósticos, inclinación o pendiente y tipo y porcentaje de cobertura vegetal. El modelo de erosión RUSLE comprende en general cinco factores: Factor R: erosividad de las lluvias, factor K: erodabilidad del suelo, factor LS: longitud e inclinación de la pendiente del terreno, factor C: porcentaje de vegetación según sea su tipo y, por último, el factor P: Prácticas de conservación. Este último no fue incluido debido a la ausencia de estas prácticas en la cuenca. Una vez se reunieron los análisis de cada uno de los factores, se realizó una operación en la calculadora ráster, en la extensión de *Spatial Analys Tools*, multiplicando los resultados de cada factor para obtener un mapa de erosión en la cuenca. El resultado arrojó que actualmente existen lugares con índices críticos de erosión llegando a 660.96 ton*ha*año, y que potencialmente esta cantidad podría alcanzar las 680.8 ton*ha*año. Las zonas de asentamiento poblacional dentro de la cuenca presentan los índices más altos de erosión debido al cambio de uso del suelo. Es inminente realizar programas sociales de sensibilización en el cambio de uso del suelo y la deforestación dentro de la cuenca, como también aplicar planes de protección a las áreas sensibles identificadas.

PALABRAS CLAVES: Cuenca, SIG, RUSLE, Erosión, Suelo, Conservación.

ABSTRACT

In the present work, the potential and current water erosion of the Combeima river basin was evaluated using Geographic Information Systems (GIS) and the RSULE Erosion Model. To carry out the analysis, secondary information was collected, being submitted to mathematical and statistical processes. This information includes data from eight hydro-climatological stations located in the area, characteristics of the soils and their diagnostic horizons, inclination or slope of the terrain, and type and percentage of vegetation cover. The RUSLE Erosion Model generally comprises five factors: R factor: rainfall erosivity, K factor: soil erodibility, LS factor: length and steepness of the terrain slope, C factor: percentage of vegetation according to its type and, finally, the P factor: Conservation practices. The latter was not included due to the absence of local watershed management. Once the analyzes of each of the factors were gathered, an operation was carried out on the Raster Calculator, in the extension of Spatial Analyst Tools, multiplying the results of each factor to obtain an erosion map in the watershed. The result allowed to determine that currently, there are places suffered from critical erosion rates reaching 660.96 tons*ha*year, and, potentially, this amount could reach 680.8 tons*ha*year. The areas of human settlement located within the watershed present the highest rates of erosion due to changes in land use. It is imminent to promote social awareness programmes on land use change and deforestation of watershed, as well as implement protection plans in the identified sensitive areas.

KEY WORDS: Basin, GIS, RUSLE, Erosion, Soil, Conservation.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una realidad. Nos encontramos ante grandes cambios que están ocurriendo alrededor del mundo y, sin embargo, estamos dando el último a un estado irreversible para la vida en nuestro planeta. Se habla de que, al parecer, la tierra entra en un proceso de cambio cada 20000 años, pero todo indica que estamos acelerando dicho proceso con nuestras actividades sobre la naturaleza. La deforestación de los bosques con el objetivo de ampliar la frontera agrícola y ganadera, la contaminación de las aguas y los gases de efecto invernadero, han sido un gran problema a nivel mundial. Estos procesos han desencadenado cambios en procesos climáticos como lluvias, nevadas, temperaturas extremas, fortaleza y anomalías en el comportamiento de distintos fenómenos naturales: Aumento en la frecuencia y extensión de temporada de huracanes, fuertes nevadas en regiones boreales, nevadas y granizadas en lugares donde jamás se han registrado dichos fenómenos y variación en temporadas e intensidad de las precipitaciones.

La erosión es un fenómeno de remoción de material por efecto de rozamiento de otro cuerpo o fluido. Actualmente, alrededor del mundo, este fenómeno persiste en grandes y pequeñas cantidades y mínimas o grandes extensiones; puede ser causado por el agua (erosión hídrica) o por el viento (erosión eólica). La causa de ello está relacionada en su mayoría debido a la modificación de las coberturas de la tierra.

La cuenca hidrográfica el río Combeima no es ajena a este problema. Hoy en día, a causa del crecimiento poblacional, la frontera agrícola y ganadera se ha ido expandiendo, llevando consigo la modificación de coberturas naturales. Estos cambios han favorecido la disminución de la protección del suelo por parte de la capa vegetal. Además de la deforestación de bosques, cambios en las coberturas naturales y la erosión que esto genera, el material particulado que cae a la cuenca

principal, de la cual se toma el líquido vital para abastecer a la ciudad de Ibagué, hace colapsar la bocatoma del acueducto, generando grandes problemas públicos en el servicio.

En el presente trabajo, observaremos el comportamiento de la erosión hídrica por efecto de la precipitación en la cuenca hidrográfica del Río Combeima, en el municipio de Ibagué, capital del departamento del Tolima. Analizaremos distintos factores como la precipitación, la erodabilidad, la pendiente y el porcentaje de la capa de vegetación de la cuenca. Combinaremos estos resultados para generar dos salidas cartográficas, en las cuales observaremos y analizaremos la erosión actual y erosión potencial en la cuenca. Finalmente, concluiremos acerca de estos procesos que allí se están llevando a cabo y, daremos las recomendaciones necesarias desde el punto de vista de la conservación y el uso y manejo sostenible del suelo y las coberturas naturales.

En el presente estudio, evaluamos la erosión hídrica potencial y actual de cuenca hidrográfica del río Combeima. Teniendo algunos factores como lo es la lluvia, el suelo, la morfología de este y la cobertura vegetal de la cuenca, se busca establecer como inciden estos factores.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

Las dinámicas terrestres y del clima han sido constantes desde la génesis de nuestro mundo. Aunque en aquellos tiempos, los cambios solían ser más pronunciados, hoy en día y por más mínimas que sean, estas variaciones provocan grandes cambios. El cambio climático es un hecho. Innumerables variables, lugares y ecosistemas dan evidencia de ello; incremento de la temperatura, duración y magnitud de fenómenos meteorológicos, aumento en el nivel del océano, migración y extinción de organismos, causando pérdida de biodiversidad en los ecosistemas. La erosión es un proceso natural que genera la degradación del suelo, haciendo que este pierda características esenciales como nutrientes, profundidad, materia orgánica etc. La acción antrópica ha acelerado estos procesos, creando y/o acentuando problemas ambientales, culturales, sociales y económicas. Alrededor del mundo el principal problema que ha acrecentado la pérdida de los suelos es la expansión agrícola y ganadera, ya que esta actividad precisa de extensiones de tierra libres de cobertura boscosa. Colombia no es foránea a esta situación, ya que el 40% de los suelos del área continental e insular del país correspondiente a 45'379.057 hectáreas, están afectadas por algún grado de erosión, 2.9% presenta erosión severa y muy severa en 3'334.594 ha, 16.8% erosión moderada en 19.222.575 ha, 20% erosión ligera en 22.821.889 ha, según datos entregados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.

La cuenca del río Combeima, en inmediaciones del municipio de Ibagué, en el departamento del Tolima, es de suma importancia para la región, brindando el preciado líquido desde su nacimiento en las cumbres de su volcán nevado, hasta la desembocadura en el río Coello. Esta cuenca se encuentra comprendida por diferentes unidades geológicas como lo son el batolito de Ibagué que procede del Intrusivo Jurásico, abanico de Ibagué que procede del Cuaternario, depósitos Aluviales que procede del Cuaternario y depósitos Coluviales o de ladera, también procediendo del Cuaternario. Aunque en términos geológicos estas unidades no son tan antiguas como por ejemplo la unidad Cajamarca, la cual procede del paleozoico

y posee rocas con alto grado de metamorfismo, haciendo estos terrenos muy inestables y propensos a movimientos en masa; las unidades que componen la cuenca del río Combeima poseen rocas metamórficas y sedimentarias de fácil meteorización haciendo estas áreas proclives a la erosión. La ciudad de Ibagué y algunas de sus veredas, mediante sus respectivos acueductos, captan el agua del río, sin embargo, actualmente existe un gran problema; al configurarse un evento hidrológico en la parte alta de la cuenca y la deforestación existente en ella creando suelos desnudos, se generan avenidas torrenciales las cuales generan un incremento sustancial en el caudal del río Combeima, generando así gran cantidad de partículas en suspensión y en casos extremos, arrastre de material es de gran tamaño provocando el cierre temporal de la bocatoma del acueducto.

En consideración de lo anterior mencionado, lo ideal sería encontrar una solución a esta problemática que aqueja a los habitantes de la ciudad de Ibagué. ¿Cómo podríamos mediante la evaluación de la pérdida de suelo a través de sistemas de información geográfica y modelos de erosión, predecir qué áreas de la cuenca son proclives a estos fenómenos?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar mediante los sistemas de información geográfica y el modelo de erosión RUSLE, las áreas de la cuenca hidrográfica del río Combeima que actualmente son proclives a fenómenos de remoción en masa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las áreas sensibles a la erosión en la cuenca hidrográfica.
- Crear una base de datos espaciales con información de variables de la cuenca hidrográfica y de las estaciones hidro-climatológicas allí presentes.
- Desarrollar y modelar los parámetros como: pendiente, usos del suelo, tipos de suelo y condiciones climáticas, para la determinación de la erosión hídrica de la cuenca hidrográfica del río Combeima.
- Elaborar conclusiones y recomendaciones, esta últimas expuestas en un ámbito de gestión del riesgo por remociones en masa dentro de la cuenca

3. JUSTIFICACIÓN

La cuenca hidrográfica del río Combeima se encuentra en el municipio de Ibagué. Su afluente es alimentado por la fusión constante de las nieves perpetuas y el aporte de arroyos y quebradas. Esta cuenca se encuentra presente dentro de algunas unidades geológicas, las cuales, dentro de sus características, se han encontrado rocas de fácil meteorización; sumado a esto, el sitio posee una característica especial en sus factores climáticos: configura fenómenos de precipitaciones de grandes intensidades y poca duración, haciendo que los afluentes incrementen el caudal de sus aguas en poco tiempo, formando avenidas torrenciales. La deforestación presente en la cuenca, dada la conversión y el cambio del uso del suelo, facilita e incrementa estos fenómenos naturales. Estos fenómenos mencionados anteriormente aumentan la cantidad de partículas en suspensión, provocando el cierre de la bocatoma del acueducto de la ciudad y por ende la restricción temporal del servicio.

La realización de este trabajo busca evaluar las áreas proclives a la erosión y a la remoción en masa, delimitarlas, generar dos mapas de erosión actual y potencial, y así mismo, recomendar acciones y/o medidas de restauración y protección de estos suelos.

4. REFERENTE TEÓRICO

4.1 CUENCA

4.1.1. Cuenca hidrográfica. Se entiende por cuenca u hoya hidrográfica “el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor, que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de agua, en un pantano o directamente en el mar” en [1]. El anterior concepto, puede entenderse como meramente hidrográfica.

“Una hoya o cuenca hidrográfica se puede concebir como un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple” en [2]. Durante el proceso anteriormente descrito, se generan pérdidas de agua. Por ejemplo, la evapotranspiración inicia una vez ha comenzado el proceso de precipitación. La cuenca hidrográfica no es propiamente plana, en ella existen depresiones y/o accidentes geográficos en los cuales, el agua puede quedar acumulada para luego ser evaporada o infiltrarse en el suelo o roca.

“También, en el proceso de infiltración, al penetrar el agua en el suelo sigue diversos caminos, quedando almacenada temporalmente en dicho medio; de ahí, por medio del proceso de percolación, continúa a estratos más profundos, formando el nivel freático, o se mueve lateralmente como escorrentía subterránea, y puede surgir 58 superficialmente como fuente de escorrentía superficial o, según la localización de la divisoria del nivel freático, escurrir hacia otra cuenca” [3].

Otro concepto acuñado por [4] “La cuenca hidrográfica es una unidad natural claramente delimitada por los divisores topográficos, y definida territorialmente por una superficie común de drenaje, donde interactúan los factores físicos, biológicos y humanos, para conformar un mega sistema socio–ecológico”.

4.2 SUELO

El suelo es un componente fundamental de ambiente, natural y finito, constituido por minerales, aire, agua, materia orgánica, macro y microorganismos que desempeñan procesos permanentes de tipo biótico y abiótico, cumpliendo funciones vitales para la sociedad y el planeta [5].

Si miramos el suelo desde un ámbito científico, pedológico y edáfico, el USDA (United States Department of Agriculture) por sus siglas en inglés, define el suelo como “el medio natural para el desarrollo de las plantas terrestres ya sea que tenga o no horizontes discernibles”. Este mismo instituto norteamericano define el suelo como “un cuerpo y sistema natural que comprende sólidos (Minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en la superficie de la tierra, que ocupa un espacio y que caracteriza por uno o ambos de los siguientes: horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas transferencias y transformaciones de energía y materia o por la habilidad de soportar plantas enraizadas en un ambiente natural” [6].

"un área delineable que reúne todos los atributos de la biósfera inmediatamente por encima o por debajo de la superficie terrestre, incluyendo el suelo, el terreno, la superficie hidrológica, el clima cerca de la superficie, los sedimentos y las reservas de agua asociadas, los recursos biológicos, así como los modelos de establecimientos, humanos y la infraestructura resultante de las actividades humanas"

4.2.1. Importancia y funciones del suelo. El suelo proporciona una gran variedad de servicios ecosistémicos que incluyen la provisión de alimentos, fibras y recursos genéticos, la moderación del ciclo hidrológico y climático, el soporte físico para las plantas, la retención y oferta de nutrientes para la vegetación, el procesamiento de desechos y materia orgánica muerta, el mantenimiento de la fertilidad edáfica, los servicios de soporte relacionados con la formación de suelos y los ciclos bioquímicos, la regulación del hábitat para una cantidad enorme de organismos que

realizan algunas de estas funciones [7]. Así, por ejemplo, se estima que el contenido de carbono orgánico es 1,5 veces mayor al acumulado en la biomasa aérea (por encima del suelo), lo que lo convierte en el almacén de carbono más importante entre los sistemas terrestres [8].

El suelo, como capa superior de la corteza terrestre, desempeña una serie de funciones claves tanto ecológicas como sociales y económicas, que resultan fundamentales para la vida. La capacidad de almacenaje, filtración, amortiguación y transformación convierte al suelo en uno de los principales factores para la protección del agua y el intercambio de gases con la atmósfera. Además, constituye un hábitat y una reserva genética, un elemento del paisaje y del patrimonio cultural, así como la fuente principal de materias primas y alimento [9].

El suelo constituye la base, en más del 90%, de la producción de alimentos, forraje, fibras y combustible, y desempeña otras funciones ecosistémicas vitales. Este participa en la dimensión espacial del desarrollo de los asentamientos humanos: la construcción de viviendas e infraestructuras, instalaciones recreativas y de eliminación de residuos. El suelo es una parte esencial del paisaje, conserva los restos del pasado y es un elemento importante del patrimonio cultural. Sin embargo, es un recurso limitado y no renovable (a escala humana), y a diferencia de lo que ocurre con el aire y con el agua, el suelo no se recupera con facilidad de los daños que se le ocasionan [10].

4.2.2. Degradación del suelo. La degradación de los suelos es entendida como “la reducción en su capacidad para proporcionar bienes y servicios del ecosistema y garantizar sus funciones durante un periodo de tiempo para sus beneficiarios” [11]. También, puede entenderse “como el resultado de la acción de un conjunto de factores de índole tanto biofísica como antrópica que desencadenan procesos de alteración de cualidades y características de la tierra, entendiendo dentro de este concepto al conjunto de suelos, coberturas vegetales, fauna asociada y dotaciones de agua que existen dentro de determinados paisajes fisiográficos” [12]. Según la Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación y la

Sequía (UNCCD), la degradación de tierras se define como la incapacidad del recurso para sostener adecuadamente las funciones ecológicas y/o económicas originales del suelo, a partir de causas naturales o antrópicas [13], [14].

La degradación de los servicios que prestan los ecosistemas responde a muchas causas, entre ellas, la demanda excesiva de tales servicios producto del crecimiento económico, los cambios demográficos y las elecciones individuales [15].

4.3. EROSIÓN

El término "erosión" proviene del latín *erosiō, -ōnis*, que significa roedura. El diccionario de la Real Academia Española define este término como "1. desgaste o destrucción producidos en la superficie de un cuerpo por la fricción continua o violenta de otro", o como "2. desgaste de la superficie terrestre por agentes externos, como el agua o el viento" [16].

La erosión es el desprendimiento y arrastre de las partículas del suelo principalmente por acción del agua y el viento [17].

Los factores que influyen en las tasas de erosión son la energía, resistencia y protección [18].

El principal daño que causa la erosión es la pérdida del suelo. Sin embargo, existen otros daños indirectos que este proceso causa, como lo menciona Vásquez en 1983 y citado por [17].

4.3.1. Erosión hídrica. La erosión hídrica es el arrastre de las partículas de la superficie del suelo por el agua. Aunque sucede sin necesidad de actividades antrópicas, su efecto sí es incrementado por el deterioro de la cobertura vegetal, causada por el hombre [19].

Los siguientes son los factores que conllevan a la erosión hídrica [20].

- El tipo de vegetación
- El desarrollo de esta a través del año
- El porcentaje de cobertura
- La rugosidad del terreno
- Las condiciones de la superficie del suelo.

La erosión hídrica consta de tres fases: primero, el desprendimiento de las partículas por salpicadura de las gotas de agua; segunda, el arrastre de estas por las escorrentías hídricas debido a la saturación de humedad del suelo; y tercero, su posterior depósito en ríos, lagos o mares al ceder las fuerzas de la gravedad [18].

4.3.2. Evolución de los modelos de estimación de Erosión Hídrica. Los modelos de estimación de la erosión hídrica y evaluación de las pérdidas de suelo comenzaron con las investigaciones del Forest Service de USA (1915) y de M.F. Miller (1917), al analizar los efectos de distintos tipos de cobertura vegetal y la rotación de cultivos sobre escorrentías y la erosión en parcelas experimentales. Estos estudios se complementaron con la investigación de la importancia del impacto de la gota de lluvia sobre el suelo desnudo, hecha por Laws (1940) y Ellison (1947). El primer modelo que consideró de manera conjunta los parámetros de la cubierta vegetal, (C), longitud de la pendiente (L), la inclinación de la pendiente (S), el valor de la precipitación (P30), así como la erodabilidad del suelo (e) fue el de Musgrave desarrollado en 1947. El Forest Service y el Soil Conservation Service trabajaron durante cuarenta años aproximadamente para mejorar los métodos previos, dando como resultado el modelo del USLE (Universal Soil Loss Equation), desarrollada principalmente por Wischermeier y Smith en 1978 [19].

“El modelo USLE evolucionó conforme se desarrollaron investigaciones y prácticas de estimación de la erosión, generando así el RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Aunque basado en la misma fórmula, este método varía del USLE en: una aproximación que toma en cuenta la variación temporal en el cálculo del factor K; una nueva ecuación para calcular el factor LS; una aproximación subfactorial para

evaluar el manejo de la vegetación, nuevos valores a las prácticas de conservación” [21] citado por [19].

