



Los residuos orgánicos como alternativa para la restauración del suelo productivo

Ana María Bermúdez Serna

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniera Ambiental otorgado por
UdeA

Asesora
Lía Isabel Alviar Ramírez, MSc En Gestión Ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Cita	(Bermúdez Serna, 2022)
Referencia	Bermúdez Serna, A. M. (2022). Los residuos orgánicos como alternativa para la restauración del suelo productivo
Estilo APA 7 (2020)	[Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Grupo de Investigación Aliados con el Planeta.

Corporación Académica Ambiental (CAA).



Centro de Documentación Ingeniería

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Hoy miro este hermoso cielo

lo hizo tus manos divinas,

obra es tuya verde suelo

y el sol que nos ilumina

Cual si de nuevo amanecieras

Alegre tu voz concierto

De la tierra placentera

Doy gracias a mi hacedor

En honor a los que dejaron huella en la forma de una poderosa y cálida brisa.

Mis abuelos.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Agradecimientos

A mis asesores Lía Isabel Alviar Ramírez y Edwin Echeverri Salazar, por su confianza, por guiarme en este proceso de manera dedicada y paciente, porque con sus conocimientos me han enseñado a ser una mejor profesional.

A el Semillero de Investigación Aliados Con el Planeta, especialmente a Edwin Andrés Mora Aristizábal por incentivar me a cumplir mis metas

A Corantioquia, en especial al Ingeniero Sebastián Mesa Marín de la Subdirección de Gestión Ambiental por la información de la Actualización y Ajuste al Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Aurrá, necesaria para el desarrollo este proyecto de investigación.

A El Siata, por brindarme los datos de sus estaciones meteorológicas los cuales fueron necesarios para el desarrollo de este proyecto de investigación.

A Emvarias, en especial al ingeniero Antonio Robayo Díaz por proporcionar el inventario de disposición de residuos en el Relleno Sanitario La Pradera, necesario para el desarrollo de este proyecto de investigación

A la Universidad de Antioquia, por formarme como persona y profesional.

A mis padres Mary Luz y Héctor, y a mi hermana Jessica, por apoyarme, confiar en mí y permitirme fluir con amor en cada uno de mis procesos.

A mis amigos, que a lo largo de estos años se volvieron mi familia, cultivaron mi curiosidad, me motivaron a ser mejor cada día y me llenaron de alegría. Sin ustedes el pregrado hubiera sido más difícil y menos divertido.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Tabla De Contenido

1	Índice de Figuras	7
2	Índice de Tablas	7
3	Índice de Ecuaciones	8
4	Resumen	8
5	Abstract	8
6	Introducción	9
7	Justificación e Importancia	11
8	Objetivos	12
8.1	Objetivo General	12
8.2	Objetivos Específicos	12
9	Marco Teórico	12
9.1	Erosión hídrica	12
9.2	Erosión en Colombia y Antioquia	13
9.3	Modelos para estimar la erosión hídrica - Modelo Rusle	15
9.4	Relleno Sanitario La Pradera	18
10	Zona de estudio y conjunto de datos	19
10.1	Generalidades	19
10.2	Descripción del conjunto de datos	21
10.2.1	Precipitación	22
10.2.2	Modelo de Elevación Digital (DEM)	23
10.2.3	Mapa de Clasificación de Suelos	24
10.2.4	Mapa de coberturas Vegetales y uso del suelo	25
10.2.5	Inventario de residuos sólidos	26
11	Metodología	27
11.1	Estimación pérdida de suelo tendencial	27
11.1.1	Descripción y cálculo de factores	27
11.1.2	Factor de Erosividad (R)	28
11.1.3	Factor Topográfico (LS)	32

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

11.1.4	Factor de erodabilidad (K)	35
11.1.5	Factor de Cobertura y Gestión (C)	38
11.1.6	Factor de prácticas de manejo (P)	41
11.2	Residuos orgánicos domésticos-Compost	43
12	Resultados y Discusión	44
12.1	Factor de erosividad (R)	44
12.2	Factor Topográfico (LS)	44
12.3	Factor Erodabilidad (K)	45
12.4	Factor (C)	45
12.4.1	Escenario tendencial	45
12.4.2	Escenario Recomendado	46
12.5	Factor (P)	47
12.6	Pérdida de Suelo Anual (A)	47
12.6.1	Materia Orgánica con uso potencial en los suelos productivos	49
13	Conclusiones	51
14	Referencias	52

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

1 Índice de Figuras

Figura 1:Localización Zona de Estudio Corregimiento San Sebastián de Palmitas.....	21
Figura 2 Modelo de elevación digital a escala 1:25,000 Corregimiento San Sebastián de Palmitas.....	24
Figura 3 Tipos de suelos en el Corregimiento San Sebastián de Palmitas.....	25
Figura 4: Coberturas y usos del suelo en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas (derecha). Usos del suelo escenario recomendado (izquierda).....	26
Figura 5 Metodología de aplicación de RUSLE.....	27
Figura 6 Factor R ecuación logarítmica para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas a escala 1:25.000	28
Figura 7 Modelo logarítmico para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora Propuesto por Ríos (2018). Extraído de Ríos (2018).....	31
Figura 8 Modelo lineal para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora Propuesto por Pérez & mesa (2002). Extraído de Pérez & Mesa (2002).....	31
Figura 9 Modelo exponencial para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora propuesto por Pérez& Mesa (2002). Extraído de Ríos (2018).....	32
Figura 10 Factor LS para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas a escala 1:25.000	33
Figura 11 Pendientes para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas a escala 1:25.000	35
Figura 12 Factor K para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas a escala 1:25.000	36
Figura 13 Factor C y Factor P para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas a escala 1:25.000.....	39
Figura 14 Factor C y Factor P para un escenario recomendado según la capacidad de carga del suelo	41
Figura 15 Erosión en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas mediante la aplicación de Rusle para el año 2019. Escenario tendencial (izquierda) y escenario recomendado (derecha).	47

2 Índice de Tablas

Tabla 1 Relación de estaciones de precipitación utilizadas.....	23
Tabla 2 Unidades Cartográficas del suelo y sus respectivas asociaciones de suelos	25
Tabla 3 Porcentaje de cada cobertura en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas	26
Tabla 4 Toneladas de residuos sólidos domésticos dispuestos en La Pradera 2019	27
Tabla 5 Coberturas Corine Land Cover, Factores De Cobertura (C) Y De Prácticas De Manejo (P).....	41
Tabla 6 Factores de cobertura y gestión (C) y de prácticas de manejo (P) Escenario recomendado según la capacidad de uso del suelo del Pomca Río Aurrá 2018	42

