



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ANÁLISIS DEL RIESGO ASOCIADO A EROSIÓN
PLUVIAL EN UNA MICROCUENCA EN
COLOMBIA Y PROYECCIONES DE PÉRDIDA DE
SUELOS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO
CLIMÁTICO**

Autor:

Laura Raquel Jiménez Arcia

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2020



Análisis del riesgo asociado a erosión pluvial en una microcuenca en
Colombia y proyecciones de pérdida de suelos bajo escenarios de cambio
climático

Laura Raquel Jiménez Arcia

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:
Magister en Ingeniería

Asesora: Alba Nury Gallego Hernández, PhD en Ciencias de la Tierra y Ciencias
Geoambientales

CoAsesor: Hernán Martínez Carvajal, PhD en Geotecnia

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2020

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA



1 8 0 3

Análisis del riesgo asociado a erosión pluvial en una microcuenca en Colombia y proyecciones de pérdida de suelos bajo escenarios de cambio climático

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERIA

Autor: Laura Jiménez Arcia

Directores: Alba Nury Gallego Hernández y Hernán Eduardo Martínez Carvajal

Escuela Ambiental
Facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia

Medellín, Mayo, 2019

COLOMBIA

DEDICATORIA

*A mis padres y mi hermana, por creer en cada uno de mis sueños, porque su amor es mi
fortaleza.*

AGRADECIMIENTO

A mi asesora Alba Nury Gallego por su calidad profesional y humana, quien me ayudó con sus conocimientos, paciencia y dedicación en cada una de las etapas de este proceso, por la confianza y por enseñarme a ser una mejor profesional.

A mi asesor Hernán Martínez, por su gran apoyo, por la confianza y por brindarme todos sus conocimientos en el tema y dar las bases e ideas necesarias para desarrollar este proyecto de investigación.

A mis padres, porque sin su apoyo y amor no hubiera sido posible emprender este camino.

A la empresa Ecodula, especialmente a Cesar Castro por facilitarme información de la cuenca y actividades económicas de la zona.

A Geusep Ortega, por su amistad incondicional y ayuda en temas específicos del proyecto de investigación.

Al semillero de investigación en geología y suelos, por cada una de sus sugerencias que fueron de gran ayuda en el desarrollo del trabajo. Especialmente a Juan Carlos Guzman, Carlos Mendoza, Carlos Herrera, Valeria Bedoya y Daniela Naranjo por su ayuda en el levantamiento de datos en campo.

Al grupo de investigación en infraestructura GII, por el apoyo económico para las visitas a la zona de estudio y trabajo en campo.

Al profesor Camilo Castro, por ayudarme a seleccionar la zona de estudio y a obtener información para el desarrollo del trabajo.

A los profesores Edwin García y Julio Saldarriaga por las sugerencias y acompañamiento en el trabajo de campo.

A mi hermana, familiares y amigos, por creer en mi y darme ánimo en este proceso.

A la Universidad de Antioquia, por formarme como profesional.

ÍNDICE

RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
OBJETIVOS	12
0.1 General	12
0.2 Específicos	12
I MARCO TEÓRICO	13
1.1 Erosión de suelos	14
1.1.1 Tipos de erosión	15
1.1.2 Factores que influyen en la erosión pluvial	19
1.1.3 Estimación de tasas de erosión pluvial	21
1.2 Definición de riesgo	23
1.3 Evaluación de riesgo asociado a procesos de erosión	29
1.4 Proyecciones de cambios en el suelo e influencia del cambio climático	31
II AREA DE ESTUDIO	34
III METODOLOGÍA	37
3.1 Estimación de tasas de pérdida de suelo	37
3.1.1 Erosividad por lluvia (R)	38
3.1.2 Factor de erodabilidad del suelo (K)	40
3.1.3 Factor topográfico (LS)	44
3.1.4 Factor de coberturas del suelo	46
3.1.5 Factor de prácticas de conservación	47
3.2 Análisis de riesgo	47
3.2.1 Amenaza: Probabilidades de excedencia de lluvia y periodos de retorno	49
3.2.2 Vulnerabilidad: Porcentaje de pérdida de suelo útil	50
3.3 Proyecciones de pérdida de suelo	52

IV RESULTADOS	54
4.1 Estimación de tasas de pérdida de suelo	54
4.1.1 Erosividad por lluvia (R)	55
4.1.2 Erodabilidad del suelo (K)	56
4.1.3 Factor de coberturas del suelo (C)	68
4.1.4 Factor de longitud e inclinación de la pendiente (LS)	71
4.1.5 Pérdida de suelo anual	73
4.2 Análisis de riesgo	75
4.2.1 Estimación de amenaza: probabilidades de excedencia de lluvia y períodos de retorno	75
4.2.2 Estimación de vulnerabilidad: porcentaje de pérdida de suelo útil	76
4.2.3 Estimación de Riesgo	80
4.3 Proyecciones de pérdida de suelo	83
V DISCUSIÓN DE RESULTADOS	86
5.1 Discusiones de resultados	86
5.1.1 Estimación de pérdida de suelo anual	86
5.1.2 Estudio de riesgo por erosión	91
5.1.3 Proyecciones de pérdida de suelo	94
VI CONCLUSIONES	96
6.1 Conclusiones	96
REFERENCIAS	112
Anexos	113
A Registro histórico de precipitación de la estación San Roque	114

Índice de tablas

1.1	Descripción de modelos de erosión. Modificado de Merritt et al. (2003).	22
1.2	Valores de pérdida de suelo asociados a estudios realizados en Colombia	24
3.1	Muestras recolectadas en cada estación.	43
3.2	Ensayos de laboratorio	44
3.3	Información de los modelos de circulación general utilizados en la zona de estudio para las proyecciones de pérdida de suelo.	53
4.1	Erosividad por lluvia de la zona.	55
4.2	Descripción general de los horizontes de suelo evidenciados en la zona.	60
4.3	Cálculo de materia orgánica para cada muestra de suelo	65
4.4	Distribución porcentual de partículas de suelo de las estaciones de muestreo.	67
4.5	Propiedades físicas del suelo. A: arena fina; L: limo; Ar: arcilla; M.O: materia orgánica; P: permeabilidad; E: estructura; K: erodabilidad del suelo.	68
4.6	Clasificación de coberturas de acuerdo a la metodología Corine Land Cover y valores de C asociados.	69
4.7	Cálculo de espesores de suelo erosionado para el periodo 2000-2016.	77
4.8	Porcentaje de pérdida de suelo para el periodo 2000-2016	77
4.9	Porcentaje de pérdida de suelo para zonas de cultivo por año. Donde R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ año ⁻¹), A (ton/ha/año), espesor erosionado (cm), espesor erosionado sobre espesor útil (adimensional) y porcentaje de pérdida (%)	79
4.10	Rendimiento en t/ha de la zona de estudio y valores anuales en Colombia.	80

Índice de figuras

1.1	Tipos de erosión pluvial: (A) erosión por salpicadura, vía Don Matías - Entreríos, Antioquia (B) erosión laminar, Medellín - Antioquia (C) erosión en surcos, finca Ecodula - San Roque, Antioquia (D) erosión en cárcavas, San Roque, Antioquia.	17
1.2	Mapa conceptual para la evaluación de riesgo. Adaptado de Faber and Stewart (2003).	28
2.1	Ubicación zona de estudio.	35
2.2	Ciclo anual de precipitación de la estación San Roque - Antioquia. Tomado de base de dato del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)	35
2.3	Coberturas en la zona de estudio: pasto, bosque y cultivos de caña de azúcar, finca Edocula, San Roque, Colombia.	36
3.1	Variables del modelo RUSLE.	38
3.2	Ubicación de estaciones de muestreo	43
3.3	Variables asociadas a la evaluación de riesgo por erosión: amenaza, vulnerabilidad y elementos expuestos.	48
3.4	Mapa conceptual del enfoque de las variables de riesgo para el presente estudio.	48
4.1	Valores de la erosividad por lluvia para cada año del periodo en estudio y la precipitación total en cada año.	56
4.2	Horizontes de suelo. Donde en A) 1. Horizonte A; 2. Transición horizonte A y E; 3. Horizonte E. B) Horizonte B. y C) Horizonte C.	61
4.3	Fotografías de horizontes encontrados en las estaciones de muestreo.	62
4.4	Pruebas de infiltración en campo	64
4.5	Curvas granulométricas de las muestras de suelo.	66
4.6	Coberturas de suelo	70
4.7	Factor C.	71
4.8	Mapa de pendientes.	72
4.9	Mapa de factor topográfico LS.	72

4.10	Mapas de erosión anual. 1.A. Año 2002 con $K=0,04$; 2.A. Año 2002 con $K=0,05$; 3.A. Año 2002 con $K=0,06$; 1.B. Año 2011 con $K=0,04$; 2.B. Año 2011 con $K=0,05$; 3.B. Año 2011 con $K=0,06$	74
4.11	Probabilidades de excedencia de los valores anuales de precipitación de la estación San Roque asociadas a un periodo de retorno.	76
4.12	Porcentaje de pérdida de suelo útil. 1) Año 2002 - horizonte A; 2) Año 2011 - horizonte A.	78
4.13	Árbol de decisiones para el estudio de riesgo por erosión, por medio de los posibles escenarios del problema en estudio.	81
4.14	Relación Amenaza y vulnerabilidad. La amenaza está representada por la probabilidad de excedencia de un evento de precipitación que genere determinado porcentaje pérdida. La vulnerabilidad está representada por el porcentaje de pérdida de suelo útil para cultivar (es una representación de la vulnerabilidad del horizonte A). El periodo de retorno es un indicador de la recurrencia de un evento de precipitación que puede generar determinado porcentaje de pérdida en un tiempo determinado.	82
4.15	Probabilidad de pérdida de suelo útil establecida como la probabilidad de excedencia de los eventos de precipitación en el registro histórico en estudio (2000-2016) y su influencia en los valores de pérdida de suelo y la vulnerabilidad como el porcentaje de pérdida de suelo útil.	83
4.16	Registro histórico de precipitación por medio de datos satelitales y modelos. . .	84
4.17	Erosión actual y proyecciones de pérdida de suelo	85
5.1	Procesos de erosión en la zona de estudio.	90

RESUMEN

La pérdida de suelo por erosión es un problema que se ha intensificado con las actividades humanas. En el presente estudio se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) integrado con herramientas de información geográfica (SIG) para evaluar la pérdida de suelo en una subcuenca del río Nus en el municipio de San Roque – Colombia. Los resultados para erosividad por lluvia, erodabilidad del suelo, factor topográfico y factor de coberturas arrojaron valores de 133 a 241 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, 0.03 a 0.06 ton h MJ mm⁻¹-, 0 a 7464 y 0.001 a 0.5, respectivamente. Los resultados indican que los valores más altos de pérdida de suelo se tienen en zonas con vocación agrícola (cultivo de caña). El análisis de riesgo se realizó por medio de la estimación de probabilidades de excedencia de lluvia que generan erosión (amenaza) y el nivel de pérdida de suelo útil para cultivar (vulnerabilidad) en un elemento expuesto que es el cultivo de caña donde los resultados muestran que para probabilidades de excedencia de lluvia menores, se tiene un mayor valor de erosividad por lluvia generando mayor pérdida de suelo y mayor pérdida de suelo útil para cultivar. Adicionalmente, se estimaron proyecciones de pérdida de suelo de acuerdo con cambios en la precipitación bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5, los resultados indican que para el periodo de 2034-2050 y 2084-2100 hay una disminución en la precipitación, que se ve reflejado en los valores de erosividad por lluvia, disminuyendo los valores de pérdida de suelo a largo plazo. Estos resultados pueden servir para la implementación de medidas de gestión y conservación del suelo.

INTRODUCCIÓN

La erosión es un proceso natural que comprende el desprendimiento, arrastre y depósito de suelo en un determinado lugar, siendo responsable, junto con la acción de otros factores naturales, de la variedad de geformas que se tienen en el planeta (Tarbuck and Lutgens, 2005). Sin embargo, existe evidencia que la actividad humana ha desencadenado un aumento sustancial en las tasas de erosión dentro de ciertas escalas espaciales y temporales, trabajos que estiman tasas de erosión demuestran que la tendencia en tasas actuales de erosión supera las que se produjeron antes de que se implementaran actividades de agricultura intensiva (Nearing et al., 2017). Aún siendo la agricultura una de las actividades responsables del aumento en las tasas de erosión en algunos lugares del mundo, la erosión pluvial es una seria amenaza para la sostenibilidad agrícola debido que uno de los impactos significativos de la erosión en la agricultura es la disminución de los niveles de productividad de los cultivos (Sposito, 2013), esto es debido a las alteraciones en algunas propiedades importantes del suelo para el rendimiento de cultivos como contenido de materia orgánica, estado de los nutrientes, textura, estructura y características de retención de humedad (Lal and Moldenhauer, 1987). Considerando que la tasa de renovabilidad del suelo es de un orden mayor a la escala de tiempo humano, necesario implementar medidas de intervención como la agricultura sostenible, de tal forma que se mantenga un equilibrio entre la conservación de los recursos y las tasas de producción asociadas a la actividad agrícola (Vanwalleghem et al., 2017).

Debido al alto impacto de los procesos de erosión en los suelos y su afectación a las actividades humanas es necesario cuantificar las tasas de erosión, para comprender el fenómeno y poder así desarrollar medidas de prevención y mitigación que permiten disminuir los efectos a largo plazo. Para estimar tasas de erosión pluvial, modelos empíricos y físicos son las herramientas más utilizadas; sus aplicaciones han tenido especial valor en parcelas de cultivo. La ecuación universal de pérdida de suelo y la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (USLE y RUSLE respectivamente) son dos importantes y ampliamente usados modelos empíricos de erosión de suelos en cuencas agrícolas (Udayakumara et al., 2010). Los resultados de estos modelos permiten cuantificar áreas en que las tasas de erosión exceden algún valor de erosión severa o estimar valores de erosión en lugares donde se tienen limitaciones en la obtención de datos (Boardman, 2006).

En Colombia, se estima que el 40% de la superficie continental e insular presenta algún grado de degradación de suelos por erosión: los procesos de erosión pluvial son los más característicos siendo la erosión laminar, en surcos y cárcavas de mayor representatividad en el territorio nacional; adicionalmente, el 60% de estas áreas corresponde a zonas con vocación agrícola (IDEAM, 2015b). El panorama local refleja que la erosión pluvial es un problema que puede afectar los sistemas agrícolas en el país, teniendo en cuenta que los costos de mantener la producción u otras actividades en una cuenca pueden incrementarse al no tener un suelo en condiciones aptas para las funciones requeridas, lo que necesita intervenciones que permitan regular el estado del recurso y mantener sus características; el desconocimiento de los costos que genera la degradación de suelo por erosión, conlleva en la mayoría de los casos, preferir medidas de compensación que resultan luego de haberse materializado el fenómeno, lo que implica más tiempo e intervención. Realizar una evaluación que permita alertar sobre posibles cambios en el suelo y las consecuencias asociadas a estos cambios, es una herramienta que puede servir

para la gestión del recurso. Esta evaluación puede desarrollarse por medio de la relación entre la posibilidad de ocurrencia de ciertos valores de pérdida de suelo y las pérdidas asociadas a este fenómeno; conocer la relación entre la materialización de erosión de suelo con el nivel de pérdidas o consecuencias asociadas, puede servir como un argumento para los gestores en la conservación del suelo, permitiendo no solo mantener las actividades en la cuenca, también evitar consecuencias ambientales e irreversibles para el recurso en la actualidad, a mediano y largo plazo. Adicionalmente, conocer proyecciones acerca del estado del suelo advierte sobre las posibles condiciones en la cuenca y permite intervenir sobre el recurso ante los escenarios planteados a futuro.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde el punto de vista agrícola, la erosión de suelo es una seria amenaza para la sostenibilidad agrícola debido a que los recursos del suelo son finitos a una escala de tiempo humano, la agricultura sostenible depende entre otras cuestiones, de los recursos naturales: el suelo, agua y otros componentes del medio ambiente (Vanwalleghem et al., 2017). La capacidad de la agricultura para aumentar los rendimientos de los cultivos se ve amenazada por la erosión y degradación del suelo (Sposito, 2013). La retroalimentación entre la erosión, las propiedades del suelo, la vegetación y los rendimientos de los cultivos agrícolas son complejas y difíciles de cuantificar (Vanwalleghem et al., 2017). Por otro lado, la pérdida de las propiedades intrínsecas del suelo es un problema ambiental ya que la tasa de renovabilidad de los suelos es baja y se puede hablar de una pérdida del recurso y de servicios ecosistémicos. Adicionalmente a esto, las estimaciones globales de los cambios en la erosión de los suelos con escenarios climáticos futuros proporcionan una perspectiva amplia de esta importante cuestión ambiental; Sin embargo, se necesita información regional y local para orientar futuras estrategias de manejo de la tierra (Hoomehr et al., 2016). Los incrementos de las precipitaciones podrían ser un potencializador de la degradación de suelos, los cambios inducidos por el clima en la erosión del suelo se rigen por cambios en los patrones temporales y espaciales de los volúmenes e intensidades de los eventos pluviales, que influyen en la erosividad futura (Diodato and Bellocchi, 2009). El riesgo por erosión de suelos hace referencia a las consecuencias medibles y cuantificables

debido a la ocurrencia del fenómeno (Merlotto et al., 2016). En la región andina se advierten tasas de erosión cuyas pérdidas del recurso conllevan a implicaciones negativas en aspectos económicos, ambientales y productivos. Las medidas de compensación o remediación cuando se tiene un suelo erosionado generan costos que pueden ser de un orden mayor al valor asociado a medidas de prevención. El desconocimiento de estos costos conlleva en la mayoría de los casos, preferir medidas de compensación que resultan luego de haberse materializado el fenómeno, lo que implica más tiempo e intervención. Realizar una evaluación del riesgo relacionado con las consecuencias de la materialización de un evento de erosión permite alertar en términos cuantitativos las pérdidas asociadas al evento. La relación entre la probabilidad de ocurrencia de erosión y nivel de pérdidas económicas asociadas, puede ser un argumento para los gestores en la conservación del suelo, y de cierta forma, permite no solo mantener las actividades en la cuenca, si no también evitar consecuencias ambientales e irreversibles para el recurso cuya tasa de renovabilidad es del orden de siglos a milenios. De la misma manera, las proyecciones de pérdida de suelo son una aproximación de los posibles cambios del recurso suelo en un futuro (Hoomehr et al., 2016).

OBJETIVOS

0.1 General

Evaluar el riesgo por erosión de suelos en una microcuenca en Colombia de acuerdo con la estimación de amenaza por erosión y pérdidas económicas asociadas a la disminución rendimiento de cultivo de caña en la zona, analizando variaciones en las tasas de erosión de acuerdo con escenarios de cambio climático.

0.2 Específicos

- Predecir la pérdida de suelo anual correspondiente a la zona de estudio.
- Evaluar la amenaza de erosión en la microcuenca de acuerdo con probabilidades de excedencia de valores de pérdida de suelo.
- Estimar la vulnerabilidad relacionada con el nivel de pérdidas económicas en el área de estudio de acuerdo con cambios en la producción de cultivos de caña.
- Realizar estimaciones de pérdida de suelo en periodos futuros de acuerdo con escenarios de cambio climático.

Capítulo I

MARCO TEÓRICO

El suelo es un cuerpo natural compuesto de minerales, materia orgánica, líquidos y gases en la superficie de la tierra y se caracteriza porque tiene horizontes o capas que se diferencian del material inicial como resultado de procesos de meteorización tanto físicos como químicos y de procesos pedogenéticos, tales como: adiciones, pérdidas, traslocaciones y transformaciones de energía (SoilSurveyStaff, 1999). Estos horizontes o capas, son el producto de la meteorización de las rocas o material parental que, junto con otros factores como el clima, los organismos y topografía del área en un tiempo determinado, dan lugar a la formación de los diferentes tipos de suelos que tenemos en el planeta (Huggett, 2016). Los horizontes del suelo tienen características físicas y químicas diferentes entre uno y otro, en virtud que los factores formadores de suelo y procesos pedogenéticos actúan con mayor intensidad en la superficie del suelo y disminuyendo a medida que se aumenta la profundidad del suelo (Huggett, 2016). El suelo cumple funciones vitales para la sociedad y el planeta como lo son: ciclos biogeoquímicos, ciclo del agua, actividades de agricultura, sostenimiento ecológico de especies, entre otros (IDEAM, 2015b). Sin embargo, este recurso está cada vez más amenazado por las actividades

humanas que contribuyen a su degradación y deterioro. Los procesos de pérdida de suelo convencionalmente identificados son la lixiviación de material, pérdida de calidad y la erosión, que corresponde a la pérdida física, desprendimiento u arranque y movilización de las partículas de suelo. Los procesos de erosión son ampliamente reconocidos, más su estudio es complejo dada la diversidad de factores que eventualmente intervienen en el proceso. En ocasiones la erosión representa un peligro para las áreas cultivadas convirtiéndose en un problema universal a tratar (Conciani, 2008). En Colombia, la erosión pluvial constituye un gran problema para las actividades de agricultura.

1.1 Erosión de suelos

La erosión de suelos es un proceso de pérdida que consiste en el arranque de partículas de suelo o roca, mediada por agentes externos como el agua, el viento y el hielo que transportan el material y lo depositan en otro lugar; la mayor parte de las ciencias a las que compete el estudio de erosión de suelos entienden el proceso como la suma de todos los procesos destructivos por medio de los cuales son arrancados los productos de la meteorización y son transportados por medio de un agente; la mayor parte de geólogos y geomorfólogos asocian el proceso de transporte con la erosión, sin embargo, es importante mencionar que para algunos investigadores el proceso de erosión hace referencia al arranque de material mediada por agentes, pero no involucra el transporte (Huggett, 2016). El proceso de erosión hace parte del grupo de procesos naturales externos que se ocupan de denudar y moldear el terreno, dentro del ciclo de las rocas, se pueden definir como procesos de denudación del terreno: la meteorización, procesos gravitacionales y erosión (Tarbuck and Lutgens, 2005). La meteorización es la descomposición y desintegración química, biológica y mecánica con nada o muy poco transporte; el material

meteorizado puede permanecer in situ o puede ser desplazado a zonas más bajas en las laderas, como respuesta a la fuerza de la gravedad. Entre los procesos gravitacionales se reconocen: movimiento en masa, caída de bloques, y flujos de lodo o flujo de tierra; estos procesos se diferencian de la erosión porque no requiere del agente de transporte para desplazar el material (Tarbuck and Lutgens, 2005). Los productos de la meteorización, in situ o transportados y acumulados estarán listos para que los factores formadores de suelo actúen sobre ellos, generando horizontes de suelo cuyas propiedades físicas, químicas y biológicas permitirán que se diferencien entre ellos (Ditzler et al., 2017).

1.1.1 Tipos de erosión

Los procesos de erosión se clasifican en función de su dinámica y del agente erosivo, de modo que la clasificación general de tipos de erosión da cuenta de erosión eólica, glacial, marina, fluvial y pluvial.

Erosión Eólica

Arrastre y depósito de partículas tamaño limo y arena fina por acción del viento, se evidencia en regiones con escasa vegetación, como desiertos cálidos y fríos, zonas de arenas costeras y en algunas regiones montañosas expuestas (Corpocaldas, 1998). El desplazamiento del material del suelo mediado por el viento casi siempre es causado por una disminución de la cobertura vegetal del suelo, ya sea debido al sobrepastoreo o la eliminación de vegetación para uso doméstico o agrícola. En general, los suelos de textura gruesa son más vulnerables a la erosión eólica que los suelos de textura fina (Oldeman, 1992).

Erosión Marina

Causada por el impacto del agua de los mares y océanos sobre los suelos y rocas de la costa. Esta forma de erosión es acentuada en las épocas en que las corrientes marinas están excavando el suelo, en otras épocas, esta misma área pasa a ser local de acumulación del material excavado (Conciani, 2008).

Erosión Fluvial

Producida por la fuerza del agua encauzada debido a su circulación por canales naturales de drenaje, capaz de arrastrar partículas de suelos y fragmentos grandes de rocas que poco a poco se van desgastando (Corpocaldas, 1998).

Erosión glacial

Ocurre cuando se incorporan detritos subglacialmente en el hielo mediante congelación, se van transportando dentro del interior del glaciar y se liberan mediante deposición o en la parte superior del glaciar (supragracial) cuando se tiene un retroceso del glaciar. (Boulton, 1996).

Erosión Pluvial

Cuando el agente que desencadena el proceso de erosión es la precipitación se denomina erosión pluvial; parte de la precipitación que cae sobre la tierra retorna a la atmósfera como evaporación o transpiración, otra parte se infiltra en el suelo alimentando las aguas subterráneas o queda retenida como parte del suelo, el resto del agua escurre sobre el terreno como escorrentía superficial (Chow et al., 1994). Cuando la infiltración es menor a la escorrentía superficial, las gotas de agua que impactan en el suelo pueden ocasionar desprendimiento y desplazamiento de las partículas de suelo, en función de su energía cinética e intensidad del evento de precipitación

(Lal and Moldenhauer, 1987).

Los procesos de erosión pluvial se clasifican en erosión por salpicadura, erosión laminar, erosión en surcos y erosión en cárcavas (Figura 1.1).