El modelo RUSLE en la actualidad:

$$E = R * K * LS * C$$

- El Factor R representa la erosividad de la lluvia en función de la energía cinética de la precipitación;
- El Factor K equivale la erodabilidad del suelo;
- El Factor LS mide el efecto de la longitud y la magnitud de la pendiente;
- El Factor C expresa el valor de la cobertura vegetal.

4.4. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Un Sistema de Información Geográfica es un contiguo de herramientas con las cuales podemos tomar información, almacenarla, procesarla, analizarla y visualizarla para generar un sin número de productos útiles para planeación, gestión, solución y toma de decisiones en gran parte de las ramas de la ciencia.

“Un Sistema de información Geográfica es un conjunto de datos, medios y actividades, así como las relaciones entre estos distinto elementos, que permiten un adecuado tratamiento de la información” [22]. Es una “caja de herramientas” [23] Que permite capturar, almacenar, procesar, analizar y visualizar datos del mundo real.

Los Sistemas de Información Geográfica son herramientas, entonces que permiten utilizar diversas técnicas de procesamiento de información espacial. La base de un

SIG es una serie de capas de información espacial en formato digital que representan diversas variables (Ya sea en formato ráster o vectorial) [24].

“Los datos son la representación concreta de hechos y constituyen el antecedente necesario para el conocimiento. La información se obtiene para una finalidad determinada y es fruto de un proceso interpretativo” [25].

4.4.1. Teledetección espacial. La “observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la teledetección. (...) ideado a principios de los 60 para designar cualquier medio de observación remota, si bien se aplicó fundamentalmente a la fotografía aérea, principal sensor de aquel momento. (...) la teledetección no engloba sólo procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o el espacio, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación” [26].

“Hemos definido a la teledetección espacial como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, estamos suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia. A su vez, es necesario que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada, pueda almacenarse y, en última instancia, ser interpretada para una determinada aplicación” [26].

Un sistema de teledetección espacial incluye los siguientes elementos [26]:

- Fuente de energía, que supone el origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por éste (teledetección activa). La fuente de energía más importante obviamente es la energía solar.

- Cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía, y refleja o emiten de acuerdo con sus características físicas.
- Sistema sensor, compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- Sistema de recepción-comercialización, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado y, tras las oportunas correcciones, se distribuye a los intérpretes.
- Intérprete, quien analiza esa información normalmente en forma de imágenes analógicas o digitales, convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio.
- Usuario final, encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

4.4.2. Análisis estadísticos (Método “Kriging”). Las herramientas de interpolación IDW (distancia inversa ponderada) y “Spline” se conocen como métodos determinísticos de interpolación porque están basados directamente en los valores medidos o en fórmulas matemáticas específicas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Hay una segunda familia de métodos de interpolación que consta de métodos geoestadísticos, como “Kriging”, que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no sólo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones [27].

“*Kriging*” presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta “*Kriging*” ajusta una función matemática a un número específico de puntos o a todos los puntos dentro de un radio especificado, para determinar el valor de salida para cada ubicación. “*Kriging*” es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos. Se utiliza a menudo en la ciencia del suelo y la geología [27].

4.4.3. Mapas temáticos. Conforme hemos avanzado en distintas áreas del conocimiento, así mismo ha avanzado la cartografía. Hoy en día podemos agrupar una cantidad ilimitada de información espacial para uno o más fines y esto, representarlo en una visión de la realidad. Le podemos llamar mapa temático a un grupo de variables o capas, que pueden representar un fenómeno o cualquier tipo de información cualitativa y “su objetivo es la representación gráfica de los patrones y relaciones espaciales, en la medida en que es posible relacionarlos con el espacio geográfico y transformarlos en símbolos cartográficos” [28]. Así como también “comunicar información geográfica y servir de soporte para la resolución de problemas” [23].

“Los mapas temáticos, se centran en las variaciones espaciales y en la forma de un solo atributo o en la relación existente entre varios” [29].

4.5 ANTECEDENTES

4.5.1. Afectación al bosque natural. “El grado de afectación de los bosques naturales para esta región es alto, debido principalmente al empleo de prácticas

inadecuadas de producción como son la tala, la quema, la fertilización y la fumigación. También el impacto al suelo y al recurso hídrico de los ecosistemas es alto, debido al aporte de las trazas de los químicos empleados en las labores de fumigación y fertilización agrícola, sin embargo el desarrollo de las actividades agropecuarias sigue siendo la constante productiva de la región” [30].

“El bosque natural del Municipio ha sufrido una fuerte presión por la implementación de prácticas productivas inadecuadas e insostenibles en el manejo de los recursos naturales, por ejemplo la tumba, el repique y la quema de las áreas boscosas para ampliar la frontera agropecuaria, incrementan la deforestación del bosque, repercutiendo en la degradación de los suelos y favoreciendo su erosión, así como también destruyendo el hábitat de las especies, estimulando la migración de los animales y la extinción de la vegetación” [30].

“La explotación del bosque a causa de la extracción ilegal de la madera para la elaboración de tableros, postes, pisos, chapados y madera aserrada en general, y su venta en los mercados nacionales e internacionales, ha constituido también un factor importante en la extinción de las especies del bosque natural. Las especies maderables comerciales son apetecidas por este tipo de industria que no respeta los diámetros mínimos de corta (40 cm de DAP), disminuyendo los periodos de aprovechamiento y cosecha de la madera del bosque” [30].

4.5.2. Mitigación de impactos. “La zona delimitada y propuesta como Parque Natural Regional, es una estrella hídrica de importancia regional y en la actualidad no quedan áreas nuevas aptas para una producción sostenible de productos agropecuarios en el área, debido a las condiciones climatológicas, topográficas y del suelo. Al contrario, existen muchas áreas ya taladas que en realidad deben tener una cobertura boscosa permanente” [31].

“Con el ánimo de mitigar este impacto negativo ocasionado sobre los recursos vegetales del Departamento y favorecer su conservación y protección, la Corporación Autónoma Regional del Tolima CORTOLIMA expidió el Acuerdo No.

003 de 1994, por medio del cual se suspende la expedición de permisos de aprovechamientos forestales persistentes y únicos, dentro del departamento del Tolima. En el mencionado Acuerdo, el artículo primero prohíbe la tala de árboles de bosque natural en todo el departamento del Tolima, y el artículo segundo suspende la expedición de permisos de aprovechamiento forestal persistente y único en el Departamento, a partir de la fecha de expedición del acuerdo y exceptuando algunas situaciones. También se tienen en cuenta otras disposiciones” [30].

4.5.3 Composición florística de la cuenca. “Por otro lado, los reportes y listados de especies forestales provenientes de inventarios estadísticos y censos de los bosques del municipio son pocos, básicamente los elaborados por las instituciones de investigación y control como la Universidad del Tolima y la Corporación Autónoma Regional CORTOLIMA, son las bases de datos que, con rigurosidad técnica y científica, representan la composición y estructura de las especies existentes en el bosque. Estos listados de especies son producto del levantamiento de las caracterizaciones de los componentes bióticos en los planes de manejo ambiental de los predios adquiridos por el Municipio, la universidad y otras instituciones (IBAL, Asocombeima, CORTOLIMA, Alcaldía Municipal de Ibagué, la Sociedad Civil, entre otros); así como también en la elaboración de otros estudios técnicos como por ejemplo el Plan General de Ordenación de Forestal del Departamento del Tolima (2007)” [30].

“Durante la revisión de los listados de la composición florística en los estudios mencionados, fueron identificadas algunas especies forestales que se encuentran en las categorías de amenaza o peligro de extinción, de las listas rojas definidas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza - IUCN. En este sentido el Libro Rojo de Plantas de Colombia Volumen 4. Especies Maderables Amenazadas de Colombia, elaborado por el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial y el Instituto Amazónico de Investigación Científica SINCHI, recoge los criterios de definición de las categorías de amenaza de la UICN y los

adopta a nivel nacional, con el fin de constituir una herramienta útil para la identificación taxonómica, la descripción de usos y la formulación de lineamientos estratégicos de conservación para algunos grupos de plantas que se encuentran en una situación grave de explotación” [30].

4.5.4. Remociones en masa. “La cuenca del río Combeima presenta un paisaje en general montañoso, compuesto en su parte alta por rocas y depósitos de origen volcánico, que desarrollaron el volcán Nevado del Tolima, clasificado como estratovolcán; este edificio volcánico es el resultado de la acumulación de capas de ceniza, lapilli y lava, durante episodios explosivos (piroclastos) y efusivos (lavas). Teniendo en cuenta que las rocas y depósitos en esta área de la cuenca presentan alta resistencia y consolidación, junto con una gran cobertura vegetal de bosques primarios, esta zona no presenta mayores problemas de inestabilidad hacia la parte media de la cuenca predominan rocas metamórficas, bastante fracturadas por fallamiento, conformadas principalmente por esquistos verdes y negros, a partir de los cuales se desarrollan suelos que suavizan los rasgos morfológicos, siendo bastante sueltos y permeables, facilitando la ocurrencia de movimientos en masa y flujos torrenciales generando abanicos aluviales y conos de detritos que han afectado las localidades de Juntas y Villa Restrepo” [32].

5. METODOLOGÍA

5.1 INVESTIGACIÓN APLICADA

Sin duda alguna, uno de los muchos problemas que afectan a las cuencas hidrográficas en todo el mundo, es la deforestación. Ello conlleva a otro problema llamado erosión. Nuestra investigación es aplicada. Dado que el problema de la erosión en la cuenca es de conocimiento público y está establecido. Ello nos lleva a utilizar la investigación para dar respuestas a preguntas o problemas específicos.

5.2 PROCEDIMIENTO

La metodología utilizada en el presente informe se desarrolla con base en la obtención de información temática, gráfica y alfanumérica. Una vez obtenida y procesada esta información, se presenta el modelo procesado mediante el software ArcGIS PRO 2.7.

Para la elaboración de las salidas gráficas: Mapa de erosión hídrica actual y Mapa de erosión hídrica potencial, se realizaron 7 pasos. Lo cuales están encaminados al cumplimiento del objetivo general y objetivos específicos. En la tabla 1 se puede observar el desarrollo del proceso.

Tabla 1. Metodología aplicada durante el proceso del cálculo de erosión hídrica potencial y actual de la cuenca.

Metodología	Pasos	
Elaboración de lista de base de datos de cartografía necesaria con sus diferentes soportes.	1	Revisión bibliográfica y de las diferentes técnicas utilizadas en para la ejecución de la ecuación RUSLE.
	2	Recolección de información secundaria necesaria. (Imágenes satelitales, modelos digitales de elevación, cartográfica temática digital, etc.)

Metodología	Pasos	
Metodología apropiada para el cálculo de la erosión hídrica potencial y actual mediante la ecuación RUSLE.	3	Selección de modelos matemáticos. Implementación. Herramientas y procesos SIG.
Cuantificación de cada uno de los resultados RUSLE a partir de índices, técnicas de teledetección y herramientas SIG.	4	Cálculo y análisis de variables de la ecuación RUSLE.
	5	Clasificación de la erosión hídrica potencial y actual y su zonificación.
Elaboración de productos (salidas cartográficas) para la totalidad de la cuenca del río Combeima.	6	Salidas cartográficas: Espacialización de los datos mediante el software ArcGIS PRO 2.7.
	7	Análisis de los resultados obtenidos.

Localización

La cuenca hidrográfica del río Combeima se encuentra en el centro sur occidente de la república de Colombia, sobre el flanco oriental de la cordillera central de los andes, con las siguientes extensiones geográficas: 4°39'47" y 4°19'18" Latitud norte y 75°8'49" y 75°22'32" Longitud oeste. Su extensión en superficie es de aproximadamente 27459 hectáreas. El gradiente altitudinal de la cuenca es de 4565 m tomando en cuenta el rango medido desde su parte más alta, ubicada en la cima del volcán Nevado del Tolima a 5244 m.s.n.m., hasta el vertimiento de sus aguas en el río Coello, ubicado a los 679 m.s.n.m. La cuenca se encuentra en su totalidad en el municipio de Ibagué colindando al oriente con el municipio de Anzoátegui, al occidente con la cuenca hidrográfica del río Coello.

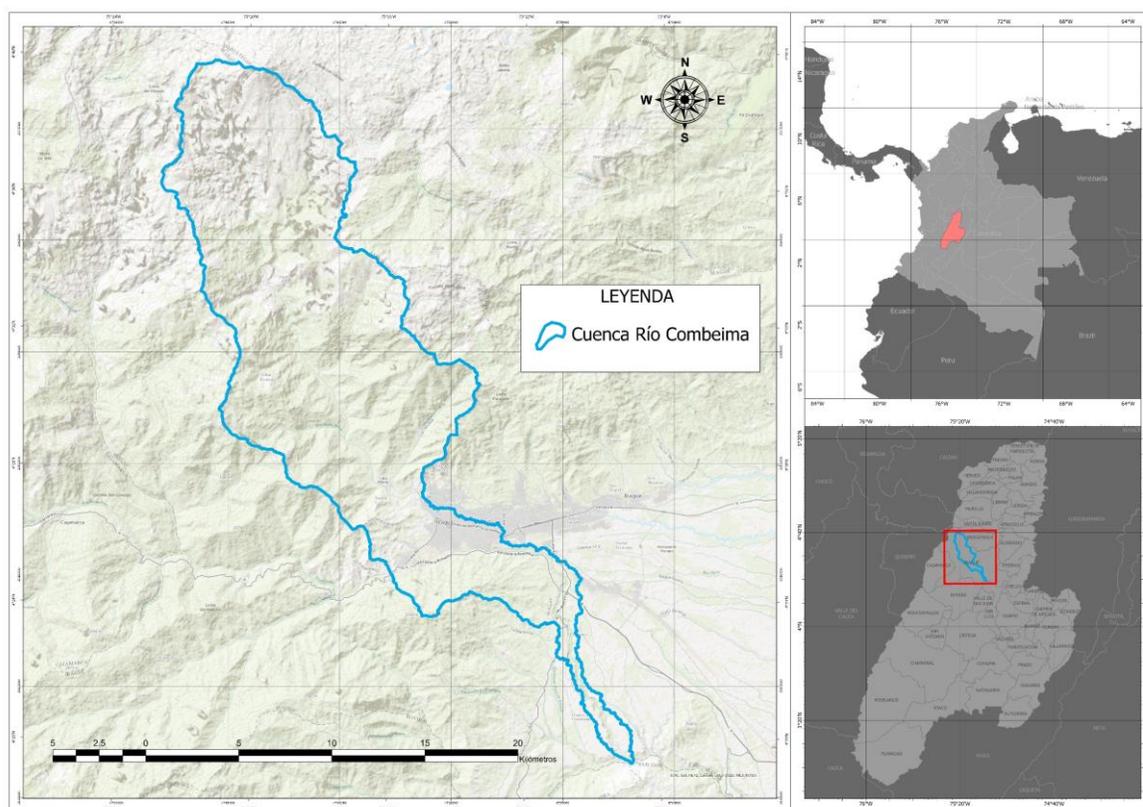


Ilustración 1. Mapa de geolocalización de la cuenca hidrográfica del río Combeima.

Fuente: Realización propia

Fuente de datos: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) [33]. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [34].

Geología

En la cuenca hidrográfica del río Combeima, encontramos 10 unidades geológicas. Ocho (8) de ellas, formadas mayormente durante las eras cenozoicas y paleozoicas, en los periodos neógeno y paleozoico inferior, respectivamente. Las restantes unidades geológicas, fueron formadas durante las eras proterozoica y mesozoica; la unidad perteneciente a esta última fue formada durante el periodo jurásico. Del área total de la cuenca hidrográfica, correspondiente a 27.45 ha, 47.16% de ella, correspondiente a 12.95 ha, fue formado durante la era paleozoico. El 36.29% del

área total de la cuenca, fue formado durante la era cenozoica. El porcentaje correspondiente para las eras mesozoica y proterozoica es de 9.76% y 6.51%, respectivamente. Un 0.26% restante, hace parte de la unidad geológica formada debajo del glaciar del volcán nevado del Tolima.

Litológicamente, la cuenca está compuesta por: esquistos cloríticos-actinolíticos con epidota y albita, esquistos de cuarzo-sericíticos con grafito, neises y anfibolitas: rocas metamórficas; batolito de Ibagué, compuesto en su mayor parte de “hornblenda y biotita” [35], rocas hipoabisales porfiríticas de composición andesítica-dacítica: rocas ígneas plutónicas o intrusivas; flujos de lava con intercalaciones piroclásticas de caída y flujo, depósitos piroclásticos de caída y flujo con intercalaciones de material: rocas ígneas volcánicas o extrusivas; Aluviones y terrazas, rocas de Santa Teresa conformadas por Lutitas y limolitas silíceas oscuras, con metamorfismo incipiente por sectores, areniscas y conglomerados ocasionales [36]: rocas sedimentarias.

Tabla 2. Conformación de unidades geológicas de la cuenca hidrográfica del río Combeima [36].