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Tabla 7 Potencial de transformación de materia orgánica a compost con los residuos dispuestos en el Relleno Sanitario La Pradera en el año 2019.	43
Tabla 8 Calculo del Factor R para cada estación. Ecuación Lineal y Ecuación Logarítmica	44
Tabla 9 Valores de Factor K relacionados con los diferentes tipos de asociaciones del suelo	45
Tabla 10 Pérdida del suelo en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas mediante la aplicación de Rusle para el año 2019	48
Tabla 11 Enmienda de compost para los suelos productivos en el año 2019	49

3 Índice de Ecuaciones

1 Ecuación modelo Rusle	17
2 Ecuación lineal.....	29
3 Ecuación exponencial.....	29
4 Ecuación logarítmica.....	30
5 Ecuación Factor K Rusle.....	37

4 Resumen

La degradación del suelo, tanto física como química, es un problema ambiental, social, económico y de salud pública; el cual podría evitarse si nos ceñimos a las leyes de la naturaleza en lo que respecta al ciclaje de nutrientes, aprovechando la estructura de las redes tróficas, para así retornar las capacidades funcionales del suelo en terrenos degradados. Por tanto, en el presente estudio se analizó el uso potencial de los residuos orgánicos domésticos producidos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (3'626.000 habitantes), que normalmente estarían dispuestos en rellenos sanitarios, como material de compostaje en los suelos productivos del corregimiento rural de San Sebastián de Palmitas. Por otro lado, se estimó la cantidad de suelo perdido por efecto de la erosión en dicho corregimiento. Haciendo uso del modelo Rusle se evidenció una tasa de denudación de 33,3 mm/año equivalente a 4'433.741 toneladas de suelo perdido al año, además de evidenciar que si utilizáramos la materia orgánica que se dispone en el Relleno Sanitario La Pradera como compost podríamos enmendar el 104% de toda el área productiva degradadas correspondientes a un área de 1.536 ha.

Palabras clave: Erosión, Rusle, compost, residuos orgánicos.

5 Abstract

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Soil degradation, both physical and chemical, is an environmental, social, economic and public health problem, which could be avoided if we follow the laws of nature regarding nutrient cycling, taking advantage of the structure of the trophic networks in order to return the functional capacities of the soil in degraded soils. Therefore, this study analyzed the potential use of organic household waste produced in the Metropolitan Area of the Aburrá Valley (3'626,000 inhabitants), which would normally be disposed of in sanitary landfills as composting material in the productive soils of the rural district of San Sebastián de Palmitas. On the other hand, the amount of soil lost due to erosion in this township was estimated. Using the Rusle model, a denudation rate of 33.3 mm/year was found, equivalent to 4'433.741 tons of soil lost per year, in addition to showing that if we used the organic matter disposed of in La Pradera sanitary landfill as compost, we could amend 104% of the entire degraded productive area corresponding to an area of 1,536 ha.

Key words: Erosion, Rusle, compost, organic waste, organic waste.

6 Introducción

El rápido crecimiento de la población y la urbanización han provocado la generación de enormes cantidades de residuos sólidos urbanos (RSU) los cuales han sido dispuestos en rellenos sanitarios. 3.100 toneladas de residuos ingresan diariamente al Relleno Sanitario La Pradera, provenientes del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y municipios cercanos. Como indica Alviar (2014) se puede considerar que el 60% de estos residuos son materia orgánica de origen doméstico, los cuales al no ser gestionados adecuadamente pueden incidir en cargas ambientales relevantes como la contaminación generada por los gases y lixiviados que se liberan.

El suelo está lleno de agua, nutrientes y microorganismos que son esenciales para la producción de alimentos y los ciclos biogeoquímicos e hídricos. Sin embargo, el suelo es un recurso finito, restaurar unos pocos centímetros de este puede llevar hasta mil años (FAO; Mads, 2018). Además, la erosión del suelo es uno de los problemas ambientales y de salud pública más graves que enfrenta la sociedad humana, los seres humanos obtienen más del 95% de sus alimentos del suelo (Pimentel, 2006).

La vocación agrícola en Colombia representa el 19,34% del territorio (FAO; Mads, 2018), actualmente la mayoría de las prácticas agrícolas son insostenibles comprometiendo la productividad biológica del suelo; los fertilizantes, monocultivos, plaguicidas y la maquinaria

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

usada ocasionan el debilitamiento del suelo predisponiéndolo a la erosión de la capa fértil cultivable, impidiendo garantizar la seguridad alimentaria de la población, ya que la erosión puede reducir el rendimiento agrícola hasta un 50% (Ideam et al., 2015) al disminuir los nutrientes disponibles para las plantas, ocasionando que los cultivos tiendan a ser de menor calidad.

Del 60% de los residuos orgánicos domésticos mencionados anteriormente, al ser compostados, se obtiene el 25% de abono, apto para ser aprovechado por el suelo; sin embargo, con la disposición final que se le da a la materia orgánica ésta queda excluida del proceso natural del ciclaje de nutrientes y junto con las prácticas agrícolas actuales se promueve un gran despilfarro energético como lo expone Alviar (2014); por tanto, las prácticas actuales están lejos de promover la gestión sostenible de los terrenos que puede prevenir y reducir la degradación de la suelo, manteniendo la productividad, además, de contrarrestar los impactos adversos del cambio climático (Alcaldía Municipio de Medellín, 2014).

La ruralidad en el municipio de Medellín se divide en cinco corregimientos, cada uno con diferentes procesos de urbanización, usos del suelo, y sistemas productivos. Hacia el costado occidental se encuentra el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, según lo planteado Plan de Ordenamiento Territorial (Alcaldía Municipio de Medellín, 2014) sigue siendo el más agrario y tradicional; aproximadamente el 50% de su territorio se relaciona con usos agropecuarios, agrícola campesino y agrícola comercial; además, su relieve es moderadamente escarpado. Entre las prácticas de suelo frecuentes se encuentran los cultivos a suelo desnudo, lo cual de la mano con las moderadas y altas pendientes vuelven al suelo de San Sebastián de Palmitas particularmente vulnerable a la erosión hídrica.

Realizar una evaluación que permita alertar sobre posibles cambios en el suelo puede servir para la gestión del recurso. Dicha evaluación puede desarrollarse por medio proyecciones acerca del estado tendencial del suelo, precisando valores de pérdida de suelo asociadas a fenómenos erosivos. Permitiendo establecer acciones de conservación, evitando consecuencias ambientales grave e irreversibles para el recurso a mediano y largo plazo.