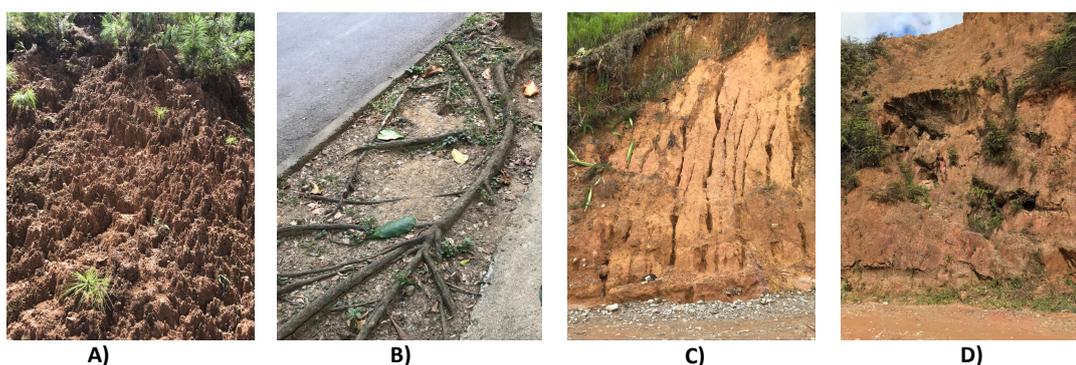


Figura 1.1: Tipos de erosión pluvial: (A) erosión por salpicadura, vía Don Matías - Entrerríos, Antioquia (B) erosión laminar, Medellín - Antioquia (C) erosión en surcos, finca Ecodula - San Roque, Antioquia (D) erosión en cárcavas, San Roque, Antioquia.

Erosión por salpicadura: es el resultado del impacto directo de las gotas de agua en el suelo o en una capa delgada de agua sobre la superficie del suelo. En este proceso, las partículas del suelo son arrastradas y transportadas (Park et al., 1982).

Erosión laminar: proceso que se da debido al efecto de la lámina de agua de escorrentía que se forma sobre el suelo y que posee la suficiente energía para generar arrastre de las partículas de suelo; como resultado se forman delgadas capas de suelo extendidas en forma uniforme en la superficie del terreno (Conciani, 2008). El flujo laminar sobre la superficie del suelo ocurre principalmente cuando la superficie es lisa, de pendiente uniforme y la posibilidad de infiltración es reducida.

Erosión en surcos: ocurre cuando la lámina de agua que se mueve sobre la superficie del suelo fluye a lo largo de vías preferenciales formando canales fácilmente reconocibles; por ejemplo, en zona con cultivos la superficie del suelo presenta depresiones, elevaciones e irregularidades que concentran los flujos de agua en corrientes con capacidad erosiva en función de la velocidad del agua, formando los surcos (Conciani, 2008).

Erosión en cárcavas: corresponde al aumento de las dimensiones en las incisiones del suelo, formando parte del paisaje y cambiando las características geomorfológicas de la cuenca. Surge generalmente luego de la erosión laminar y la erosión en surcos, al aumentar el volumen de escorrentía o su velocidad; suele ser producto del descuido en la aplicación de medidas protectoras cuando se tienen formas incipientes de erosión (Conciani, 2008). En tierras intensamente cultivadas, las cárcavas ocurren con más frecuencia de lo que se pensaba anteriormente, uno de los problemas encontrados al estudiar estos fenómenos de erosión es que estas cárcavas a menudo son ocultadas rápidamente con la labranza poco después de haberse formado; por lo tanto, existe la necesidad de un monitoreo de campo rápido y detallado de este proceso de erosión (Poesen, 2011). Sin embargo, las cárcavas son una de las pocas evidencias morfológicas de los períodos de erosión del suelo anteriores que reflejan impactos de cambios ambientales (uso del suelo, lluvias extremas) en el paisaje. De hecho, las cárcavas son características geomorfológicas ideales para desentrañar las interacciones entre el ser humano y el entorno inducidas por determinados aspectos socioeconómicos (Poesen, 2011).

El desplazamiento del material del suelo por erosión pluvial puede tener varias consecuencias negativas. La eliminación de parte del suelo generalmente fértil reduce la capacidad productiva del suelo, mientras que en casos extremos la profundidad de enraizamiento puede re-

stringirse para los cultivos agrícolas. Las mediciones de las reducciones en el rendimiento de los cultivos causadas por la erosión del suelo son difíciles, principalmente porque con el tiempo los agricultores pueden sustituir cantidades cada vez mayores de fertilizantes para compensar la pérdida de la fertilidad natural del suelo. En suelos frágiles con una estabilidad de estructura baja, el agua de escorrentía puede conducir a una incisión rápida de las cárcavas, arrastrando suelos con altas cantidades de nutrientes y haciendo que el terreno sea eventualmente inadecuado para la agricultura (Oldeman, 1992).

1.1.2 Factores que influyen en la erosión pluvial

Entre los investigadores pioneros que postularon y evaluaron los factores que influyen en el proceso de erosión pluvial se encuentran Wischmeier y Smith en estudios como: *A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning* (Wischmeier et al., 1960); *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning* (Wischmeier et al., 1978); *Rainfall energy and its relationship to soil loss* (Wischmeier and Smith, 1958), son algunos de los trabajos pioneros desarrollados en el tema. Estos autores consideran que la precipitación, topografía, cobertura del suelo, prácticas de conservación y propiedades físicas del suelo juegan un papel relevante a la hora de estimar tasas de pérdida de suelo. Sus postulados han sido de gran aceptación mundial y aún hoy sus conceptos y principios son vigentes en diferentes trabajos alrededor del mundo como se puede evidenciar en algunos trabajos recientes desarrollados. Ganasri and Ramesh (2016) utilizan en su estudio el modelo RUSLE integrado con sistemas de información geográfica para estimar la pérdida de suelo en la cuenca de Nethravathi ubicada en la parte suroeste de la India (3128.72 km^2), enfatizando en identificar zonas con mayor probabilidad de erosión de suelos; la zona de probabilidad de erosión del suelo se generó superponiendo diferentes capas de los mapas de uso y coberturas del suelo, propiedades del suelo, la

pendiente y factor de erosividad por lluvia utilizando el método de superposición de índice ponderado, las zonas con probabilidad de erosión en el área de estudio se categorizaron en cuatro tipos: baja, moderada, alta y muy alta erosión. Fayas et al. (2019) utilizan el modelo RUSLE integrado con SIG para comprender la variabilidad espacial de la severidad de la erosión; el área de estudio es la cuenca Kelaniriver en Sri Lanka (2292 km^2); El mapa de severidad de erosión se toma como el computo de los cinco factores del modelo RUSLE y las medidas para mejorar la gestión del uso del suelo se aplicó en función del análisis de los factores individuales del modelo RUSLE. En Galdino et al. (2016) evalúan los impactos de planificar y conservar sobre la reducción en la erosión del suelo; estiman la pérdida de suelo con el modelo RUSLE bajo cuatro escenarios de uso de la tierra, manejo de pastos e implementación de terrazas. También se evaluarán los efectos de convertir áreas montañosas en áreas preservadas permanentemente, indicando que los pastos bien manejados plantados en terrazas y áreas muy inclinadas con vegetación nativa presentó una reducción del 709% en la tasa de erosión del suelo por el agua en comparación con pasturas mal manejadas sin prácticas de conservación del suelo. En Karame-souti et al. (2016) enfatizan la modelación de pérdida de suelo con dos modelos: Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE) y la Evaluación Paneuropea de Riesgo de Erosión del Suelo (PESERA) con el fin predecir los cambios en la variabilidad espacial de la erosión del suelo después de un evento de incendio forestal, estimando las tasas de erosión del suelo para el sitio antes y después del incendio.

Así mismo, los estudios señalan que los factores influyentes en los procesos de erosión pluvial pueden tener mayor o menor relevancia en condiciones específicas, es decir, mientras que la precipitación y características internas en los suelos difieren considerablemente de un sitio a otro, es posible que características de cobertura y topografía sean asociadas a características de mayor extensión, en todo caso, será tarea del experto que defina con que datos cuenta y que

tanto depura los datos de entrada para determinar cada factor.

1.1.3 Estimación de tasas de erosión pluvial

Los modelos de erosión en la actualidad son las herramientas más utilizadas para evaluar y cuantificar las pérdidas de suelo, principalmente en parcelas de cultivo (Alewell et al., 2019). Entre los estudios realizados al respecto se han utilizado modelos de base física, empírica y conceptual, difiriendo cada uno en la forma de darle solución a un problema de modelación. Los modelos empíricos se basan principalmente en el análisis de observaciones y buscan describir el comportamiento de los datos observados teniendo en cuenta una serie de suposiciones para desarrollarlos; los modelos de base física se fundamentan en la solución de ecuaciones físicas fundamentales que describen el flujo superficial, carga de sedimentos y en algunos casos algunos parámetros físico-químicos de la cuenca; los modelos conceptuales describen las etapas del proceso a estudiar al igual que sus interacciones, sin entrar en detalles mayores del mismo, se pueden generar resultados de los efectos cualitativos y cuantitativos de los cambios en el suelo sin requerir una entrada de datos muy grandes (Merritt et al., 2003). Algunos de modelos utilizados para estimar tasas de erosión pluvial son descritos en la Tabla 1.1.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) es el primer y más utilizado modelo empírico; fue desarrollado por Wischmeier et al. (1978) sobre la base de miles de puntos de datos experimentales recogidos por el Servicio de Conservación y el Servicio de Investigación Agrícola en 37 estados de Estados Unidos. Los autores, expresaron matemáticamente los factores que influyen en el proceso de erosión pluvial. Una revisión de este modelo fue realizada por Renard et al. (1997) en el cual se conservan las variables de entrada. A pesar de que la ecuación de pérdida de suelo universal (USLE) original se ha mantenido en RUSLE, la tecnología para la evaluación de factores se ha modificado y se han introducido nuevos datos

Nombre	Sigla	Tipo	Escala	Estimación	Referencia
Universal Soil Loss Equation	USLE; RUSLE; MUSLE	Empírico	Ladera	Tasas de erosión de suelo anual	Wischmeier et al. (1978) Renard et al. (1997)
Agricultural Non-Point Source model	AGNPS	Conceptual	Cuenca pequeña	Producción y concentración de sedimentos, erosión y cantidad de deposición (%)	Young et al. (1989)
Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation	ANSWERS	Físico	Cuenca pequeña	Escorrentía y erosión	Beasley et al. (1980)
The Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems model	CREAMS	Físico	40-400 ha	Erosión, deposición y el transporte de sedimentos en canales de primer y segundo orden.	Knisel (1980)
Environmental Management Support System	EMSS	Conceptual	Cuenca	Escorrentía diaria y cargas diarias de sedimento total suspendido, nitrógeno total y fósforo total para subcuencas individuales.	Vertessy et al. (2001)
Griffith University Erosion System Template	GUEST	Físico	Parcela	Concentración de sedimento, concentración promedio de sedimentos basada en eventos para determinar un parámetro de erosión.	Yu et al. (1997)
Hydrologic Simulation Program, Fortran	HSPF	Conceptual	Cuenca	Historial temporal de escorrentía, velocidad de flujo, carga de sedimento y concentraciones de nutrientes junto con una serie de tiempo de cantidad y calidad de agua en cualquier salida de la subcuenca en la cuenca.	Johanson et al. (1980)
IHACRES rainfall runoff and STARS models	IHACRES-WQ	Empírico/ Conceptual	Cuenca	Flujo superficial y concentración de sedimentos suspendidos aguas abajo.	Jakeman et al. (1990) Jakeman et al. (1994)
Integrated Water Quantity and Quality Model	IQQM	Conceptual	Cuenca	Flujo superficial diario, oxígeno disuelto, DBO, coliformes y algas.	DLWC (1995)
Limburg Soil Erosion Model	LISEM	Físico	Cuenca pequeña	Escorrentía, sedimentos, infiltración, agua almacenada.	Takken et al. (1999)
The Productivity, Erosion and Runoff, Functions to Evaluate Conservation Techniques	PERFECT	Físico	Cuenca	Balace hídrico, erosión y el crecimiento de los cultivos en un tiempo diario.	Littleboy et al. (1992)
Watershed Erosion Prediction Project	WEPP	Físico	Ladera/ Cuenca	Distribuciones espaciales y temporales de la pérdida de suelo, rendimiento de sedimento, características de tamaño de sedimento, volúmenes de escorrentía y balance hídrico.	Laflen et al. (1991)

Tabla 1.1: Descripción de modelos de erosión. Modificado de Merritt et al. (2003).

con los cuales evaluar los términos para condiciones específicas. Consiste en la misma ecuación original (parámetros de entrada) pero con mejoramientos en el procedimiento de cálculo de cada uno haciendo un énfasis en prácticas de cultivos y medidas de conservación y con un rango más amplio para los valores de pendientes (Renard et al., 1997). El modelo RUSLE se ha aplicado en áreas extendidas y en diferentes contextos, incluidos zonas de bosques, pastos, áreas intervenidas (Terranova et al., 2009; Ganasri and Ramesh, 2016; Correa et al., 2016; Haregeweyn et al., 2017; Park et al., 2011). Los resultados permiten cuantificar áreas en que las tasas de erosión exceden algún umbral de riesgo o estimar las tasas de erosión en lugares para los cuales no se tienen limitaciones en la obtención de datos, también permite estimar variaciones en la pérdida de suelo con condiciones de clima y suelo variadas (Boardman, 2006).

En Colombia, se han realizado estudios para estimar tasas de erosión pluvial por medio del modelo RUSLE en áreas locales y regionales. En la Tabla 1.2, se resumen algunos estudios asociados a la aplicación del modelo RUSLE en el país.

1.2 Definición de riesgo

El término riesgo denota una estimación probabilística que busca cuantificar la cantidad de pérdidas económicas, que se producen cuando un elemento que está expuesto a determinada amenaza o proceso ocurre (ISO31000, 2009), convencionalmente el riesgo se entiende como una función de la amenaza y la vulnerabilidad (ISO31000, 2009). Estudios de evaluación de riesgo asociado a procesos geológicos es un tema que ha avanzado de manera clara desde la década de los 80s (Whitman, 1984; Li et al., 2010; Isaza-Restrepo et al., 2016; Malamud et al., 2004; Vega and Hidalgo, 2016; Huang and Li, 2011; Whitman, 2000; Narra et al., 2019); ya que se reconoce claramente que los procesos geológicos, desencadenados naturalmente o por actividades

Área de estudio	Variable dominante	Valores de pérdida de suelo (ton/ha/año)	Referencia
Departamento de Caldas	K (Caracterización de propiedades físicas y químicas del suelo)	Desde valores menores a 10 hasta 100	Ramirez and Hincapié (2009)
Quebrada la García (Antioquia)	C (variación de c en dos periodos 1988 y 2000)	Año 1988: desde 0.5 hasta 48 2000: desde 0.5 hasta 400	Villa (2012)
Quindío	Erosión hídrica potencial (R*K*LS)	Valores menores de 10 a valores mayores 100	Quintero et al. (2017)
Quebradanegra, Cundinamarca	K (Características del suelo)	12 a 250	Tauta Muñoz et al. (2018)
Río Grande y San Andrés, Antioquia – Colombia	R (erosividad de la lluvia estimada por dos metodologías)	Erosión media de 942	Rios (2018)
Cuenca en zona andina con vocación agrícola (cultivo de café)	R (erosividad de la lluvia - Factor de erosividad estacional)	Menores a 9 hasta 300	Hoyos (2005)
Cuenca del río Negro - Antioquia		Entre 163.148 hasta 1.130.933	Restrepo and Alviar (2013)
Cuenca de Río Grande (Antioquia)	Erosión hídrica actual - Variaciones en el factor de coberturas	Desde 0 hasta 489	Sepulveda (2013)

Tabla 1.2: Valores de pérdida de suelo asociados a estudios realizados en Colombia

antrópicas inciden cada vez más en la pérdida de vidas humanas, infraestructura y servicios ecosistémicos, se evalúa por ejemplo, el riesgo asociado a la actividad volcánica, actividad sísmica, inundaciones, procesos gravitacionales y erosión, estos procesos geológicos representan la amenaza, mientras que el elemento expuesto se interpreta como población, infraestructura, servicios ecosistémicos, etc. Las ciencias económicas cuentan con metodologías para evaluar la viabilidad económica de proyectos (Gollier, 2004), de manera análoga, se han desarrollado metodologías que permiten estimar el riesgo asociado a procesos geológicos (Whitman, 1984), los cuales constituyen la amenaza; en este sentido, se conocen múltiples estudios en los cuales se puede reconocer un importante avance en la definición de cada una de las variables que permiten estimar el riesgo; por ejemplo el riesgo geotécnico, se describe como: $R = (Hp) (E) (V)$, donde, R representa la evaluación del riesgo, Hp es la probabilidad de ocurrencia del evento, E corresponde al valor total de todos los elementos afectados por el evento, por su parte V es la vulnerabilidad de los elementos expuestos al evento, representa el nivel de pérdidas si se materializa el evento, el producto de la vulnerabilidad y la exposición representan en conjunto las consecuencias en caso de que se materialice el evento descrito en la amenaza (Van Westen et al., 2006; Lee and Jones, 2004). El concepto de riesgo presentado en el párrafo anterior, ha sido aceptado y utilizado en diversas áreas del conocimiento, y ha sido utilizado particularmente para entender las consecuencias asociadas a fenómenos naturales. En resumen, el riesgo es la combinación de la amenaza con el valor de los elementos expuestos, en función de su vulnerabilidad (Merlotto et al., 2016). La amenaza es expresada como la probabilidad de ocurrencia de un evento con determinada magnitud en un periodo de tiempo, entendiendo el evento como un proceso físico que puede ocasionar daños. Las consecuencias asociadas a la amenaza son relativas y van a depender del contexto en el cual ocurren, los elementos expuestos afectados y el valor o nivel de importancia que la sociedad le ha impuesto (Glade et al., 2006). En este

contexto, cada sociedad o grupo social puede tener su propio conjunto específico de riesgos que considera que son motivo de preocupación (Rohrman and Renn, 2000), cada sociedad tiene diferentes formas de aceptar el riesgo; diferentes individuos y grupos de individuos en la sociedad perciben los riesgos de manera diferente: depende de su propia situación, de que tan afectados puedan verse por las exposiciones, en qué medida pueden influir en los riesgos, y en qué medida los riesgos son voluntarios (Winter and Bromhead, 2012). De acuerdo con Faber and Stewart (2003) los criterios más comunes para aceptar el riesgo están gobernados por: la percepción del riesgo, la garantía de que el nivel de riesgo es aceptable o tolerable y el análisis de costo-beneficio de riesgo. La evaluación cuantitativa de riesgo se puede desarrollar de acuerdo a los pasos descritos en la Figura 1.2: 1. Identificar la amenaza, 2. analizar la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias asociadas, 3. Identificar posibles escenarios de riesgo y 4. Finalizar con la evaluación del riesgo. Apostolakis (2004) también establece una línea de diagnóstico para la evaluación del riesgo:

- Definir un conjunto de estados finales indeseables (consecuencias adversas).
- Para estas posibles consecuencias, se identifica el proceso o fenómeno amenazante, y cuáles son los posibles desencadenantes que pueden llevar a dichas consecuencias.
- Se emplean diagramas lógicos para identificar secuencias de eventos que comienzan de cierta forma y pueden terminar en un estado final adverso de acuerdo a las perturbaciones; por lo tanto, se generan escenarios de riesgos.
- Las probabilidades de estos escenarios se evalúan utilizando toda la evidencia disponible, principalmente la experiencia pasada y el juicio de expertos. Estas evaluaciones responden al análisis de probabilidad de ocurrencia del evento.

- Estos escenarios se clasifican según su frecuencia esperada de ocurrencia. El propósito del análisis de riesgo es poder identificar y entender los posibles riesgos asociados a cierta actividad o fenómeno y así proveer información que pueda ayudar a tomar mejores decisiones de gestión de control ante posibles escenarios adversos.

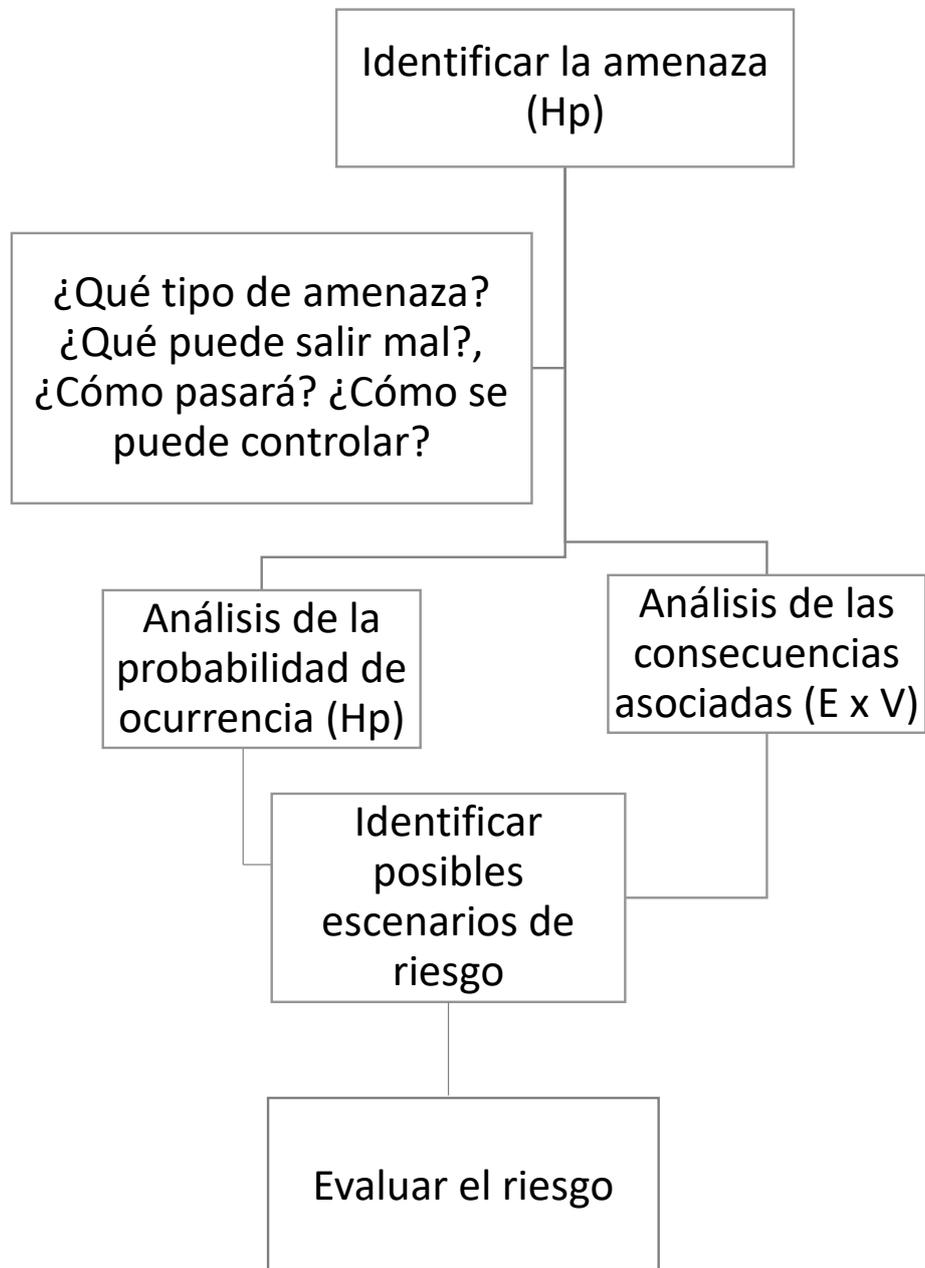


Figura 1.2: Mapa conceptual para la evaluación de riesgo. Adaptado de Faber and Stewart (2003).

El propósito del análisis de riesgo poder identificar y entender los posibles riesgos asociados a cierta actividad o fenómeno y así proveer información que pueda ayudar a tomar mejores decisiones de gestión de control ante posibles escenarios adversos.

1.3 Evaluación de riesgo asociado a procesos de erosión

Son múltiples los estudios que se han realizado buscando evaluar el riesgo por erosión de suelos (Haregeweyn et al., 2017; Narra et al., 2019; Correa et al., 2016; Ochoa et al., 2016; Aslan et al., 2019; Abidin et al., 2017); sin embargo, es claro que no hay consenso en una metodología específica, por el contrario, se han implementado múltiples metodologías entre las cuales, se destacan algunas de las siguientes en mención: se han realizado estudios considerables con respecto a la problemática de erosión de suelos, en los cuales se han utilizado diversos modelos de base física y matemática mencionados en la Tabla 1.1. Algunos enfoques recientes en estudios de riesgo por erosión se mencionan a continuación.