Nomenclatura	Nombre unidad geológica	Área (ha)	Porcentaje (%)
Glaciar	Glaciar	73.071	0.266
Ji	Batolito de Ibagué (131-151 Ma, K-Ar, hornblenda-biotita)	2680.990	9.763
Ngpa	Rocas hipoabisales porfiríticas de composición andesítica-dacítica	573.591	2.089
NgQacl	Abanico de Lérida	3533.600	12.868
NgQl	Flujo de lava con intercalaciones piroclásticas de caída y flujo	4934.890	17.971
NgQp	Depósitos piroclásticos de caída y flujo, con intercalaciones de material	848.070	3.088
PEnat	Neises y Anfibolitas de Tierradentro (1.360 Ma, K-Ar, roca total)	1788.040	6.512
Pzes	Esquistos cuarzo-sericíticos con grafito.	3867.230	14.083
Pzev	Esquistos cloríticos-actinolíticos, con epidota y albita	9028.300	32.878
Pzrst	Rocas de Santa Teresa	56.769	0.207
Qal	Aluviones y terrazas	75.155	0.274
Total general		27459.706	100

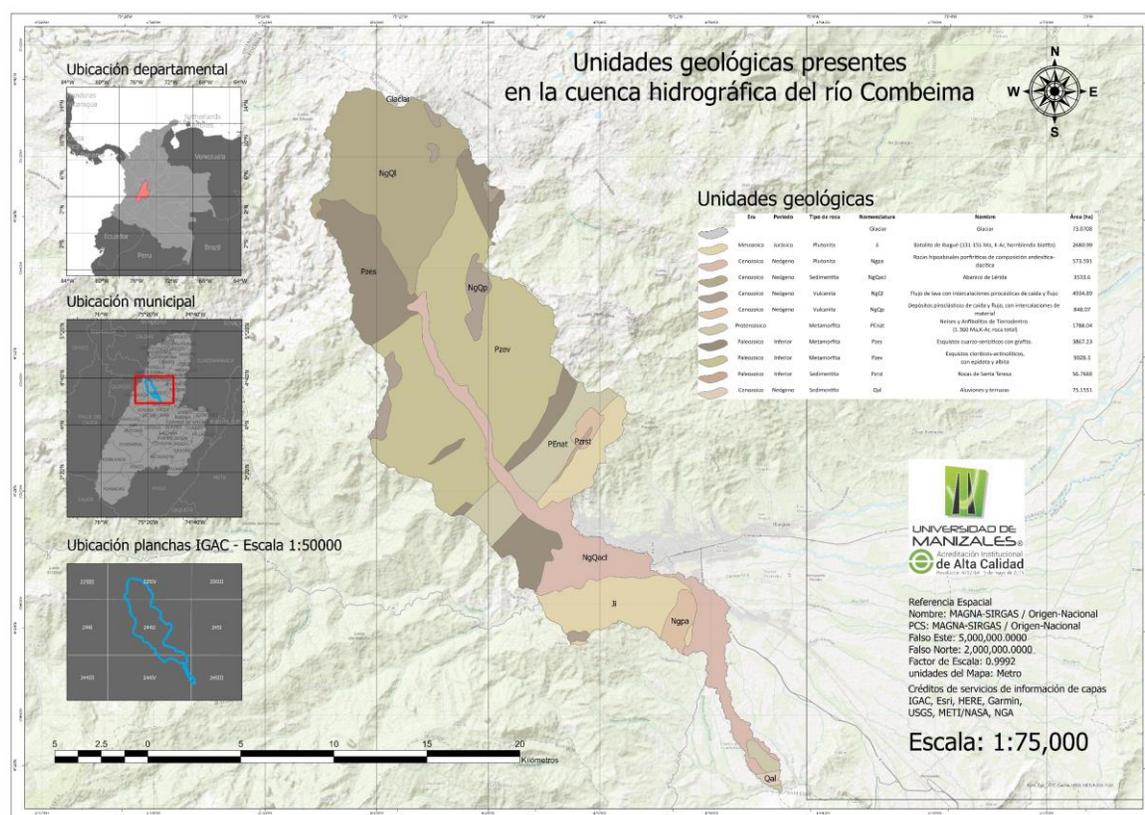


Ilustración 2. Unidades geológicas de la cuenca hidrográfica del río Combeima.

Fuente: Realización propia

Fuente de datos: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) [33]. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [34]. Servicio Geológico Colombiano (SGC) [37].

Suelos

Los suelos de la cuenca hidrográfica del río Combeima están compuestos en su mayoría por andisoles, ya que este género, posee un área total de 11805.97 ha, correspondiente al 42.99% del área total de la cuenca. Los andisoles se caracterizan por ser “derivados de cenizas volcánicas y están compuestos por un epipedon umbrico, el cual presentan contenidos de materia orgánica muy altos, dentro de los límites de los porcentajes de un suelo mineral. El color del epipedón úmbrico es generado por el contenido de carbón orgánico. La saturación de bases es menor al

50%” [38]. Las unidades que conforman este género de suelos dentro de la cuenca son las siguientes: Thaptic Haplocryands, Typic Melanudands, Lithic Troorthents y Typic Hapludands.

Luego de los andisoles, encontramos los entisoles. “Son suelos que se desarrollan bajo condiciones adversas, en donde se inhibe la presencia de horizontes diagnósticos. Generalmente tienen ocurrencia en áreas que continuamente depositan materiales, o donde la alteración de los materiales parentales es muy débil, o también, donde las pendientes son muy escarpadas o en áreas mal drenadas. En zonas aluviales recientes por el continuo aporte de sedimentos no hay evolución pedogenética” [38]. En la cuenca, este género ocupa un 25.53% del total de las unidades de suelo en la cuenca. Este porcentaje corresponde al 7011.24 ha y de él hacen parte las siguientes unidades taxonómicas de suelo: Lithic Cryorthents, Typic Cryaquents, Lithic Tropofolists, Typic Troorthent, Typic Tropofluvents y Typic Ustorthents.

Con menor área y después del género entisol, encontramos los inceptisoles. Este género posee una extensión de 3998.04 ha, equivalente a 14.55% del área total de la cuenca. Esta unidad se caracteriza por su “susceptibilidad a los movimientos en masa muy alta, debido a su insipencia en evolución. Son suelos poco evolucionados de perfiles tipo ABC o AC, predominantemente presentan epipedones ócricos o úmbricos. Este orden agrupa suelos que presentan uno o más horizontes diagnósticos de formación más o menos rápida y en cuya génesis no han intervenido, por lo menos en forma significativa, procesos de translocación de materiales, o alteración extrema y poseen suficiente cantidad de minerales fácilmente intemperizables” [38]. Las unidades taxonómicas que conforman este género y, se encuentran presentes en la cuenca son las siguientes: Typic Humitropepts, Typic Eutropepts, Typic Dystropepts y Aeric Trophaquepts.

Seguido del género inceptisol, se encuentran los suelos pertenecientes al grupo de los molisoles. Poseen “contenidos de materia orgánica son altos y se presenta alta humificación condicionado una buena estructura” así como también “son predominantes en las unidades de suelos de clima frío seco correspondiente a la

unidad de montaña” [38]. La unidad taxonómica que hace parte de este género es Entic Hapludolls. Posee una extensión de 878.76 ha, que corresponde al 3.20% del total de la cuenca.

Por último, encontramos la unidad taxonómica Typic Haplustalfs. Esta unidad pertenece al género de los alfisoles. “Este orden se caracteriza por un endopedón argílico con una saturación de bases del 35% o más, se consideran suelos moderadamente evolucionados a partir de materiales sedimentarios como las areniscas y las arcillolitas y están sujetos a procesos de translocación, específicamente iluviación, en relación con la entrada de algún material a una porción del suelo; donde se presenta un enriquecimiento en el material que recibe, con respecto al contenido que presenta el resto del suelo en él. Este proceso genera horizontes Bt; cuya acumulación es de arcilla, la cual genera horizontes argílicos” [38]. Ocupa una extensión de 756.90 ha, siendo solo el 2.75% del total de la extensión de la cuenca.

El 10.98% restante, hace parte de unidades taxonómicas indiferenciadas, afloramientos rocosos, nieves perpetuas y no suelo (zona urbana) entre otras.

Tabla 3. Unidades taxonómicas y géneros de suelo presentes en la cuenca hidrográficas del río Combeima [39].

Nomenclatura (IGAC)	Litología	COMPONENTE	Órdenes suelo	de	Porcentaje componente	Área unidad de suelo (ha)
MAAf	Piroclastos andesitas	sobre Consociación: suelo	No	N/A	N/A	360.539
MDAd	Cenizas volcánicas sobre andesitas	Grupo Indiferenciado: Thaptic Haplocryands; Lithic Cryorthents; Typic Cryaquents	Andisoles Entisoles	y	50, 30, 20	31.399
MDAe	Cenizas volcánicas sobre andesitas	Grupo Indiferenciado: Thaptic Haplocryands; Lithic Cryorthents; Typic Cryaquents	Andisoles Entisoles	y	50, 30, 20	468.409
MDAg	Cenizas volcánicas sobre andesitas	Grupo Indiferenciado: Thaptic Haplocryands; Lithic Cryorthents; Typic Cryaquents	Andisoles Entisoles	y	50, 30, 20	1138.724
MGAf	Cenizas volcánicas sobre andesitas y cuarzodioritas	Consociación: Melanudands	Typic Andisoles		70	155.255

Nomenclatura (IGAC)	Litología	COMPONENTE	Órdenes suelo	de	Porcentaje componente	Área unidad de suelo (ha)
MGAf1	Cenizas volcánicas sobre andesitas y cuarzdioritas	Consociación: Melanudands	Typic	Andisoles	70	135.196
MGAg1	Cenizas volcánicas sobre andesitas y cuarzdioritas	Consociación: Melanudands	Typic	Andisoles	70	6.506
MGBg	Tonalitas y andesitas con cubrimiento de cenizas volcánicas	Grupo Indiferenciado: Lithic Troporthents; Lithic Hapludands; Lithic Tropofolists		Andisoles y Entisoles	60, 20, 20	5315.293
MGCe	Cenizas volcánicas sobre andesitas	Consociación: Hapludands	Typic	Andisoles	90	1325.490
MGCe1	Cenizas volcánicas sobre andesitas	Consociación: Hapludands	Typic	Andisoles	90	54.194
MKBf1	Cenizas volcánicas sobre esquistos	Consociación: Hapludands	Alic	Andisoles	50	6088.121
MKGd	Cenizas volcánicas sobre andesitas	Consociación: Hapludands	Typic	Andisoles	90	120.147
MKGe1	Cenizas volcánicas sobre andesitas	Consociación: Hapludands	Typic	Andisoles	90	444.151
MQCf1	Esquistos con recubrimientos de cenizas volcánicas	Asociación: Humitropepts; Troporthent	Typic Typic	Inceptisoles Entisoles	y 40, 40	4616.778
MQDf1	Tonalitas y granodioritas (Batolito de Ibagué)	Asociación: Eutropepts; Troporthents; Hapludolls	Typic Typic Entic	Inceptisoles, Entisoles Molisoles	y 40, 30, 30	2929.229
MQEf2	Tonalitas y granodioritas (Batolito de Ibagué)	Asociación: Troporthents; Dystropepts	Typic Typic	Entisoles Inceptisoles	e 60, 40	632.302
MQObp	Sedimentos coluvio – aluviales heterométricos	Grupo Indiferenciado: Typic Tropofluvents; Aeric Tropaquepts		Entisoles Inceptisoles	e 50, 40	1271.973
MWDg2	Esquistos y arenas volcánicas	Asociación: Afloramientos rocosos; Typic Ustorthents		Entisoles Inceptisoles	e 60	535.388
NP	Nieve perpetua	Consociación: suelo	No	N/A	N/A	285.611
PWDb1	Flujos de lodo, aglomerados y aluviones	Consociación: Haplustalfs	Typic	Alfisoles	80	756.906
PWLbp	Sedimentos coluvio – aluviales	Grupo Indiferenciado: Typic Ustifluvents; Vertic Haplustalfs; Typic Ustipsamments		Entisoles Alfisoles	y 50, 30, 20	7.559
ZU	Zona urbana	Zona urbana		N/A	Zona urbana	780.527

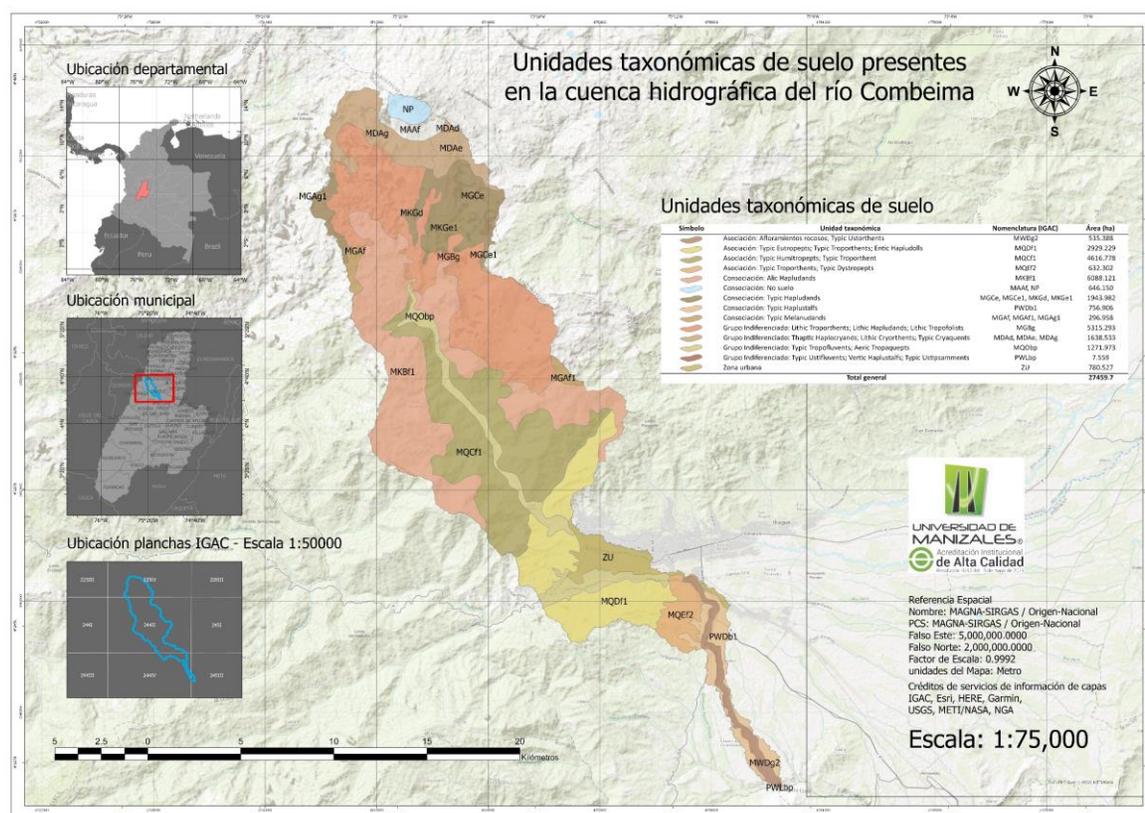


Ilustración 3. Unidades taxonómicas de suelo presentes en la cuenca hidrográfica del río Combeima

Fuente: Realización propia

Fuente de datos: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) [33]. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [34]. Servicio Geológico Colombiano (SGC) [37].

Clima

Con el fin de obtener la clasificación climática de la cuenca hidrográfica del río Combeima, se tomó el Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas y Acuíferos (POMCA) de la cuenca mayor de Río Coello, realizado por la Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima) y del cuál, nuestra cuenca objeto de estudio, hace parte.

La clasificación climática se realizó mediante el método Caldas-Lang. “Se estableció la clasificación climática teniendo en cuenta los parámetros de temperatura, altura y precipitación o índice de efectividad en la precipitación” [40]. “La clasificación de Caldas fue ideada en 1802 por Francisco José de Caldas y sólo considera la variación de la temperatura con la altura (pisos térmicos) y su aplicabilidad es exclusiva para el trópico americano.

Como se indica en la tabla 4. El sistema Caldas tiene en cuenta los rangos altitudinales y la altura. Se establecen cinco pisos térmicos.

Tabla 4. Clasificación de Caldas. Pisos térmicos [40].

Piso térmico	Símbolo	Rango de altura (m.s.n.m.)	Temperatura °C	Variación de la altitud por condiciones locales
Cálido	C	0 a 1000	$T \geq 24$	Límite superior ± 400
Templado	T	1001 a 2000	$24 > T \geq 17.5$	Límite superior ± 500 Límite inferior ± 500
Frío	F	2001 a 3000	$17.5 > T \geq 12$	Límite superior ± 400 Límite inferior ± 400
Páramo bajo	Pb	3001 a 3700	$12 > T \geq 7$	
Páramo alto	Pa	3701 a 4200	$T < 7$	

La clasificación climática que utilizó Richard Lang, “utiliza la precipitación anual en mm y la temperatura media anual en °C. Los dos parámetros se relacionan mediante un cociente entre la precipitación (P) y la temperatura (T), llamado factor Lang, y se obtienen seis clases de climas de humedad” [41].

Lo descrito anteriormente se puede observar en la tabla 5.

Tabla 5. Grado de humedad – Método Lang [40].

Factor de Lang P/T	Clase de clima	Símbolo
0 a 20.0	Desértico	D
20.1 a 40.0	Árido	A
40.1 a 60.1	Semiárido	Sa
60.1 a 100.0	Semihúmedo	Sh
100.1 a 160.0	Húmedo	H
Mayor que 160.0	Superhúmedo	Shu

Provincias climáticas

Páramo Alto Superhúmedo: Comprende alturas mayores a 3700 m.s.n.m., temperatura menor a los 7 °C y una relación P/T mayor a 160. Se ubica hacia el noroeste de la cuenca, especialmente en el municipio de Ibagué y se caracteriza por un régimen hidrológico regulado por la presencia de glaciares (nieve y tierras eriales con afloramientos rocosos), páramo y cobertura vegetal poco intervenida (bosques naturales). Se observa que la producción agropecuaria es escasa y su importancia radica por ser zona productora de agua [42].

Páramo Alto Húmedo: Con una altura mayor de 3700 m.s.n.m., temperatura menor a los 7°C y una relación P/T entre 100 y 160. Su cobertura está constituida por vegetación de páramo con presencia de tierras eriales y afloramientos rocosos; además existen pastos naturales [42].

Páramo Bajo Superhúmedo: Comprende altura entre los 3200 y 3700 m.s.n.m., temperatura entre los 7 y 12°C y una relación P/T mayor a 160. Su cobertura vegetal se encuentra constituida por vegetación de páramo que incluye afloramientos rocosos y tierras eriales, bosques y pastos naturales dedicados en parte a pastoreo de ganado Normando y Hosltein [42].

Páramo Bajo Húmedo: Corresponde a alturas entre los 3200 y 3700 m.s.n.m., temperatura entre los 7 y 12°C y una relación P/T entre 100 y 160. Las características son muy similares a la de Páramo Alto con la diferencia que en dichas zonas se encuentra ya una actividad económica de cultivos de papa y ganadería. En esta área se encuentran especies arbóreas como la palma de cera, siete cueros, encenillo y exóticas como pino y eucalipto [42].

Frío Húmedo: Corresponde a alturas entre los 2.000 y 3.000 m.s.n.m., y temperatura entre 12 y 17.5 °C y una Relación P/T entre 100 y 160, se caracteriza por ser una

zona con alta presencia de Bosques Naturales; especies forestales como ciprés, pino y eucalipto. En ella se desarrolla una actividad económica diversa con gran riqueza agropecuaria, destacándose cultivos como arracacha fríjol bolo rojo y cuarzo, papa fina (de año) y criolla, zanahoria cebolla de huevo y junca, arveja, repollo, lechuga y frutales como tomate de árbol, mora, lulo, curuba y pastos manejados dedicados a la ganadería de doble propósito (leche y carne) [42].

Frío Semihúmedo: Comprende alturas entre los 2.000 y 3.000 m.s.n.m., y temperatura entre 12 y 17.5 °C y una Relación P/T entre 60 y 100, corresponde a la provincia climática de mayor extensión (37608.032 hectáreas). Los cultivos más predominantes son: maíz, hortalizas, habichuela, arveja; y pastos dedicados a la ganadería Normando, Hosltein y Criollo [42].

Frío Semiárido: Corresponde a alturas entre los 2.000 y 3.000 m.s.n.m., y temperatura entre 12 y 17.5 °C y una Relación P/T entre 40 y 60; se caracteriza por ser una zona con alta presencia de Bosques Naturales y pastos [42].

Templado Húmedo: Comprende alturas entre los 1.000 y 2.000 m.s.n.m., y temperatura entre 17.5 y 24 °C y una Relación P/T entre 100 y 160. Además de bosques naturales y pastos dedicados a la ganadería extensiva, existen cultivos de café, hortalizas, plátano y frutales [42].