El modelo Rusle es un modelo que estima la pérdida potencial de suelo que se fundamenta en la Ecuación Universal de Erosión de Suelo, permitiendo calcular el promedio anual de erosión en la región de estudio bajo un sistema específico de uso y gestión del terreno,

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

donde el valor de los factores que componen el modelo deben ser ajustados de acuerdo al área de estudio.

7 Justificación e Importancia

La pérdida del suelo es un asunto de consideración prioritaria, ya que el suelo, desempeña una serie de funciones claves tanto ecológicas como sociales y económicas, que resultan fundamentales para la vida. La capacidad de almacenaje, filtración, amortiguación y transformación convierte al suelo en uno de los principales factores en la protección de los diferentes ciclos biogeoquímicos, además del sostén nutricional de la humanidad. Sin embargo, actualmente la alerta a nivel mundial sobre el aumento en la degradación del suelo es alta. El suelo es sometido a procesos de degradación tanto naturales como antropogénicos, tales como, la erosión, la disminución de la materia orgánica, la contaminación, el sellado superficial, la compactación y la salinización.

Por otro lado, los residuos dispuestos en Rellenos Sanitarios están constituidos en su mayoría por materia orgánica, la cual tiene un gran potencial de convertirse en compostaje apto para la restauración y conservación de suelos productivos; es decir, en los rellenos sanitarios no solo se entierra la materia orgánica sino también la posibilidad de evitar la erosión de los suelos, promover su capacidad nutricional y mantener la soberanía alimenticia de la población.

Los intereses económicos y políticos, han conducido a una administración inadecuada y una gestión ambiental de los ecosistemas ineficiente, lejos de comprender el ordenamiento de la naturaleza y su economía energética. Las prácticas actuales han provocado un derroche o inadecuado aprovechamiento de recursos, además, de la aparición de impactos directos e indirectos en la búsqueda de contrarrestar la carencia nutricional del suelo y en la disposición de residuos.

Por tanto, es necesario diseñar prácticas sostenibles que armonicen nuestra vida como sociedad con nuestro entorno, comprendiendo su equilibrio inestable y dinámico. Con ello, este estudio busca exponer cómo la materia orgánica, producida en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, tiene un gran potencial como herramienta de restauración de suelo en la zona rural. Teniendo la capacidad de revertir procesos erosivos y disminuir el despilfarro energético que se presenta actualmente.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

8 Objetivos

8.1 Objetivo General

Calcular los residuos orgánicos producidos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá que puedan ser involucrados al suelo del corregimiento de San Sebastián de Palmitas, como materia prima para evitar procesos erosivos y disminuir el despilfarro energético que se presenta actualmente.

8.2 Objetivos Específicos

- Calcular la cantidad de residuos orgánicos de origen doméstico producidos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá durante el periodo 2006-2021.
- Utilizar herramientas de modelación basada en sistemas de información geográficos (SIG) para identificar los sitios más susceptibles a la erosión y para cuantificar la pérdida de suelo.
- Comparar mediante herramientas de modelación las diferencias de pérdida de suelo entre un escenario con gestión del suelo actual y otro escenario adecuado con una gestión sostenible del suelo.

9 Marco Teórico

9.1 Erosión hídrica

Los procesos erosivos en las laderas son el resultado de la interacción de diversos agentes, tanto naturales como antropogénicos, que contribuyen al desprendimiento de la capa superior del suelo, la más fértil, implicando la pérdida minerales y nutrientes. Las principales condiciones ambientales que pueden conducir a la degradación del suelo son la topografía (pendientes pronunciadas), los factores climatológicos (lluvias torrenciales), la cobertura vegetal, así como los diferentes usos del suelo, y tipos de suelo susceptibles a la erosión.

La erosividad causada por la lluvia (erosión hídrica), también conocida como agresividad climática, es uno de los factores detonantes de la erosión de los suelos, considerándose la forma más generalizada y seria de degradación natural (Lince & Castro, 2016), ya que el impacto generado por las gotas de agua en el suelo es directamente proporcional a la cantidad de lluvia producida en un periodo y lugar determinado, así como su fuerza de impacto que dependerá de su diámetro y la velocidad de caída, factores que influyen en el desprendimiento del suelo (Ochoa, 2012).

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

La erosión hídrica se puede presentar en tres maneras diferentes en zonas de montaña y en zonas agrícolas, como son la erosión laminar, surcos y cárcavas. La erosión laminar tiene lugar cuando las partículas superficiales del suelo se desprenden por acción de la salpicadura de las gotas de agua y son arrastradas por el flujo superficial de precipitación, que excede la capacidad de infiltración del suelo, derivando un exceso de agua en la superficie. A partir de allí y con el aumento de pendiente, si el suelo carece de cobertura vegetal o de métodos de barrera para su conservación, los sedimentos se escurrirán dando inicio a pequeños canales que con el tiempo se transformarán en surcos, dando lugar a la erosión en surcos (Ochoa, 2012). Al seguir aumentando las concentraciones de escorrentía y de sedimentos, la erosión en cárcavas arranca y transporta partículas del fondo y de las paredes del canal generando cantidades importantes de material, produciendo efectos aguas abajo al aumentar el tamaño de los canales; en su avance presentan un efecto tipo remontante y frecuentemente los procesos de cárcavamiento estimulan el desarrollo de movimientos en masa (Ríos, 2018). Las masas de suelo desplazadas pierden usualmente la cubierta vegetal protectora, favoreciendo el proceso de infiltración; de esta forma alcanzan plena expresión la separación - disgregación de partículas y el escurrimiento superficial.

Si bien, la erosión es un proceso natural donde se arrastra parte del suelo de unos puntos a otros logrando degradar el terreno reduciendo su productividad de forma natural, éste proceso se vuelve crítico cuando se acelera debido a la interferencia humana y sus actividades, las cuales presentan medidas de conservación del suelo inadecuadas o inexistentes y unas prácticas agrícolas demasiado intensas o insostenibles (Arhem & Freden, 2014). Ya que los materiales perdidos en las zonas erosionadas no se recuperan, dicho proceso representa un deterioro grave en el equilibrio entre el suelo, la vegetación, el paisaje y los agentes meteorológicos.

9.2 Erosión en Colombia y Antioquia

En Colombia debido a las condiciones topográficas como cadenas montañosas y valles alternos; la forma como se han dado los procesos de ocupación del territorio y la cultura de producción y consumo, los procesos de degradación de suelos continúan incrementándose. Factores como erosión, compactación, salinización y contaminación dinamizan y acelerado los procesos de desertificación (Mads, 2007).