Prasannakumar et al. (2012) evalúan el riesgo por erosión por medio del geoprocesamiento de las variables del modelo RUSLE, realizando el computo de cada una y de esta forma clasificarlo como zonas de severidad de erosión de acuerdo a la tasa de erosión y área cubierta en cada valor; la clasificación de riesgo se categoriza en bajo, moderado y alto de acuerdo a ciertos criterios de tolerancia. En Correa et al. (2016) evalúan el riesgo de erosión de suelo en la cuenca del río Mantaro ubicada en los Andes peruanos asociado con el escenario de cambio climático A1B durante el siglo XXI; la evaluación de riesgo se realizó por medio de una clasificación del riesgo de erosión del suelo basada en la tasa de erosión promedio estimada por RUSLE; partiendo de una clasificación "riesgo muy bajo" a "riesgo extremadamente severo". En Ochoa et al. (2016) plantean la evaluación de riesgo en una cuenca semiárida de Catamayo, el obje-

tivo es avanzar en la comprensión del riesgo de erosión del suelo bajo una la influencia de una fuerte presión antropogénica en los Andes ecuatorianos, teniendo en cuenta: (i) la influencia de altitud y topografía sobre los factores climáticos de la lluvia y la temperatura del aire; (ii) parámetros de riesgo asociados a estaciones seca y la estación húmeda; y (iii) los factores más importantes que controlan la vulnerabilidad a la erosión del suelo asociado a los parámetros del modelo RUSLE. En el estudio de Du et al. (2016) se realizó una evaluación del riesgo de erosión del suelo por efecto del viento y el agua con base en modelos de erosión del suelo; el Sistema Integrado de Modelado de Erosión Eólica (IWEMS) y la Ecuación de Erosión Eólica Revisada (RWEQ) se utilizaron para estimar la erosión eólica y erosión hídrica fue estimado por el suelo universal revisado Ecuación de pérdida (RUSLE). Merlotto et al. (2016) determinan el riesgo de erosión costera de las ciudades de Necochea y Quequén, (Argentina); se estima el riesgo por medio de los componentes amenaza y vulnerabilidad, fueron evaluados por medio de construcción de índices, el índice de amenaza se compone de cuatro indicadores: la tasa de erosión o acreción, geomorfología costera, efectos de olas de tormenta y suministro de sedimentos; el índice de vulnerabilidad se compone de uso / cobertura del suelo, demografía, vida condiciones e indicadores de trabajo y consumo, e incluye datos del censo de población, tales como demografía, educación, salud, sanidad, economía, producción, trabajo y aspectos de exposición de la población. En el estudio de Abidin et al. (2017) el objetivo principal fue evaluar el riesgo de acuerdo a las características texturales del suelo; relacionar la evaluación de riesgos de erosión pluvial en la orilla del río de acuerdo con la composición del suelo, en función de su erodabilidad. El grado de erodabilidad es clasificado en cinco clases: "crítico", "muy alto", "alto", "medio" y "bajo, por medio del cual se establece la erosión en la rivera del río. En Narra et al. (2019) presentan una nueva metodología para evaluación del riesgo por erosión marina: Evaluación del riesgo de erosión costera (CERA2.0); el modelo conceptual evalúa el riesgo en

cuatro componentes: susceptibilidad, valor, exposición y amenaza (erosión costera); posteriormente, estos se combinan para generar mapas de vulnerabilidad, consecuencia y riesgo. Aslan et al. (2019) sugieren el índice de erosividad (EI) como un estimador indirecto del riesgo a erosión del suelo debido a los regímenes de precipitación y la aridez realizando un análisis de agrupamiento (cluster) con las estaciones de precipitación, para establecer el valor del índice de erosividad e indicar zonas de riesgo a erosión de suelos.

1.4 Proyecciones de cambios en el suelo e influencia del cambio climático

El cambio climático se refiere a un cambio en el estado del clima que se puede identificar (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) como cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante un período prolongado, generalmente décadas o más (IPCC, 2013). El cambio climático puede deberse a procesos internos o forzamientos externos naturales tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra (Cubasch et al., 2013; Mann et al., 1998). Sin embargo, las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero han aumentado desde la era preindustrial, impulsadas en gran medida por el crecimiento económico y poblacional, esto ha llevado a concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso que no tienen precedentes en al menos los últimos 800,000 años (IPCC, 2014). Sus efectos, junto con otras emisiones de gases de efecto invernadero antropicas, se han detectado en todo el sistema climático y es muy probable que sean la causa dominante del calentamiento observado desde mediados del siglo XX (IPCC, 2014).

Para representar condiciones presentes y futuras de las variables climáticas se usan comúnmente

los modelos climáticos globales impulsados por grupos de modelación a nivel mundial dentro del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés), con un protocolo experimental estándar para estudiar la salida de los modelos de circulación global (GCM) océano-atmósfera (IPCC, 2013). La versión más reciente es el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados fase 5 (CMIP5), donde describen escenarios de emisiones que describen potenciales descargas de sustancias a la atmósfera que pueden afectar el balance radiativo de la tierra, como los gases de efecto invernadero y aerosoles (Moss et al., 2010). Estos escenarios de emisiones son llamados Vías de Concentración Representativas (RCP), cada RCP proporciona solo uno de los muchos escenarios posibles que conducirían a características de forzamiento radiativo, enfatizando que no solo es importante obtener los niveles de concentración de las sustancias que pueden afectar el balance radiativo a largo plazo, sino también la trayectoria tomada para alcanzar ese resultado en el tiempo (Moss et al., 2010). Son cuatro escenarios de emisiones utilizados en CMIP5: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5, cada uno corresponde a una vía específica de forzamiento radiativo; RCP8.5 es el escenario más pesimista respecto a las emisiones en un futuro (Taylor et al., 2012).

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) desarrolló escenarios de cambio climático para Colombia, siguiendo la metodología del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en el Quinto Informe de Evaluación (AR5), consistió en escoger 16 modelos de circulación global que mejor representaran el clima de referencia en Colombia (1976-2005) y por medio de ajustes estadísticos adaptarlos al contexto local del país (IDEAM, 2015a). Los resultados más relevantes de este estudio indican que un 31% del territorio nacional podría verse afectado por disminución en las precipitaciones en los próximos 25 años y un aumento de 0,7C en la temperatura en los siguientes 25 años en los departamentos del país (IDEAM, 2015a).

Proyecciones a escala mundial y continental no se ajustan a las necesidades de la planificación de cada nación, de modo que se requieren proyecciones regionales o locales de condiciones probables de cinco a 10 años a partir del presente. Además, los encargados de la toma de decisiones están interesados en comprender los impactos del cambio climático en sectores específicos, por ejemplo, la producción agrícola, la seguridad alimentaria, la prevalencia de enfermedades y la vulnerabilidad de la población (Trzaska and Schnarr, 2014).

Debido a que los escenarios de cambio climático pronostican aumentos en las tasas de erosión del suelo con los impactos adversos asociados, modelar las tasas de erosión futuras es un paso crucial para evaluar los posibles problemas agrícolas y ambientales futuros que pueden acompañar a las crecientes tasas de erosión (Mullan, 2013). El clima es uno de los factores dominantes al estudiar procesos de erosión, el efecto principal estar relacionado con la precipitación; de acuerdo a la cantidad e intensidad de la lluvia; sin embargo, la variable dominante parece ser la intensidad y energía en lugar de la cantidad de lluvia sola (Zare et al., 2016). La magnitud del impacto asociado a escenarios de cambio climático son poco claras y difíciles de predecir con precisión, sin embargo estudios sugieren que dentro de los efectos del cambio climático sobre la erosión del suelo en todo el mundo la precipitación es el factor de influencia más directo (Li and Fang, 2016). Es por esto que el clima y los modelos de erosión del suelo se han convertido en instrumentos indispensables para evaluar la respuesta de la erosión con estimaciones de clima posteriores (Routschek et al., 2014).

Capítulo II

AREA DE ESTUDIO

La subcuenca de la quebrada el Carmín, está ubicada en la cuenca del río Nus en el municipio de San Roque al este del departamento de Antioquia – Colombia, cuenta con un área total de $5,7 \tilde{km}^2$ (Figura 2.1), su elevación varía desde 1155 a 1574 metros sobre el nivel del mar, con valores de pendiente entre 0 y 150%.

La precipitación mantiene un régimen de lluvias bimodal, el cual alcanza sus valores más altos en el mes de mayo y octubre (Figura 2.2) el promedio anual multianual de precipitación en el periodo 2000-2016 fue de 3846 mm.

La litología de la zona son rocas ígneas plutónicas, pertenecientes a la unidad denominada Batolito Antioqueño; en los afloramientos observados en el área se reconocieron escarpes rocosos profundos horizontes de suelo, el relieve es montañoso, con presencia significativa de depósitos aluviales de topografía suave. Son evidentes procesos de erosión que han generado significativos surcos y cárcavas y movimientos en masa. El uso del suelo corresponde a cultivo de caña, la cual es la principal actividad económica de la subcuenca y también se identificaron algunas coberturas asociadas a zonas de bosque y pasto. (Figura 2.3). Las razones por las

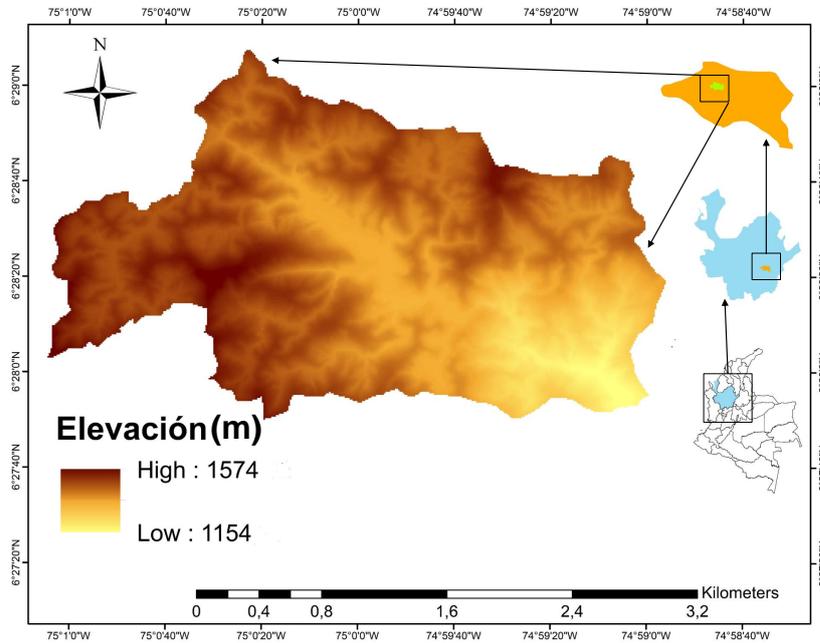


Figura 2.1: Ubicación zona de estudio.

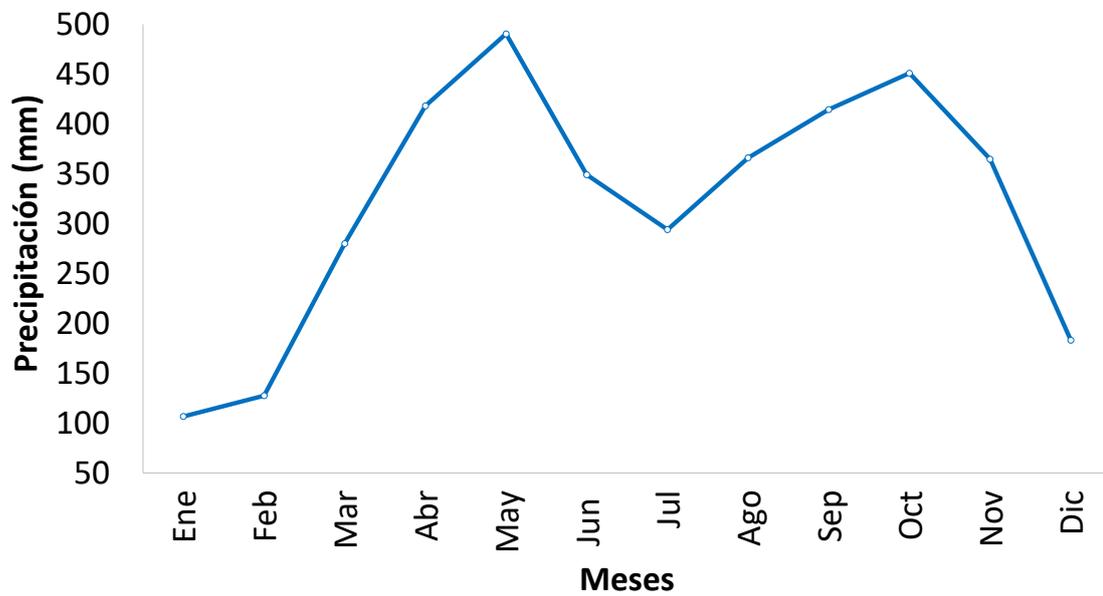


Figura 2.2: Ciclo anual de precipitación de la estación San Roque - Antioquia. Tomado de base de dato del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

cuales fue escogida esta zona de estudio: 1) el tamaño de la subcuenca permitió realizar trabajo en campo para la caracterización física del suelo y así encontrar el factor de erodabilidad del suelo, que requería de información primaria recolectada en la zona; 2) la actividad económica asociada a un solo tipo de cultivo permitió establecer el elemento expuesto como cultivo de caña 3) la obtención de datos, debido a que la empresa de siembra y producción de caña (Ecodula), permitió la utilización de datos de producción asociados al cultivo de caña y recolección de datos en campo para generar los resultados en la investigación.



Figura 2.3: Coberturas en la zona de estudio: pasto, bosque y cultivos de caña de azucar, finca Edocula, San Roque, Colombia.

Capítulo III

METODOLOGÍA

3.1 Estimación de tasas de pérdida de suelo

La ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE) es un modelo que permite estimar tasas de erosión de suelo en un tiempo determinado por medio de cinco variables asociadas con la precipitación, propiedades del suelo, topografía, cobertura y usos del suelo y prácticas de conservación. El modelo se expresa matemáticamente como se describe a continuación en la ecuación (3.1):

$$A = K \times R \times LS \times C \times P \quad (3.1)$$

Donde A es el promedio anual de pérdida de suelo por unidad de área (ton ha⁻¹ año⁻¹), R es el promedio anual de erosividad por lluvia MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, K es el factor de erodabilidad del suelo (ton h MJ⁻¹ mm⁻¹), LS corresponde al factor topográfico asociado a la longitud e inclinación de la pendiente (adimensional), C factor asociado a los usos y coberturas del suelo (adimensional) en un rango de valores de 0 a 1, P factor de prácticas de conservación

(adimensional) en un rango de valores de 0 a 1.

En la figura 3.1 se describe cada una de las variables que alimenta el modelo RUSLE, primera fila; en la segunda fila se describe la característica o propiedades que se debe conocer para hacer uso del modelo RUSLE y finalmente en la línea 3 se describen los posibles insumos con los cuales se pueden determinar las características o propiedades descritas en la línea dos.

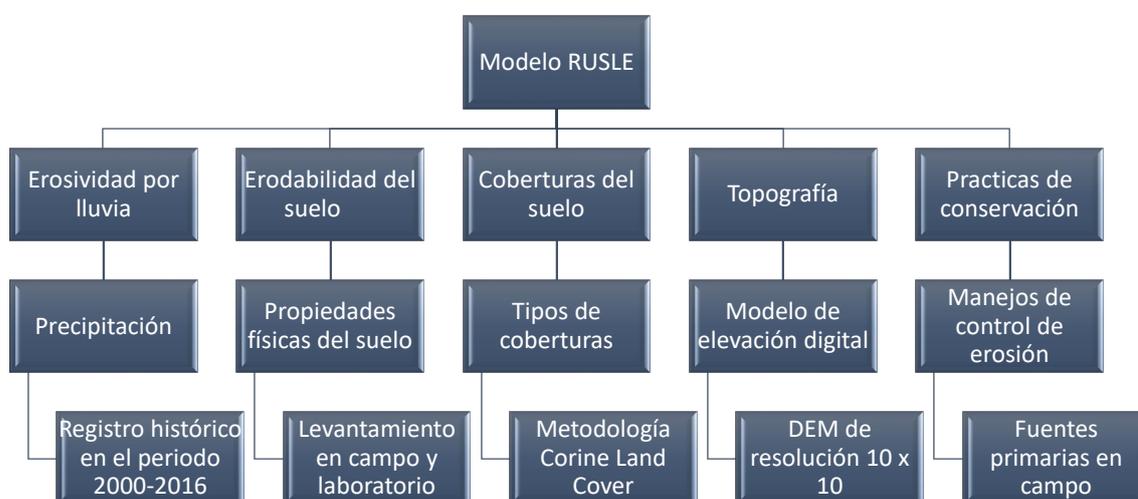


Figura 3.1: Variables del modelo RUSLE.

3.1.1 Erosividad por lluvia (R)

La erosividad de la lluvia es un índice que describe el poder de la lluvia para causar erosión del suelo (Nearing et al., 2017). Wischmeier (1959) identificó que con características del suelo y la pendiente constantes, la combinación más significativa de indicadores de pérdidas por erosión está asociado a la intensidad y frecuencia de la lluvia: la energía total de la tormenta (E) multiplicada por la intensidad máxima en 30 minutos, considerado el factor desencadenante de los

procesos de erosión pluvial.

Sin embargo, debido a las limitaciones que comúnmente se encuentran para obtener registros de datos de precipitación diarios y horarios, Pérez and Mesa (2002) plantearon una ecuación para calcular valores de R teniendo en cuenta los valores de precipitación media anual y la cual fue calibrada para zonas montañosas en Colombia por medio del uso de cascadas aleatorias basada en la estructura fractal de la lluvia para desagregar datos de precipitación diarios en datos con una frecuencia de 22.5 minutos; la metodología se validó con seis estaciones pluviográficas en la región occidental y central de Antioquia y se aplicó a 134 estaciones pluviométricas. Las ecuaciones matemáticas propuestas por los autores son:

$$R = -8,831 + 0,0071263 \times PMA \quad (3.2)$$

$$R = 0.00001193 \times PMA^{1,70148} \quad (3.3)$$

Donde R es el factor de erosividad por lluvia (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹), PMA es la precipitación media anual, obtenida de la precipitación acumulada anual con datos mensuales (mm). La ecuación (3.2) es válida cuando la precipitación media anual es superior a 1240 mm/año y la ecuación (3.3) es válida para representar valores de precipitación media anual menores a 1240 mm/año.

En el desarrollo del presente estudio, con el fin de estimar el factor R, se seleccionó una estación de precipitación. Se utilizó la estación San Roque código 23080760, se utilizaron datos de precipitación mensual para el periodo 2000-2016, datos obtenidos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (anexo A). Se optó por usar datos de esta única estación debido a la escala de la cuenca, que abarca no más de 6 \tilde{km}^2 y por su ubicación en

las cercanías a la estación (5km), se tenía información de otras estaciones de la zona (Yolombo, Nus, Santo Domingo, Guayabito), pero dichas estaciones se encontraban alejadas de la zona de estudio. Se considera que los datos de precipitación de la estación San Roque representan espacialmente las variaciones de precipitación de la zona de estudio. Se calculó el valor de R para la totalidad de los 16 años de la serie de datos de precipitación, un especial aporte al estudio se reconoce en los valores de R estimados para los años 2002 y 2011, ya que son los años en los cuales se tienen el menor y mayor valor de precipitación anual en la serie de tiempo estudiada; lo cual está relacionado con las oscilaciones ENSO (año 2002 fenómeno del Niño y año 2010 fenómeno La Niña). De acuerdo con el estudio realizado por Arias et al. (2015) durante el periodo 2010–2012, el norte de Sudamérica experimentó una de las estaciones húmedas más fuertes en los registros históricos, los años 2010 y 2011 corresponden a los años más lluviosos en Colombia desde que los registros están disponibles; estos años se caracterizaron por dos eventos La Niña más fuerte que el promedio, uno ocurrió en 2010–2011 y otro evento, menos intenso, en 2011-2012. Comparado con fenómenos La Niña precedentes (año 2000 y 2007) el Índice de Niño Oceanico (ONI) muestra una mayor magnitud para el periodo 2010-2011. Para identificar los valores de R en función de los cambios en la precipitación anual en un año, se usó la Ecuación 3.2, desarrollada por Pérez and Mesa (2002) para el cálculo del factor de erosividad por lluvia debido a que la precipitación media anual de la zona es 3846 mm.

3.1.2 Factor de erodabilidad del suelo (K)

El factor de erodabilidad del suelo es una medida del efecto total de algunas propiedades del suelo en la resistencia a desprenderse ante un evento de precipitación, algunas de estas propiedades permiten conocer la capacidad que tiene el suelo para infiltrar el agua que cae por precipitación y ayudan a determinar la cantidad y la tasa de escorrentía superficial; otras

propiedades influyen en la capacidad del suelo para resistir el desprendimiento y el transporte por la energía de las gotas de lluvia que caen en la superficie del suelo (Wischmeier and Mannering, 1969). Algunos suelos se erosionan con mayor facilidad que otros, incluso cuando los factores de clima, topografía, coberturas y prácticas de conservación se mantienen igual; esto se debe a que las propiedades físicas y químicas del suelo varían en función de los procesos de formación y evolución del mismo. En términos generales, los suelos que son altos en limo, bajos en arcilla, y con bajo contenido de materia orgánica son los más erosionables, sin embargo, los porcentajes de limo, arcilla y arena deben considerarse en relación con los niveles existentes de otras propiedades físicas y químicas del suelo (Wischmeier and Mannering, 1969). Por otro lado, un mismo tipo de suelo cuando actúan los factores formadores de suelo y procesos pedogenéticos desarrollan diferentes horizontes que suelen tener características físicas y químicas distintas en cada uno de los horizontes (Jaramillo, 2002); los parámetros a utilizar para el cálculo de erodabilidad del suelo pueden variar considerablemente dentro del perfil de suelo, aún cuando se tiene un material parental homogéneo, por esta razón en el desarrollo de este estudio se optó por evaluar con detalle variables texturales y estructurales de cada uno de los horizontes de suelo que afloran en superficie del área de estudio y que eventualmente tendrían capacidad de soportar el crecimiento de un cultivo. Para hacer una caracterización detallada de las propiedades físicas y químicas del suelo, se realizó un trabajo de campo a lo largo de la cuenca; el trabajo de campo estuvo dividido en dos etapas, la inicial fue de reconocimiento de la zona, vías de acceso, zonas intervenidas, zonas de cultivo, litología, procesos de erosión y gravitacionales activos e inactivos, entre otras características que permitieron planear una segunda etapa de trabajo de campo, donde se seleccionaron recorridos estratégicos durante cinco días, que posibilitaron realizar el levantamiento de los perfiles de suelo representativos en la zona, medidas de permeabilidad en campo en cada uno de los horizontes de interés y la recolec-

ción de muestras con las cuales se desarrollaron ensayos de laboratorio para determinar otras propiedades del suelo. El levantamiento de perfiles de suelo en campo, se realizó siguiendo la metodología planteada en SoilSurveyStaff (2017) para la clasificación de horizontes de suelo; se decidió seguir esta propuesta de clasificación ya que es una de las que mejor discrimina cambios texturales asociados a procesos pedogenéticos en los horizontes más superficiales. Para los ensayos de laboratorio, se recolectaron un total de catorce muestras (ver Tabla 3.1) en las estaciones de muestreo ubicadas en la Figura 3.2. El desarrollo de levantamiento de perfil de suelo y toma de muestras se realizó en la parte oriental de la zona de estudio por tres razones: 1) En la primera etapa del trabajo de campo y por medio de reconocimiento de la zona, fue posible identificar que en la zona de estudio se tiene la misma litología e igual desarrollo de los horizontes de suelo que permitió acotar el trabajo de diagnóstico y recolección de muestras de suelo a la parte oriental de la subcuenca; 2) En la parte oriental de la subcuenca era posible realizar el levantamiento del perfil en taludes expuestos y zonas factibles de realizar apiques en el suelo; en la parte occidental de la cuenca, se tiene una cobertura con mayor densidad vegetal lo que dificulta el trabajo de reconocimiento y toma de muestras de suelo; 3) El permiso para realizar levantamiento y toma de muestras fue obtenido por medio de la empresa Ecodula, ubicada en la parte oriental de la zona de estudio.

De las catorce muestras se tomaron 12 (las muestras correspondientes a las estaciones ES11 y ES12 no fueron tenidas en cuenta para ensayos de laboratorio debido a que corresponden a bloques y fragmentos de roca alterados) para los ensayos de determinación de textura y estructura de cada uno de los horizontes de suelo de interés, estos ensayos se realizaron en el laboratorio de suelos, concretos y pavimentos de la Universidad de Antioquia, siguiendo la norma ASTM D6913/D6913M – 17 y ASTM D7928 17; adicionalmente se estimó el porcentaje de materia orgánica en el laboratorio de procesos fisicoquímicos de la Universidad de Antioquia de cada

uno de los horizontes de suelo de interés. Las pruebas de permeabilidad en campo se desarrollaron siguiendo la guía ASTM D3385 – 09, prueba de anillo doble. Ver Tabla 3.2.