Templado Semihúmedo: Con alturas entre los 1.000 y 2.000 m.s.n.m., y temperatura entre 17.5 y 24 °C y una Relación P/T entre 60 y 100, se observan cultivos de café, caña panelera, maíz, banano, plátano y frutales como: guayaba, mango, zapote, guanábana, naranja, limón, guamo el cual es utilizado como sombrío [42].

Templado Semiárido: Con altitud entre los 1.000 y 2.000 m.s.n.m., temperatura entre 17.5 y 24 °C y una Relación P/T entre 40 y 60, en su mayor extensión

predominan los pastos, existiendo además pequeños reductos de bosque y cultivos de café [42].

Cálido Húmedo: Con alturas entre 0 y 1000 m.s.n.m., y temperatura mayor a 24 °C y una relación P/T entre 100 y 160. En su mayor extensión predominan los pastos naturales y mejorados, encontrándose además cultivos de café, arroz y pequeños reductos de bosques secundarios [42].

Cálido semihúmedo: Con altitud entre los 0 y 1.000 m.s.n.m., temperatura mayor a 24 °C y una Relación P/T entre 60 y 100, posee una extensión de 11509.4637 hectáreas, que se caracteriza por ser apta para el cultivo de arroz, sorgo, algodón, caña panelera, soya, pastos, ganadería doble propósito. Las veredas ubicadas en esta provincia climática han adquirido un desarrollo económico creciente en avicultura y porcicultura [42].

Tabla 6. Provincias Climáticas de la cuenca hidrográfica del río Combeima [42].

Símbolo	Provincia
Csh	Cálido semihúmedo
CH	Cálido Húmedo
Tsa	Templado Semiárido
Tsh	Templado Semihúmedo
TH	Templado Húmedo
Fsa	Frío Semiárido
Fsh	Frío Semihúmedo
FH	Frío Húmedo
PBsh	Páramo Bajo Húmedo
PBH	Páramo Bajo Superhúmedo
PAH	Páramo Alto Húmedo
PASH	Páramo Alto Superhúmedo

Fuente: Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima). Plan de ordenación y manejo de Cuencas Hidrográficas. POMCA 2006 [42].

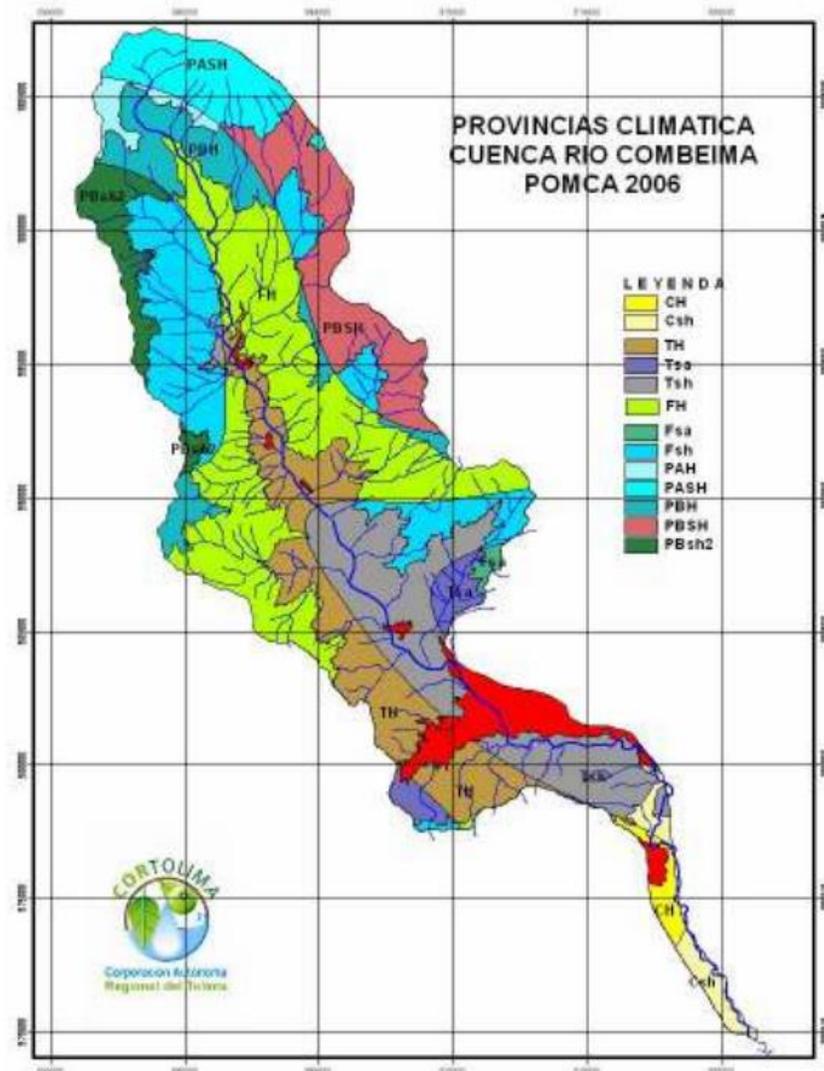


Ilustración 4. Mapa de provincias Climáticas de la cuenca hidrográfica del río Combeima. Fuente: Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima) [42].

Vegetación

“La vegetación en el territorio del Municipio de Ibagué, localizado en la vertiente oriental de la cordillera central de los andes colombianos, es representada por una valiosa diversidad de especies que caracterizan y hacen parte funcional de los ecosistemas de paramo, los bosques y los ríos; estas especies intervienen en la regulación de los procesos naturales de los ecosistemas como son la producción de

agua y aire, la formación de suelo, el ciclaje de nutrientes, la germinación de especies y las etapas de sucesión de los bosques, entre otros” [30].

“De acuerdo con estudios realizados en el bosque alto andino de la cuenca del río Coello, se encuentra una cobertura vegetal muy característica de paramos; la familia Orchidaceae presenta la mayor abundancia de especie, seguida por las familias de Asteraceae, Poaceae, Bromeliaceae, Clusiaceae y por último la de menor abundancia es la Apiaceae; esta área presenta una alta diversidad representada en 169 especies florísticas” [31].

Evaluación de la Erosión Hídrica

Para el desarrollo de la evaluación de la degradación de los suelos por efecto de la erosión hídrica, se aplicará la metodología concebida por FAO [20]. La organización utilizó en dicho procedimiento, la ecuación universal de pérdida de suelos. La ecuación utiliza un sistema paramétrico con valores cuantitativos y métricamente se expresa de la siguiente manera:

$$E = R * K * LS * C$$

Donde:

- El factor E es igual a la pérdida del suelo (ton/ha/año)
- El factor R representa la erosividad de la lluvia en función de la energía cinética de la precipitación;
- El factor K equivale la erodabilidad del suelo;
- El factor LS mide el efecto de la longitud y la magnitud de la pendiente;
- El factor C expresa el valor de la cobertura vegetal.

Delimitación de la cuenca hidrográfica

Durante el proceso de delimitación de una cuenca hidrográfica se puede hacer uso de varios procesos. En el presente estudio, se adquirió una imagen del Sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar) o (Radar de Apertura Sintética), dispositivo que es transportado por el satélite ALOS y operado por la Agencia Aeroespacial Japonesa. La imagen adquirida es un Modelo Digital de Elevación (DEM). Esta posee una resolución espacial de 12.5 metros, lo que quiere decir que cada uno de los pixeles que conforman la imagen, posee esta longitud en cada uno de sus lados. El procesamiento de la imagen inicia a manera de corrección. Si bien, la gran mayoría de estas imágenes poseen un preprocesamiento que ha disminuido los errores, durante el desarrollo de esta actividad, se realizó un preprocesamiento mediante la herramienta “*Fill*” albergada en la extensión “*Spatial Analyst Tools*”. Posteriormente se utilizaron las siguientes herramientas pertenecientes a la extensión antes mencionada: “*Flow accumulation*” que nos provee de información de la acumulación de flujo, basándose en el ráster corregido del DEM. El producto es una capa ráster de acumulación de flujo, el cual procesaremos para buscar la dirección de flujo a través de la herramienta “*Flow direction*”. El producto del análisis de esta herramienta obtendremos una capa ráster con las direcciones desde cada celda hasta su vecina o vecinas con pendiente descendente. Conocida la desembocadura de la cuenca o su desagüe, se grafica un punto de referencia, ya que este será tomado por la herramienta “*Watershed*” la cual establece el área de carga por sobre un conjunto de celdas del ráster de dirección de flujo. El resultado final es un ráster simulando el polígono o forma de la cuenca.

Erosividad de las precipitaciones – Factor (R)

Para determinar los valores de la erosividad de las precipitaciones, se consideraron los datos de precipitación de 8 estaciones hidrometeorológicas; en un periodo de 10

años 2010 – 2020 y, localizadas en el área de estudio como se puede observar en la ilustración 5.

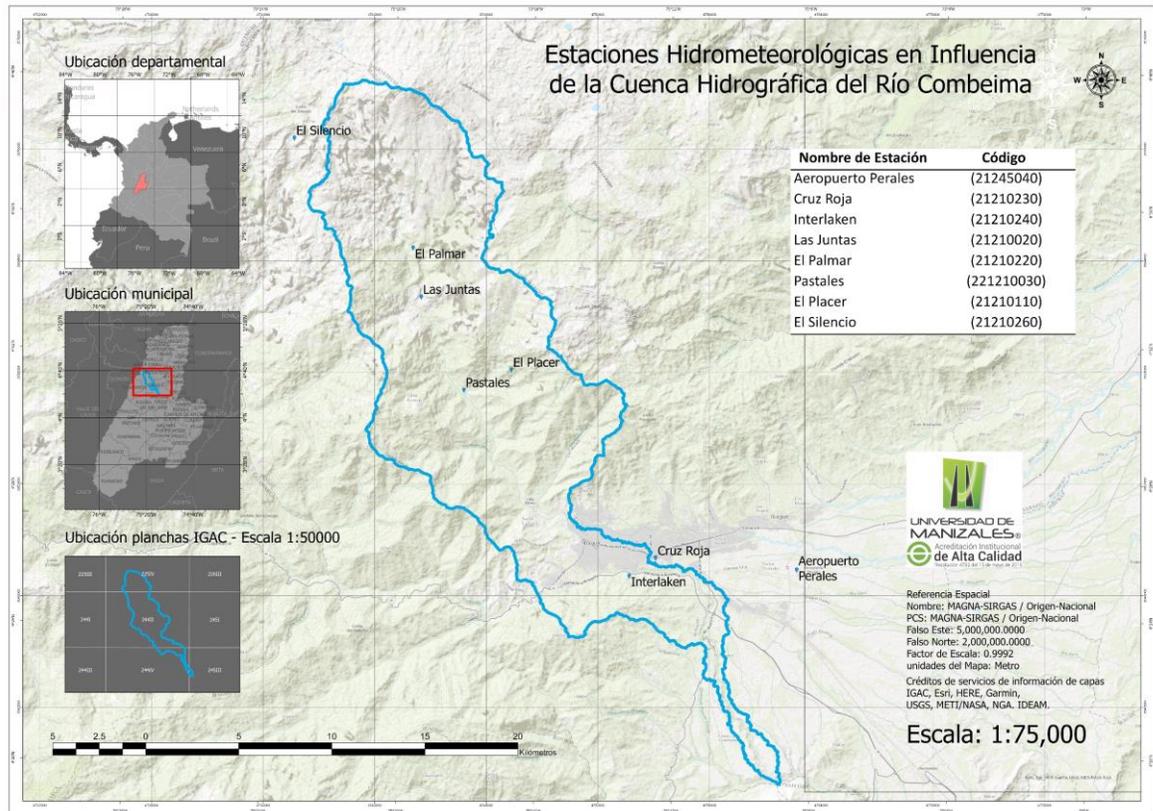


Ilustración 5. Estaciones hidrometeorológicas en inmediaciones de la cuenca hidrográfica del río Combeima.

Fuente: Realización propia

Fuente de datos: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

Tabla 7. Valores de precipitación media mensual y media anual de las estaciones hidrometeorológicas en influencia de la cuenca hidrográfica del río Combeima.

ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS									
	Aeropuerto Perales (21245040)	Cruz Roja (21210230)	Interlaken (21210240)	Las Juntas (21210020)	El Palmar (21210220)	Pastales (221210030)	El Placer (21210110)	El Silencio (21210260)	
Norte (m)	2047205.775	2047845.350	2046888.206	2061881.910	2064515.850	2056870.700	2057956.202	2070422.602	
Este (m)	4762681.226	4755099.386	4753675.312	4742503.699	4742065.244	4744796.621	4747346.334	4735685.608	
Latitud (°)	4.424138889	4.429722222	4.42102778	4.556305556	4.58011111	4.511055556	4.520944444	4.633333333	
Longitud (°)	-75.13941667	-75.20775	-75.2205556	-75.32163889	-75.3256667	-75.30083333	-75.2778889	-75.3833333	
Precipitación Media Mensual (mm)	Enero	98.920	164.833	152.463	44.710	37.900	51.470	88.267	32.838
	Febrero	108.180	159.844	127.738	67.780	64.310	79.000	104.940	51.000
	Marzo	178.330	216.956	222.822	144.110	130.120	195.410	228.420	102.557
	Abril	245.530	282.622	269.722	163.030	152.670	201.550	234.400	132.329
	Mayo	204.880	235.244	243.775	185.490	159.740	251.360	269.330	212.300
	Junio	82.340	98.333	132.944	133.510	123.310	161.856	185.620	123.688
	Julio	75.360	71.833	113.388	125.500	107.022	124.538	167.360	144.825
	Agosto	58.170	63.900	77.244	87.070	90.940	88.250	124.540	74.867
	Septiembre	108.390	109.656	156.078	150.610	120.910	144.463	189.620	162.200
	Octubre	194.230	210.856	254.656	164.520	134.820	188.925	220.120	175.700
	Noviembre	176.280	254.389	300.556	125.190	114.789	125.300	173.450	150.850
	Diciembre	138.170	187.989	197.763	69.590	70.589	93.189	116.190	26.000
Precipitación Media anual (mm)	1668.780	2018.950	1940.720	1461.110	1277.880	1558.040	2093.430	1037.180	

Fuente de datos: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Los valores que se pueden observar en la tabla 7. Pertenecen a las medias mensuales y medias anuales, para cada estación hidrometeorológica en un periodo de 10 años 2010 – 2020. Una vez obtenidos estos valores y, mediante la ecuación del Índice Modificado de Fournier [43]. Propuesta por [44], o también llamada “ecuación de Arnolds modificada por Fornoulds la cual podemos visualizar a continuación; se agrupan los datos arrojados por la ecuación en una tabla. Ver tabla 8.

$$R = 0.032(RI)^{1.9}$$

$$RI = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P_t}$$

Donde:

RI = Índice Modificado de Forunier

p_i = Precipitación Media Mensual (mm)

P_t = Precipitación Media Anual (mm)

Tabla 8. índice Modificado de Fournier [44]. Para cada una de las estaciones hidrometeorológicas de la cuenca hidrográfica del río Combeima.

Código Estación	Nombre Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Norte (m)	Este (m)	IMF	Factor (R)
21245040	Aeropuerto Perales	4.424138889	-75.13941667	2047205.775	4762681.226	162.4136	507.3788
21210230	Cruz Roja	4.429722222	-75.20775	2047845.350	4755099.386	203.3017	777.3520
21210240	Interlaken	4.421027778	-75.22055556	2046888.206	4753675.312	245.5474	1112.7745
21210020	Las Juntas	4.556305556	-75.32163889	2061881.910	4742503.699	136.7234	365.8067
21210220	El Palmar	4.580111111	-75.32566667	2064515.850	4742065.244	123.0261	299.3260
221210030	Pastales	4.511055556	-75.30083333	2056870.700	4744796.621	180.5606	620.4886
21210110	El Placer	4.520944444	-75.27788889	2057956.202	4747346.334	193.1897	705.5364
21210260	El Silencio	4.633333333	-75.38333333	2070422.602	4735685.608	192.1251	698.1681

Luego del cálculo del factor R para cada una de las estaciones hidrometeorológicas cercanas a la cuenca, esta información fue espacializada y guardada mediante el software ArcGIS PRO 2.7. Posteriormente se ejecutó la extensión “*Geostatistical Analyst*” para hacer uso del método determinístico que mejor representara la interpolación de los datos de precipitación.

Esta herramienta posee métodos de interpolación como *Inverse Distance Global* o IDW, familia de métodos determinísticos de la cual hace parte *Kriging*, *Global Polynomial Interpolation*, *Radial Basis Functions* y *Local Polynomial Interpolation*. En la presente metodología, se analizó la información de la precipitación con los distintos métodos, llegando a la conclusión de utilizar el método *Kriging*, el cual tuvo un error medio cuadrático de 192.47 figura frente a 191.21 de *Radial Basis Functions*. No se utilizó este último método mencionado, ya que es primordial que el número de muestreos sea mayor y, la variación en la elevación sea mínima.

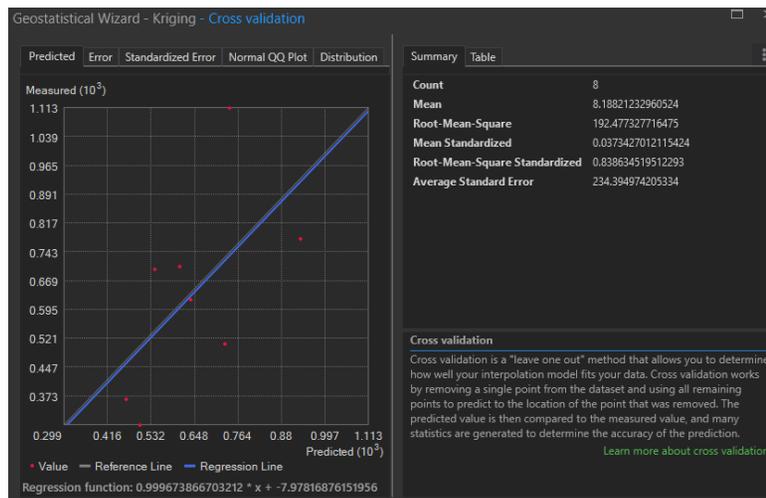


Ilustración 6. Error medio cuadrático método determinístico Kriging.



Ilustración 7. Error medio cuadrático método determinístico Radial Basis Functions.