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

De acuerdo con lo mencionado por la Política para la Gestión del Suelo (Ministerio de Ambiente, 2016) en Colombia uno de los procesos que más influye en la degradación del suelo es la erosión, generando un impacto ambiental sin precedentes. Sin embargo, esta problemática es ignorada y desconocida, como consecuencia de la escasa educación en el uso y manejo sostenible del suelo.

En el año 2015 el *Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia* (Ideam et al., 2015), registró que el 40% de los suelos del área continental e insular del país, se encuentran afectados por algún grado de erosión, 2,9% presenta erosión severa y muy severa, sus funciones y servicios ecosistémicos originales están totalmente dañados, su restauración es muy difícil y muy costosa; 16,8% erosión moderada, sus funciones y los servicios originales están parcialmente destruidos y requieren prácticas de conservación y restauración inmediatas; 20% presenta erosión ligera.

De acuerdo con el informe del Ideam et al. (2015) las principales causas directas de la degradación de los suelos por erosión son:

Deforestación: Los factores socioeconómicos que más intervienen la degradación por erosión son los distritos de riego 94,4%, los territorios agropecuarios (agrícolas 92,9%, agropecuario 88,2%, ganaderos 77,3%), en territorios con conflictos de uso por sobreutilización de los suelos (90,9%), subutilización (80,4%) y por los incendios de la cobertura vegetal (80,9%).

A partir del *Seguimiento y monitoreo de la deforestación en Colombia* (Ideam, 2020) registra que el 77 % de la deforestación del país se concentra en los departamentos de Meta, Caquetá, Guaviare, Putumayo, Norte de Santander y Antioquia.

Minería: Las distintas formas de minería ocasionan el proceso de degradación por erosión más severo, provocando erosión en surcos y cárcavas.

Para el caso del Valle de Aburrá, Caballero (2011) menciona, que debido a las condiciones geomorfológicas y climáticas, como gradientes altos y presencia de material fino granular tipo limos y arcillas, aumenta el potencial de avenidas torrenciales y movimientos en masa que pueden afectar a la población. Así mismo, el Pomca del Río Aurrá (Corantioquia, 2018) identifica a las avenidas torrenciales y los movimientos en masa como factores de riesgo, con probabilidades de alta ocurrencia, que amenazan al corregimiento de San Sebastián de Palmitas. Señalando que dichos procesos erosivos no solo ponen en riesgo los patrimonios y las vidas humanas, sino, además, a lo animales y cultivos que sirven de

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

sustento a la población. Igualmente, el Pomca destaca que las vías y caminos en mal estado, la baja densidad de cobertura, las inadecuadas tecnologías de manejo (constructivas y agropecuarias), incrementan los factores de amenaza por movimiento de masa y avenidas torrenciales en la zona.

9.3 Modelos para estimar la erosión hídrica - Modelo Rusle

La inquietud por implementar prácticas en la conservación del recurso suelos no es una preocupación actual, los primeros esfuerzos en la investigación por la conservación del suelo se registra a mediados del siglo XVIII con los estudios realizados por Jared Elliot en Connecticut, Estados Unidos, en su libro titulado "*Essays Upon Field-Husbandry in New-England*" publicó algunas prácticas de conservación del suelo, como, por ejemplo, "plantar trébol y hierba, esparcir estiércol y arar de forma que se reduzca la erosión" (Presbitero, 2003). Ya en el siglo XIX, el edafólogo alemán Ewold Wollny, en sus experimentos, usó pequeñas parcelas para medir los efectos de factores tales como la vegetación y la cobertura del suelo, en la intersección de la precipitación y la estructura del suelo (Giménez, 2008). En 1907, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Usda, United States Department of Agriculture), inicia una política oficial de protección de suelo, la cual provocó que los científicos comenzaran a investigar los procesos de la erosión en el suelo (Ochoa, 2012).

Dada la necesidad de analizar este proceso, a través de los años se han desarrollado diversidad de modelos. En su estudio Renard et al. (1997) mencionan que el desarrollo de la tecnología de predicción de la erosión comenzó con los análisis de Cook en 1936, donde identificó las principales variables que afectan a la erosión del suelo por el agua, enumerando tres factores principales: la susceptibilidad del suelo a la erosión, la erosividad potencial de la lluvia y la esorrentía, y la protección del suelo proporcionada por la cubierta vegetal. Luego, (Zingg, 1940) publicó la primera ecuación para calcular la pérdida de suelo en el campo. Esa ecuación describía matemáticamente los efectos de la inclinación y la longitud de la pendiente sobre la erosión. Posteriormente Smith en 1941, añadió a la ecuación los factores del sistema de cultivo y las prácticas de apoyo. También añadió el concepto de límite de pérdida de suelo anual específico, y utilizó la ecuación resultante para desarrollar un método gráfico de selección de prácticas de conservación para determinadas condiciones de suelo en el medio oeste de Estados Unidos (Renard et al., 1997).

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Por otra parte, Smith & Whitt (1948) modificaron la ecuación anteriormente propuesta por Zingg, para los principales suelos de Missouri. Presentaron un método para estimar las pérdidas de suelo en campos de suelos arcillosos, haciendo uso de los efectos de longitud e inclinación de pendiente, rotaciones de cultivos, tipos de suelos y prácticas de conservación. Sin embargo, presentaba problemas para la medición en suelos con pendientes inferiores al 4%. La fórmula por ellos establecida sería prácticamente similar a la Usle (Giménez, 2008).

La oficina regional de Milwaukee del Servicio de Conservación del Suelo (SCS) de la Usda reconoció el valor de una ecuación de pérdida de suelo para la planificación de las explotaciones agrícolas y en conjunto con investigadores de esa región desarrollaron un sistema de aplicación regional, teniendo como resultado la ecuación de tipo paramétrico de Musgrave (Musgrave, 1947). Esta ecuación incorpora un factor climático basado en la precipitación máxima en 30 minutos con un periodo de retorno de dos años, más tarde conocido como el índice de erosividad de precipitación, lo que sería el precursor de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (Usle) (Giménez, 2008).

Posteriormente, el Centro Nacional de Datos de Escorrentía y Pérdida de Suelos del Servicio de Investigación Agrícola (ARS) de Estados Unidos, se percató que las diferentes ecuaciones de predicción de la erosión estatales y regionales fueron tan útiles en la conservación del suelo, que iniciaron esfuerzos para localizar, reunir y consolidar todos los datos disponibles de estudios de escorrentía para desarrollar una ecuación nacional (R. R. Wischmeier, 1955).