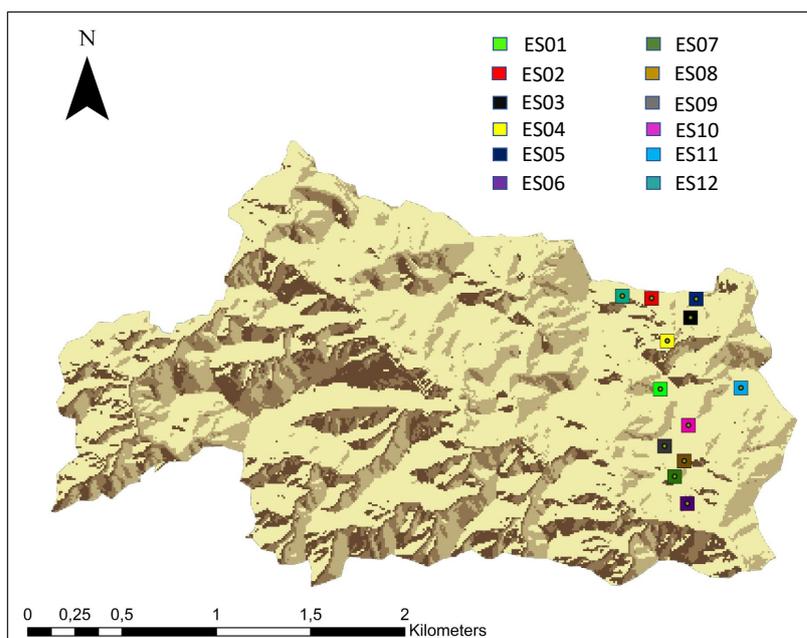


Figura 3.2: Ubicación de estaciones de muestreo

Estación	Muestras recolectadas	Pruebas realizadas en campo
ES01	ES01_1	Infiltración
ES02	ES02_1	Infiltración
ES03	–	Infiltración
ES04	ES04_1	Infiltración
ES05	ES05_1	–
ES06	ES06_1; ES06_2	Infiltración
ES07	ES07_1; ES07_2	–
ES08	ES08_1; ES08_2	–
ES09	ES09_1	–
ES10	ES10_1	–
ES11	ES11_1	–
ES12	ES12_1	–

Tabla 3.1: Muestras recolectadas en cada estación.

Ensayo	Tipo	Guía/Estándar	Parámetro estimado
Tasa de infiltración de suelos en campo usando infiltrómetro de anillo doble.	Campo	ASTM D3385 – 09	Permeabilidad del suelo
Análisis de distribución de tamaño de partículas de suelo por medio de tamices.	Laboratorio	ASTM D6913/ D6913M – 17	Textura material grueso del suelo
Análisis de distribución de tamaño de partículas de suelo por medio de sedimentación (hidrómetro)	Laboratorio	ASTM D7928 17	Textura material fino del suelo
Determinación de materia orgánica y carbono orgánico en el suelo.	Laboratorio	Norma técnica colombiana 5403 b	Materia orgánica en el suelo

Tabla 3.2: Ensayos de laboratorio

Una vez obtenidos los resultados del trabajo de campo y laboratorio, se utilizaron las expresiones matemáticas de las Ecuaciones (3.4) y (3.5) desarrolladas por Wischmeier et al. (1978), que define la erodabilidad en función de la textura, permeabilidad, materia orgánica y estructura del suelo:

$$K = \frac{2,1 \times M^{1,14} \times 10^{-4} \times 12 - SOM + 3,25 \times (S - 2) + 2,5 \times (p - 3)}{100} \times 0,1318 \quad (3.4)$$

$$M = [100 - \%arcilla] \times [\%limo + \%arenamuyfina] \quad (3.5)$$

Donde K es el factor de erodabilidad del suelo, SOM es el porcentaje de materia orgánica, S código asociado a la estructura del suelo, P código asociado a la permeabilidad del suelo.

3.1.3 Factor topográfico (LS)

La longitud de la pendiente (L) y la inclinación de la pendiente (S) representan el efecto de la topografía sobre la erosión en el modelo RUSLE (Wischmeier et al., 1978). La longitud de la pendiente se define como la distancia horizontal desde el punto donde inicia el flujo de material hasta el punto donde el gradiente de la pendiente disminuye lo suficiente como para que comience la acumulación de material o el flujo se concentra en un canal definido (Wischmeier

et al., 1978); la inclinación de la pendiente se define como la influencia del gradiente de la pendiente en los procesos de erosión (Renard et al., 1997). La variable LS ha sido incorporada por varios autores con herramientas de sistemas de información geográfica, permitiendo entradas como modelos de elevación digital, mapas de pendientes y flujos acumulados para su cálculo (Mitasova et al., 1996; Moore and Burch, 1986; Van Remortel et al., 2001). La entrada básica para generar una cuadrícula de factor LS en un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es un conjunto de datos DEM recortando la zona de interés, generalmente una cuenca hidrográfica definida. En el desarrollo del presente trabajo, se utilizaron datos de entrada obtenidos por medio del modelo de elevación digital (DEM) de la cuenca, con un tamaño de celda 9,5x9,5(m) . Por medio de la herramienta hydrology del software ArcGis se realizó el geoprocésamiento para generar el mapa de direcciones y flujo acumulado y con la herramienta slope se generó el mapa de pendientes en porcentaje. La ecuación utilizada en Ganasri and Ramesh (2016) fue empleada para el cálculo del factor LS. Ecuación (3.6).

$$LS = \frac{QaM^y}{22,13} \times (0,065 + 0,045 \times Sg + 0,0065 \times Sg^2) \quad (3.6)$$

Donde LS es el factor topográfico (adimensional), Qa celda de acumulación de flujo, M tamaño de la celda, y es un exponente cuyo valor se encuentra entre 0,2 y 0,5: para pendientes mayores a 4,5% el valor es 0,5; pendientes entre 3-4,5% el valor es 0,4, pendientes entre 1-3% el valor es 0,3 y para pendientes menor que 1% el valor es 0,2.

Se asume que el modelo de elevación digital de la zona no presenta cambios significativos en el periodo de tiempo escogido para la estimación de pérdida de suelo.

3.1.4 Factor de coberturas del suelo

Las coberturas del suelo actúan como un factor protector o potencializador de la erosión, dependiendo del tipo de cobertura. Los suelos provistos de vegetación suelen considerarse menos susceptibles a la pérdida de suelo, ya que la vegetación actúa como un agente regulador así: la interacción raíz-suelo retiene las partículas de suelo y aumenta la resistencia del suelo al desprendimiento por agentes erosivos; los árboles actúan como una barrera directa ya que disipan la energía de las gotas de lluvia y al caer al suelo el impacto es menor; mejoran la estructura del suelo, aumentando la porosidad y tasa de infiltración; entre otras ventajas. A diferencia de la erosividad por lluvia, erodabilidad del suelo y factor topográfico, el factor de coberturas del suelo ha sido desarrollado por medio de categorización cualitativa, teniendo en cuenta el tipo de cobertura que se tiene, los valores de C podrían ser calculados por medio de una fórmula matemática que incorpora el índice NVDI como se plantea en Karaburun et al. (2010). Sin embargo, para este trabajo las coberturas de suelo del área de estudio fueron delimitadas por medio de imágenes satelitales de Google Earth del año 2015 y se realizó la clasificación de coberturas en el software ArcGis. La clasificación de tipos de coberturas se hizo por medio de la metodología Corine Land Cover adaptada por el IDEAM para describir las coberturas de la tierra en el territorio nacional. Para el modelo RUSLE los valores de C son estimados por medio de clasificación de coberturas de suelo, asignando un valor de 0 a 1 de acuerdo con el tipo de cobertura que se tiene. En la literatura, se propone que para coberturas relacionadas con actividades agrícolas tienen el valor más alto y las coberturas boscosas tienen los valores menores en el factor C (Correa et al., 2016; Zerihun et al., 2018; Ganasri and Ramesh, 2016). Los valores de C utilizados por Zerihun et al. (2018) fueron empleados en la determinación del factor C en la zona de estudio, asumiendo que las coberturas se mantienen igual en el periodo de estudio condición refrendada por la inspección de fotografías aéreas de la zona de diferentes

años y por fuentes primarias se pudo obtener información acerca de los usos del suelo en el periodo de tiempo.

3.1.5 Factor de prácticas de conservación

En general, siempre que el suelo en pendiente se cultive, debería existir un respaldo por prácticas que reduzcan la velocidad del agua de escorrentía y, por lo tanto, reduzcan la cantidad de suelo removido. El factor P es definido originalmente como el valor que mide el efecto de medidas de conservación adoptadas para mitigar el efecto de la erosión variando de 0 a 1 de acuerdo con las acciones de control asociadas (Wischmeier et al., 1978), teniendo en cuenta los levantamientos realizados en campo y entrevistas con agricultores de la zona, se asignó un valor de 1, ya que se registra que no existen medidas de conservación del suelo que puedan contrarrestar la erosión.

3.2 Análisis de riesgo

Teniendo en cuenta el marco conceptual referente al tema de riesgo, en el presente estudio, las variables asociada a la evaluación del riesgo se definieron de la siguiente forma: 1) la amenaza se estableció como la probabilidad de excedencia que un evento de precipitación sea igualado o excedido y a su vez, esta excedencia ocasione la materialización de procesos de erosión en un año determinado; 2) la vulnerabilidad es interpretada como el nivel de pérdidas establecido por la relación entre espesor de suelo necesario para cultivar caña y entre el espesor de suelo removido por fenómenos de erosión, entendiendo el elemento expuesto como los cultivos de caña en la zona. (Figuras 3.3 y 3.4).



Figura 3.3: Variables asociadas a la evaluación de riesgo por erosión: amenaza, vulnerabilidad y elementos expuestos.

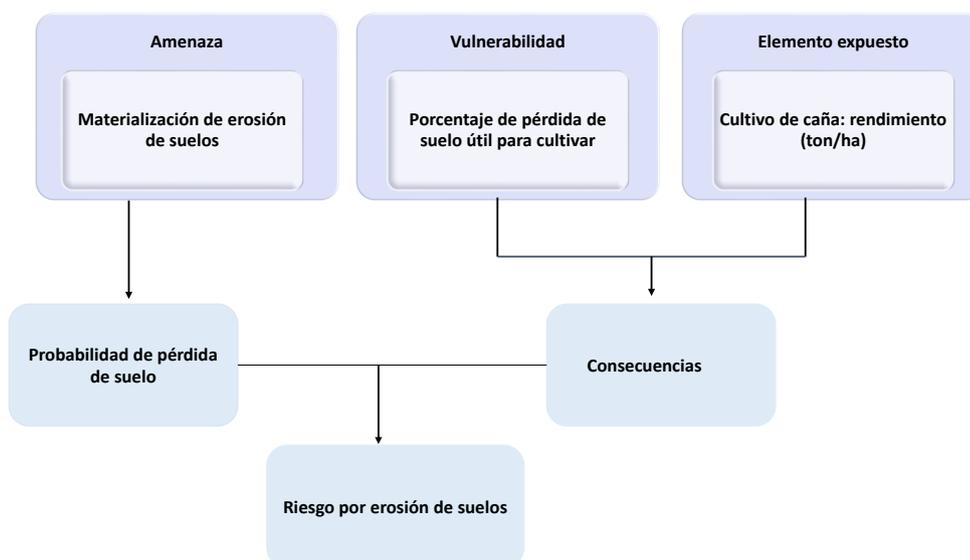


Figura 3.4: Mapa conceptual del enfoque de las variables de riesgo para el presente estudio.

3.2.1 Amenaza: Probabilidades de excedencia de lluvia y periodos de retorno

La precipitación total recibida en un período determinado en un lugar es muy variable de un año a otro, la variabilidad depende del tipo de clima y la duración del período considerado y las estimaciones de la profundidad de lamina de agua o intensidades que se pueden esperar para una probabilidad específica durante un período de referencia específico (hora, día, semana, 10 días, mes, año) son utilizados para la gestión y prevención en múltiples proyectos (Dirk, 2013). En este estudio, evaluar la probabilidad de excedencia de lluvia e identificar periodos de retorno es necesario para poder estimar la variable amenaza, que a su vez permite estimar el riesgo. Entender el comportamiento de la precipitación en el tiempo, permite obtener información sobre la dinámica de la precipitación en la zona a estudiar. Se utilizó un registro histórico de 16 años para representar la probabilidad de ocurrencia de un valor anual de la variable precipitación. Por medio de la distribución de probabilidad fue posible resumir el conjunto de datos de precipitación como una función y sus parámetros asociados, metodología descrita por Chow et al. (1994). La elección de la distribución de probabilidad a utilizar se basa en la prueba de bondad de ajuste que permite comparar valores teóricos y muestrales de la función y como difieren las frecuencias observadas de las frecuencias esperadas. La distribución de probabilidad utilizada es la distribución normal expresada como se muestra en la Ecuación (3.7)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times \exp \frac{x-\mu^2}{2\sigma^2} \quad (3.7)$$

Teniendo en cuenta dos parámetros: media y desviación estándar. Para validar que los valores de la muestra (serie de datos de precipitación de la zona) siguen la distribución teórica (distribución normal) se realizaron las pruebas de bondad de ajuste Smirnov-Kolmogorov y Chi

cuadrado. El ajuste de la distribución de probabilidad a la serie de datos, permite obtener las probabilidades de excedencia por medio de las frecuencias acumuladas de la distribución de probabilidad. Posteriormente, el periodo de retorno definido como el tiempo que transcurre para que un evento sea excedido o igualado al menos una vez en promedio (Vélez and Smith, 1997) fue calculado por medio de la relación con la probabilidad de excedencia. Ver ecuación (3.8).

$$P(X > X_t) = \frac{1}{T} \quad (3.8)$$

Donde P es probabilidad que un evento sea igualado o excedido y T es periodo de retorno.

3.2.2 Vulnerabilidad: Porcentaje de pérdida de suelo útil

Una vez determinados los valores de pérdida de suelo en la zona de estudio, se estimaron los espesores de suelo erosionado para los periodos de tiempo estudiados, de modo que fuera posible comparar espesor de suelo perdido y el espesor de suelo orgánico necesario para garantizar la estabilidad de los cultivos de caña; de modo que se puede estimar la vulnerabilidad. El espesor de suelo útil para cultivar se tomó como un valor de 40 cm teniendo en cuenta las observaciones identificadas en el documento técnico realizado por Aguiar (2001) para cultivos de caña, donde se expresa que para los cultivos de caña, existen raíces que abundan los 60 cm y dos metros de longitud, sin embargo generalmente hay una mayor cantidad de raíces en los 40 cm, teniendo en cuenta este valor de profundidad para mejorar las prácticas de conservación y preparación de suelo.

En el calculo del porcentaje de pérdida de suelo útil para cada año fue necesario establecer un solo valor (sin variación espacial) para toda la cuenca de cada factor del modelo RUSLE, con el

objetivo de relacionar las probabilidades de excedencia de un valor de precipitación anual, con un solo valor de % de pérdidas anuales de suelo útil para cultivar. De esta forma, poder asociar la probabilidad de excedencia de un evento de precipitación a pérdidas en el suelo óptimo para cultivar, resaltando que la precipitación es el evento desencadenante en el proceso de erosión pluvial. Sin embargo, como para el análisis de riesgo es necesario caracterizar los elementos expuestos, en este caso los cultivos de caña, se realiza la suposición de una sola cobertura asociada a cultivos de caña. Se realizaron las siguientes consideraciones: 1) el valor de erosividad por lluvia corresponde al obtenido para cada año en el registro histórico de precipitación; 2) El valor de erodabilidad del suelo corresponde a $K=0,04$ debido a que es el valor relacionado con la erodabilidad en un horizonte A (Horizonte con mayor contenido de nutrientes y con mejor sustento para los cultivos); 3) El factor de LS se promedió como un valor constante en toda la cuenca $LS=75$ (adimensional); 4) El factor de coberturas asociado a cultivo de caña para toda la cuenca, $C=0,5$. Con estos valores se calculó la pérdida de suelo (ton/ha/año) para cada año, espesor de suelo erosionado (cm) y porcentaje de pérdida de suelo de acuerdo con la relación establecida en la Ecuación (3.9).

$$\%Perdidadesueloutil = \frac{espesorerosionado}{espesordesueloutil} \quad (3.9)$$

Donde %pérdida de suelo útil se refiere a la relación entre espesor erosionado y espesor de suelo necesario para cultivar caña; espesor erosionado es el valor en cm del suelo removido de acuerdo con los valores de pérdida de suelo calculados; espesor de suelo útil es definido como el valor en cm del espesor necesario para cultivar caña, tomado como 40 cm.

Adicionalmente, a la estimación de pérdida de suelo útil para cultivar, se realizó una comparación del rendimiento de los cultivos de caña en la zona de estudio con el rendimiento anual

estimado en Colombia; la información de rendimiento en ton/ha de la zona de estudio fue suministrada por la empresa Ecodula en el periodo 2008-2017 y la información de rendimiento en ton/ha en Colombia en el periodo 2007-2015 fue obtenida por medio de los datos publicados por el Ministerio de Agricultura, datos disponibles en: www.agronet.gov.co/capacitacion/Paginas/Biblioteca-Digital-.aspx.

Con los valores de probabilidad de excedencia de lluvias y porcentaje de pérdida de suelo útil, se estableció la relación entre amenaza y vulnerabilidad para estimar el riesgo por erosión de suelos, teniendo en cuenta que el riesgo se expresa como el producto de la amenaza y vulnerabilidad con elementos expuestos. Ecuación (3.10)

$$Riesgo = amenaza \times vulnerabilidad \quad (3.10)$$

3.3 Proyecciones de pérdida de suelo

Con el objeto de evaluar posibles cambios e impactos en la actividad agrícola de la zona de estudio, se buscó obtener datos de precipitación a partir de modelos de cambio climático. Para ello, se utilizaron las series mensuales de precipitación simulada del experimento histórico (1850-2005) de tres modelos del proyecto CMIP5 cuya información se muestra en la Tabla 3.3. Los datos se encuentran disponibles en: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>. La selección de estos modelos se debe a su buena representación de la precipitación en Suramérica (Sierra et al., 2015). El experimento histórico es simulado abarcando el periodo entre 1850-2005 bajo condiciones de forzamiento natural y antrópico. Adicionalmente, se consideraron como bases de datos observacionales la Misión para la Medición de Lluvias Tropicales TRMM (por sus

siglas en inglés) y CHIRPS: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data que corresponden a productos satelitales ajustados con mediciones en tierra. Los datos observacionales están comprendidos entre el año 1998-2013 y 1981-2017 para TRMM y CHIRPS respectivamente y se utilizaron con el fin de comparar datos observacionales con los datos modelados, ya que los datos obtenidos del IDEAM abarcan un periodo más corto, desde 2000 hasta 2016. Las proyecciones de precipitación abarcan el periodo 2006 -2100 bajo el escenario de emisiones RCP 8.5 que plantea el mayor desbalance radiactivo a finales de siglo entre los experimentos del CMIP5 y ha sido usado en diversos estudios (Payne and Magnúsdóttir, 2015; Kim et al., 2015; Park et al., 2015; Chou et al., 2014). Se escogieron los periodos 2034-2050 y 2084-2100 que representan cambios en la precipitación a mediano y largo plazo para estimar proyecciones de pérdida de suelo. Se calculó el promedio anual multianual de la serie escogida y fue utilizada la ecuación (3.2) para obtener el valor de erosividad por lluvia. En el presente estudio se asume que las condiciones de cobertura y propiedades físicas del suelo, topografía y prácticas de conservación se mantienen iguales en el siglo presente.

Nombre del modelo	Resolución	Institución	Acrónimo	Proyecto	Referencia
CCSM4	1.25x0.9	National Center for Atmospheric Research, USA	NCAR	AMIP/CMIP	Gent et al. (2011)
HadGEM2-CC	1.9x1.25	Met Office Hadley Centre	MOHC	CMIP	Collins et al. (2011)
HadGEM2-ES	1.9x1.25	Met Office Hadley Centre	MOHC	CMIP	Bellouin et al. (2011)

Tabla 3.3: Información de los modelos de circulación general utilizados en la zona de estudio para las proyecciones de pérdida de suelo.

Capítulo IV

RESULTADOS

Los resultados de este trabajo están organizados en tres ítems: 4.1 estimación de pérdida de suelo, donde se muestran todos los valores estimados para cada uno de los factores que intervienen en la ecuación de pérdida de suelo, así mismo, se muestran los valores de pérdida de suelo del área de estudio; en el ítem 4.2, se presenta un análisis del riesgo de pérdida de suelo, que involucra estimación de la amenaza de que ocurra el evento y vulnerabilidad el suelo en condiciones de soportar el crecimiento de la caña; finalmente, en el ítem 4.3 se describe los resultados de la estimación de pérdida de suelo asociado a valores de precipitación inferidos por modelos de cambio climático, es decir, se muestra el resultado de la proyección de pérdida de suelo en la zona.

4.1 Estimación de tasas de pérdida de suelo

Los resultados de pérdida anual de suelo en la zona de estudio, son el producto de cada uno de los factores que compone la ecuación universal de pérdida de suelo (RUSLE), a continuación, se describe por separado los valores estimados de erosividad, erodabilidad, características de

longitud y pendiente de la cuenca, usos del suelo y prácticas de conservación.

4.1.1 Erosividad por lluvia (R)

En la Tabla 4.1 se relacionan los datos de precipitación anual y sus respectivos valores de erosividad, para cada año de la serie de tiempo estudiada. El menor valor de erosividad por lluvia se observa en el año 2002 con un valor de 133 (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹) y el mayor valor se obtuvo en el año 2011 con un valor de 241 (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹); estos datos son correspondientes con los valores registrados con los valores más bajo y más alto de precipitación, respectivamente. En la Figura 4.1 es posible observar la tendencia de los valores de erosividad de acuerdo con la precipitación total en un año.

Años	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Precipitación anual (mm)	3674	3657	3108	4340	3518	3655	4175	4447	4043	3884	4020	4623	4040	3726	3297	3585	3583
Erosividad (MJ/ha)(mm/hr)	174	172	133	221	162	172	209	229	200	188	198	241	200	177	147	167	167

Tabla 4.1: Erosividad por lluvia de la zona.

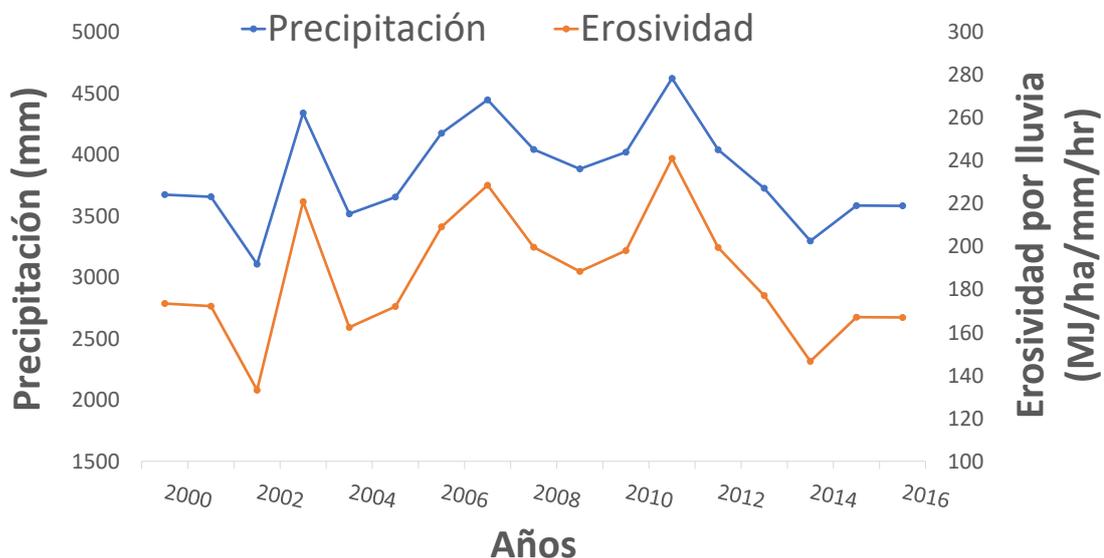


Figura 4.1: Valores de la erosividad por lluvia para cada año del periodo en estudio y la precipitación total en cada año.

4.1.2 Erodabilidad del suelo (K)

Como se mencionó en el capítulo 3, se realizó una etapa de trabajo de campo para realizar caracterización de parámetros físico - químicos del suelo. En esta subsección se describe: caracterización de los horizontes reconocidos en campo, análisis granulométrico, valores obtenidos de permeabilidad y materia orgánica.

Descripción de horizontes de suelo

A continuación se describe detalladamente el levantamiento de perfil de suelo en cada una de las estaciones, adicionalmente se muestra en la Tabla 4.2 la descripción de los horizontes de suelo hallados en la zona de estudio, siguiendo el modelo conceptual planteado por SoilSurveyStaff (2017).

- Estación ES01: se realizó un apique de 89 cm en el cual se evidenciaron dos horizontes maestros que se describen a continuación.

Horizonte A: color café oscuro con una textura limosa; bajo contenido de humedad, presencia de raíces y macroorganismos, se evidencian minerales primarios en poca proporción (cuarzo). Espesor: 15 cm.

Horizonte transicional AE: espesor: 13 cm. Características dominantes de horizonte A con transición hacia horizonte E.

Horizonte E: Color amarillo oscuro (pardo claro) textura limoso-arenoso (mas grueso que horizonte suprayacente), se evidencia presencia de raíces que disminuye con la profundidad. Espesor: 60 cm (Nota: hasta donde se hizo la excavación para el apique, puede tener una mayor profundidad); se evidencia cantidades considerables de minerales primarios.

- Estación ES02: En el talud expuesto, se observo el horizonte maestro B. Descripción: color rojizo-amarillo. Se evidencia presencia de minerales primarios como cuarzo). Clastos de tamaño aproximado 2 cm, plagioclasas (colores claros), plagioclasas con un color amarillo (mayor grado de meteorización), biotita y moscovita. No hay presencia de materia orgánica. Matriz con textura arcillosa pero con presencia de bloques de roca de 2,2 cm. Se realizó prueba de infiltración para cálculo de permeabilidad (anexo C).
- Estación ES03: se realizó prueba de infiltración para cálculo de permeabilidad. Se describe en el anexo C.
- Estación ES04: Se realizó levantamiento de perfil de suelo en el cual el horizonte que afloraba era el horizonte E, cuyas características principales coinciden con las encontradas en la ES01, teniendo en cuenta algunas diferencias en el contenido de humedad, menor contenido de cuarzo y mayor plasticidad. Se realizó prueba de infiltración para cálculo

de permeabilidad (anexo C).