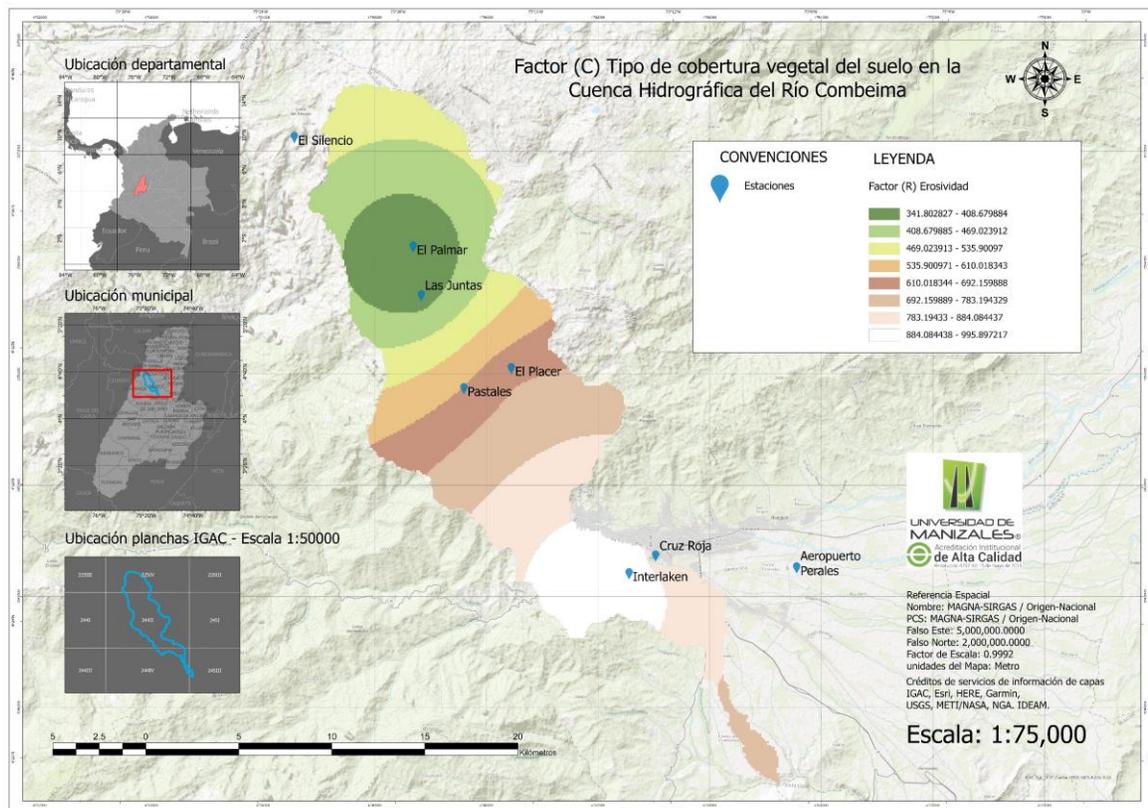


Ilustración 8. Factor (R) Erosividad de las Precipitaciones en la Cuenca Hidrográfica del Río Combeima.

Fuente: Realización propia

La metodología de FAO [20], propone cuatro clases de erosividad con sus respectivos rangos de ligero, moderado, alto y muy alto. En la tabla 9. Se pueden observar las distintas clases de la metodología con sus respectivos rangos y estados.

Tabla 9. Clases de erosividad en la precipitación [20].

Factor R	Erosividad de las lluvias
0 - 50	Ligera
50 - 500	Moderada
500 - 1000	Alta
> 1000	Muy Alta

Erodabilidad del suelo – Factor (K)

El Factor K derivado de la ecuación universal (USLE) para la predicción de la pérdida de suelo, conceptualmente brinda información sobre la susceptibilidad del suelo frente a la erosividad de la lluvia, y considera una erosividad particular bajo condiciones estándar de parcelas [45]. Para realizar la evaluación del factor erodabilidad (K) en la cuenca hidrográfica del río Combeima, se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

Se utilizó la herramienta “Clip” de la extensión “*Analysis Tools*” para recortar la capa del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras – Departamento del Tolima [39], y generar una capa de información con la forma del polígono del área de estudio (cuenca hidrográfica). En este estudio se encuentran datos de las propiedades fisicoquímicas, así como la descripción completa de los horizontes evaluados en cada una de las unidades presentes en el departamento. Dado que para cada uno de los muestreos realizados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), no se obtuvo el porcentaje de arena, limo y arcilla, método por el cual se adquiere el valor de la erodabilidad del suelo, como lo propone [46].

Conforme a lo anterior, se utilizaron datos tabulados por [47]. Kirkby y Morgan, proponen estos datos conforme a las texturas asociadas al suelo y el contenido de la materia orgánica de éste. En la tabla 10., se pueden observar los valores tabulados [47].

Tabla 10. Valores del factor (K) Erodabilidad según textura del suelo y porcentaje de materia orgánica [47].

Textura del suelo	Materia orgánica		
	< 0.5%	2%	> 4%
Arcilla	0.017	0.038	---
Arcilla arenosa	0.018	0.017	0.016
Arcilla limosa	0.033	0.03	0.025
Arena	0.007	0.004	0.003
Arena fina	0.0021	0.018	0.013
Arena fina franca	0.032	0.026	0.021
Arena franca	0.016	0.013	0.011
Arena muy fina	0.055	0.047	0.037
Arena muy fina franca	0.058	0.05	0.04
Franco (grada)	0.05	0.045	0.038
Franco arcillolimoso	0.049	0.042	0.034
Franco arcilloso	0.037	0.033	0.028
Franco arenoarcilloso	0.036	0.033	0.028
Franco arenoso	0.036	0.032	0.025
Franco arenoso fino	0.046	0.04	0.032
Franco arenoso muy fino	0.062	0.054	0.043
Limo	0.079	0.068	0.055
Limo francoso	0.063	0.055	0.043

Sin embargo, los estudios realizados por el IGAC en ese entonces no detallaban la cantidad de materia orgánica en el suelo. Para conocer este parámetro se pueden emplear diferentes fórmulas, en ellas se utilizan algunos elementos presentes en el suelo: Azufre (S), Nitrógeno (n) Carbono (C) entre otros. Para el presente estudio se empleó el método de Walkley y Black (Dicromato de potasio). En este método se analiza el carbono (C) principal presente en la materia orgánica; ya que, como sabemos, el 58% de la materia orgánica es carbono.

Para medir la cantidad de materia orgánica se utilizó la siguiente ecuación:

$$M.O\% = \%C * 1.724 \quad (\text{Factor de Von Bemmelen})$$

Donde:

$M.O\%$ = Porcentaje de materia orgánica

$\%C$ = *Porcentaje de Carbono*

Una vez organizados los datos de cada una de las unidades presentes en la cuenca hidrográfica del río Combeima: Unidad, perfil, porcentaje de perfil, porcentaje de carbono y textura, Se aplica el factor de Von Bemmelen a cada uno de los porcentajes de Carbono, presentes en las unidades de suelo de la cuenca que nos brinda el resultado del porcentaje de materia orgánica para cada una de ellas.

Los valores resultantes del porcentaje de materia orgánica son contrastados con los valores tabulados por [47], valores de textura del suelo, arrojando como resultado los valores de erodabilidad factor (K) para cada uno de los perfiles. Para obtener el factor (K) de la unidad completa, se aplica un promedio ponderado a los valores de la erodabilidad de cada uno de los perfiles pertenecientes a ella (Cuando existe más de un perfil en la unidad), ya que, los porcentajes de cada uno de los perfiles difieren. Como resultado, obtenemos los valores de la erodabilidad, factor (K) para cada una de las unidades de suelo de la cuenca. Ver tabla 11.

Tabla 11. Valores de erodabilidad, Factor (K) de las unidades de suelo presentes en la cuenca hidrográfica del río Combeima.

Unidad de suelo	Perfil	Profundidad (cm)	Porcentaje perfil (%)	Porcentaje Carbono (%)	Textura	Factor de Von Bemmelen	Porcentaje Materia orgánica (%)	Factor Método Kirkby Morgan (Mjmm/ha.a) (Perfil)	Factor (K) total
MAA	---	---	---	---		---	---	0.007	0.007
	PT-1	00-23	50	5.18	Franco Arenosa	1.724	8.93032	0.025	
MDA	PT-3	00-22	30	7.61	Areno Francosa	1.724	13.11964	0.011	0.0268
	PT-4	00-28	20	38.61	Orgánica	1.724	66.56364	0.055	
MGA	PTC-1	00-18	100	25.65	Franco Arenosa	1.724	44.2206	0.025	0.025
	TS-11	00-05	60	18.49	Franco Arenosa	1.724	31.87676	0.025	
MGB	TS-1	00-30	20	15.24	Franco Arenosa	1.724	26.27376	0.025	0.031
	TS-13	00-49	20	18.09	Orgánica	1.724	31.18716	0.055	
MGC	PT-6	00-30	100	5.11	Franco Arenosa	1.724	8.80964	0.025	0.025
MKB	BT-62	00-20	100	16.8	Franco Arenosa	1.724	28.9632	0.025	0.025
MKG	PT-7	00-25	100	6.95	Franco Arenosa	1.724	11.9818	0.025	0.025
	PTC-2	00-25	50	3.48	Franco Arenosa	1.724	5.99952	0.025	
MQC	PTC-3	00-17	50	2.04	Franco Arenosa	1.724	3.51696	0.032	0.0285
	PTC-6	00-17	40	1.09	Franca	1.724	1.87916	0.045	
MQD	PTS-9	00-17	30	1.21	Areno Francosa (gruesa)	1.724	2.08604	0.013	0.0315
	BT-63	00-20	30	1.68	Franco Arenosa	1.724	2.89632	0.032	
	P-9	00-18	60	1.78	Franco Arenosa	1.724	3.06872	0.032	
MQE	PI-1	00-25	40	3.09	Arcillosa	1.724	5.32716	0.038	0.0344
	P-25	00-20	50	2.8	Franco Arenosa	1.724	4.8272	0.032	
MQO	BT-82	00-18	50	0.25	Arcillosa	1.724	0.431	0.017	0.0245
MWD	BT-61	00-18	100	0.42	Areno Francosa	1.724	0.72408	0.013	0.013
PWD	PH-1	00-22	100	1.22	Franco Arenosa	1.724	2.10328	0.032	0.032
	G-10	00-34	50	1.6	Franco Arenosa Arcillosa	1.724	2.7584	0.033	
PWL	G-8	00-20	30	1.9	Franca	1.724	3.2756	0.045	0.0326
	A-38	00-20	20	1.47	Areno Francosa (gruesa)	1.724	2.53428	0.013	

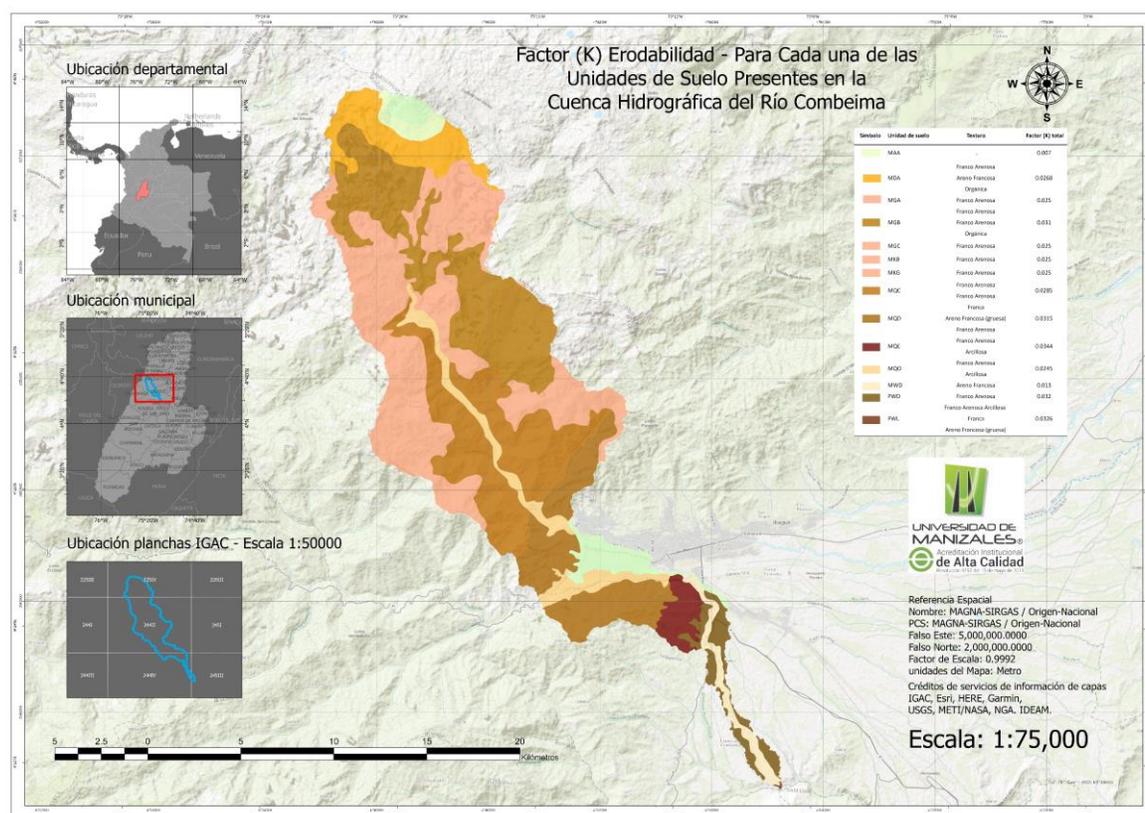


Ilustración 9. Factor (K) Erodabilidad - Para Cada una de las unidades de suelo presentes en la cuenca del río Combeima.

Fuente: Realización propia

Influencia Longitud – pendiente – Factor (LS)

“El factor topográfico LS es la relación entre el suelo perdido en un terreno con pendiente p y longitud λ , y la correspondiente a la parcela piloto utilizada en el desarrollo de la USLE. Se refiere entonces al efecto combinado de la pendiente y la longitud de los terrenos expuestos a la erosión laminar y en surcos. Su valor se obtiene por multiplicación de los subfactores: longitud (L) y pendiente (S)” [48].

Para el cálculo del factor LS [46], propusieron las siguientes ecuaciones:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m$$

$$S = 65.41 \text{Sen}^2\theta + 4.56 \text{Sen}\theta + 0.065$$

Donde:

L = Es el factor longitud de la pendiente (adimensional).

λ = Es la longitud uniforme del terreno (metros).

m = Es el exponente cuyo valor varía entre 0.2 y 0.5 de acuerdo con el valor en la inclinación de la pendiente entre <1 y >5%.

S = Es el subfactor inclinación de la pendiente (adimensional).

θ = Es el ángulo de inclinación del terreno uniforme en grados.

Sin embargo [49] proponen para la ecuación MUSLE, la siguiente actualización:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m$$

$$m = \frac{\beta}{(1 + \beta)}$$

$$\beta = \frac{\frac{\text{Sen}\theta}{0.0896}}{[0.56 + 3 * (\text{Sen}\theta)^{0.8}]} * r$$

$$S = 16.8 \text{ Sen}\theta - 0.50 \quad \text{Si la pendiente} \geq 9\%$$

$$S = 10.8 \text{ Sen}\theta + 0.03 \quad \text{Si la pendiente} < 9\%$$

Donde:

L = Es el factor longitud de la pendiente (adimensional).

λ = Es la longitud del terreno (metros).

m = Es el exponente variable según β

β = Relación erosión en surco a erosión en entresurco

θ = Es el ángulo de inclinación del terreno en grados.

r = Coeficiente igual a: 0.5 en tierras forestales o pastizales; 1.0 en terrenos agrícolas.

S = Es el subfactor inclinación de la pendiente (adimensional).

“La expresión original de Wischmeier y Smith, (1978), fue desarrollada experimentalmente con datos de terrenos uniformes, pendientes entre 3 y 18 % y longitudes entre 10 y 100 metros. La aplicación fuera de este rango experimental es de carácter especulativo, tal es el caso de las cuencas hidrográficas en donde las vertientes no son uniformes y frecuentemente tienen 20 %, 30 %, 40 % o más de pendiente” [48]. Se utilizó la expresión de [49] “teniendo en cuenta lo anterior y por eso se recomienda su utilización en cuencas hidrográficas” [50].

Para el cálculo del factor LS, es sumamente necesario calcular el subfactor de pendiente. Para realizar el proceso anteriormente mencionado, se utilizó el mismo modelo digital de elevación DEM, utilizado para elaborar la delimitación de la cuenca. Una vez corregido el modelo mediante la herramienta “Fill”, procesamiento albergado en la caja de herramientas de “Spatial Analyst Tools”; se elabora una capa tipo ráster de pendientes con la herramienta “Slope”. El resultado es un raster de pendientes medido en porcentaje y clasificado por defecto con x o y cantidad de

clases. Para brindarle la forma del polígono de la cuenca hidrográfica es necesario utilizar la herramienta “*Extract by Mask*” de la extensión “*Spatial Analyst Tool*”. Posteriormente, se utiliza la herramienta “*Reclassify*” de la extensión “*3D Analyst Tools*” para brindarle al ráster, una nueva clasificación acorde con proceso. Dado lo anterior, se aplica la reclasificación para lograr 7 clases de grado de pendiente del terreno, como su puede observar en la tabla 12.

Tabla 12. Rango de pendientes del terreno y porcentaje de extensión en la cuenca hidrográfica del río Combeima.

Rango Pendiente (%)	de	Clasificación	Área (ha)	Área (%)
0 - 3		Muy plano	378.843	1.380
3 - 7		Plano	431.634	1.572
7 - 12		Casi plano	632.241	2.302
12 - 25		Ondulado	1997.849	7.276
25 - 50		Muy ondulado	6888.587	25.087
50 - 75		Escarpado	8776.580	31.962
> 75		Muy Escarpado	5361.361	19.525
Zona urbana		-	2991.904	10.896
Total			27459	100

Longitud del terreno de la cuenca hidrográfica del río Combeima

Para generar el cálculo del subfactor “S”, fue necesario con anterioridad, generar un ráster de clasificación de coberturas naturales o seminaturales. Para este proceso se utilizó la herramienta de clasificación supervisada “Clasificación de máxima verosimilitud”, herramienta albergada en la caja de herramientas “*Classification Tools*”. En primer lugar, fueron utilizadas dos imágenes capturadas por el sensor MSI de la plataforma SENTINEL 2A, perteneciente a la Agencia Espacial Europea

(ESA). Capturadas en las fechas 18/02/2020 y 7/06/2020. Se tuvieron en cuenta dos imágenes de diferente fecha ya que, el porcentaje de nubosidad en esas fechas fue el único < 10%. La resolución espacial de las bandas utilizadas (4, 3 y 2), es de 10 metros. Se utilizó un mosaico de dos imágenes ya que la extensión de la cuenca hidrográfica hace necesario realizar un mosaico de las imágenes satelitales. Una vez realizada la clasificación, se aplicaron las ecuaciones actualizadas por [49] para obtener los valores sucesivos del subfactor de L para cada rango de pendiente.

Tabla 13. Valor de "r" para cada una de las coberturas naturales o seminaturales en la cuenca hidrográfica del río Combeima.