Más tarde, (W. H. Wischmeier & Smith, 1965) aprovecharon los datos reunidos por el Centro de Datos de Escorrentía y Pérdida de Suelos, desarrollando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Usle), la cual cuantifica la erosión del suelo como el producto de seis factores que representan la erosividad de la lluvia y la escorrentía, la erodabilidad del suelo, la longitud de la pendiente, la inclinación de la pendiente, las prácticas de gestión de la cubierta y las prácticas de conservación de apoyo. Finalmente, la Usle se presentó en el Manual de Agricultura nº 282 (Renard et al., 1997). Con el pasar de los años, la ecuación Usle empezó a presentar restricciones en su uso, por lo cual se hicieron modificaciones y mejoras a la expresión, a partir de la introducción de nuevos índices de erosión para conseguir objetivos diferentes. A esta modificación del Usle se la denominó Musle (Usle Modificado), presentado en el Manual de Agricultura nº 537. En la Musle, el factor R (factor de erosividad de la lluvia) se reemplazó por un factor de escorrentía, e incluyó la experiencia

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

de los estudios en los terrenos de pastos de las regiones semiáridas surorientales de los Estados Unidos, además de bosques y llanuras con pendientes de menos de 3% (Ochoa, 2012).

Después de varias mejoras en los parámetros del Usle, el Usda publicó el Manual de Agricultura No. 703 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, la llamada Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (Rusle), presentada por Renard et al. (1997) que conserva los seis factores originales del modelo Usle (Wischmeier y Smith, 1978), sin embargo, el modelo Rusle incorpora nuevas maneras de cálculo de los factores y el análisis de nuevos datos de calibración y validación que no estuvieron disponibles cuando el Manual de Agricultura No. 537 fue completado, aumentando así el rango de aplicación del modelo. Destacando las mejoras incorporadas a los factores, en la revisión y desarrollo de algoritmos para reflejar la relación de erosión de surcos a entre surcos en los factores topográficos de Longitud e Inclinación de la Pendiente (LS) (Ríos, 2018).

De este modo, el modelo Rusle se compone de los siguientes seis factores:

1 Ecuación modelo Rusle

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Donde:

A: promedio espacial de la pérdida de suelo y la pérdida temporal de suelo por unidad de area.

(toneladas/ha/año)

*R: Factor de erosividad [MJ * mm * ha⁻¹ * h⁻¹ * año⁻¹].*

*K: Factor de erodabilidad [(Mg * ha⁻¹) * (MJ * mm * ha⁻¹ * h⁻¹)]*

LS: Factor de longitud y profundidad de la pendiente (Adimensional)

C: Factor de cobertura (Adimensional)

P: Factor de prácticas de manejo de suelo (Adimensional)

Esta ecuación de pérdida de suelo fue desarrollada para permitir planes de conservación, investigación científica y la evaluación de la susceptibilidad a la erosión en muchas localidades y condiciones que no han sido directamente representadas en la investigación

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

original, esto es posible dada la sencillez del modelo y requerimientos de información (Ríos, 2018).

9.4 Relleno Sanitario La Pradera

Con el continuo desarrollo de las actividades humanas y el crecimiento poblacional, bien ha aumentado la generación de residuos sólidos, enfrentado a las sociedades con dificultades en el manejo de la gran cantidad de residuos generados, viéndose en la necesidad de establecer sistemas de recolección y disposición final. El Área Metropolitana del Valle de Aburrá no es indiferente a dicha problemática, en ella converge la mayor población del departamento de Antioquia, con 4'055.296 personas al año 2020, según cifras del Dane, repercutiendo en la generación de grandes cantidades de residuos.

Para gestión de la disposición final de residuos en el Valle de Aburrá se usa el método de rellenos sanitarios. Desde el año 2004 los residuos sólidos de los municipios del Valle de Aburrá a excepción de Envigado son dispuestos en el Relleno Sanitario La Pradera, el relleno sanitario de mayor capacidad en Antioquia (Gascón et al., 2015), ubicado en el municipio de Don Matías a 57 kilómetros de Medellín; en él se disponen diariamente 3.100 toneladas de residuos provenientes del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y de 45 municipios cercanos, en promedio ingresando cerca de 290 camiones recolectores por día (Emvarias). Desde el año 2015, con el cierre del relleno sanitario El Guacal, La Pradera se convirtió en el único punto de disposición final de residuos para el Valle de Aburrá y de muchos otros municipios.

Con lo planteado por Bernache, (2012) se puede considerar que las principales afectaciones de los rellenos sanitarios son las emisiones atmosféricas (gases de efecto invernadero), las descargas al suelo y al agua (lixiviados) y las afectaciones al entorno cercano (emisión de olores y vectores de enfermedades). En el caso de las emisiones atmosféricas, según la última actualización del Inventario de Emisiones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, las emisiones anuales del relleno La Pradera comprenden tres gases principales, metano (15.383 toneladas por año), dióxido de carbono (63.532 toneladas por año) y compuestos orgánicos no metanogénicos (828 toneladas por año). Según Giménez (2008) los lixiviados presentes en los rellenos sanitarios en Colombia presentan altos contenidos de materia orgánica fácilmente biodegradable, con contenido de humedad alto, produciendo altas concentraciones de ácidos grasos volátiles y de amoníaco producto de la fermentación inicial. A su vez, estos ácidos se diluyen fácilmente

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

en el lixiviado del relleno sanitario, le bajan el pH y contribuyen a la solubilización de los metales presentes en los residuos dispuestos en el relleno, implicando un lixiviado altamente contaminante. Conjuntamente, cabe mencionar, que las gestiones para la mitigación de esos impactos se requiere un gran nivel de complejidad en el despliegue de recursos y procedimientos técnicos.

10 Zona de estudio y conjunto de datos

10.1 Generalidades

El corregimiento de San Sebastián de Palmitas, se encuentra al noroccidente de la ciudad de Medellín (Antioquia) limitando al lado norte con el municipio de San Jerónimo, hacia el sur con el corregimiento San Antonio de Prado y el municipio de Heliconia, al oriente con el municipio de Bello y el corregimiento de San Cristóbal, y al occidente con el municipio de Ebéjico. La variación altitudinal del corregimiento oscila entre los 662 y los 3.168 metros sobre el nivel del mar, con variaciones de pendiente entre 0 y 670%.