- Estación ES05: horizonte B, donde se puede evidenciar mayor contenido de ferromagnesianos y de minerales claros (cuarzo, plagioclasas), matriz más arenosa, con menor contenido de clastos y color más claro comparado con que el horizonte encontrado en la estación ES02.
- Estación ES06: se realizó un apique de 70 cm de profundidad evidenciando los horizontes A y E. Adicionalmente se realizó prueba de infiltración para cálculo de permeabilidad (anexo C).

Horizonte A: color café oscuro con una textura limo-arenosa; bajo contenido de humedad, presencia de raíces y macroorganismos, se evidencian minerales primarios en poca proporción (cuarzo). Estructura de bloques redondeados.

Horizonte E: color naranja, textura arcillosa, bajo contenido de humedad, presencia de minerales primarios como el cuarzo.

- Estación ES07: reconocimiento de horizontes expuestos A, transicional AB y B.

Horizonte A: Color café oscuro, espesor 13 cm textura limosa, presencia raíces y actividad biológica activa.

Horizonte AB: Se evidencia horizonte transicional AE color amarillo-café claro con evidencia de un color más oscuro típico del horizonte A. Espesor 17cm presencia de raíces y actividad biológica, presencia de cuarzo.

Horizonte B: Espesor aproximadamente de 35 cm, color rojizo-amarillo y presencia de minerales primarios.

- Estación ES08: reconocimiento de horizonte A, transicional AE y horizonte E.
Horizonte A: Color café muy oscuro, espesor 30 cm actividad biológica (macroorganismos), presencia de raíces, textura limo-arcillosa.
Horizonte AE: espesor 23 cm. Características dominantes de horizonte A con transición hacia horizonte E.
Horizonte E: espesor de 64 cm. Textura arcillosa color café claro sin presencia de cuarzo: No hay eluviación de arcillas.
- Estación ES09: color café oscuro con una textura limo-arenosa; bajo contenido de humedad, presencia de raíces y macroorganismos, se evidencian minerales primarios en poca proporción (cuarzo). Estructura de bloques redondeados.
- Estación ES10: Se puede evidenciar características de un horizonte B. No hay presencia de raíces ni materia orgánica. Se pueden encontrar materiales de roca altamente meteorizados y fragmentos de suelo granulares.
- Estación ES11: Se evidencia roca con alto grado de meteorización que incrementa a medida que se avanza verticalmente en el talud, se conserva la estructura del material parental y se pueden identificar plagioclasas y cuarzo. No se evidencia presencia de materia orgánica ni procesos pedogenéticos. En las zonas más altas del talud se presencia oxidación y aumento en la capacidad de disgregación del material. La textura varía de forma considerable en el cual se obtienen muestras más arenosas en las partes bajas del talud y muestras más limo-arcillosas en las partes superiores del mismo. Horizonte C.
- Estación ES12: fragmentos de roca alterados; fragmentos de rocas con alto grado de descomposición. Horizonte C.

Horizonte	Descripción
A	color café oscuro con una textura limosa; bajo contenido de humedad, presencia de raíces y macroorganismos, se evidencian minerales primarios en poca proporción (cuarzo). Estructura de bloques redondeados, espesor: 15 cm.
Transicional AE	color amarillo-café claro con evidencia de un color más oscuro típico del horizonte A. Espesor 17cm presencia de raíces y actividad biológica, presencia de cuarzo.
E	Color amarillo oscuro (pardo claro) textura mas fina que horizonte suprayacente, se evidencia presencia de raíces que disminuye con la profundidad. Espesor: 60 cm. Se evidencia cantidades considerables de minerales primarios.
B	Color rojizo-amarillo. Se evidencia presencia de minerales primarios como cuarzo). Clastos de tamaño aproximado 2 cm, plagioclasas (colores claros), plagioclasas con un color amarillo (mayor grado de meteorización), biotita y moscovita. No hay presencia de materia orgánica. Matriz con textura arenosa y con presencia de bloques de roca de 2,2 cm.
C	Se evidencia roca con alto grado de meteorización que incrementa a medida que se avanza verticalmente en el talud, se conserva la estructura del material parental y se pueden identificar plagioclasas y cuarzo. No se evidencia presencia de materia orgánica ni procesos pedogeneticos. En las zonas más altas del talud se presencia oxidación y aumento en la capacidad de disgregación del material. La textura varía de forma considerable en el cual se obtienen muestras más arenosas en las partes bajas del talud y muestras más limo-arcillosas en las partes superiores del mismo.

Tabla 4.2: Descripción general de los horizontes de suelo evidenciados en la zona.

En la Figura 4.2 se muestran los horizontes descritos anteriormente, los cuales pertenecen a la zona de estudio. Por medio de inspección visual y posteriormente análisis en laboratorio fue posible constatar cambios entre un horizonte y otro. En la Figura 4.3 se muestran los horizontes encontrados en las estaciones de muestreo.

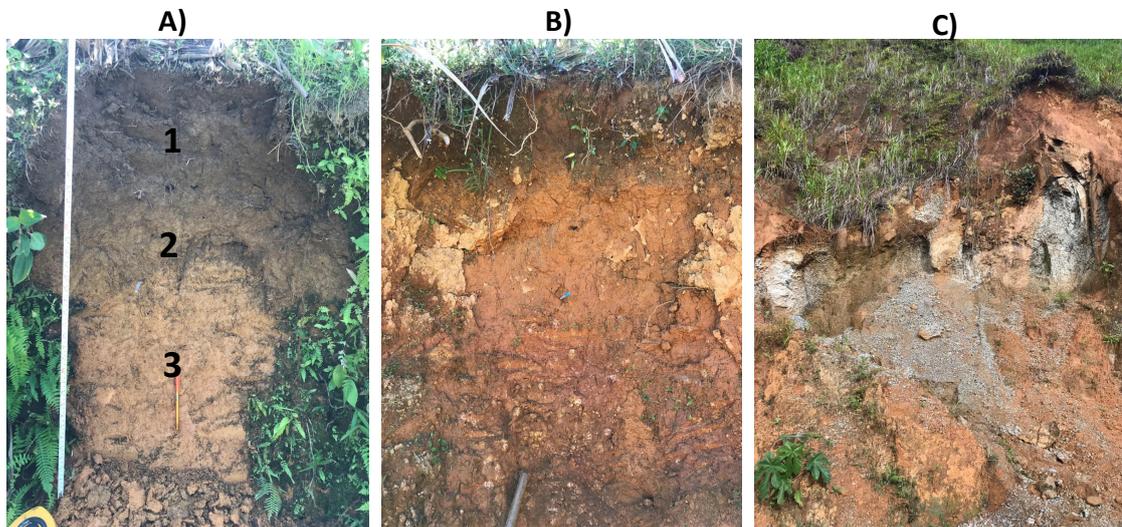


Figura 4.2: Horizontes de suelo. Donde en A) 1. Horizonte A; 2. Transición horizonte A y E; 3. Horizonte E. B) Horizonte B. y C) Horizonte C.

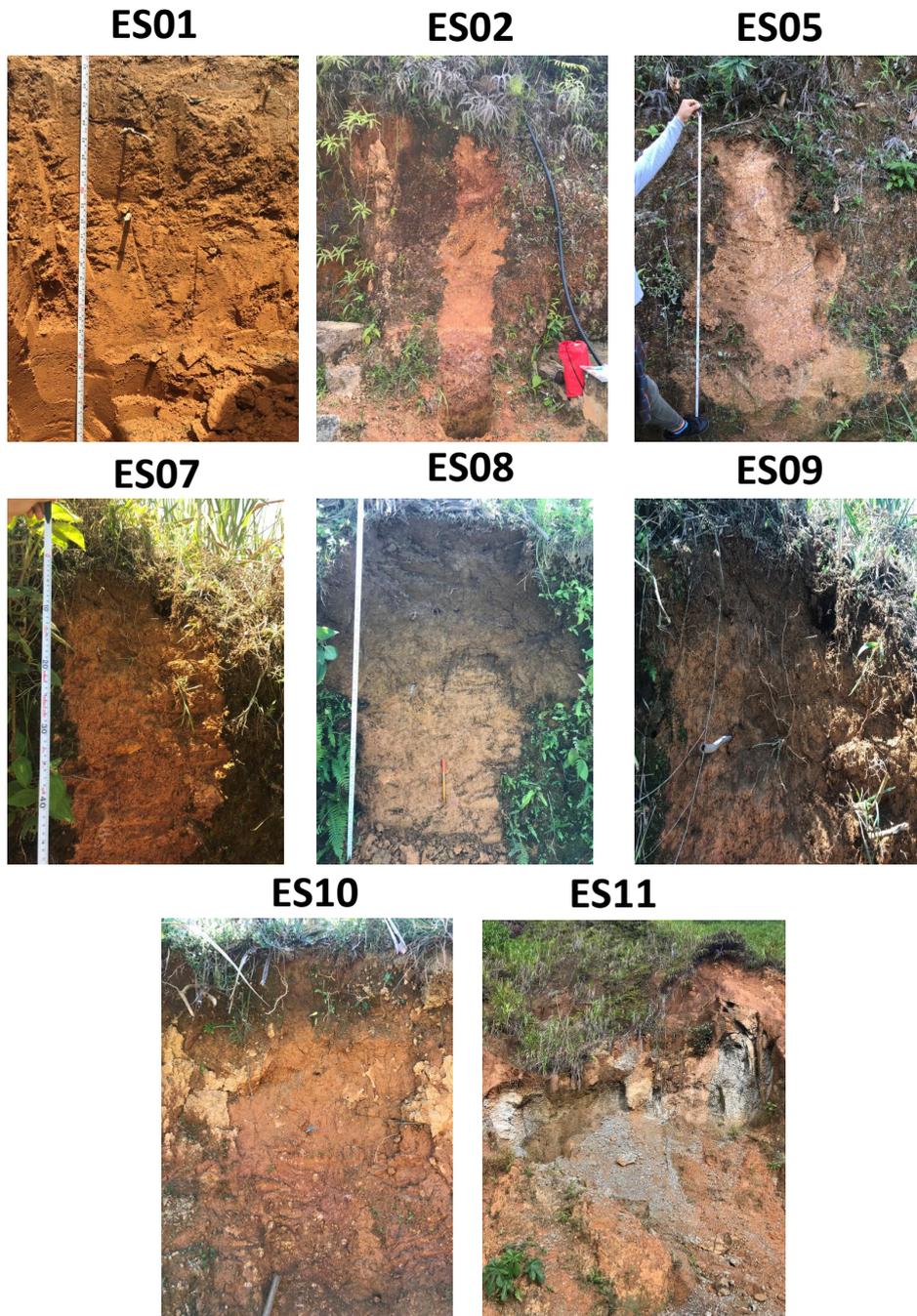


Figura 4.3: Fotografías de horizontes encontrados en las estaciones de muestreo.

Pruebas de infiltración en campo para cálculo de permeabilidad

Las pruebas de infiltración en campo se realizaron siguiendo la metodología de anillos concéntricos que permite conocer el descenso de una lámina de agua en un tiempo determinado. Los aros son enterrados en la superficie del suelo entre 5-10 cm; el aro exterior se llena de agua y se mantiene a una altura constante, con el fin de saturar el medio. Se esperan algunos minutos y luego se llena el aro interior con agua y se empieza a tomar en un intervalo de tiempo el descenso de la lámina de agua. Los datos se miden hasta el momento en que los valores de descenso de la lamina de agua permanezcan constantes en al menos tres medidas; en este momento se tiene una tasa de infiltración constante que es el parámetro de entrada para el cálculo de permeabilidad. En la Figura 4.4 se muestra el procedimiento realizado en campo para la prueba.



Figura 4.4: Pruebas de infiltración en campo

Cálculo de materia orgánica

Siguiendo la Norma Técnica Colombiana NTC 5403 se realizó el procedimiento en laboratorio para el cálculo de carbono orgánico y materia orgánica de los cuales se obtuvieron los siguientes

resultados:

Muestra	FAS (ml) Blanco	FAS (ml) muestra	Normalidad Dicromato	Volumen Dicromato (ml)	Factor meq C	Peso de la muestra (gr)	Humedad	Factor recuperación	%C.O	%M.O
ES01_1	10,5	6,5	1	5	0,003	1,5	20	0,77	0,59	1,02
ES02_1	10,5	5,5	1	5	0,003	1,5	28	0,77	0,79	1,37
ES04_1	10,5	7,8	1	5	0,003	1,5	27	0,77	0,42	0,73
ES05_1	10,5	7,1	1	5	0,003	1,5	19	0,77	0,50	0,86
ES06_1	23	11,2	1	10	0,003	1	31	0,77	2,62	4,51
ES06_2	10,5	4	1	5	0,003	1,5	29	0,77	1,04	1,79
ES07_1	23	9,3	1	10	0,003	1	30	0,77	3,02	5,20
ES07_2	10,5	3,5	1	5	0,003	1,53	27	0,77	1,08	1,86
ES08_1	23	6,5	1	10	0,003	1	32	0,77	3,69	6,36
ES08_2	10,5	4,8	1	5	0,003	1,5	21	0,77	0,85	1,47
ES09_1	23	19,9	1	10	0,003	1	30	0,77	0,68	1,18
ES10_1	10,5	9,3	1	5	0,003	1,53	26	0,77	0,18	0,32

Tabla 4.3: Cálculo de materia orgánica para cada muestra de suelo

Granulometría y textura del suelo

De las curvas granulométricas (Figura 4.5 se clasificaron las partículas de suelo de cada estación en gravas, arenas y material fino, como es mostrado en la Tabla 4.4; el material fino (limos y arcillas) es descrito con mayor detalle en la tabla 4.5.

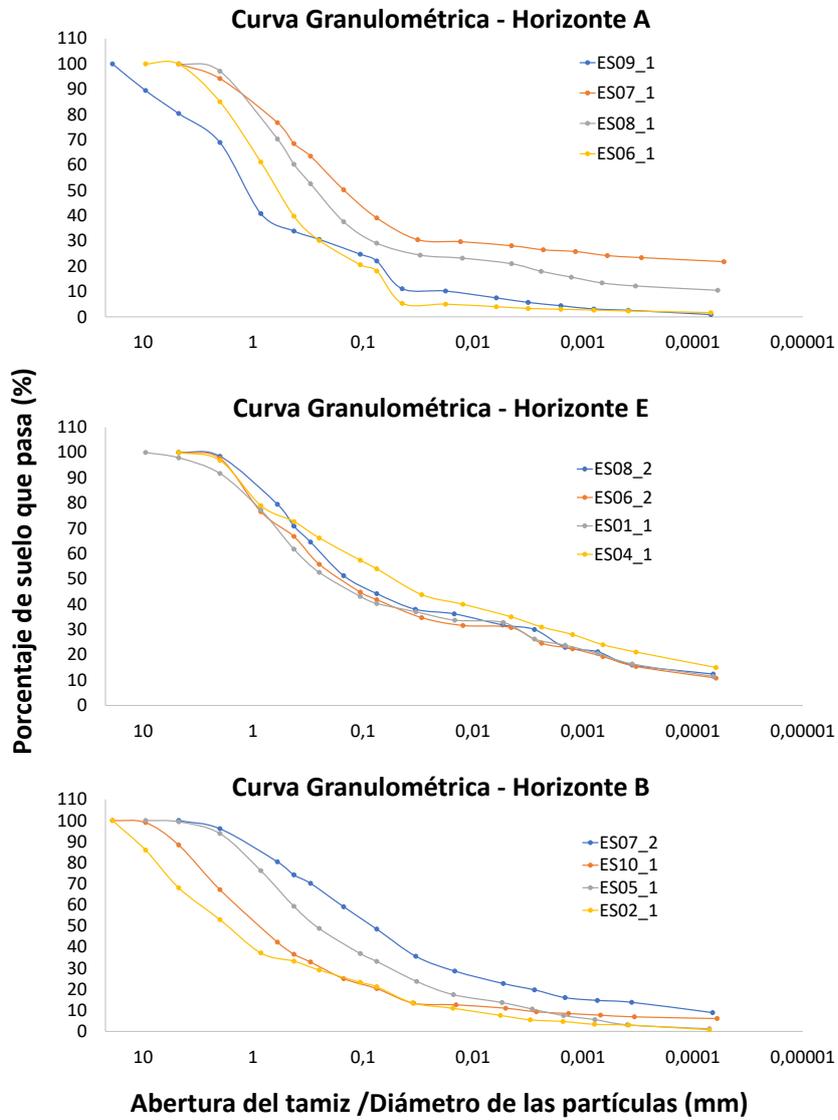


Figura 4.5: Curvas granulométricas de las muestras de suelo.

Estación	% Gravas	% Arenas	% Finos (Limo y Arcilla)
ES01_1	2,1	57,6	40
ES02_1	31,9	46,9	21,2
ES04_1	0	46	54
ES05_1	0,6	66,2	33,2
ES06_1	0,1	81,7	18
ES06_2	0	58,2	41,7
ES07_1	0	60,9	39,1
ES07_2	0	51,5	48,5
ES08_1	0	70,9	29,1
ES09_1	19,6	68,3	10
ES10_1	11,6	68,1	20,3

Tabla 4.4: Distribución porcentual de partículas de suelo de las estaciones de muestreo.

En la Tabla 4.5 se encuentran los valores obtenidos para cada una de las propiedades del suelo necesarias para estimar el valor de erodabilidad. Los valores de materia orgánica más altos están asociados a las muestras clasificadas como horizonte A (Tabla 4.3; Tabla 4.5), consistente con las características de clasificación de este horizonte, asociado a un mayor contenido de materia orgánica, microorganismos, presencia de raíces, buena estructuración, las muestras clasificadas como horizonte E y B muestran menores valores de materia orgánica. La estimación de la permeabilidad revela que el suelo del horizonte E tienen los menores valores, lo cual, está influenciado por la textura que es más fina que los otros dos horizontes, A y B. Teniendo en cuenta cada una de las características del suelo asociadas a la erodabilidad del mismo, fue posible obtener los valores de esta variable. En la Figura 4.5 son mostradas las curvas granulométricas que permiten identificar la distribución de partículas de suelo por medio del ensayo de granulometría por tamizado; asociado a cada muestra de suelo y el horizonte en el cual se clasifica. De la Tabla 4.5 se puede observar que los menores valores de K están asociado a un horizonte A, seguido de los valores obtenidos para el horizonte E y finalmente los valores más

altos para las muestras clasificadas en el horizonte B.

Una vez conocido el perfil de suelo típico en el área, se seleccionó como horizonte vulnerable, es decir, que soportan el crecimiento de la caña de azúcar, el horizonte A para poder hacer la respectiva evaluación de riesgo.

Estación	%A	%L	%Ar	%M.O	P (cm/hr)	Código P	Código E	Horizonte	K
ES01_1	25	15	25	1,02	0,01	6	4	E	0,05
ES02_1	19	15	5	1,37	0,75	4	4	B	0,04
ES04_1	20	14	40	0,73	0,01	6	4	E	0,04
ES05_1	29	25	9	0,86	0,75	4	4	B	0,06
ES06_1	26	13	4	4,51	0,20	5	4	A	0,04
ES06_2	27	18	24	1,79	0,01	6	4	E	0,05
ES07_1	34	13	26	5,20	0,20	5	4	A	0,04
ES07_2	30	30	17	1,86	0,75	4	4	B	0,06
ES08_1	36	13	16	6,36	0,20	5	4	A	0,04
ES08_2	31	19	25	1,47	0,01	6	4	E	0,05
ES09_1	13	5	5	1,18	0,20	5	4	A	0,03
ES10_1	18	10	10	0,32	0,75	4	4	B	0,04

Tabla 4.5: Propiedades físicas del suelo. A: arena fina; L: limo; Ar: arcilla; M.O: materia orgánica; P: permeabilidad; E: estructura; K: erodabilidad del suelo.

4.1.3 Factor de coberturas del suelo (C)

Se realizó la clasificación de coberturas de suelo como se muestra en la Figura 4.6. Se asignaron tres valores de C para las coberturas reconocidas, en un rango de valores de 0.001 – 0.5 (Tabla 4.6; Figura 4.7), el valor más bajo fue asignado a coberturas de bosques y el valor más alto a zonas de cultivo, lo cual es acorde con lo observado en campo, en donde se encuentran zonas de bosque con alta vegetación que actúan como una barrera contra la erosión, disipando la energía con la que impactan las gotas de lluvia y aumentando la estabilidad de los agregados del suelo por medio del sistema radicular. Las zonas de pasto y cultivo enmarcadas como pasto presentan fuertes procesos de erosión que puede explicarse por el hecho de la exposición directa del suelo

al efecto de la lluvia y a su vez, la susceptibilidad asociada a las propiedades intrínsecas del suelo. Finalmente, las zonas con vocación agrícola son las más vulnerables a los efectos de la erosión, debido a la degradación del suelo que conlleva a la pérdida de nutrientes, materia orgánica y otros elementos importantes para la sustentabilidad de los cultivos, agricultores de la zona sostienen que a lo largo del tiempo se evidencia la pérdida de la capa de suelo con mayor contenido de nutrientes, que ha sido removida por los efectos de la precipitación, evidente en los elevados valores de precipitación anual que se registran en la estación de lluvia. El valor de C espacialmente distribuido en la cuenca es mostrado en la Figura 4.7.

Tipo de cobertura	Clasificación	Código	Factor C
Territorios agrícolas	Cultivo permanente herbáceo de caña	2.2.1.2	0,5
Bosques y areas semi naturales	Bosques	3.1	0,001
Territorios agrícolas	Pastos	2.3	0,2

Tabla 4.6: Clasificación de coberturas de acuerdo a la metodología Corine Land Cover y valores de C asociados.

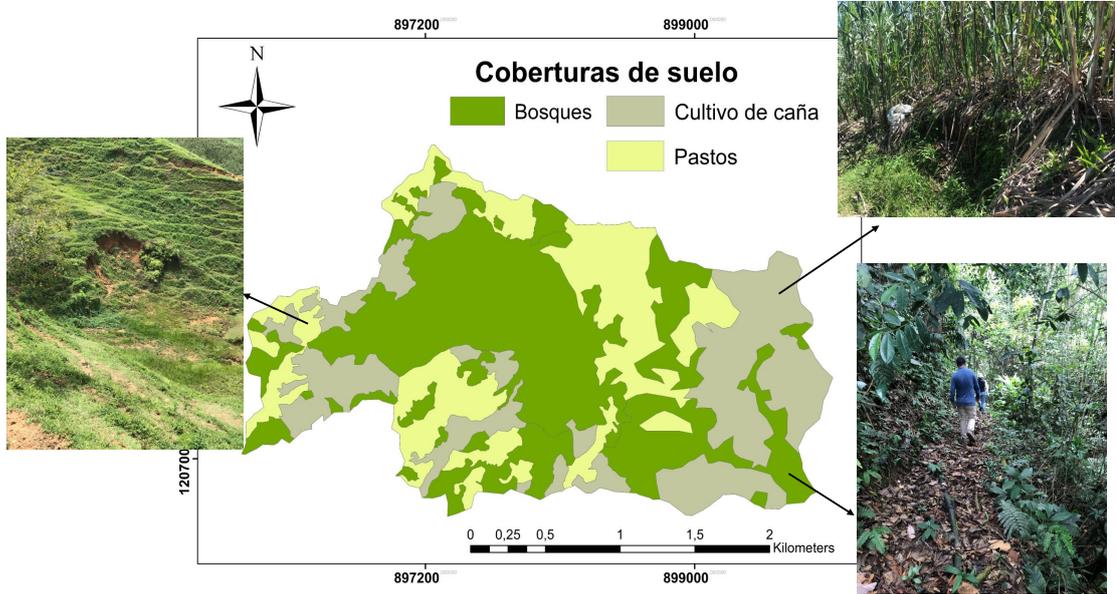


Figura 4.6: Coberturas de suelo

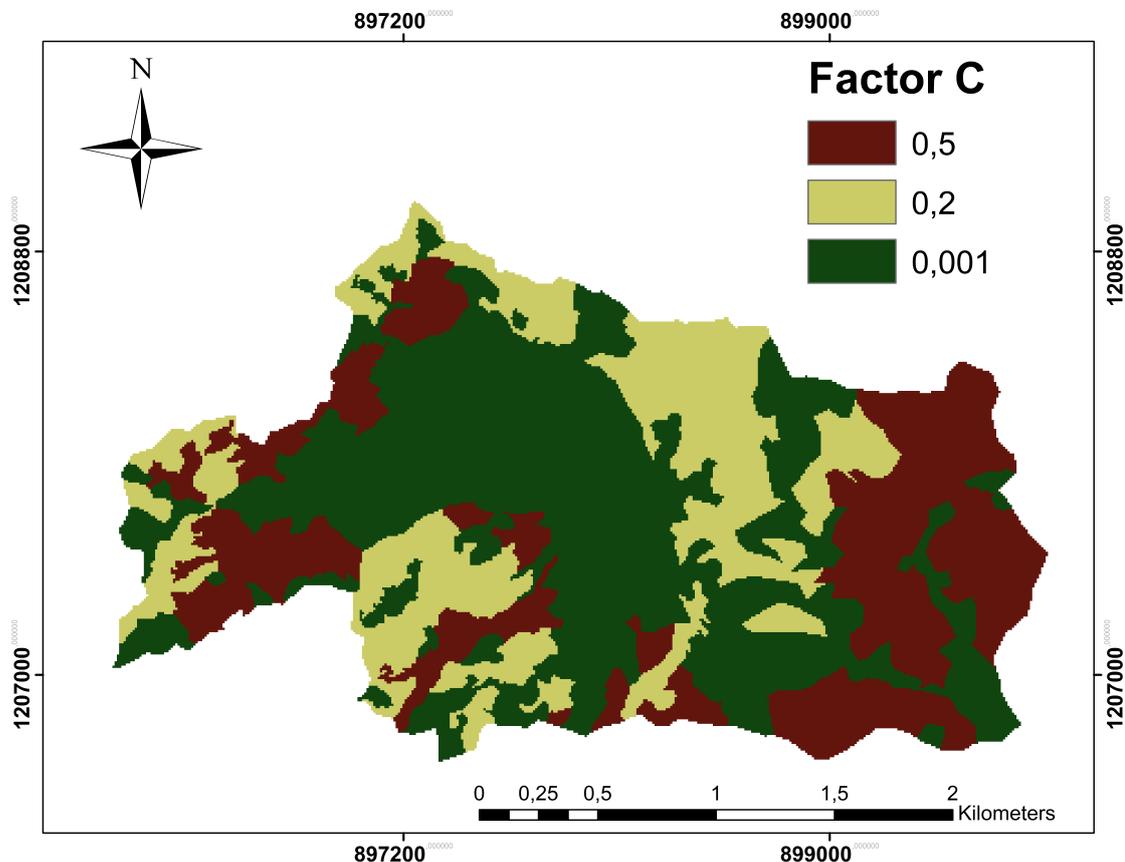


Figura 4.7: Factor C.