Tipo de cobertura	Cobertura	Símbolo	R	Clasificación	Área (ha)
Coberturas arbóreas y pastizales	Bosques y áreas seminaturales	B	0.5	A	11298.684
	Cultivos permanentes	Cp	0.5	A	5361.636
Coberturas de cultivos transitorios y suelos expuestos	Pastos	P	0.5	A	3069.162
	Cultivos transitorios	Ct	1	B	2834.251
	Tierras desnudas	Td	1	B	2093.204
	Nubosidad	N	-	C	1215.407
Coberturas que no aplican	Zonas glaciares y nivales	G	-	C	22.928
	Superficies de agua	A	-	C	835.386
	Zonas urbanizadas	Zu	-	C	728.493
Total					27459

Cálculo del factor LS de la cuenca hidrográfica del río Combeima.

Para la obtención del factor S, se utilizaron las ecuaciones actualizadas por [49]. Estos valores se calcularon a partir de las coberturas naturales y seminaturales de la cuenca y de las pendientes del terreno. Se sobrepusieron las capas pertenecientes a las coberturas y pendientes del terreno a través de la herramienta "Union" en la extensión "Analysis Tools". La tabla 14 presenta los valores del subfactor L. Seguidamente, la tabla 15 presenta los valores de LS para la cuenca hidrográfica del río Combeima y así mismo, la ilustración 10 presenta la ubicación del factor LS en la cuenca.

Tabla 14. Valor del subfactor "L" para cada uno de los rangos de pendiente existentes en la cuenca hidrográfica del río Combeima.

Rango de Pendiente (%)	Clasificación	θ	β	m	L
0 - 3	Muy plano	0.675	0.1017	0.0923	1.0487
3 - 7	Plano	2.25	0.279	0.2181	1.1228
7 - 12	Casi plano	4.275	0.4444	0.3077	1.1869
12 - 25	Ondulado	8.325	0.6736	0.4025	1.2993
25 - 50	Muy ondulado	16.875	0.9669	0.4916	1.4716
50 - 75	Escarpado	28.125	1.1936	0.5441	1.6687
> 75	Muy Escarpado	39.375	1.3386	0.5724	1.8282

Tabla 15. Valor de "LS" para cada uno de los rangos de pendiente presentes en la cuenca hidrográfica del río Combeima.

Tipo cobertura	de Rango Pendiente (%)	de θ	β	m	L	S	LS	Área (ha)
A	0 - 3	0.675	0.1017	0.0923	1.048694233	0.1572	0.1649	276.4814
	3 - 7	2.25	0.279	0.2181	1.122820854	0.4540	0.5098	275.2669
	7 - 12	4.275	0.4444	0.3077	1.186921864	0.8351	0.9912	457.2427
	12 - 25	8.325	0.6736	0.4025	1.299329644	1.9324	2.5109	1502.3389
	25 - 50	16.875	0.9669	0.4916	1.471587829	4.3768	6.4408	6008.5367
	50 - 75	28.125	1.1936	0.5441	1.668676294	7.4195	12.3807	6767.8660
	> 75	39.375	1.3386	0.5724	1.828209596	10.1578	18.5706	4333.7504
B	0 - 3	0.675	0.2035	0.1691	1.090995872	0.1572	0.1715	173.5461
	3 - 7	2.25	0.5581	0.3582	1.20951615	0.4540	0.5491	107.3354
	7 - 12	4.275	0.8889	0.4706	1.29966288	0.8351	1.0853	1734.9675
	12 - 25	8.325	1.3473	0.574	1.452691559	1.9324	2.8072	550.6854
	25 - 50	16.875	1.9338	0.6591	1.678714823	4.3768	7.3474	626.8264
	50 - 75	28.125	2.3873	0.7048	1.941003737	7.4195	14.4012	234.3038
	> 75	39.375	2.6773	0.7281	2.15420138	10.1578	21.8820	1457.2407
Total								24506.388

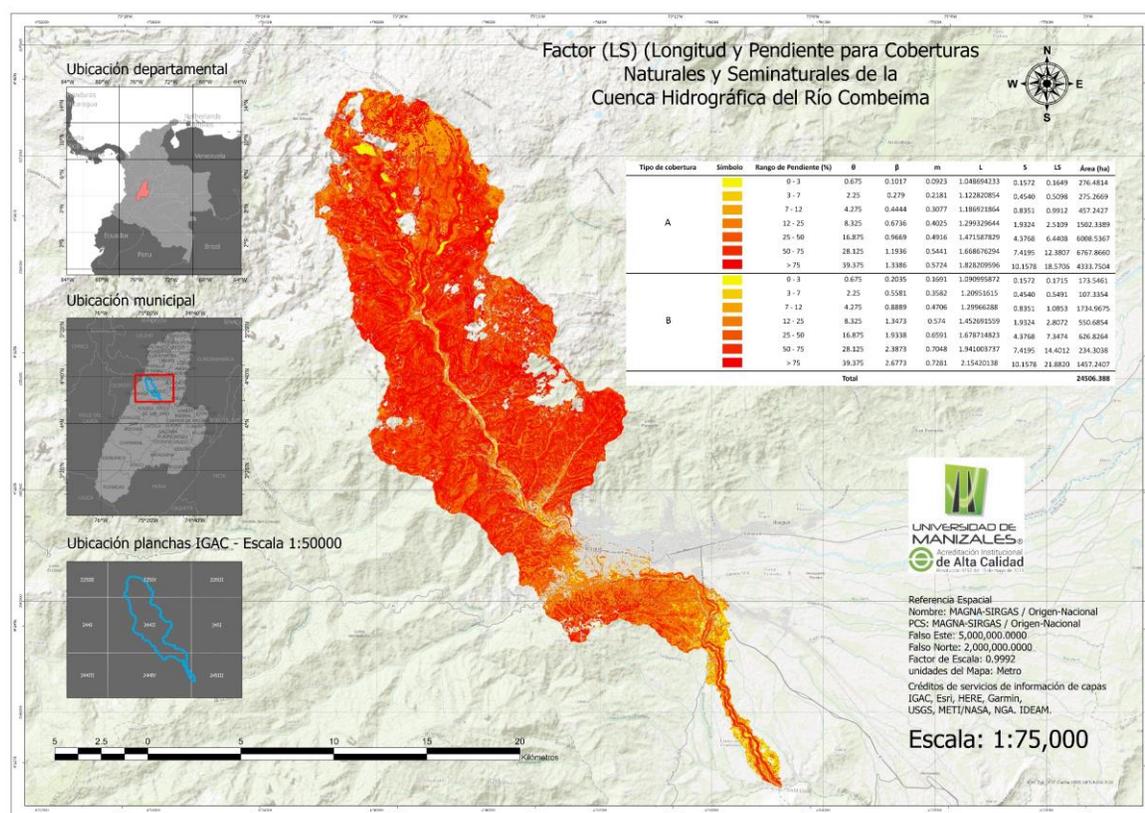


Ilustración 10. Mapa del factor LS para la cuenca hidrográfica del río Combeima

Cálculo del factor (C) – Efecto de la cobertura vegetal en la pérdida de suelo

Para realizar el cálculo del Factor (C) – Efecto de la cobertura vegetal en la pérdida de suelo de la cuenca, se tuvieron en cuenta valores propuestos por [51]. Sumado a lo anterior, se realizó una clasificación supervisada, para evaluar los distintos tipos de cobertura vegetal que se encuentran actualmente en la cuenca.

A continuación, se detalla el proceso de la clasificación supervisada de la imagen satelital para obtener como producto, una capa ráster clasificada de coberturas de la tierra.

Una vez obtenida la imagen satelital compuesta por un mosaico de dos imágenes Sentinel 2, (imagen que fue utilizada para realizar el modelo digital de elevación

para delimitación de la cuenca), Se realizan una serie de salidas de campo para llevar a cabo la toma de puntos de control sobre algunas coberturas de la tierra. Esta información de campo recolectada y almacenada es llevada al software ArcGIS PRO 2.7 y superpuesta en la imagen. Con ella se lleva a cabo el entrenamiento para la asignación de clases a cada una de las coberturas de la tierra ilustración 11. Cada una de ellas se clasificó de la siguiente manera:

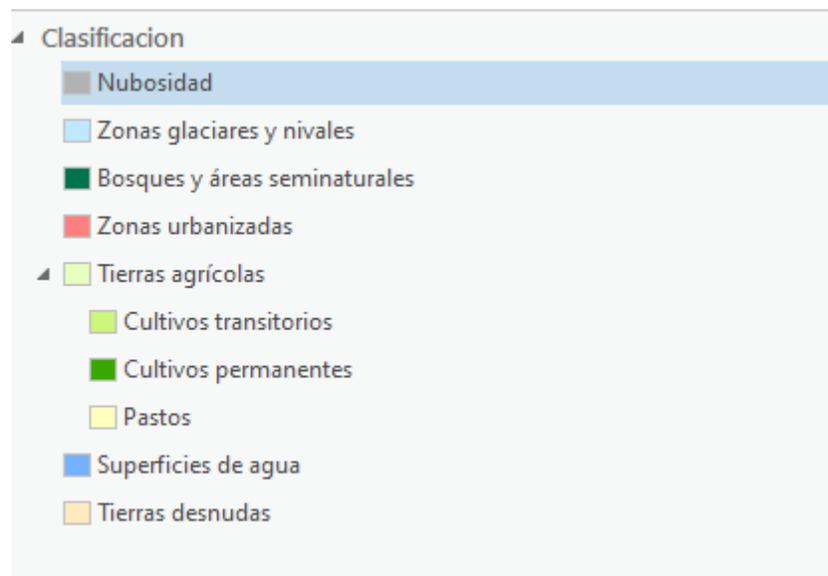


Ilustración 11. Clasificación supervisada de coberturas naturales y seminaturales de la cuenca.

Una vez finalizado el entrenamiento de clases y cada una de ellas con una cantidad acorde de pixeles albergando individualmente valores similares, se realiza el proceso de la clasificación supervisada de máxima verosimilitud. En la ilustración 12 se puede observar la clasificación supervisada de la cuenca hidrográfica del río Combeima.

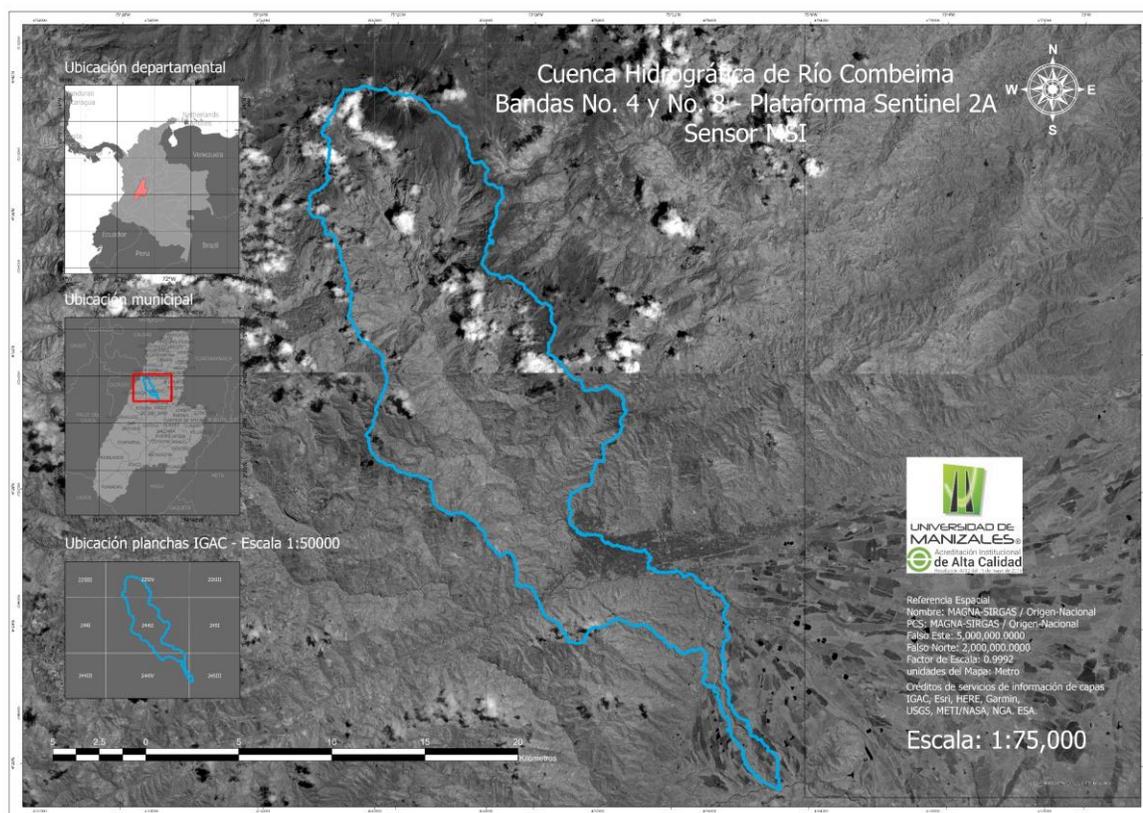


Ilustración 13. Mosaico de imágenes satelitales (Sentinel 2A).

Fuente: Sensor MSI – Dispositivo transportado por la plataforma Sentinel – Operación a cargo de la Agencia Espacial Europea (ESA).

Las coberturas de la cuenca se clasificaron de la siguiente manera:

Tabla 16. Factor (C) para distintos tipos de cobertura natural y seminatural [51].

Tipo de cobertura natural y seminatural	Factor (C)	Área ha
Bosques y áreas seminaturales	0.001	11298.684
Cultivos permanentes (Café, Aguacate, guanábana)	0.01	5361.636
Pastos	0.0175	3069.162
Cultivos transitorios (Arroz, maíz, granadilla, ahuyama)	0.06	2834.251
Tierras desnudas	1	2093.204
Total		24656.937

Una vez finalizado el proceso de clasificación y generando el mapa de coberturas, se procede a realizar la asignación de valores del Factor (C) a cada uno de los tipos de cobertura clasificados. El resultado se puede observar en la Ilustración 14.

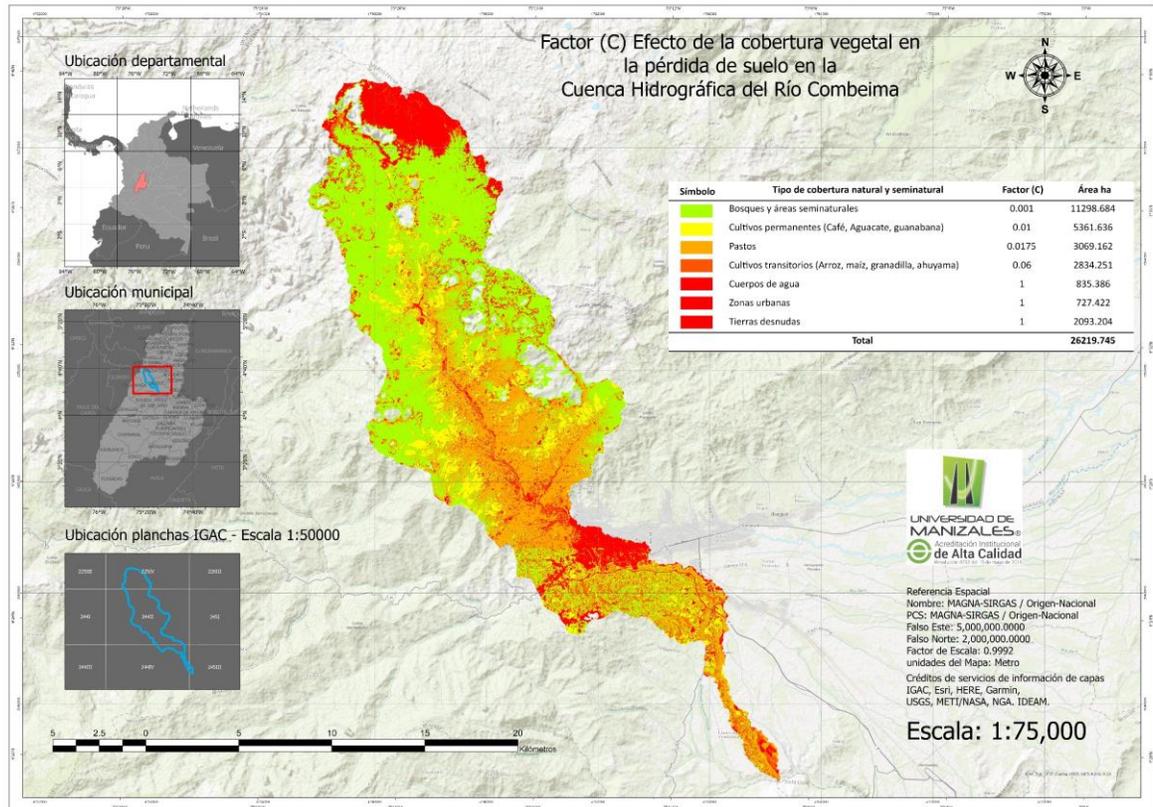


Ilustración 14. Mapa Factor (C) efecto de la cobertura vegetal en la pérdida de suelo en la cuenca. Fuente: Realización propia.

Se ha omitido al cálculo del Factor (P), debido a que en la cuenca no existen prácticas de conservación de suelos y si bien, por parte de la Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima), existen programas de reforestación, la mayoría de ellos poseen pocos años de ser establecidos o son de una mínima extensión.

Multiplicación de capas ráster (calculadora ráster)

Una vez obtenidos cada uno de los factores de la ecuación RSULE y estos representados en capas de almacenamiento de información ráster, procedemos a realizar la última etapa de la metodología: Multiplicar mediante la función “*Raster*

Calculator” alojada en la extensión “*Image Analyst Tool*” sub-extensión “*Map Algebra*”. El proceso se realiza de la siguiente manera.

Nos dirigimos al directorio antes mencionado para abrir la extensión. La interfaz de ella nos muestra dos pestañas: parámetros y configuración del entorno. En la sección de parámetros, encontramos dos campos. El primero de ellos nos mostrará las capas en formato ráster que posee el software ArcGIS PRO 2.7 en su tabla de contenido. El segundo de ellos nos mostrará los operadores para realizar las operaciones matemáticas. Esta interfaz la podemos observar en la ilustración 15.

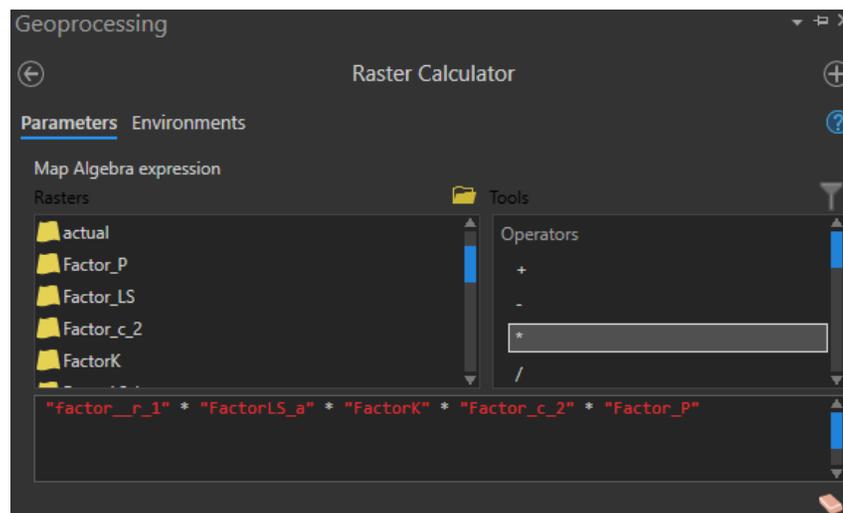


Ilustración 15. Interfaz de extensión "*Map Calculator*" de ArcGIS PRO 2.7.