Su área total corresponde a 5'781.05 hectáreas con un 9,83% de ocupación, la cual se divide en ocho veredas: Urquitá, La Sucia, Potrera – Miserenga, Palmitas Sector Central, La Aldea, Volcana – Guayabala, La Frisola, y La Suiza. El Corregimiento de San Sebastián de Palmitas registró una población de 5'476 habitantes para el año 2017, presentando un índice de presión demográfica moderada lo que significa que la población está aumentando a un grado normal, ejerciendo una presión media sobre las coberturas naturales; aunque la sostenibilidad sobre el recurso es media la amenaza crece a medida que se incrementa la población(Corantioquia, 2018).

La precipitación mantiene un régimen de lluvias bimodal, el cual alcanza sus valores más altos en el mes de mayo y septiembre (Figura 3Figura). La red de drenaje del corregimiento se compone de varias microcuencas pertenecientes a la Cuenca Hidrográfica de los Río Cauca - Río Aurrá, donde sus principales quebradas son La Sucia, La Frisola, La Potrera, La Miserenga, que cruzan el territorio en dirección sur-noroccidente.

La ruralidad de San Sebastián de Palmitas está bien sustentada en sistemas productivos asociados a actividades fundamentalmente rurales, asociados a sistemas agropecuarios relacionados con la ganadería extensiva, el sistema agrícola campesino, el sistema

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

agropecuario mismo, y a los sistemas comerciales agrícola y forestal, los cuales tienden a presionar sobre los sistemas de protección del territorio prestadores de bienes y servicios ambientales (Alcaldía Municipio de Medellín, 2015).

San Sebastián de Palmitas es considerado aún como el corregimiento más agrario y tradicional del municipio de Medellín; mantiene una mejor protección de suelos y sus ecosistemas estratégicos, especialmente hacia la cuchilla de Las Baldías y el Padre Amaya, sistemas convencionales agrícolas y pecuarios con introducción de prácticas agroecológicas en las veredas como La Volcana- Guayabala, La Frisola, Palmitas Central, Potrera-Miserenga, La Aldea, La Suiza, La Sucia y Urquitá. Sin embargo, esta ruralidad próxima a la ciudad, muestra en las dos últimas décadas, una acelerada transformación espacial en su base económica y dinámica poblacional, sociocultural y prácticas de manejo del suelo (Corantioquia, 2018). Las dinámicas de transformación y cambio en el uso del suelo y la recomposición de la población son ya una realidad; sólo las restricciones geográficas y ambientales parecen proteger a San Sebastián de Palmitas de que se asienten sistemas productivos de mayor impacto ambiental (Alcaldía Municipio de Medellín, 2014).

De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial POT del Municipio de Medellín (Alcaldía Municipio de Medellín, 2014), en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas las coberturas terrestres predominantes, son los bosques (abierto, denso, ripario, fragmentado) con un 4,61% del territorio, seguida de pastos (limpios, arbolados, enmalezados) con un 41,5%. El 96,5% del corregimiento se encuentra compuesto entre bosques, áreas seminaturales y territorios agrícolas.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

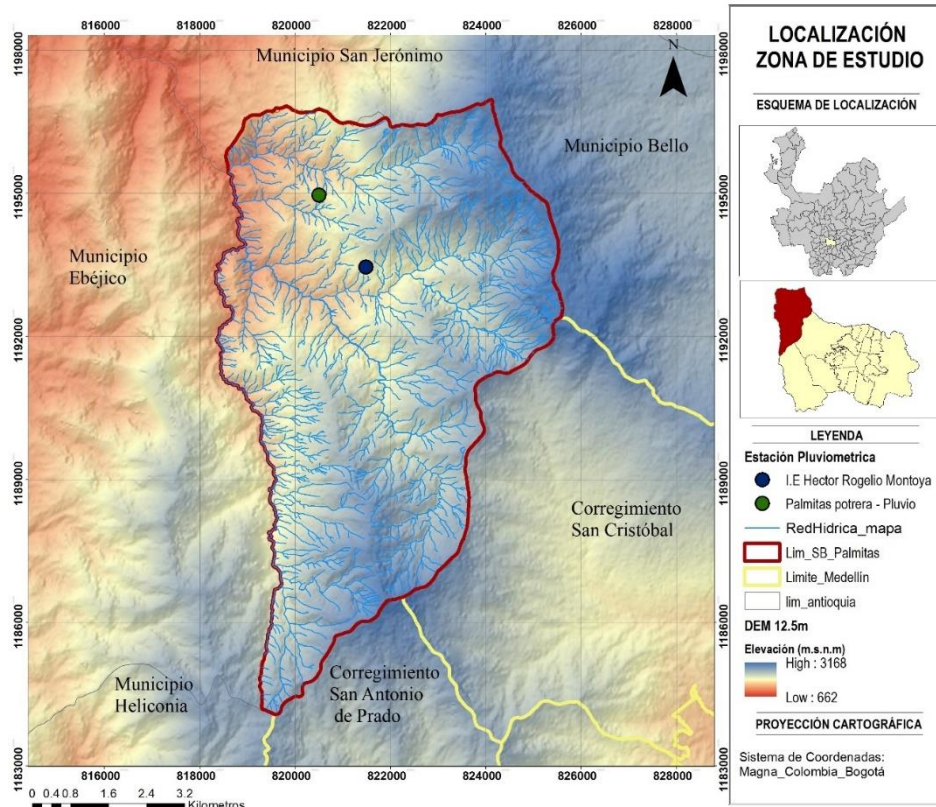


Figura 1: Localización Zona de Estudio Corregimiento San Sebastián de Palmitas.