4.1.4 Factor de longitud e inclinación de la pendiente (LS)

La Figura 4.8 corresponde al mapa de pendientes de la zona de estudio, en el cual se tienen valores desde 0.10% hasta 150%, los colores rojos indican las zonas con valores más elevados y los colores verdes las zonas con pendientes más bajas. El mapa del factor LS es generado por medio del mapa de pendientes y flujo acumulado, donde se puede observar valores desde 0 hasta 7464 (adimensional), aunque el rango de valores es amplio, es notable que la cuenca registra bajos valores de LS en un rango estrecho que corresponde al límite bajo (Figura 4.9,

siendo los valores altos etiquetados por el color rojo zonas con menor área dentro de la zona.

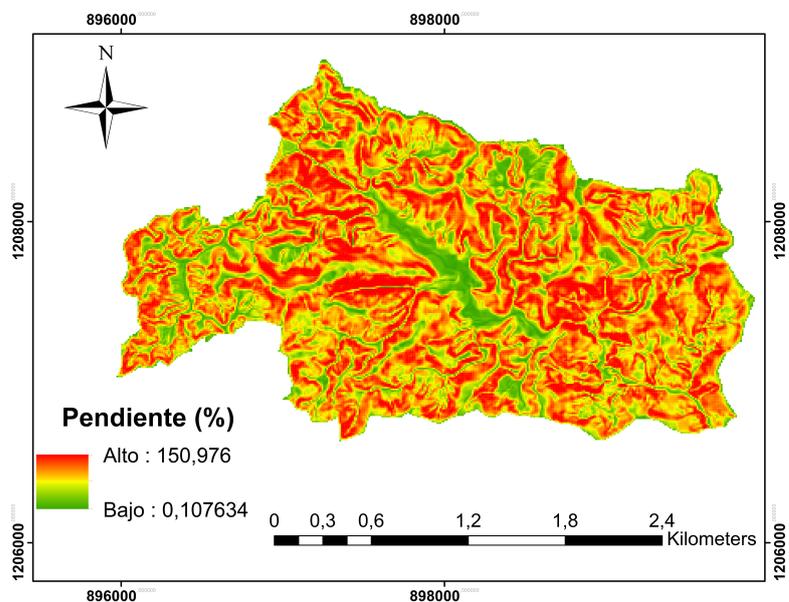


Figura 4.8: Mapa de pendientes.

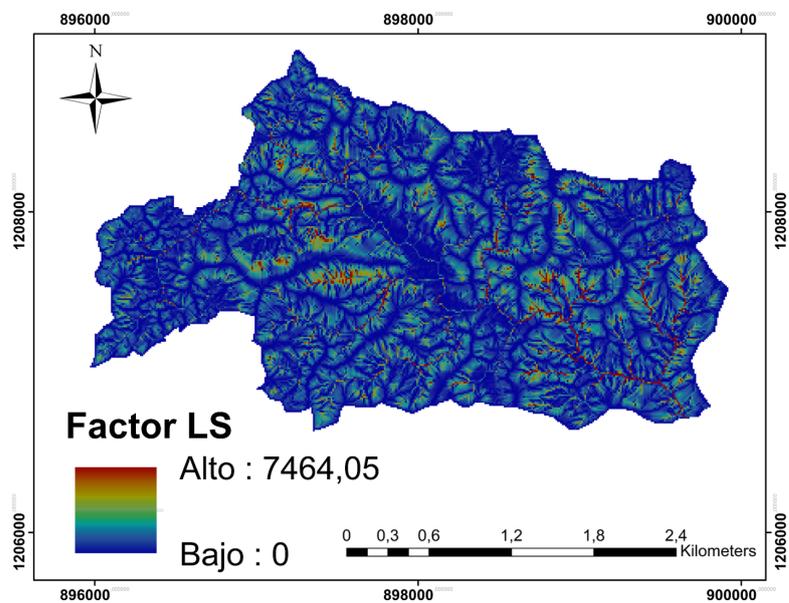


Figura 4.9: Mapa de factor topográfico LS.

4.1.5 Pérdida de suelo anual

Con cada una de las variables del modelo calculadas, se obtuvo los mapas de erosión anual, teniendo en cuenta que se tomaron los años de erosividad por lluvia del año 2002 y 2011. En cada año se tomó el mayor valor de K obtenido en cada horizonte de suelo, para horizonte A el mayor valor fue 0,04; horizonte E un valor de 0,05 y horizonte B un valor de 0,06. En la Figura 4.10 se muestran los mapas de pérdida de suelo para el año 2002 y 2011, con variación en el valor de K. Los menores valores de erosión se obtuvieron en el año 2002 con el menor valor de erodabilidad del suelo asociado a un horizonte A, y los mayores valores de erosión se obtuvieron para el año 2011 con un valor de K asociado al horizonte B. Para el año 2002 los valores de pérdida de suelo estuvieron en un rango desde valores menores a 5 hasta 3.631 ton/ha/año y para el año 2011 desde valores menores a 5 ton/ha/año hasta 6.581 ton/ha/año. Los valores para el año 2002 con un valor de $K=0,04$ variaron desde valores menores a 5 hasta 2.421 ton/ha/año; con $K=0,06$ fueron de valores menores a 5 hasta 3.631 ton/ha/año. Y el año 2011 para $K=0,04$ desde valores menores a 5 hasta 4.387 ton/ha/año y para $K=0,06$ variaron entre valores menores 5 hasta 6.581.

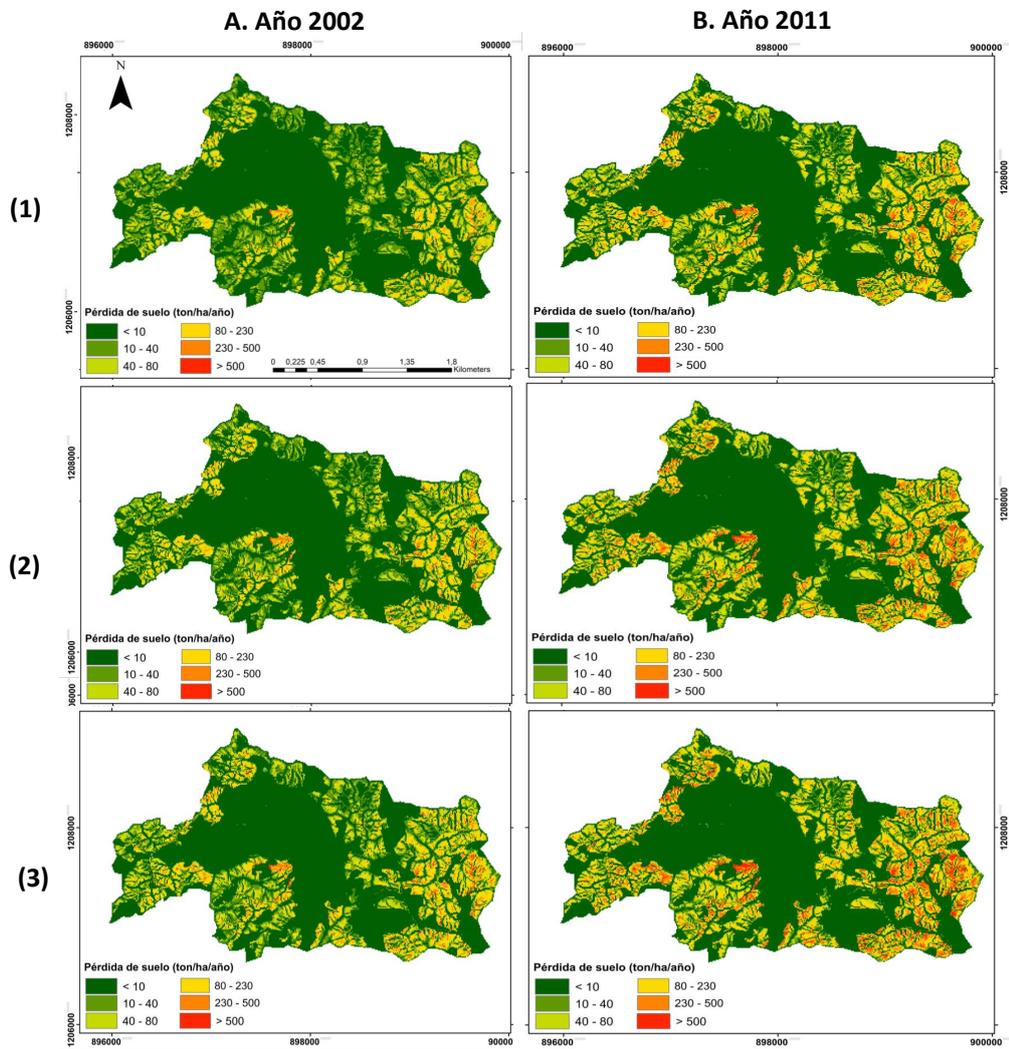


Figura 4.10: Mapas de erosión anual. 1.A. Año 2002 con $K=0,04$; 2.A. Año 2002 con $K=0,05$; 3.A. Año 2002 con $K=0,06$; 1.B. Año 2011 con $K=0,04$; 2.B. Año 2011 con $K=0,05$; 3.B. Año 2011 con $K=0,06$.

4.2 Análisis de riesgo

4.2.1 Estimación de amenaza: probabilidades de excedencia de lluvia y periodos de retorno

Los datos de precipitación fueron ajustados a la distribución normal obteniendo la frecuencia acumulada, por medio de la cual se pudo estimar la probabilidad de excedencia de los valores de precipitación anual, ya que debido a que el modelo RUSLE cuantifica tasas de pérdida de suelo anual, la probabilidad de excedencia se estimó a escala anual. Obtenidas las probabilidades de excedencia se calculó los periodos de retorno con la Ecuación (3.8). La relación entre periodos de retorno y probabilidades de excedencia es mostrado en la Figura 4.11. De la Figura se puede inferir que para mayores valores de precipitación se tiene una menor probabilidad de excedencia y mayor periodo de retorno.

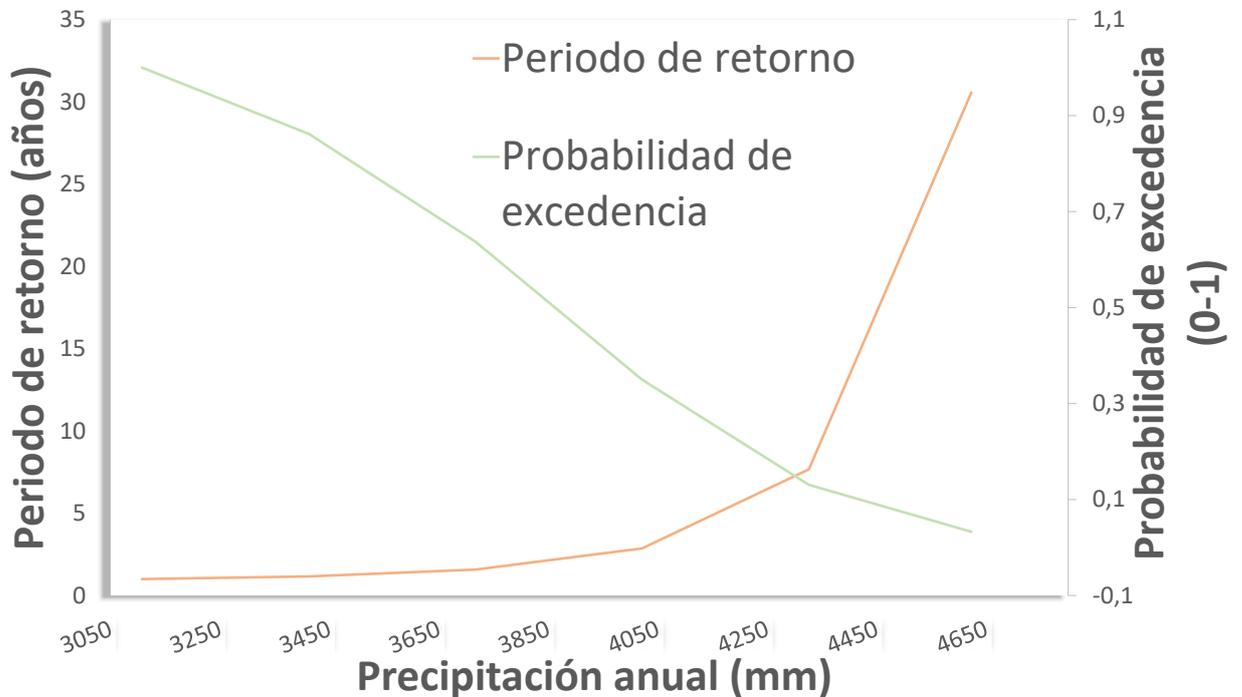


Figura 4.11: Probabilidades de excedencia de los valores anuales de precipitación de la estación San Roque asociadas a un periodo de retorno.

4.2.2 Estimación de vulnerabilidad: porcentaje de pérdida de suelo útil

El primer paso para calcular el porcentaje de pérdida de suelo útil es obtener el valor de espesor de suelo erosionado de los valores de pérdida de suelo ya estimados. Para obtener los valores de espesor erosionado, se utilizó los valores de pérdida de suelo en el periodo de tiempo 2000-2016 y se realizó la conversión de pérdida de suelo (ton/ha/año) a termino de espesor en cm, asumiendo un valor de peso específico del suelo 1500 kg/m³ para obtener los valores en términos de volumen y espesor.

Pérdida de suelo (ton/ha/año)	Conversión (kg/m²)	Peso específico (kg/m³)	Volumen erosionado m³	Espesor erosionado (cm) por m²
5	0,5	1500	0,0003	0,03
10	1	1500	0,0007	0,07
40	4	1500	0,0027	0,27
80	8	1500	0,0053	0,53
230	23	1500	0,0153	1,53
500	50	1500	0,0333	3,33
1000	100	1500	0,0667	6,67
2000	200	1500	0,1333	13,33
3000	300	1500	0,2000	20,00

Tabla 4.7: Cálculo de espesores de suelo erosionado para el periodo 2000-2016.

Los resultados de espesor erosionado por metro cuadrado son mostrados en la Tabla 4.7. Para establecer la relación entre espesor de suelo erosionado y el espesor útil para cultivar caña (porcentaje de pérdida de suelo útil) se utilizó la Ecuación (3.9). Los resultados son mostrados en la Tabla (4.8); es posible observar que los porcentajes de pérdida de suelo útil tienen un rango amplio desde 0,1% a 50%.

Pérdida de suelo (ton/ha/año)	Espesor erosionado (cm)	Relación espesor erosionado/espesor útil	Porcentaje de pérdidas
5	0,03	0,001	0,1
10	0,07	0,002	0,2
40	0,27	0,007	0,7
80	0,53	0,013	1,3
230	1,53	0,038	3,8
500	3,33	0,083	8,3
1000	6,67	0,167	16,7
2000	13,3	0,333	33,3
3000	20,00	0,500	50,0

Tabla 4.8: Porcentaje de pérdida de suelo para el periodo 2000-2016

Luego de obtener el espesor de suelo erosionado, se muestra en la Figura 4.12 el porcentaje de pérdida de suelo útil asociado a los años 2011 y 2002, con valores entre 0 y 40% para el año 2002 y entre 0 y 73% para el año 2011.

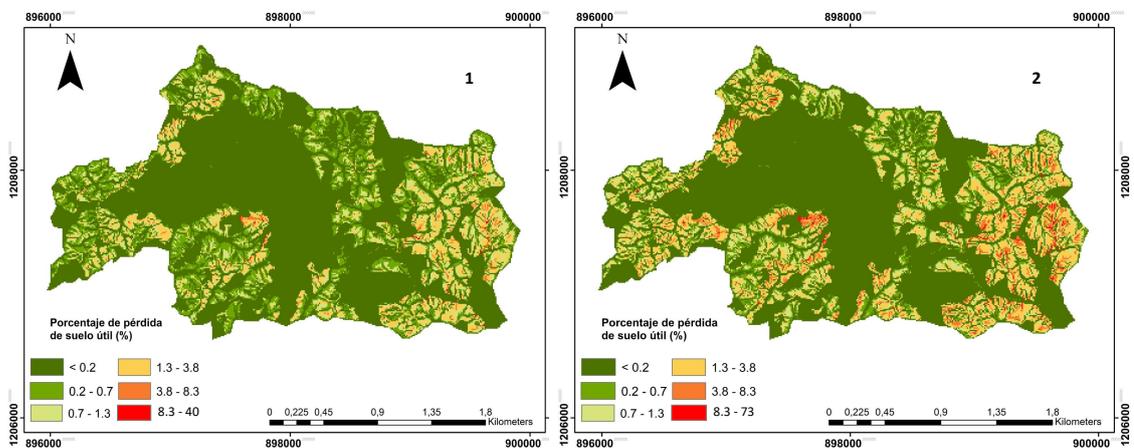


Figura 4.12: Porcentaje de pérdida de suelo útil. 1) Año 2002 - horizonte A; 2) Año 2011 - horizonte A.

Sin embargo, debido a que los valores de pérdida de suelo se encuentran distribuidos espacialmente en la cuenca y el valor de erosividad por lluvia es el mismo en toda la zona (una sola estación de precipitación), para poder relacionar los valores de pérdida de suelo con probabilidades de excedencia de lluvia que generan unos valores de erosividad asociados, se estimaron los valores de pérdida de suelo en las zonas de cultivos de caña en cada año del registro histórico de precipitación, como un solo valor de pérdida de suelo, asumiendo que el factor LS no tiene una variación espacial, el factor de coberturas estaría solo asociado a cultivos de caña y el valor de erodabilidad del suelo igual a 0,04 correspondiente a un horizonte A que dadas sus características se tiene el mayor sustento agrícola. De esta forma se obtuvo un solo valor de pérdida de suelo para toda la cuenca para cada año de estudio mostrado en la Tabla 4.9.

Año	R (Erosividad por lluvia)	A (Pérdida de suelo anual)	Espesor erosionado	Espesor erosionado/ espesor útil	Porcentaje de pérdida (%)
2000	133	200	0,89	0,033	3,3
2001	172	258	1,15	0,043	4,3
2002	133	200	0,89	0,033	3,3
2003	221	331	1,47	0,055	5,5
2004	162	244	1,08	0,041	4,1
2005	172	258	1,15	0,043	4,3
2006	209	314	1,39	0,052	5,2
2007	229	343	1,52	0,057	5,7
2008	200	300	1,33	0,050	5,0
2009	188	283	1,26	0,047	4,7
2010	198	297	1,32	0,050	5,0
2011	241	362	1,61	0,060	6,0
2012	200	299	1,33	0,050	5,0
2013	177	266	1,18	0,044	4,4
2014	147	220	0,98	0,037	3,7
2015	167	251	1,11	0,042	4,2
2016	167	251	1,11	0,042	4,2

Tabla 4.9: Porcentaje de pérdida de suelo para zonas de cultivo por año. Donde R (MJ mm ha-1 h-1 año-1), A (ton/ha/año), espesor erosionado (cm), espesor erosionado sobre espesor útil (adimensional) y porcentaje de pérdida (%)

Seguido a la estimación de pérdida de suelo útil para cultivar, se realizó la comparación de rendimiento entre la zona de estudio y los datos de rendimiento de cultivo de caña en Colombia. Según la Tabla 4.10 se tiene que el rendimiento de los cultivos de la zona están por debajo del rendimiento promedio anual, por lo cual, es mucho más susceptible a problemas de degradación por erosión. El porcentaje de pérdidas de suelo útil, está asociado al potencial agrícola, ya que en los horizontes superficiales del suelo es donde se encuentran la mayor cantidad de nutrientes que necesitan los cultivos para desarrollarse de forma óptima y el proceso de erosión pluvial genera la remoción superficial del suelo. Por lo cual, la pérdida de suelo tendrá consecuencias en el rendimiento agrícola.

Años	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Rendimiento zona de estudio t/ha	3,3	4,4	4,7	4,3	4,5	4,3	4,9	5,4	5,0	4,4
Rendimiento promedio anual en Colombia t/ha	6,4	6,2	6,2	6,2	6,2	6,3	6,0	6,1		

Tabla 4.10: Rendimiento en t/ha de la zona de estudio y valores anuales en Colombia.

4.2.3 Estimación de Riesgo

Para la interpretación de los posibles escenarios de riesgo se realizó un diagrama de árbol (diagrama lógico) que permite tener una perspectiva de las diferentes alternativas ante la evaluación del riesgo. Para el caso en estudio, se realizó el árbol de decisiones con respecto al análisis de riesgo por erosión de suelos, descrito en la Figura 4.13. Se presentan las siguientes situaciones:

1) la primera situación es la decisión de realizar o no estudios de suelos para cuantificar tasas de pérdida de suelo; si se decide realizar el estudio, pueden existir dos resultados: i) suelo con evidencia de procesos de erosión o ii) suelo que no presenta evidencias de procesos de erosión. Si el resultado del estudio indica que el suelo está bien en términos de erosión se puede tomar la siguiente decisión de realizar el análisis de riesgo con el fin de establecer medidas de prevención o no hacer análisis de riesgo porque en el estado actual no se advierte un fenómeno amenazante; por el contrario, si el resultado del estudio indica que se evidencia pérdida de suelo asociado a procesos de erosión, si se toma la decisión de realizar análisis de riesgo, será posible conocer el nivel de pérdidas de suelo útil para cultivar caña y de esta forma establecer medidas de reducción o compensación. En caso tal se tome la decisión de no realizar análisis de riesgo, se tendrá un desconocimiento del nivel de pérdidas de suelo útil, que a largo plazo puede incrementar los costos de mitigación y compensación. 2) si no se decide realizar cuantificación de pérdida de suelo, no se va a tener información del estado del recurso y por ende, no será posible determinar

el riesgo asociado a la pérdida de suelo.

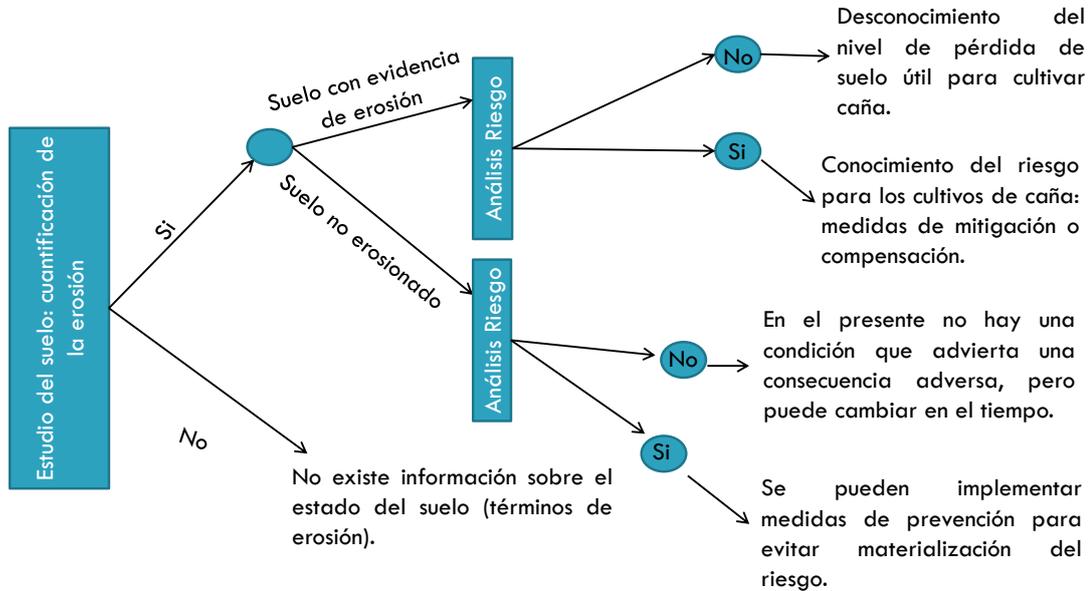


Figura 4.13: Árbol de decisiones para el estudio de riesgo por erosión, por medio de los posibles escenarios del problema en estudio.