Durante el proceso, la programación de la extensión del software lleva a cabo la multiplicación de cada uno de los valores pertenecientes a los pixeles de las capas, que pertenecen a una misma ubicación geográfica. Generando así un solo valor en una única capa ráster, la cual alojará pixeles cuyo valor será el resultado del proceso descrito anteriormente. En la ilustración 16, se puede detallar de mejor manera en el procedimiento.

1	5	4	5	6
4	2	4	2	2
3	5	2	5	3
6	4	4	5	5
6	5	6	7	6

 \times

4	4	5	5	5
3	3	2	7	6
3	4	5	4	5
2	3	3	3	3
1	1	2	2	3

 \times

1	2	2	2	3
2	2	4	3	3
3	4	3	3	4
3	2	3	4	5
3	2	4	5	5

 $=$

4	40	40	50	90
24	12	32	42	36
27	80	30	60	60
36	24	36	60	75
18	10	48	70	90

Ilustración 16. Esquema de multiplicación de capas en formato ráster.

Fuente: realización propia.

Una vez finalizado este proceso y obtenida la capa ráster final, se realiza una clasificación de los valores obtenidos para brindarle una temática a la salida gráfica y hacer más fácil su interpretación al lector o usuario. En nuestro caso se clasificaron las zonas o agrupaciones de píxeles que arrojaron una mayor, una media y una menor tasa de toneladas de suelo por hectárea, por año removidas.

6. RESULTADOS

6.1. Erosión Actual

El valor máximo de la erosión actual, presente en la cuenca hidrográfica del río Combeima, es de 660.966 ton*ha*año. El valor mínimo es fue de 0 ton*ha*año. Los valores más altos de erosión en la cuenca se presentan en la parte media y parte de la zona baja como se puede apreciar en la ilustración 17. Estos valores altos se presentan en las zonas anteriormente descritas, debido al factor C, el cual, para esta zona, representó las siguientes coberturas de la tierra: Cultivos transitorios, pastos y suelos desnudos. Actualmente la zona media y baja de la cuenca del río Combeima, posee gran densidad de población.

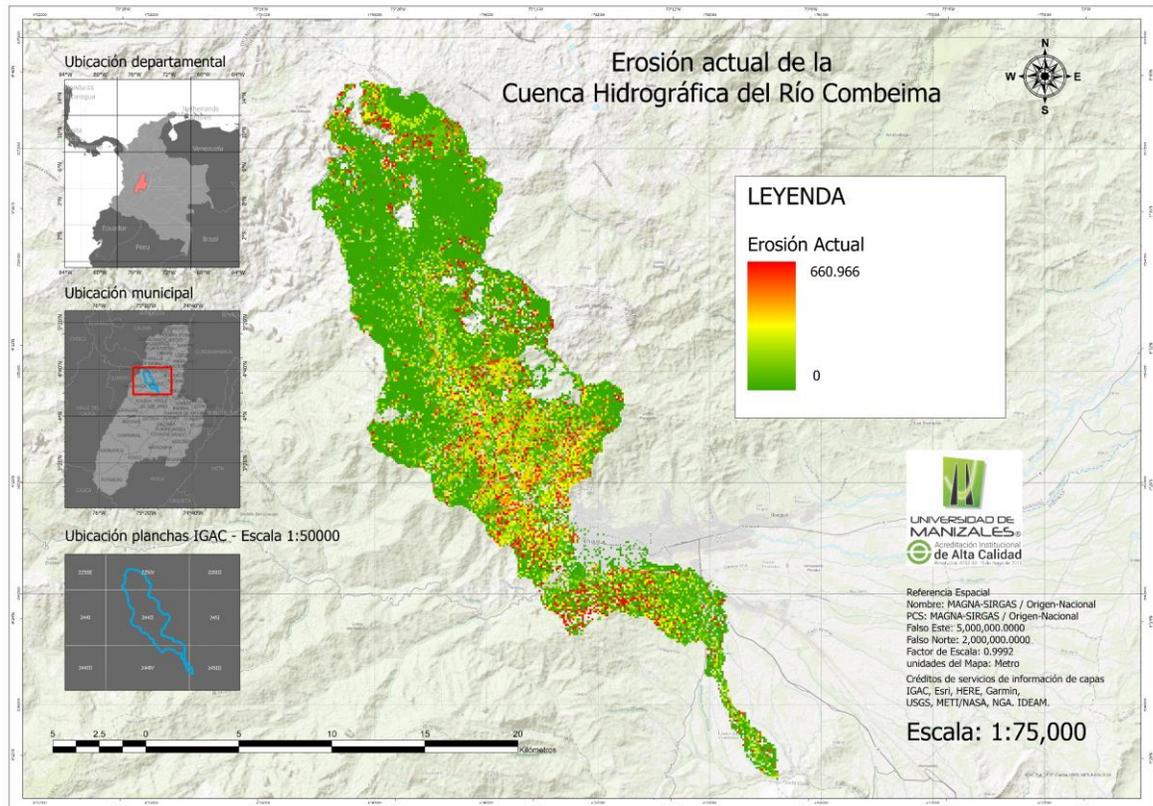


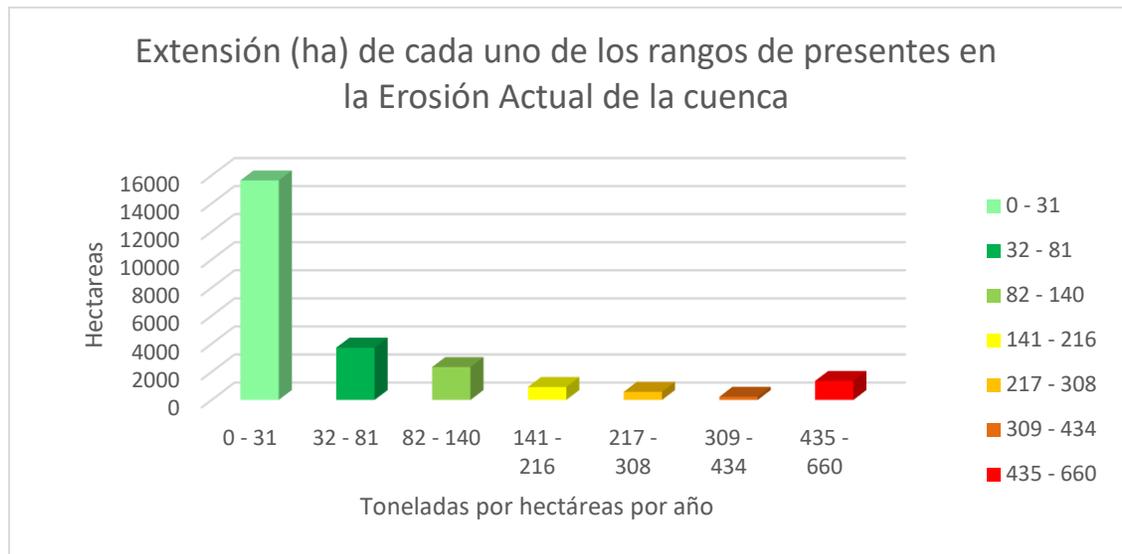
Ilustración 17. Erosión actual en la cuenca hidrográfica del río Combeima.

Fuente: Realización propia.

El rango cuyo valor en extensión de terreno (ha), fue más alto, fue de 0 a 31 ton*ha*año. Aunque gran parte de las coberturas boscosas de la cuenca, se encuentran con algún tipo de afectación, los relictos de bosques, vegetación secundaria, algunos pastizales y las grandes pendientes, favorecen que más del 60% de la extensión de la cuenca, se encuentre dentro del rango mínimo de erosión hídrica. Los resultados de la extensión (ha) del terreno afectada por la erosión hídrica y, clasificada por rangos (ton*ha*año), se pueden visualizar en la Tabla 17 y la Gráfica 1.

Tabla 17. Extensión (ha) del terreno afectada por la erosión hídrica actual y, clasificada por rangos (ton*ha*año) en la cuenca.

Rango (ton*ha*año)	Extensión (ha)	Porcentaje (%)
0 - 31	15641.876	63.07
32 - 81	3726.862	15.03
82 - 140	2344.288	9.45
141 - 216	922.63	3.72
217 - 308	580.43	2.34
309 - 434	227.563	0.92
435 - 660	1356.351	5.47



Gráfica 1. Extensión (ha) del terreno afectada por la erosión hídrica actual y, clasificada por rangos (ton*ha*año) en la cuenca.

6.2. Erosión potencial

El valor máximo de la erosión potencial, presente en la cuenca hidrográfica del río Combeima, es de 680.802 ton*ha*año. El valor mínimo fue de 0 ton*ha*año. Los valores más altos de erosión en la cuenca se siguen presentando en zonas de mayor densidad poblacional y en las cuales se ha presentado el fenómeno de la expansión agrícola y ganadera. La erosión potencial es calculada retirando de la ecuación el Factor C, tal y como si toda la cuenca tuviera suelo desnudo. En la ilustración 18., se observa que la erosión potencial posee casi un patrón similar a el Factor R (erosividad de la lluvia). También podemos observar que, debido a la erosividad en zonas con pendientes muy inclinadas y escarpadas, la erosión potencial aumenta; caso contrario que se observa en áreas relativamente planas y con menor erosividad.

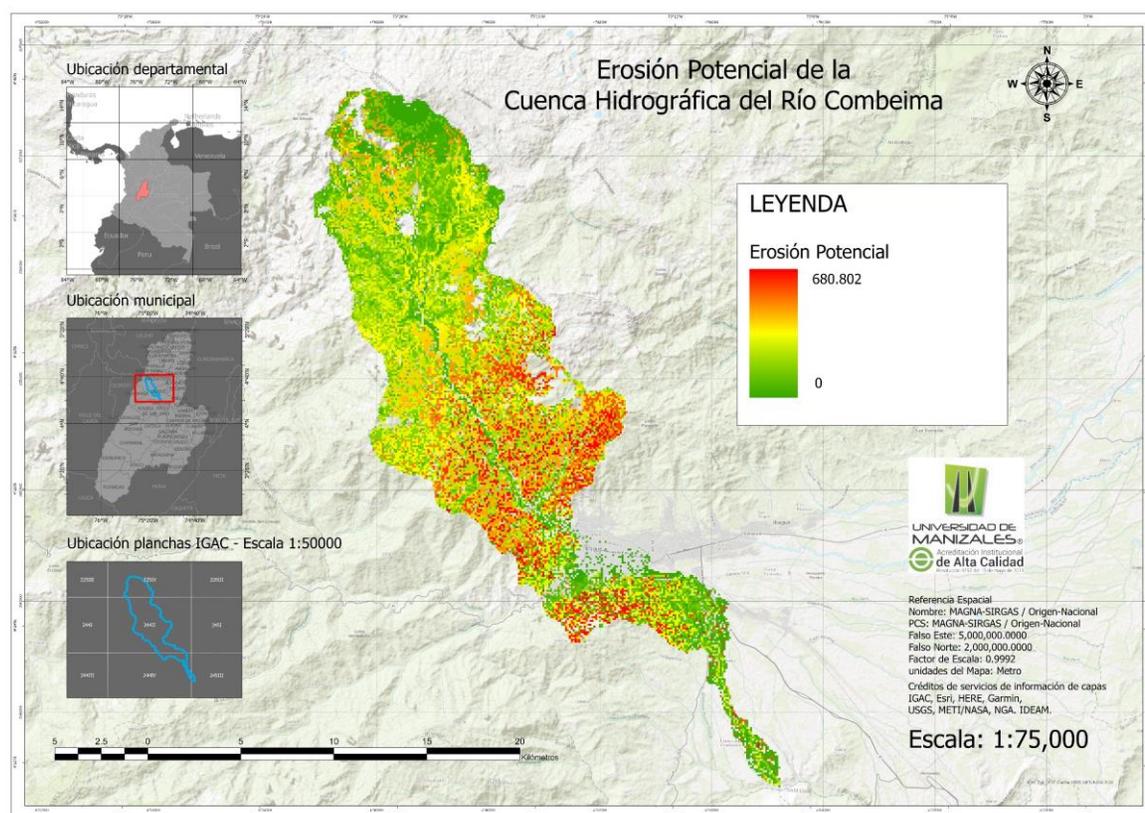


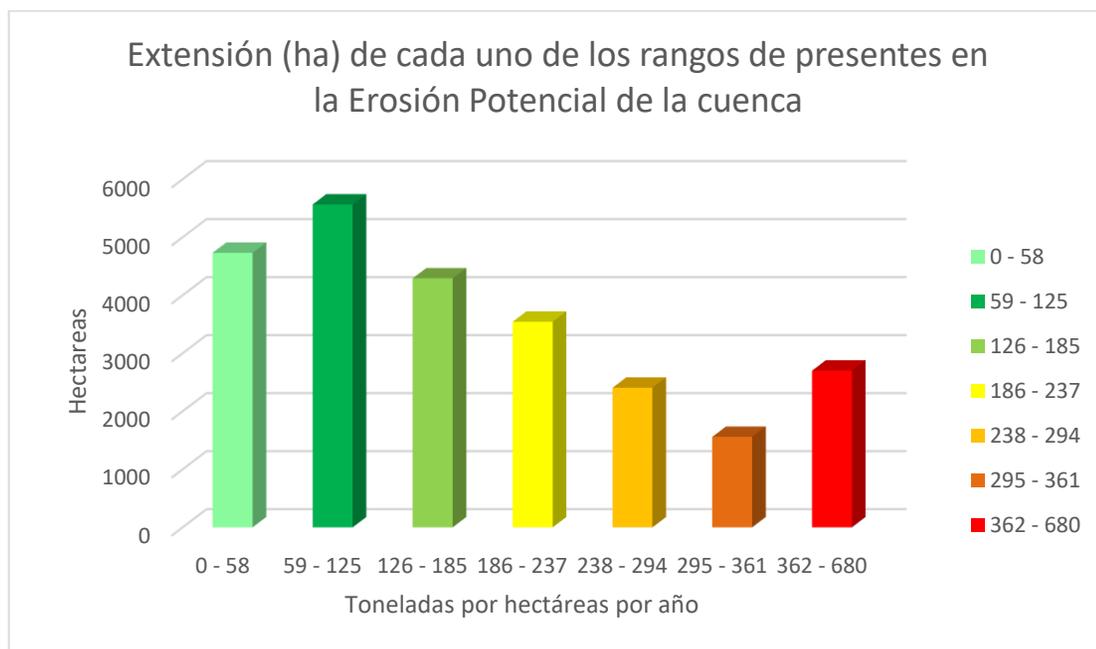
Ilustración 18. Erosión potencial en la cuenca hidrográfica del río Combeima.

Fuente: Realización propia.

El patrón de la cantidad de hectáreas a las que pertenecen cada uno de los rangos de erosión potencial (ton*ha*año), se comportó de la misma manera que observamos en la tabla de los rangos de la erosión actual. Éstos siguieron una tendencia bajista, demostrando un mayor número de extensión de terreno en los rangos más bajos, y un menor número en rangos más altos como podemos observar en la Tabla 18. y Gráfica 2. Este comportamiento puede deberse a la ausencia del Factor C. La ausencia de cobertura vegetal hace que, en los rangos de erosión potencial, la cantidad de hectáreas se comporten de manera similar, pero con tendencia a la baja. Este comportamiento también se ve reflejado por la erosividad y las fuertes pendientes del terreno.

Tabla 18. Extensión (ha) del terreno afectada por la erosión hídrica potencial y, clasificada por rangos (ton*ha*año) en la cuenca.

Rango (ton*ha*año)	Extensión (ha)	Porcentaje (%)
0 - 58	4732.349	19.08
59 - 125	5564.857	22.44
126 - 185	4291.702	17.31
186 - 237	3543.894	14.29
238 - 294	2406.152	9.70
295 - 361	1559.843	6.29
362 - 680	2701.203	10.89



Gráfica 2. Extensión (ha) del terreno afectada por la erosión hídrica potencial y, clasificada por rangos (ton*ha*año) en la cuenca.

6.3. Discusión

En su estudio de la erosión hídrica actual y potencial de la sub-cuenca de Sayula, en Jalisco, México, realizado por Vargas Lomelín [52]; el autor señala como principal protector del suelo a la vegetación. En sus resultados demuestra de cómo a pesar de que en algunas zonas de la sub-cuenca, haya fuertes pendientes (clave para presentarse elevados índices de erosión hídrica), la cantidad de ton*ha*año en estas zonas fueron bajas gracias a la vegetación. En este mismo resultado, el estudio arrojó que las zonas con una menor densidad de vegetación son proclives a poseer altos índices de erosión. El autor en sus resultados del cálculo de la erosión potencial resalta como importantes a los factores R y LS (erosividad de las lluvias y pendiente), ya que, en zonas en las cuales se presentaron alta erosividad y altas pendientes, la erosividad potencial aumenta considerablemente.

Lozano García y Parras Alcántara [53], en su publicación, hacen énfasis en que las zonas que poseen mayor facilidad de degradarse son aquellas que poseen bajos contenidos de materia orgánica (< 2.5%). Coincidiendo también con Sanz, De Bustamante y colaboradores [54], quienes hablan de importantes cifras de erosión actual en las incisiones de los drenajes y también, de la casi nulidad de la erosión en zonas con gran cobertura vegetal. En la cuenca hidrográfica del río Combeima, también podemos observar los valores cercanos a 0, encontrándose estos al norte de la cuenca en zonas poco intervenidas. Actualmente en estas zonas podemos encontrar coberturas de bosque secundario muy poco intervenido.

En un estudio publicado en un libro, en la república Argentina [55], estudio realizado para todo el país. Los autores nos hablan de que el país en su mayor extensión posee pendientes muy poco pronunciadas. Estas se acentúan al costado occidental en la cordillera de los Andes. El autor señala que, en general, la erosión potencial en el país alcanza a sobrepasar las 500 ton*ha*año, niveles preocupantes, ya que estos se presentan tanto en zonas cercanas a los Andes como en las estepas, zonas

desprovistas de vegetación. En la cuenca hidrográfica del río Combeima, estos niveles se encontraron en zonas de mayor densidad de población. Zonas en las cuales la expansión agrícola y ganadera han provocado la reducción considerable de las coberturas vegetales.