10.2 Descripción del conjunto de datos

Para evaluar el proceso de pérdida de suelo en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas fue necesario recopilar un conjunto de datos compuesto por información secundaria perteneciente a diferentes entidades gubernamentales (Siata, Corantioquia, Emvarias del Grupo EPM, Igac), si bien para algunos datos se realizaron gestiones administrativas para obtenerlas, los demás se obtuvieron por medio de bases de datos de uso libre dispuestas en internet por entidades nacionales e internacionales. Así, el conjunto de datos empleados para la caracterización de los procesos y en la estimación de parámetros que alimentan el modelo de predicción Rusle, fueron modelo de elevación digital (DEM), información hidroclimática, un mapa de clasificación de suelos, un mapa de coberturas vegetales y uso del suelo actuales, mapa capacidad del suelo. Además, de los registros de la cantidad de residuos dispuestos en el Relleno Sanitario La Pradera provenientes del Valle de Aburrá. Es preciso destacar que todos los datos geográficos se han proyectado en el sistema de coordenadas Magna Colombia, Bogotá.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

10.2.1 Precipitación

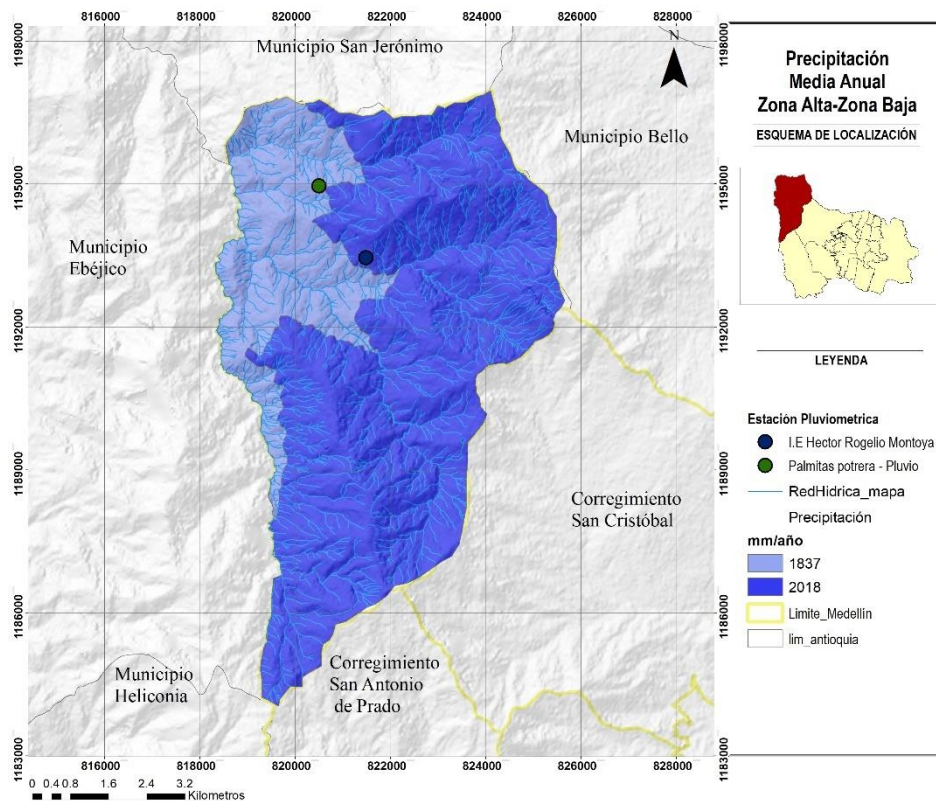


Figura 2 Mapa de Precipitación Zona Alta y Zona Baja San Sebastián de Palmitas

La información hidroclimatológica se obtuvo luego de analizar y evaluar los diferentes datos y productos de precipitación, distribuida en la zona de estudio y sus alrededores, después de considerar la calidad de la resolución espacial y temporal hasta su disposición asequible. Se decidió hacer uso de La Red Pluviométrica del Valle de Aburrá, disponibles de manera libre en el geoportal perteneciente a el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (Siata).

Los datos usados corresponden a los suministrados por dos estaciones pluviométricas (Tabla 1), cada una equipada con dos pluviómetros que registran la precipitación en mm a una resolución temporal de un minuto, para el año 2019. Igualmente, el Siata da información del índice de calidad (calidad confiable del dato en tiempo real, calidad confiable del dato no obtenido en tiempo real; etc.) de cada uno de los datos tomados, sirviendo como una herramienta más para el refinamiento de los datos. En este estudio se decidió que cada uno de los pluviómetros represente una zona diferente del área de estudio la estación IE Héctor Rogelio Montoya caracterizando la precipitación de la zona alta del corregimiento,

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

con mayores índices de precipitación y la estación La Potrera la zona baja, con menores índices de precipitación.

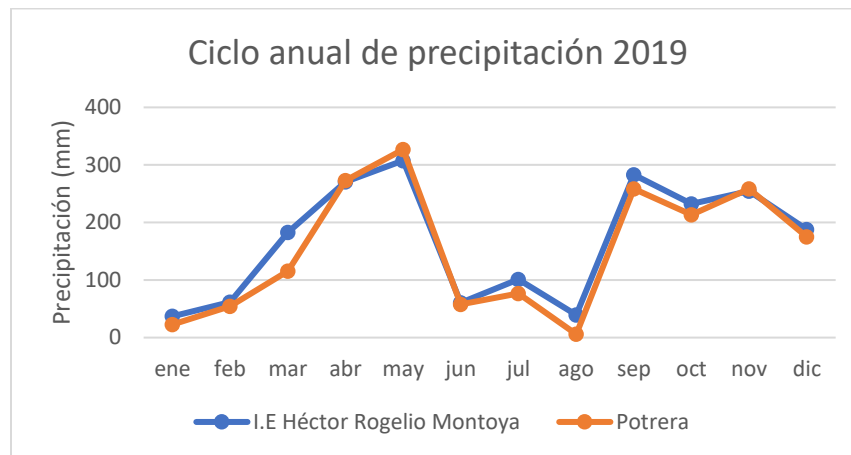


Figura 3 Ciclo anual de precipitación de las estaciones IE Héctor Rogelio Montoya y La Potrera. Datos tomados del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (Siata)

Código	Estación	Tipo	Longitud	Latitud	Elevación (msnm)	Municipio	Corregimiento
320	Potrera	Pluviométrica	-75,6997	6,35665	1.823	Medellín	Palmitas
04	IE Héctor Rogelio Montoya	Pluviométrica	-75,6908	6,34309	2.003	Medellín	Palmitas

Tabla 1 Relación de estaciones de precipitación utilizadas

10.2.2 Modelo de Elevación Digital (DEM)

El modelo digital empleado para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas es el producto de la misión Alos (Advanced Land Observing Satellite) de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón y la Nasa, a una resolución espacial 12,5 x 12,5 m por pixel o a una escala cartográfica de 1:25.000, generado mediante imágenes capturadas por el sensor Palsar (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), las cuales se encuentran disponibles de manera gratuita en la base de datos de Alaska Satellite Facility. El modelo de elevación digital para el área de estudio se puede observar en la Figura 2.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