Según el árbol de decisiones en este trabajo se realizó la cuantificación de pérdida de suelo cuyos resultados arrojan valores de pérdida de suelo, por lo cual se prosigue a realizar el análisis de riesgo con la información obtenida en la Tabla 4.9 y la Figura 4.11 estableciendo la relación entre amenaza y vulnerabilidad. En la Figura 4.14 es posible entender que cada valor de precipitación está asociado a una probabilidad de excedencia, que entre mayor sea la magnitud de la precipitación menor será la probabilidad de ser igualado o excedido, a su vez, esta probabilidad se relaciona con un periodo de retorno, que entre mayor sea la magnitud de la precipitación, mayor será el periodo en el cual pueda repetirse el mismo evento, por el contrario de valores de precipitación más bajos que debido a su magnitud, pueden repetirse a una escala de tiempo menor. Finalmente, debido a los valores obtenidos de pérdida de suelo útil, fue posible es-

tablecer una relación con la ocurrencia o excedencia de eventos que generan erosión. La línea punteada color naranja, es un ejemplo de como interpretar cada una de las relaciones obtenidas: un valor de precipitación anual de 4000 mm tiene un periodo de retorno de aproximadamente tres años, con una probabilidad de excedencia del 39% que dicho valor asociado a la capacidad de la precipitación para ocasionar pérdida de suelo genera un porcentaje de pérdida de suelo útil de 4,9%.

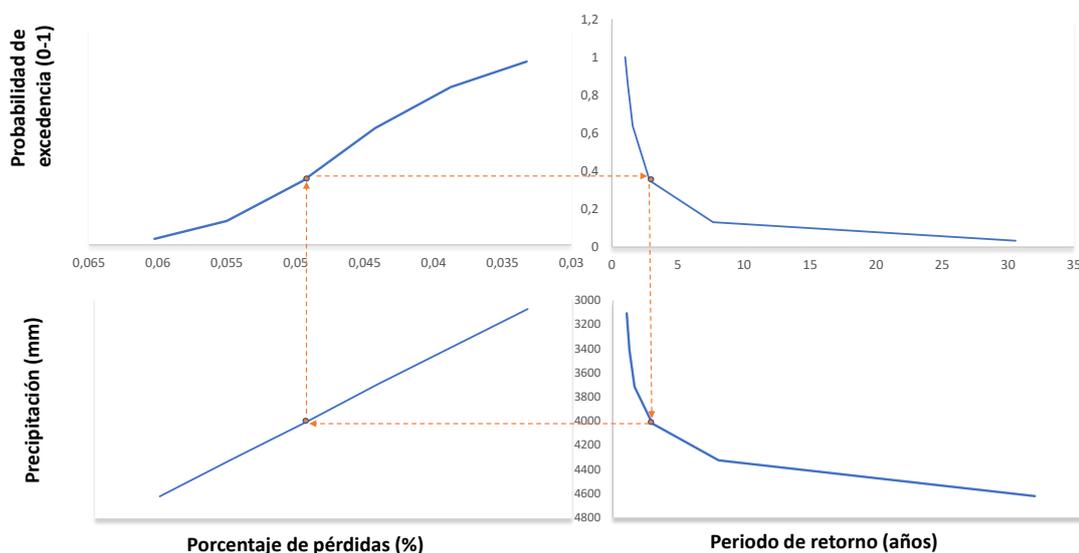


Figura 4.14: Relación Amenaza y vulnerabilidad. La amenaza está representada por la probabilidad de excedencia de un evento de precipitación que genere determinado porcentaje pérdida. La vulnerabilidad está representada por el porcentaje de pérdida de suelo útil para cultivar (es una representación de la vulnerabilidad del horizonte A). El periodo de retorno es un indicador de la recurrencia de un evento de precipitación que puede generar determinado porcentaje de pérdida en un tiempo determinado.

La relación del riesgo: amenaza y vulnerabilidad se representa como la probabilidad de excedencia y el porcentaje de pérdida de suelo útil.

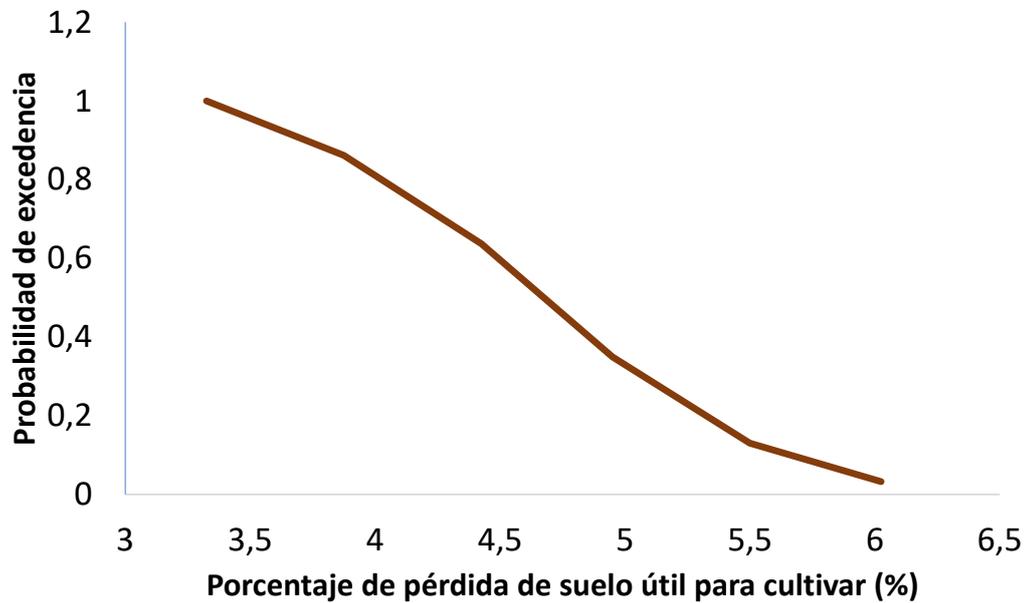


Figura 4.15: Probabilidad de pérdida de suelo útil establecida como la probabilidad de excedencia de los eventos de precipitación en el registro histórico en estudio (2000-2016) y su influencia en los valores de pérdida de suelo y la vulnerabilidad como el porcentaje de pérdida de suelo útil.

4.3 Proyecciones de pérdida de suelo

Se obtuvieron los registros históricos simulados de los modelos HadGEM ES, HadGEM CC y CCSM4, y los datos obtenidos por TRMM y CHRPS. En la Figura 4.16 se puede observar el comportamiento de cada uno de los datos obtenidos, evidenciando que los modelos HadGEM muestran unos valores más elevados con respecto al modelo CCSM4 y los datos observacionales, indicando una sobreestimación de los valores de precipitación para la región analizada. Por tal razón, se escogieron los datos de precipitación del modelo CCSM4 para la modelación de pérdida de suelo en los periodos futuros seleccionados.

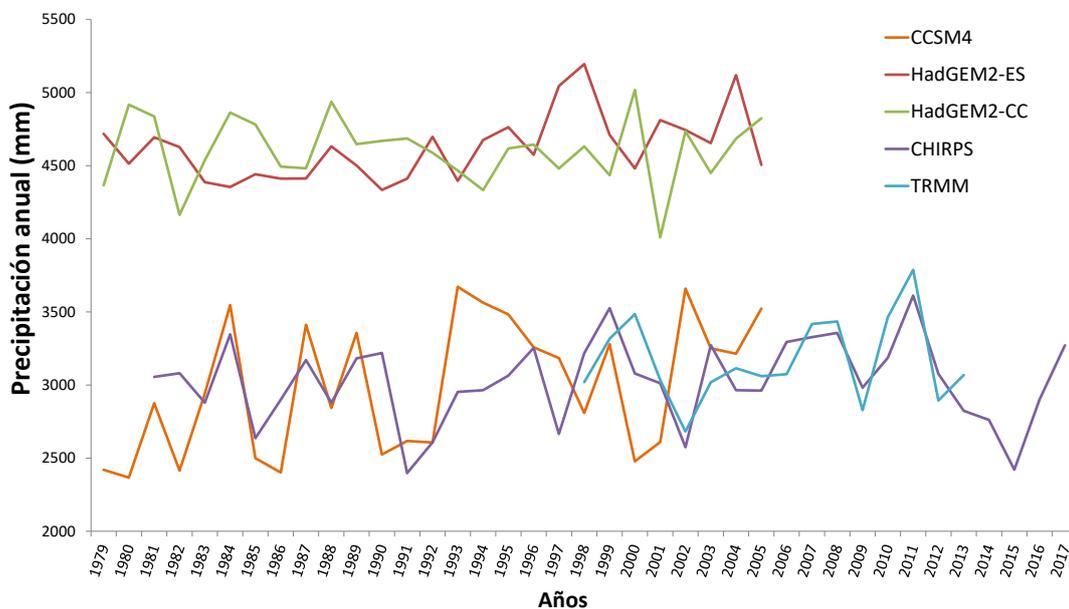


Figura 4.16: Registro histórico de precipitación por medio de datos satelitales y modelos.

Los resultados indican valores de erosividad por lluvia para el periodo de 2034-2050 de 128 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ y para el periodo 2084-2100 de 102 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ lo que muestra que existe una disminución en la precipitación media anual disminuyendo también el poder erosivo de la lluvia. En la Figura 4.17 se evidencia la disminución en los valores de erosión de suelos en relación con la disminución en la erosividad por lluvia, comparado con el periodo 2000-2016 con valores más altos de pérdida de suelo.

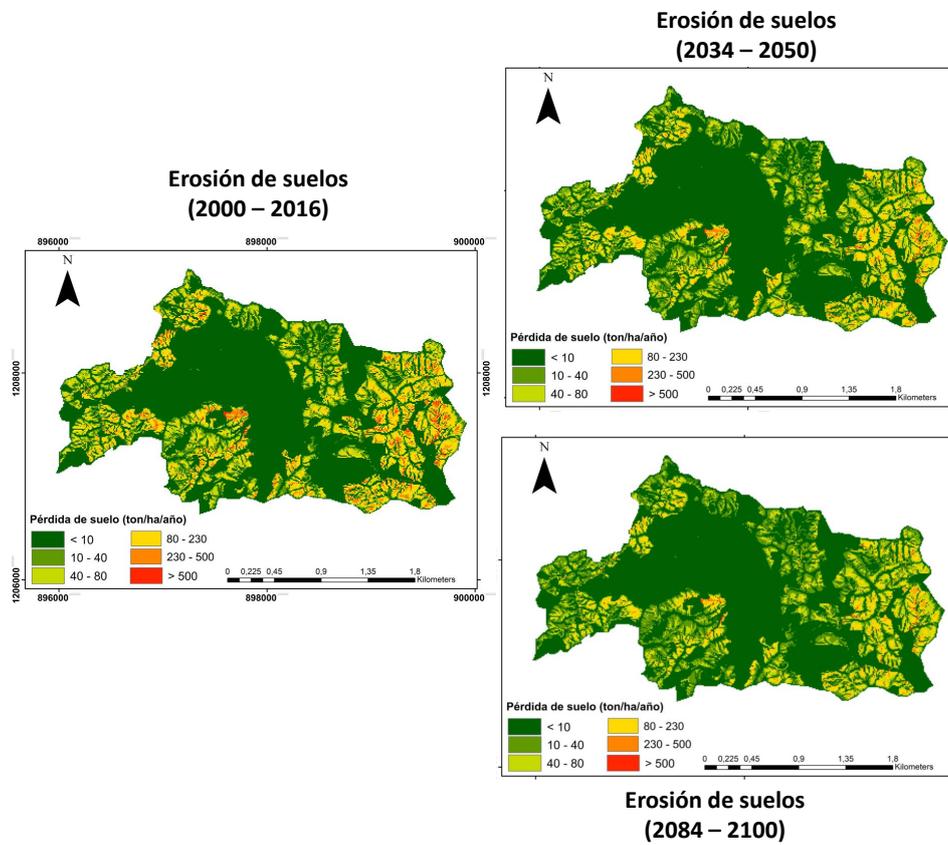


Figura 4.17: Erosión actual y proyecciones de pérdida de suelo

Capítulo V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Discusiones de resultados

5.1.1 Estimación de pérdida de suelo anual

Las propiedades físicas del suelo tienen una influencia importante en el comportamiento del suelo ante procesos externos como la erosión. La erodabilidad es la variable que permite relacionar estas propiedades físicas con la susceptibilidad del suelo a removerse, es así como en los resultados obtenidos se tiene que para los horizontes identificados en la zona de estudio (horizonte A, B y E) los valores de permeabilidad, textura, estructura y materia orgánica, los valores obtenidos para cada horizonte son diferentes, siendo el mismo material parental. Este resultado permite demostrar que aunque el desarrollo de un suelo parta de la misma litología, son los diferentes horizontes de suelo que se desarrollan los que impregnan ciertas características del suelo, es así, aunque se trate del mismo suelo, dependiendo del horizonte que se encuentre aflorando existirá diferencias en sus propiedades físicas y la erodabilidad va a va ser diferente dependiendo del tipo de horizonte expuesto.

Así mismo, partiendo del modelo conceptual utilizado para la discriminación de horizontes, en SoilSurveyStaff (2017) teóricamente el horizonte C y B cuentan con menor desarrollo de su estructura, mientras que el horizonte E y A son horizontes mayormente estructurados, teniendo en cuenta que están mayormente expuestos a procesos pedogenéticos que son los que permiten un desarrollo mayor del suelo; los horizontes evidenciados en la zona coinciden con la descripción del modelo conceptual, teniendo en cuenta las características físicas identificadas en campo y laboratorio, donde las muestras clasificadas como horizonte B tienen mayor contenido de arenas y menor contenido de material fino, seguido de las muestras clasificadas como horizonte A y por último las muestras clasificadas como horizonte E. Así mismo, la tasa de infiltración para el material más arenoso es mayor (horizonte B) y para el horizonte A se encontró valores altos de tasa de infiltración, aún sin ser el horizonte con mayor contenido de material grueso. Esto puede explicarse por otras características asociadas al horizonte A: mayor contenido de macroorganismos que aumentan la porosidad del suelo, presencia de raíces que forman bioestructura en el mismo y alto contenido de material vegetal y animal, aumentando la tasa de infiltración que los otros horizontes descritos que no cuentan con estas características. Los valores obtenidos de materia orgánica coincide con lo esperado de acuerdo a la descripción teórica de los horizontes, donde el horizonte A tiene el mayor contenido de materia orgánica, seguido del horizonte E y por último el horizonte B. La materia orgánica en el suelo es producto de la descomposición de restos animales y vegetales que por lo general se encuentran en la superficie que por algunos procesos pedogenéticos (littering, melanización) son introducidos en el suelo en cualquier grado de descomposición del material; el producto final de la descomposición de este material es llamado humus y hace parte de las sustancias coloidales en el suelo, siendo responsable también de algunos procesos físico-químicos (formación de estructura, capacidad de intercambio catiónico, entre otros). Siendo el horizonte A el más superficial de los demás, se

esperaba el mayor contenido de materia orgánica como se evidenció en los resultados. Teniendo en cuenta que los valores de erodabilidad se encuentran en función de las propiedades físicas anteriormente mencionadas, se pudieron identificar diferentes valores de erodabilidad respecto a cada horizonte, donde el mayor valor se obtuvo en una muestra de suelo clasificada como horizonte B y el menor valor en la muestra clasificada como horizonte A. Siendo el horizonte A característicamente el idóneo para el sustento de cultivos agrícolas. En acuerdo con algunos estudios (Correa et al., 2016; Hoyos, 2005; Ochoa et al., 2016) los resultados muestran que los valores de erodabilidad se encuentran en un rango desde valores de 0,01 hasta 0,09. En otros estudios como (Haregeweyn et al., 2017) se encuentran valores más altos de erodabilidad hasta 0,3, donde se utiliza una diferente metodología para el cálculo de erodabilidad del suelo.

Comparando los años 2002 y 2011, los valores más altos de pérdida de suelo se encuentran asociados al año 2011, lo que es consecuente con los valores de precipitación de la zona, teniendo en cuenta que la precipitación es el factor desencadenante del proceso de erosión (Ganasri and Ramesh, 2016). Los valores de erosividad por lluvia del presente estudio indica rangos entre 133 y 241 (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹) valores que concuerdan con el estudio de (Fayas et al., 2019), cuya zona de estudio tiene un patrón similar los valores de la precipitación, sin embargo es importante resaltar que la ecuación para el cálculo de erosividad por lluvia es diferente. En otro estudio (Ochoa et al., 2016) los valores de erosividad por lluvia muestran valores con magnitudes más altas en los resultados (de orden de 1000 a 5000) en una subcuenca en la región Andina en Ecuador utilizando una ecuación diferente al estudio de Ochoa et al. (2016) y de Pérez and Mesa (2002). Esta diferencia en los resultados puede explicarse por el hecho que existen diferentes ecuaciones para el cálculo de erosividad por lluvia como es mostrado en (Nearing et al., 2017) de tal forma que pueden existir discrepancias en las magnitudes de los resultados obtenidos.

En la literatura se muestran distintos valores del factor de cobertura de suelo para los distintos usos del suelo como se muestra en algunos estudios (Ganasri and Ramesh, 2016; Haregeweyn et al., 2017), no obstante, existe un consenso referente a la asignación de valores más altos de C para coberturas asociadas cultivos y los valores de C más bajos a coberturas asociadas con bosques. Los valores de C asignados en el trabajo son consistentes con lo observado en campo, donde es evidente que las zonas de bosque no presentan procesos de erosión significativos, a diferencia de zonas de pastos o cultivos, en los cuales se podía evidenciar procesos de erosión avanzados (Figura 5.1). Los valores de LS concuerdan con la descripción de la zona, que presenta una topografía quebrada y altas pendientes, así como zonas con algunas planicies.

Para los valores de pérdida de suelo anual, se resalta la influencia de la erosividad por lluvia, generando la tendencia en aumento o disminución de los valores de erosión en la zona, junto con los valores de erodabilidad del suelo. Teniendo todas las demás variables del modelo constantes, existe una variación entre los valores de pérdida de suelo de acuerdo al valor de erodabilidad (K) que se utilice de acuerdo a los horizontes de suelo identificados. Comparando con algunos estudios en Colombia de modelación de pérdida de suelo con el modelo RUSLE es posible notar un amplio rango de valores de pérdida de suelo, en la Tabla 1.2 se muestran algunos estudios en el país donde es notorio valores menores a 10 ton/ha/año hasta valores reportados de 1.130.933 ton/ha/año. Debido a las diversas formas de calcular cada uno de los factores del modelo, se generan ciertas sobreestimaciones o subestimaciones de los valores de pérdida de suelo, en algunos casos con resultados pocos realistas. Sin embargo, como lo anota Alewell et al. (2019) la modelación no es una alternativa de medición exacta pero podría ser una herramienta poderosa para comprender observaciones en el desarrollo y prueba de teorías, comprensión de procesos, tendencias y diferencias entre datos que difieren espacial o temporalmente para lo cual

los modelos de erosión sirven como herramientas. Quinton (2004) realiza una comparación entre diferentes modelos de erosión de mayor complejidad y rigurosidad en la entrada de datos con la versión original más simple, concluye que los modelos más complejos pueden tener mejor representación de la realidad, pero no existe una diferencia significativa para mejorar la predicción de tasas de erosión. Por lo cual, el objetivo de modelación de pérdida de suelo por erosión deben apuntar a la predicción de diferencias relativas, tendencias a lo largo del tiempo y reacciones de los sistemas a los factores impulsores del proceso, prácticas de gestión y usar modelos como herramientas para aprender sobre los sistemas modelados (Alewell et al., 2019).



Figura 5.1: Procesos de erosión en la zona de estudio.

5.1.2 Estudio de riesgo por erosión

En la figura 4.14 se plantea una relación entre las variables asociadas al estudio de riesgo. Siguiendo la metodología y definición planteada en el contexto de este proyecto, el evento que puede generar posibles daños o consecuencias en el entorno fue el proceso de erosión pluvial, el cual por su dinámica genera remoción de material (suelo) que es el sustento primario para las actividades establecidas en la zona (vocación agrícola). De este modo, el evento amenazante es la materialización de la erosión por lluvia, el cual está condicionado, de acuerdo con la definición de erosión pluvial a su agente desencadenante que es la precipitación, por lo cual la ocurrencia del fenómeno se estableció de acuerdo al régimen de precipitación de la zona; de acuerdo a esto, existieron ciertos años en los cuales se obtuvieron los valores más extremos correspondiente al año 2002 (Evento Niño) y año 2011 (Evento Niña).

La identificación de los posibles "finales" o resultados indeseables de la materialización de la erosión en la zona fueron asociados a la pérdida del horizonte más orgánico en la zona el cual requiere todos los nutrientes para las actividades de cultivo de caña, en este caso ese horizonte es llamado como horizonte A.

La amenaza se estableció, con la información obtenida por medio de métodos estadísticos relacionado con la probabilidad de excedencia de lluvias es importante anotar que este tipo de análisis estadísticos por lo general se realiza a escalas diarias o mensuales de precipitación, en este trabajo análisis de frecuencia y excedencia de lluvias se realizó bajo el registro anual de precipitación debido a que el modelo RUSLE cuantifica las tasas de pérdida de suelo anual a dicha escala. Las pruebas de bondad de ajuste indican que los datos observados se ajustan a una distribución normal, lo que concuerda con el estudio de Dirk (2013) en el cual se realiza el análisis de frecuencia con datos de precipitación anual y un total de observaciones de 33, señalando en su estudio que el 80% de las estaciones con registros de precipitación se ajustan

a una distribución normal, siendo la precipitación anual la suma de muchos eventos de lluvia individuales, se distribuye normalmente. Los resultados indican que las probabilidades de excedencia más altas están asociados a los valores más bajos de precipitación anual.

Con respecto a la vulnerabilidad se obtuvieron dos resultados importantes: 1. Porcentaje de pérdida de suelo para zonas de cultivo para el periodo de estudio 2000-2016 (Tabla 4.8) y 2. Porcentaje de pérdida de suelo para zonas de cultivo para cada año (Tabla 4.9). Es importante entender la diferencia entre estos dos resultados, para el cual el primero indica el porcentaje de pérdida de suelo de acuerdo con los valores de pérdida de suelo obtenidos desde el valor más bajo al valor más alto en el periodo de estudio. Por lo tanto, se tiene un amplio rango de valores, el valor de pérdida máximo en porcentaje es de un 50% asociado al mayor valor de pérdida de suelo. El segundo resultado asociado con la vulnerabilidad es el porcentaje de pérdida de suelo asociado a zonas de cultivo, aquí es importante resaltar que para obtener este resultado se asumió valores constantes de LS, C, P y K como fue mencionado en items anteriores y así obtener un valor de pérdida de suelo asociado a cada año del periodo de estudio (2000-2016) (Tabla 4.9); estos valores constantes en el caso de coberturas es asumiendo que toda la cuenca tiene vocación agrícola (cultivo de caña) ya que es el elemento expuesto (vulnerable) en este caso y su sustento depende del sustrato en el suelo que es encontrado mayormente en los horizontes asociados como A. Si analizamos de forma temporal (cada año) se tiene la suposición de variables constantes. Sin embargo, este resultado es el que permite tener una aproximación a la evaluación del riesgo; ya que obtenemos este como la combinación de la probabilidad de excedencia de cada valor de precipitación registrado anualmente con el porcentaje de pérdidas asociados a ese año, con un elemento vulnerable que es el cultivo de caña. Esta relación es posible evidenciarla en la Figura 4.15. El porcentaje de pérdida de suelo se encuentra asociado a una probabilidad de excedencia de precipitación, el cual también está ligado a un periodo de

retorno. La Figura 4.14 permite asociar la probabilidad de materialización de un valor de precipitación que genera un valor de pérdida de suelo por medio de la erosividad por lluvia. Así tenemos que para valores bajos de precipitación, se tiene un menor porcentaje de pérdida de suelo con una probabilidad de excedencia alta y un periodo de retorno bajo. Aún así, teniendo el menor valor de precipitación, según la tabla 4.9 se genera una erosividad de 133 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ y una pérdida de suelo de 200 ton/ha/año, el porcentaje de pérdida asociado es de 3.3% para el valor más alto de precipitación, se genera un valor de erosividad por lluvia de 241 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ asociado a una pérdida de suelo de 362 ton/ha/año el porcentaje de pérdida de suelo útil para cultivar es 6%. Es importante resaltar que si para los agricultores el espesor útil para cultivar es menor a 40 cm, los porcentajes de pérdida de suelo serán aún mayores.