Los estudios en Colombia no difieren de los efectuados en los demás países de la región. Un estudio realizado en la ciudad de Bogotá [56], arrojó varios resultados con gran similitud a los presentados en este informe. Los autores concluyeron que el factor más influyente en la erosión hídrica es la pendiente del terreno. Las zonas de ladera, presentes en algunas ubicaciones dentro de la ciudad poseen grandes pendientes. La gran inclinación del terreno junto con la erosividad de la lluvia, por mínimo que sea este valor, ayuda al arrastre de material del suelo, haciendo que este se deposite en lugares con pendientes menos pronunciadas. Otras dos conclusiones de los autores señalan dos variables que van de la mano con el incremento de la erosión hídrica: material del suelo y prácticas de conservación. En las áreas en que presentaron mayores índices de erosión hídrica, además de la pendiente, el material del suelo jugó un factor muy importante. El suelo de esta zona presentó composición de materiales muy finos y areniscas, materiales de fácil arrastre, frente a las arcillas. En contraste a estas áreas de la ciudad, se encontraron lugares en los cuales, a pesar de la inclinación de la pendiente y el material parental, las prácticas de conservación como el alcantarillado, canalizaciones y cambio de la cobertura de suelo desnudo a concreto, han hecho que los índices de erosión hídrica sean mucho más bajos. Por último, los autores constatan que, en las áreas con menor pendiente, los valores de erosión hídrica son bajos.

Por otro lado, en el departamento de Antioquia, en la cuenca del río negro, se realizó un estudio que involucraron, además de las pérdidas del suelo por efectos de la erosión hídrica; los costos económicos que acarrearán las malas prácticas del uso del suelo [57]. Las pendientes pronunciadas es el valor de más peso en la ecuación RUSLE. En el estudio realizado en la cuenca del río Negro, los autores denotan el gran problema de las malas prácticas culturales del uso del suelo, efectuadas en

pendientes pronunciadas. Se hace urgente el cambio del uso del suelo sobre estos terrenos, a un uso exclusivo de cobertura vegetal. Sugieren como alternativa, coberturas de aprovechamiento forestal, ya que estas coberturas ofrecen usos sostenibles y protección al suelo. Dada la remoción que causa la erosión hídrica, los autores mencionan la sedimentación como causa de problemas económicos y sociales, pues a largo plazo, las malas prácticas culturales sobre el uso del suelo, hacen que, en un largo tiempo, afloren verdaderos costos sociales, sugiriendo así, el control de la sedimentación; ya que, las partículas dañan los embalses que hacen parte de infraestructuras de generación de energía eléctrica y, los costos por la reparación y interrupción del servicio de generación de electricidad, serían mayores que si solo se invirtiera en la implementación de sanas prácticas culturales de uso del suelo.

La ciudad de Ibagué no es ajena al problema de la sedimentación. Continuamente la bocatoma del acueducto principal de la ciudad, bocatoma que capta agua del río Combeima; es cerrada por valores elevados de partículas en suspensión, generados por la erosión hídrica. Se hace urgente, la implementación de prácticas de conservación de suelo. Cambio de coberturas agrícolas a exclusivamente cobertura vegetal. Paralelo a esto, también se hace necesario la implementación de obras hidráulicas como alcantarillado, para mitigar los efectos de la sedimentación.

7. CONCLUSIONES

- Se evaluaron mediante el modelo RUSLE y los sistemas de información geográfica las áreas de la cuenca hidrográfica del río Combeima; sensibles a la erosión actual y potencial, y por consecuencia proclives a remociones en masa. Estas áreas han sido delimitadas en ambos mapas.
- La clasificación de la erosión actual y potencial [58], en algunos sectores de la cuenca, se encuentran dentro de los rangos de severa y fuerte, respectivamente. La cantidad de toneladas por hectárea por año, en el análisis de la erosión hídrica actual fue de 660.966, frente a las 680.802 del análisis de la erosión hídrica potencial, resultados encontrados en algunos lugares de la cuenca.
- Si bien los valores arrojados por los dos análisis no son del todo reales, estos, al discreparlos de resultados de estudios relacionados, se acercan a la realidad.
- Los valores más altos de la erosión hídrica actual se encontraron en zonas de ladera (pendientes de gran inclinación) que se encuentran relacionadas con material parental de fácil desprendimiento y con una mínima capa de material orgánica.
- Los resultados que revelaron el análisis de la erosión hídrica potencial, análisis carente del factor C, (vegetación), expuso, como es de esperar, un incremento de 20 toneladas por hectárea removidas en un año. El análisis de la erosión potencial no tiene en cuenta la vegetación presente en la cuenca. Las coberturas de este tipo se encuentran en la parte alta de la cuenca, lugares estrechamente relacionados con suelos que poseen un buen porcentaje de materia orgánica.
- Al contrastar con algunos estudios expuestos en la discusión podemos inferir algunos conceptos:
- La clasificación de la erosión hídrica actual dados sus valores, deja en evidencia la carencia de programas de protección del suelo y el uso y manejo sostenible

de este. Debido a la ubicación geográfica y su relieve compuesto por grandes pendientes, es urgente el cambio de uso de suelo agrícola, por un uso exclusivo de protección y producción, como lo son las plantaciones forestales. Las grandes pendientes acrecientan el fenómeno de la erosión si se les acompaña de factores como la denudes del terreno, material parental débil y de fácil desprendimiento, poco o nulo porcentaje de materia orgánica etc.

- Los factores más influyentes que acentúan la erosión hídrica son: Las pendientes muy inclinadas a escarpadas, material parental débil y unidades de suelo con composiciones de materiales finos y areniscas y carencia de materia orgánica.
- Es de suma importancia las buenas prácticas de conservación del suelo. En el caso del estudio realizado para la ciudad de Bogotá, existen alcantarillados y desvíos como canaletas, las cuales ayudan a mitigar el efecto de la erosión y la sedimentación que esta causa. Dentro de la cuenca no se evidencia prácticas de conservación del suelo. La corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima), ha adquirido algunos predios en pro de la conservación del ecosistema, sin embargo, son áreas de poca extensión geográfica.
- Dado que la zona de estudio se encuentra en la zona andina del país, caracterizada por alta presencia de nubosidad, las imágenes Sentinel 2A, o Landsat, representan un gran desafío si se desea interpretar la totalidad de las coberturas de la cuenca. Es difícil encontrar imágenes con un nivel de nubosidad < al 5% en los servidores que proveen esta información.

8. RECOMENDACIONES

Dadas las clasificaciones de erosión de severa y fuerte, en los que se encuentra o se podría encontrar la cuenca hidrográfica del río Combeima, es sumamente necesario implementar un programa sensibilización del uso y manejo sostenible del suelo hacia la población allí asentada. Los programas deberán socializar el problema en el que se encuentra la cuenca debido a la erosión, las causas y las soluciones a corto, mediano y largo plazo.

El uso y manejo sostenible del suelo puede desarrollarse implementando el cambio del uso de este. Transformando coberturas de uso exclusivo agrícola, por agroforestería. En las zonas de pendientes más pronunciadas o escarpadas, el uso deberá ser protector productor, dándole paso a plantaciones forestales, llevando la frontera agrícola a pendientes más suaves.

Una de las soluciones a corto plazo, es colocarle alto total a la deforestación de bosques secundarios y fragmentados que aún persisten en la cuenca, ya que esta cobertura es la que mejor desarrolla el trabajo de protección del suelo, cubriéndole de las precipitaciones y aportando materia orgánica.

Las soluciones a mediano y largo plazo, será la transición de coberturas agrícolas y ganaderas, por silvopastoriles, agroforestales o plantaciones forestales.

En algunos programas de conservación de especies y ecosistemas a nivel mundial, ONGs, instituciones estatales y privadas, ofrecen incentivos a poseedores de tierras que deseen proteger un área de interés; esta sería una buena iniciativa para promover dentro de la cuenca.

Si bien los resultados se asemejan a la realidad, ya que estos fueron contrastados con otros estudios y, a pesar de que el factor LS (pendiente y longitud del terreno) es el que más peso posee dentro del modelo RUSLE, se recomienda la instalación de un mayor número de estaciones climáticas dentro de la región, ya que el número de ellas es mínimo para elaborar un estudio detallado de una cuenca tan importante como lo es la del río Combeima.

En futuros estudios y además de la recomendación anterior, es recomendable utilizar imágenes que provean modelos digitales de elevación DEMs con mayor resolución espacial. La gran mayoría de las fuentes que proveen estas imágenes SAR, son licenciadas o de pago, sin embargo, un estudio más detallado, ameritaría la compra de esta información. Un ejemplo de imágenes de pago, con alto grado de resolución espacial (1m) son KomSAT-5, operado por la agencia aeroespacial coreana; además de que posee gran variedad de ajustes, como por ejemplo su polarización.

Es recomendable utilizar imágenes SAR para ejecutar el proceso de interpretación de coberturas, ya que, dada la alta nubosidad de la zona de estudio, ubicada en la zona andina del país, pueden encontrarse sesgos o ausencia de información debido a este fenómeno.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] República de Colombia, *Decreto-ley número 2811 de 1974 - Por el cual se dicta el Código de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*, Bogotá, 1974, p. 158.
- [2] G. Monsalve, *Hidrología de la ingeniería*, Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995.
- [3] C. H. LONDOÑO, "*Cuencas hidrográficas: bases conceptuales - caracterización - planificación-administración*," Universidad del Tolima, Ibagué, 2001.
- [4] E. NEGRET, "*Un modelo de manejo integrado para cuencas hidrográficas. República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía. En: Primer congreso nacional de cuencas hidrográficas*," Medellín, Colombia, 1982.
- [5] MADS, *Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por erosión*. IDEAM - MADS -U.D.C.A, Bogotá D.C., Colombia., 2015.
- [6] USDA, *Claves para la Taxonomía de Suelos*. 10a, Washington D.C.: Soil Survey Staff. Departamento. Servicio de Conservación de Recursos Naturales, 2006.
- [7] IDEAM, U.D.C.A, *Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por erosión*. IDEAM - MADS -U.D.C.A, Bogotá D.C., Colombia, 2015.
- [8] P. Balvanera, H. Cotler, O. Aburto-Oropeza, A. Aguilar Contreras, M. Aguilera Peña, M. Aluja, M. Andrade Cetto, I. Arroyo Quiroz, L. Ashworth and M. Astier, *Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos*. En: Sarukhán J. (Coord.). *Capital natural y bienestar social. Volumen II. Estado de Conservación y Tendencias de Cambio.*, México, D.F.: CONABIO, 2009.
- [9] CCE, *Comunicación de la Comisión al Consejo, el parlamento europeo, el Comité Económico y Social y el Comité de las Regiones. Hacia una estrategia temática para la protección del suelo.*, Bruselas: CCE, 2002.
- [10] AEMA, *Señales medioambientales. Resumen*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunicaciones Europeas, 2002.
- [11] FAO, *Cumbre Mundial sobre la Alimentación*. 13 - 17 de Noviembre de 1996, Roma. Italia: FAO, 1996.
- [12] T. LEÓN SICARD, *Curso de Agricultura Sostenible. Relaciones agricultura - ambiente en la degradación de tierras en Colombia.*, http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/2007223/lecciones/lect8/lect8_1.html, 2002.
- [13] FAO, *Base de referencia para los suelos del mundo*, Roma. Italia: FAO, 1998.
- [14] LADA, *Evaluación de la degradación de la Tierra en Zonas Áridas. Informe Final.*, Roma. Italia: FAO, 2003.

- [15 MEA Millenium Ecosystem Assessment, *Ecosystems and Human Well - Being: Synthesis*, Washigton D.C.: Island Press, 2003.
- [16 RAE, 2010.
- [17 A. B. Moreno, "*Escorrentia, Erosión y Conservación de Suelos*," Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, 1999.
- [18 Morgan, "Soil Erosion and Conservation," Blackwell Publishing, London, UK, 2009.
- [19 J. G. Vargas, "Tesis profesional "*Estimación de la Erosión Hídrica Actual y Potencial de la Sub-cuenca de Sayula*", " Jalisco, México, 2015.
- [20 FAO-PNUMA, "*Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*," Roma, Italia, 1980.
- [21 M. S. University, "*Rusle*," 2002. [Online]. Available: <http://35.8.121.139/rusle/about.htm>. [Accessed 11 Octubre 2013].
- [22 J. Guimet & Pereña, "*Introducción Conceptual a los Sistemas de Información (S.I.G.) Estudio Gráfico*," Madrid, España, 1992.
- [23 E. & S. J. & R. R. Turbau, "*Módulo 1: Introducción a los Sistemas de Información Geográfica*," UNIGIS America Latina Programa Avanzado Diplomado en SIG. Unigis Professional. 1era. Edición, 2007.
- [24 V. Y. Cappelletti, "*Aplicación de un sistema de información geografico para la determinación de la erosión hídrica en cuencas del rio agrio*," UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO, Quito, 2011.
- [25 D. COMAS and E. RUIZ, "*Fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica*," Ariel, Barcelona, España, 1993.
- [26 E. CHUVIECO, "Fundamentos de Teledetección Espacial," RIALP, S.A., Madrid, España, 1995.
- [27 E. S. R. I. (ESRI), "ArcGIS PRO Referencia para la erramienta," ESRI, [Online]. Available: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-kriging-works.htm>. [Accessed 30 Marzo 2021].
- [28 E. Lehman and R. Ogrissek, "*Thematic Cartography. In Basic Cartography*," *International Cartographic Association*, vol. 2, pp. 85 - 105, 1988.
- [29 A. Robinson, R. Sale, J. Morrison and P. Muehrcke, "*Elementos de la Cartografía*," Ediciones Omega S.A., Plató, Barcelona.
- [30 Alcaldía Municipal de Ibagué, "Estructura Ecológica Principal Municipal," Ibagué, Tolima, 2017.
- [31 Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima), "“Parque Natural Regional Coello”," Ibagué, 2010.
- [32 Instituto Colombiano De Geología y Minería (Ingeominas) , " Zonificación de amenaza por movimientos en masa y zonificación geomecánica de la cuenca del río combeima – ibagué – tolima. escala 1:25.000," Ibagué, Tolima.

- [33 Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, "Datos Abiertos IGAC," Instituto Geográfico Agustín Codazzi, [Online]. Available: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-igac>. [Accessed 1 Marzo 2021].
- [34 Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, "Geoportal DANE," DANE, [Online]. Available: <https://geoportal.dane.gov.co/servicios/descarga-y-metadatos/descarga-mgn-marco-geoestadistico-nacional/>. [Accessed 1 Marzo 2021].
- [35 Universidad Nacional de Colombia, Geología Colombiana, Bogotá: Comité Editorial Geología Colombiana, 1986.
- [36 MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INFORMACIÓN GEOCIENTÍFICA, MINERO-AMBIENTAL Y NUCLEAR INGEOMINAS, "MAPA GEOLÓGICO DEL DEPARTAMENTO DEL TOLIMA - GEOLOGÍA, RECURSOS GEOLÓGICOS Y AMENAZAS GEOLÓGICAS - ESCALA 1:250.000," Bogotá, Colombia, 2001.
- [37 Servicio Geológico Colombiano (SGC), "Motor de Integración de Información Geocientífica (MIIG)," Servicio Geológico Colombiano (SGC), [Online]. Available: <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=BusquedaPredefinida%3DDGGBM apGeolDepart>. [Accessed 1 Marzo 2021].
- [38 Servicio Geológico Colombiano (SGC), "SUCEPTIBILIDAD DE SUELOS EDÁFICOS," Bogotá, 2015.
- [39 Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), "Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento del Tolima," Bogotá, 2004.
- [40 J. ESLAVA, V. LÓPEZ and G. OLAYA, "Los climas de Colombia (Sistema de Cladas-Lang)," *Atmósfera* 7, Bogotá, 1986.
- [41 Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), "Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para los Estudios de la ERA," Bogotá D.C., 2007.
- [42 Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima), "*Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica del río Coello (POMCA)*," Ibagué, Tolima, 2006.
- [43 R. O. Fournier, "*Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems: Geothermics*," 1977.
- [44 D. Gabriels, A. Vermeulen, K. Verbist and V. Meirvenne, "*Assessment of rain erosivity and precipitation concentration in Europe. pp. 87 – 92. In: Gabriels, D. and W. Cornelis (eds.). Proceedings of the International Symposium 25 Years of Assessment of Erosion*," Ghent, Belgium, 2003.
- [45 M. Piscitelli, M. Varni, A. Sfeir and G. Ares, "*Valores de erodabilidad (factor K-USLE) para suelos representativos de la cuenca alta del arroyo Azul (partido de Azul-Buenos Aires)*," *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, vol. 109, no. 1, pp. 17-22, 2010.
- [46 W. H. Wischmeier and D. D. Smith, *Predicting Rainfall Erosion Losses*. USDA Agr. Res. Serv, Hand Book, 1978.

- [47 M. J. Kirkby and R. P. Morgan, *Erosión de suelos*, Mexico: Editorial Limumsa, 1984.
]
- [48 Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA), "*Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Mayor del Río Totare*," Ibagué, Tolima, 2008.
- [49 D. McCool, L. Brown, G. R. Foster, C. Mutchler and L. Meyer, Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation, *Trans, ASAE*, 1987.
- [50 A. G. Barrios R. and E. Quiñonez, "*Evaluación de la erosión utilizando el modelo rusle, con apoyo de sig. aplicación en una microcuenca de los andes venezolanos*," *Forest*, vol. 44, no. 1, pp. 65 - 71, 2000.
- [51 R. Morgan, *Erosión y Conservación del Suelo*, Madrid: Mundi-Prensa, 1997.
]
- [52 J. G. Vargas Lomelín, "Estimación de la Erosión Hídrica Actual y Potencial de la Subcuenca de Sayula, Jalisco, México," Jalisco, México, 2015.
- [53 B. Lozano García and L. Parras Alcántara, "*Erosión actual y potencial en suelos ácidos del sur de españa*," *Terra Latinoamericana*, vol. 29, no. 1, pp. 35 - 46, 2011.
- [54 J. M. Sanz, I. De Bustamante, J. L. Goy, A. M. Graña, I. Barrera, F. M. González Hernández and J. Forteza, "Erosión actual y potencial en el Paisaje Protegido de El Rebollar (Sierra de Gata – Salamanca)," in *Geo Temas 10*, Madrid, 2008.
- [55 J. Gaitán, M. F. Navarro, L. Tenti Vuegen, M. J. Pizarro, P. Carfagno and S. Rigo, "Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina, Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA, 2017.
- [56 J. R. Castillo Caicedo and J. L. Estrada Simbaqueva, "Determinación de Zonas de Erosión Hídrica a Partir de la Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo (R.U.S.L.E), Sistemas de Información Geográfica y Técnicas de Teledetección en la Ciudad de Bogotá," Facultad de Ingeniería - Universidad Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., 2013.
- [57 C. Restrepo Estrada and m. Alviar Ramírez, "Usos óptimos del suelo bajo enfoques ambientales y económicos," Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2013.
- [58 M. L. Páez Capriles, "Clasificación de los riesgos de erosión hídrica con fines de planificación agrícola," Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela UCV, Maracay, 1989.