De acuerdo con la metodología para la evaluación de riesgo adoptada para este proyecto de investigación, fue posible responder las preguntas asociadas al concepto de riesgo siguiendo los pasos descritos por Faber and Stewart (2003) mostrados en la Figura 1.2 identificando el tipo de amenaza: materialización de la erosión pluvial asociado a una probabilidad de ocurrencia y excedencia; las consecuencias asociadas al evento: pérdida de suelo útil para cultivar caña; elemento expuesto: cultivo de caña; posibles escenarios de riesgo de acuerdo a la pérdida de suelo en cada año. La forma de interpretar estos resultados, es decir el criterio de tolerancia al nivel de pérdidas asociado al proceso de erosión pluvial, depende de la percepción que tenga el agricultor con respecto a cuanto está dispuesto a perder en términos de producción con respecto a la pérdida de suelo útil. De acuerdo a esta percepción el agricultor puede establecer criterios de aceptación. En este estudio se muestran los niveles de pérdida de suelo útil, mas los estudios relacionados con los criterios de tolerancia y medidas para mitigar la amenaza asociada son discusiones que quedan abiertas para futuras investigaciones. Estimar el riesgo como producto

de la amenaza, vulnerabilidad y elementos expuestos ha sido ampliamente utilizada en diversos estudios geotécnicos (Vega and Hidalgo, 2016; Isaza-Restrepo et al., 2016; Narra et al., 2019) y en estudios de erosión marina (Narra et al., 2019; Merlotto et al., 2016); sin embargo, en procesos de erosión pluvial no es una metodología comúnmente utilizada, donde la evaluación del riesgo es clasificado de acuerdo a los valores de pérdida de suelo (Haregeweyn et al., 2017; Correa et al., 2016; Prasannakumar et al., 2012; Abidin et al., 2017; Aslan et al., 2019). Por lo que la aplicación de esta metodología en el presente trabajo y la relación establecida en la Figura 4.14 es una buena aproximación para entender el riesgo asociado a la pérdida del horizonte necesario para el sustento de los cultivos de caña, ya que el rendimiento de los cultivos se encuentra asociado al potencial de nutrientes que tiene el suelo y que de acuerdo a la clasificación de horizontes utilizadas, es el horizonte A el que cumple con las características para sustento agrícola. Si se pierde este horizonte, se necesitaría aumentar costos referentes a adición de nutrientes y componentes que permitan aumentar la capacidad del suelo para resistir cultivos de caña, aumentando así, los costos de sembrar y producir caña, teniendo en cuenta, que según los datos proporcionados por el ministerio de agricultura, la cuenca se encuentra por debajo del rendimiento promedio anual.

5.1.3 Proyecciones de pérdida de suelo

Los valores proyectados de pérdida de suelo muestran que al haber una disminución en la precipitación en la zona, al asumir los demás variables del modelo RUSLE constantes en el tiempo, se obtiene una disminución de pérdida de suelo, lo que quiere decir, es que estos cambios asociados a los patrones espaciales y temporales de las variables de cambio climático, para la zona estudiada y el fenómeno a entender (erosión por lluvia) puede indicar que por cambios en la precipitación no hay un aumento de pérdida de suelos. Sin embargo, la erosividad por lluvia

es definida en primera instancia en función de la frecuencia e intensidad de la lluvia, que en este caso, puede que exista una disminución en la precipitación total que cae en un año, pero eventos puntuales de precipitación en función de su intensidad y frecuencia podrían exhibir un comportamiento diferente. Es importante anotar que la resolución horizontal de los modelos de circulación global es de 100-300 km, por lo que es una limitación a la hora de resolver completamente la orografía a escala fina, limitando su capacidad de simular fenómenos climáticos (Xu et al., 2019), para casos más locales son utilizadas técnicas de reducción de escala que se refiere al uso de enfoques estadísticos o dinámicos para obtener información climática a escala regional o local de la salida de GCM o datos de reanálisis (Liu et al., 2012). Sin embargo, Xu et al. (2019) resalta que aún siendo las técnicas de reducción de escala una buena alternativa para representar información climática local, existen sesgos en la información climática entregada por los modelos de circulación global, los sesgos climáticos históricos pueden propagarse en proyecciones climáticas futuras durante la dinámica simulaciones de reducción de escala (Liang et al., 2008).

Por otro lado, existen otras variables en el modelo, que a final o mediados de siglo pueden variar, aportando un aumento o disminución en el valor total de pérdida de suelo.

Las proyecciones son una herramienta que permite entender las posibles tendencias o comportamientos de una variable climática, pero existen limitaciones referente a la escala de los modelos y la escala de la zona de estudio, además las posibles sobreestimaciones o subestimaciones que tengan los modelos con respecto a las variables climáticas. Teniendo en cuenta estas limitaciones, los resultados permiten tener una tendencia más no valores exactos de lo que puede suceder en el futuro, de manera general en la zona de estudio.

Capítulo VI

CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones

Los valores de pérdida de suelo indican que para el año con mayor valor de precipitación, se genera un mayor valor de erosividad por lluvia, incrementando el rango de valores de pérdida de suelo, entre el año 2002 y 2011, el año 2011 arrojó los valores más altos con respecto al año 2002; . Adicionalmente, las variaciones para cada año estuvieron en función de la erodabilidad del suelo, obteniendo los valores más bajos cuando se tomó un valor de $K=0,04$ correspondiente a horizonte A; y los valores más altos con $K=0,06$ correspondiente a horizonte B, el valor de K presentó una variación con respecto al horizonte de suelo expuesto en la superficie, esto debido a la diferencia en las propiedades físicas de un horizonte a otro. Los valores de pérdida de suelos arrojaron un amplio rango dependiendo de los valores de erosividad por lluvia y erodabilidad del suelo, el rango de valores de pérdida de suelo en el área de estudio es amplio, obteniendo desde valores muy bajos (menor a 5 ton/ha/año) hasta valores altos (mayor a 1000 ton/ha/año); según el reconocimiento de la zona, estos valores coinciden con algunos procesos

de erosión severos reconocidos como surcos y cárcavas, los cuales ya se han convertido en parte del paisaje. Sin embargo, las herramientas para estimar la tasa de pérdida de suelo, de acuerdo con las diversas formas de estimar cada variable puede generar subestimación o sobreestimación de los resultados obtenidos. Por lo que el modelo permite encontrar tendencias de aumento o disminución en la pérdida de suelo en la zona de estudio, mas los valores estimados pueden variar de acuerdo con las ecuaciones utilizadas para cada factor de la RUSLE.

Las proyecciones asociadas a la precipitación mostraron una disminución en los patrones anuales, por lo cual los valores de pérdida de suelo disminuyeron en el tiempo, para el periodo de 2034-2050 y el periodo 2084-2100. Existe una limitación respecto a la escala de los modelos de circulación general y la zona de estudio, por lo que los resultados obtenidos me permiten conocer la tendencia de la precipitación pero no la cantidad de precipitación en la zona. Adicionalmente, es importante anotar que en un año pueden existir eventos de precipitación intensos que generen procesos de erosión pluvial, sin registrar los mayores valores de precipitación en el año.

El análisis de riesgo de la zona permite comprender la relación existente entre la probabilidad de materialización del fenómeno de erosión, respecto a las pérdidas que se generan. Los cultivos de caña, como se mencionó anteriormente son los elementos expuestos y teniendo en cuenta que la zona ya presenta procesos de erosión considerables, es necesario adoptar medidas que permitan controlar los efectos de la erosión, ya que el rendimiento se encuentra por debajo del promedio nacional de producción y podría disminuir si el porcentaje de pérdidas de suelo útil aumenta. La relación entre la probabilidad de excedencia de ciertos valores de precipitación que generan erosión y su nivel de pérdidas, es una aproximación del comportamiento del fenómeno en la zona, resaltando que existe evidencias de procesos de erosión evolucionados, y que, los agricultores del medio expresan la remoción del horizonte más superficial y orgánico que

actualmente ya no es posible reconocerlo (horizonte O).

REFERENCIAS

- Abidin, R. Z., Sulaiman, M. S., and Yusoff, N. (2017). Erosion risk assessment: A case study of the langat river bank in malaysia. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(1):26–35.
- Aguilar, S. (2001). *Bases técnicas para el establecimiento y manejo de cultivo de caña en el departamento de Casanare*. Corpoica.
- Alewell, C., Borelli, P., Meusburger, K., and Panagos, P. (2019). Using the usle: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International soil and water conservation research*.
- Apostolakis, G. E. (2004). How useful is quantitative risk assessment? *Risk Analysis: An International Journal*, 24(3):515–520.
- Arias, P. A., Martínez, J. A., and Vieira, S. C. (2015). Moisture sources to the 2010–2012 anomalous wet season in northern south america. *Climate dynamics*, 45(9-10):2861–2884.
- Aslan, Z., Erdemir, G., Feoli, E., Giorgi, F., and Okcu, D. (2019). Effects of climate change on soil erosion risk assessed by clustering and artificial neural network. *Pure and Applied Geophysics*, 176(2):937–949.

- Beasley, D., Huggins, L., and Monke, a. (1980). Answers: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, 23(4):938–0944.
- Bellouin, N., Collins, W., Culverwell, I., Halloran, P., Hardiman, S., Hinton, T., Jones, C., McDonald, R., McLaren, A., O'Connor, F., et al. (2011). The hadgem2 family of met office unified model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4(3):723–757.
- Boardman, J. (2006). Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena*, 68(2-3):73–86.
- Boulton, G. (1996). Theory of glacial erosion, transport and deposition as a consequence of subglacial sediment deformation. *Journal of Glaciology*, 42(140):43–62.
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., et al. (2014). Assessment of climate change over south america under rcp 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3(5):512–525.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., Saldarriaga, J. G., et al. (1994). *Hidrología aplicada*. Number 551.48 C4H5.
- Collins, W., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C., Joshi, M., Liddicoat, S., et al. (2011). Development and evaluation of an earth-system model–hadgem2. *Geoscientific Model Development*, 4(4):1051–1075.
- Conciani, W. (2008). *Processos erosivos: Conceitos e ações de controle*. Brasilia, Brasil. CEFETMT.

- Corpocaldas (1998). *Manual para el control de la erosión*. Manizales, Colombia. La Patria S.A.
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N., and Norton, L. D. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at mantaro river basin, peruvian andes. *Catena*, 147:110–124.
- Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M. C., Frame, D., Mahowald, N., and Winther, J.-G. (2013). Introduction. in ‘climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change’. *K. Plattner, M. Tignor, SK Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and PM Midgley (Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press, 2013), http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Chapter01_FINAL.pdf*.
- Diodato, N. and Bellocchi, G. (2009). Assessing and modelling changes in rainfall erosivity at different climate scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(7):969–980.
- Dirk, R. (2013). Frequency analysis of rainfall data. *College on Soil Physics—30th Anniversary (1983-2013), The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physica*, pages 244–10.
- Ditzler, C., Scheffe, K., Monger, H., et al. (2017). Soil survey manual. *Soil Science Division Staff*.
- DLWC (1995). Iqqm-integrated water quality and quantity model. *Catchment Processes and Modelling Branch*, pages 297–314.
- Du, H., Dou, S., Deng, X., Xue, X., and Wang, T. (2016). Assessment of wind and water erosion risk in the watershed of the ningxia-inner mongolia reach of the yellow river, china. *Ecological indicators*, 67:117–131.

- Faber, M. H. and Stewart, M. G. (2003). Risk assessment for civil engineering facilities: critical overview and discussion. *Reliability engineering & system safety*, 80(2):173–184.
- Fayas, C. M., Abeysingha, N. S., Nirmanee, K. G. S., Samaratunga, D., and Mallawatantri, A. (2019). Soil loss estimation using rusle model to prioritize erosion control in kelani river basin in sri lanka. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(2):130–137.
- Galdino, S., Sano, E. E., Andrade, R. G., Grego, C. R., Nogueira, S. F., Bragantini, C., and Flosi, A. H. (2016). Large-scale modeling of soil erosion with rusle for conservationist planning of degraded cultivated brazilian pastures. *Land degradation & development*, 27(3):773–784.
- Ganasri, B. and Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by rusle model using remote sensing and gis-a case study of nethravathi basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6):953–961.
- Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, D. M., Neale, R. B., Rasch, P. J., Vertenstein, M., et al. (2011). The community climate system model version 4. *Journal of Climate*, 24(19):4973–4991.
- Glade, T., Anderson, M. G., and Crozier, M. J. (2006). *Landslide hazard and risk*. John Wiley & Sons.
- Gollier, C. (2004). *The economics of risk and time*. MIT press.
- Haregeweyn, N., Tsunekawa, A., Poesen, J., Tsubo, M., Meshesha, D. T., Fenta, A. A., Nyssen, J., and Adgo, E. (2017). Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the upper blue Nile river. *Science of the Total Environment*, 574:95–108.

- Hoomehr, S., Schwartz, J. S., and Yoder, D. C. (2016). Potential changes in rainfall erosivity under gcm climate change scenarios for the southern appalachian region, usa. *Catena*, 136:141–151.
- Hoyos, N. (2005). Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the colombian andes. *Catena*, 63(1):85–108.
- Huang, R. and Li, W. (2011). Formation, distribution and risk control of landslides in china. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3(2):97–116.
- Huggett, R. (2016). Fundamentals of geomorphology. *New York, United States. Routledge.*
- IDEAM (2015a). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.*
- IDEAM, U. (2015b). *Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia.* Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Core Writing Team.
- Isaza-Restrepo, P. A., Carvajal, H. E. M., and Montoya, C. A. H. (2016). Methodology for

- quantitative landslide risk analysis in residential projects. *Habitat International*, 53:403–412.
- ISO31000 (2009). Risk management—principles and guidelines. *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*.
- Jakeman, A., Littlewood, I., and Whitehead, P. (1990). Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of hydrology*, 117(1-4):275–300.
- Jakeman, A. J., Post, D. A., and Beck, M. B. (1994). From data and theory to environmental model: the case of rainfall runoff. *Environmetrics*, 5(3):297–314.
- Jaramillo, D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia.
- Johanson, R., Imhoff, J., and Davis, H. (1980). Users manual for the hydrologic simulation program—fortran (hspf) version no. 5.0. *Athens, GA: USA EPA Environmental Research Laboratory*.
- Karaburun, A. et al. (2010). Estimation of c factor for soil erosion modeling using ndvi in buyukcekmece watershed. *Ozean Journal of applied sciences*, 3(1):77–85.
- Karamesouti, M., Petropoulos, G. P., Papanikolaou, I. D., Kairis, O., and Kosmas, K. (2016). Erosion rate predictions from pesera and rusle at a mediterranean site before and after a wildfire: Comparison & implications. *Geoderma*, 261:44–58.
- Kim, H. G., Lee, D. K., Park, C., Kil, S., Son, Y., and Park, J. H. (2015). Evaluating landslide hazards using rcp 4.5 and 8.5 scenarios. *Environmental earth sciences*, 73(3):1385–1400.

- Knisel, W. G. (1980). Creams: a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems [usa]. *United States. Dept. of Agriculture. Conservation research report (USA)*.
- Lafren, J. M., Lane, L. J., and Foster, G. R. (1991). Wepp: A new generation of erosion prediction technology. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46(1):34–38.
- Lal, R. and Moldenhauer, W. C. (1987). Effects of soil erosion on crop productivity. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 5(4):303–367.
- Lee, E. M. and Jones, D. K. (2004). *Landslide risk assessment*. Thomas Telford.
- Li, Z. and Fang, H. (2016). Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 163:94–117.
- Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M., and Lacasse, S. (2010). Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(2):125–134.
- Liang, X.-Z., Kunkel, K. E., Meehl, G. A., Jones, R. G., and Wang, J. X. (2008). Regional climate models downscaling analysis of general circulation models present climate biases propagation into future change projections. *Geophysical research letters*, 35(8).
- Littleboy, M., Silburn, D., Freebairn, D., Woodruff, D., Hammer, G., and Leslie, J. (1992). Impact of soil erosion on production in cropping systems. i. development and validation of a simulation model. *Soil Research*, 30(5):757–774.
- Liu, C., Liu, W., Fu, G., and Ouyang, R. (2012). A discussion of some aspects of statistical downscaling in climate impacts assessment. *Advances in water science*, 23(3):427–437.

- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., and Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6):687–711.
- Mann, M. E., Bradley, R. S., and Hughes, M. K. (1998). Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 392(6678):779.
- Merlotto, A., Bértola, G. R., and Piccolo, M. C. (2016). Hazard, vulnerability and coastal erosion risk assessment in necochea municipality, buenos aires province, argentina. *Journal of coastal conservation*, 20(5):351–362.
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., and Jakeman, A. J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18(8-9):761–799.
- Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., and Iverson, L. R. (1996). Modelling topographic potential for erosion and deposition using gis. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10(5):629–641.
- Moore, I. and Burch, G. (1986). Modelling erosion and deposition: topographic effects. *Transactions of the ASAE*, 29(6):1624–1630.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282):747.
- Mullan, D. (2013). Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems. *Catena*, 109:234–246.

- Narra, P., Coelho, C., and Sancho, F. (2019). Multicriteria gis-based estimation of coastal erosion risk: Implementation to aveiro sandy coast, portugal. *Ocean & Coastal Management*, 178:104845.
- Nearing, M. A., Xie, Y., Liu, B., and Ye, Y. (2017). Natural and anthropogenic rates of soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(2):77–84.
- Ochoa, P., Fries, A., Mejía, D., Burneo, J., Ruíz-Sinoga, J., and Cerdà, A. (2016). Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the andes. *Catena*, 140:31–42.
- Oldeman, L. R. (1992). Global extent of soil degradation. In *Bi-Annual Report 1991-1992/ISRIC*, pages 19–36. ISRIC.
- Park, C.-K., Byun, H.-R., Deo, R., and Lee, B.-R. (2015). Drought prediction till 2100 under rcp 8.5 climate change scenarios for korea. *Journal of Hydrology*, 526:221–230.
- Park, S., Mitchell, J., and Bubenzer, G. (1982). Splash erosion modeling: physical analyses. *Transactions of the ASAE*, 25(2):357–0361.
- Park, S., Oh, C., Jeon, S., Jung, H., and Choi, C. (2011). Soil erosion risk in korean watersheds, assessed using the revised universal soil loss equation. *Journal of Hydrology*, 399(3-4):263–273.
- Payne, A. E. and Magnúsdóttir, G. (2015). An evaluation of atmospheric rivers over the north pacific in cmip5 and their response to warming under rcp 8.5. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(21):11–173.

- Pérez, J. and Mesa, O. (2002). Estimación del factor de erosividad de la lluvia en Colombia. *XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología Medellín, Colombia*, pages 29–31.
- Poesen, J. (2011). Challenges in gully erosion research. *Landform analysis*, 17:5–9.
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S., and Geetha, N. (2012). Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using revised universal soil loss equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers*, 3(2):209–215.
- Quintero, A. F. C., Salazar, L. A. L., and Melo, O. R. (2017). Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia. *RIAA*, 8(1):17–26.
- Quinton, J. N. (2004). Erosion and sediment transport. *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*.
- Ramírez, F. and Hincapié, E. (2009). Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de Caldas. *Cartography*, (2):173–189.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., and Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Vol. 703)*. United States Department of Agriculture.
- Restrepo, C. and Alviar, M. (2013). Usos óptimos del suelo bajo enfoques ambientales y económicos.
- Ríos, D. (2018). *Erosión hídrica y evolución del relieve en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés, Antioquia – Colombia*. Universidad Nacional.
- Rohrmann, B. and Renn, O. (2000). Risk perception research. In *Cross-cultural risk perception*, pages 11–53. Springer.

- Routschek, A., Schmidt, J., and Kreienkamp, F. (2014). Impact of climate change on soil erosion—a high-resolution projection on catchment scale until 2100 in saxony/germany. *Catena*, 121:99–109.
- Sepulveda, L. (2013). *Modelo para la definición de áreas estratégicas para la conservación de suelos a partir de la determinación de la susceptibilidad a la erosión hídrica*. Universidad de Antioquia.
- Sierra, J. P., Arias, P. A., and Vieira, S. C. (2015). Precipitation over northern south america and its seasonal variability as simulated by the cmip5 models. *Advances in Meteorology*, 2015.
- SoilSurveyStaff (1999). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. United States Department of Agriculture.
- SoilSurveyStaff (2017). *National soil survey handbook, title 430-VI*. U.S. Department of Agriculture.
- Sposito, G. (2013). Green water and global food security. *Vadose Zone Journal*, 12(4).
- Takken, I., Beuselinck, L., Nachtergaele, J., Govers, G., Poesen, J., and Degraer, G. (1999). Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (lisem). *Catena*, 37(3-4):431–447.
- Tarbutck, E. J. and Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la tierra. *Universitario*, page 32.
- Tauta Muñoz, J. L., Camacho-Tamayo, J. H., and Rodríguez Borray, G. A. (2018). Estimación de erosión potencial bajo dos sistemas de corte de caña panelera utilizando la ecuación universal de pérdida de suelos. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2):405–413.

- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A. (2012). An overview of cmip5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4):485–498.
- Terranova, O., Antronico, L., Coscarelli, R., and Iaquina, P. (2009). Soil erosion risk scenarios in the mediterranean environment using rusle and gis: an application model for calabria (southern italy). *Geomorphology*, 112(3-4):228–245.
- Trzaska, S. and Schnarr, E. (2014). *A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections*. United States Agency for International Development.
- Udayakumara, E., Shrestha, R., Samarakoon, L., and Schmidt-Vogt, D. (2010). People's perception and socioeconomic determinants of soil erosion: A case study of samanalawewa watershed, sri lanka. *International Journal of Sediment Research*, 25(4):323–339.
- Van Remortel, R. D., Hamilton, M. E., and Hickey, R. J. (2001). Estimating the ls factor for rusle through iterative slope length processing of digital elevation data within arcInfo grid. *Cartography*, 30(1):27–35.
- Van Westen, C., Van Asch, T. W., and Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering geology and the Environment*, 65(2):167–184.
- Vanwallegem, T., Gómez, J., Amate, J. I., de Molina, M. G., Vanderlinden, K., Guzmán, G., Laguna, A., and Giráldez, J. V. (2017). Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the anthropocene. *Anthropocene*, 17:13–29.
- Vega, J. A. and Hidalgo, C. A. (2016). Quantitative risk assessment of landslides triggered by

- earthquakes and rainfall based on direct costs of urban buildings. *Geomorphology*, 273:217–235.
- Vélez, M. and Smith, R. (1997). Hidrología de antioquia. *Medellín: Secretaría de Obras Públicas del departamento de Antioquia*.
- Vertessy, R. A., Watson, F. G., Rahman, J. M., Cuddy, S. M., Seaton, S. P., Chiew, F. H., Scanlon, P. J., Marston, F. M., Lymburner, L., Jeannelle, S., et al. (2001). New software to aid water quality management in the catchments and waterways of the south-east queensland region. In *Proceedings of the Third Australian Stream Management Conference, August*, pages 27–29. Citeseer.
- Villa, S. (2012). *Modelación de la erosión hídrica a escala de cuenca en la zona alta de la quebrada La García, Bello - Antioquia*. Universidad Nacional De Colombia.
- Whitman, R. V. (1984). Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(2):143–188.
- Whitman, R. V. (2000). Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(7):583–593.
- Winter, M. and Bromhead, E. (2012). Landslide risk: some issues that determine societal acceptance. *Natural Hazards*, 62(2):169–187.
- Wischmeier, W. H. (1959). A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 23(3):246–249.
- Wischmeier, W. H. and Mannering, J. (1969). Relation of soil properties to its erodibility 1. *Soil Science Society of America Journal*, 33(1):131–137.

- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 39(2):285–291.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D., et al. (1960). A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. *Transactions 7th int. Congr. Soil Sci.*, 1:418–425.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D., et al. (1978). Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning*.
- Xu, Z., Han, Y., and Yang, Z. (2019). Dynamical downscaling of regional climate: a review of methods and limitations. *Science China Earth Sciences*, 62(2):365–375.
- Young, R., Onstad, C., Bosch, D., and Anderson, W. (1989). Agnps: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of soil and water conservation*, 44(2):168–173.
- Yu, B., Rose, C., Ciesiolka, C., Coughlan, K., and Fentie, B. (1997). Toward a framework for runoff and soil loss prediction using guest technology. *Soil Research*, 35(5):1191–1212.
- Zare, M., Samani, A. A. N., Mohammady, M., Teimurian, T., and Bazrafshan, J. (2016). Simulation of soil erosion under the influence of climate change scenarios. *Environmental Earth Sciences*, 75(21):1405.
- Zerihun, M., Mohammedyasin, M. S., Sewnet, D., Adem, A. A., and Lakew, M. (2018). Assessment of soil erosion using rusle, gis and remote sensing in nw ethiopia. *Geoderma regional*, 12:83–90.

Anexos

Anexos A

Registro histórico de precipitación de la estación San Roque

Meses/Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	82,00	27,4	155,2	27	83	125,3	108,5	176	48	193	24	95	167	37	148,5	262	56
Febrero	169,00	113,6	58,2	150,1	142	37,5	107	3	210	222	24	250	46	177	167	159	134
Marzo	186,00	273,9	280,1	302	140,9	122,5	428,1	335	210	528	182	451	532	255	150	317	68
Abril	275,50	323,8	430,5	515	404,2	446,3	410,9	572	364,6	341	197,4	765	614	356	288	393	411
Mayo	504,00	540,9	326	828,3	538,1	399	337,3	598	275	413	700	346	537	639	544	515	295
Junio	356,00	409,7	190	615,6	147,3	577	472	166	341	419	618	363	370	305	229	125	232
Julio	395,70	410	107,1	132	523	153,5	170	374	408	194	418	289	210	166	203	520	325
Agosto	428,30	120,1	296	294	227	304	409,2	648	500	493	342	388	447	420	273	314	320
Septiembre	560,50	480,3	382	414	529,5	370	372,1	464	251	263	625	465,5	313	401	410	199	546
Octubre	364,40	662,3	318	555,2	281	483	468	574,3	539	328	356	401	487	347	587	324	591
Noviembre	176,80	173	435,5	232,3	378,6	504	591	246	799	329	365	432	255	415	202	360	306
Diciembre	175,90	121,9	129,3	274,5	123,6	132,4	301	291	97	161	169	377	62	208	95	97	299