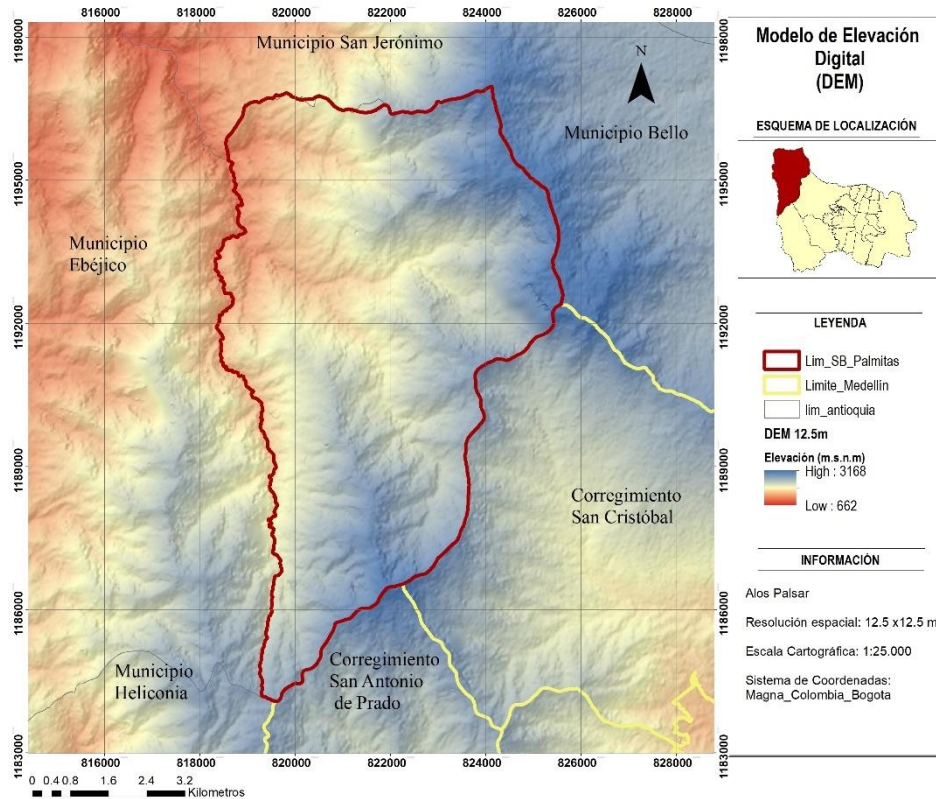


Figura 2 Modelo de elevación digital a escala 1:25,000 Corregimiento San Sebastián de Palmitas

10.2.3 Mapa de Clasificación de Suelos

El mapa de clasificación de suelos de la zona de estudio corresponde al Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia a escala 1:100.000 (Igac, 2007), disponible de manera libre en el Geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac). De los anexos del mismo estudio fue posible extraer información de propiedades de los perfiles de suelos que componen cada unidad cartográfica del corregimiento de San Sebastián de Palmitas. Los diferentes tipos de suelos de la zona de estudio se presentan en la Figura 3.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

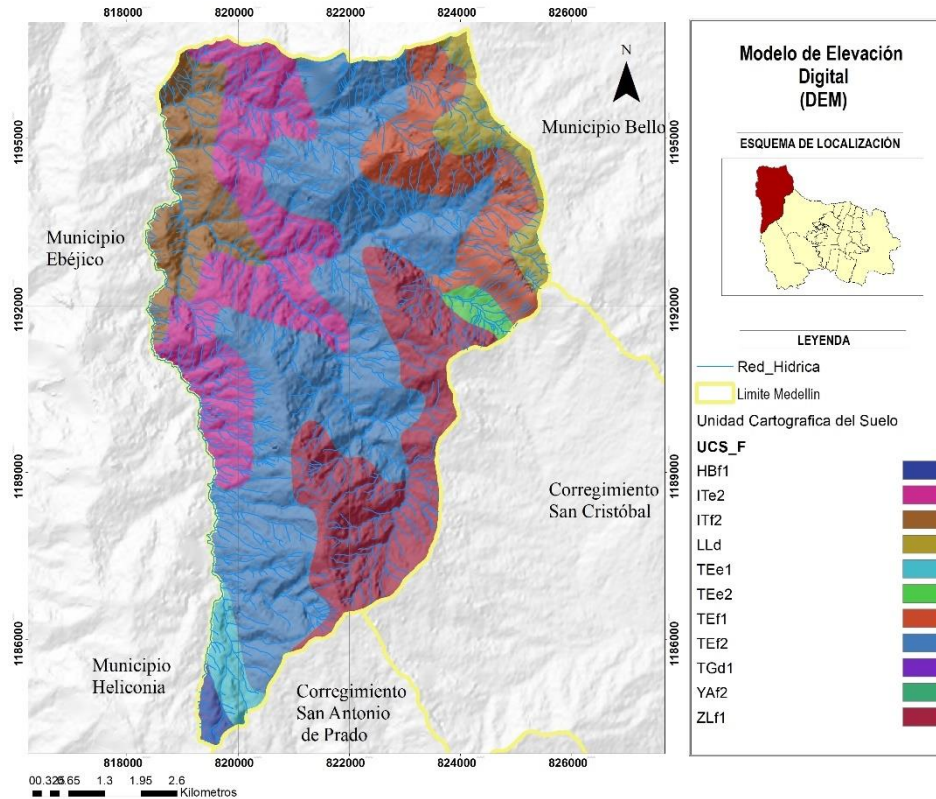


Figura 3 Tipos de suelos en el Corregimiento San Sebastián de Palmitas

Unidad Cartográfica de Suelo	Asociación de suelo
HBf1	Horizontes
ITe2	Ituango
ITf2	Ituango
LLd	Llano Largo
TEf1	Tequendamita
TEe1	Tequendamita
TEe2	Tequendamita
TEf2	Tequendamita
TGd1	Tutaná
YAf2	Yarumal
ZLf1	Zulaibar

Tabla 2 Unidades Cartográficas del suelo y sus respectivas asociaciones de suelos

10.2.4 Mapa de coberturas Vegetales y uso del suelo

Para efectuar la observación de las coberturas actuales del suelo, se extrajo el mapa Cobertura y Usos Actuales de la Tierra a una escala de 1:25.000, perteneciente a la información cartográfica de la Actualización y Ajuste al Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Aurrá (Corantioquia, 2018), provisto por la Subdirección de Planeación de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia). Para su

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

clasificación se aplica la metodología sistema estandarizado para la clasificación del uso y coberturas de la tierra Corine Land Cover, adaptada por el Ideam para Colombia. En la Figura 4 se presenta la distribución de cada cobertura.

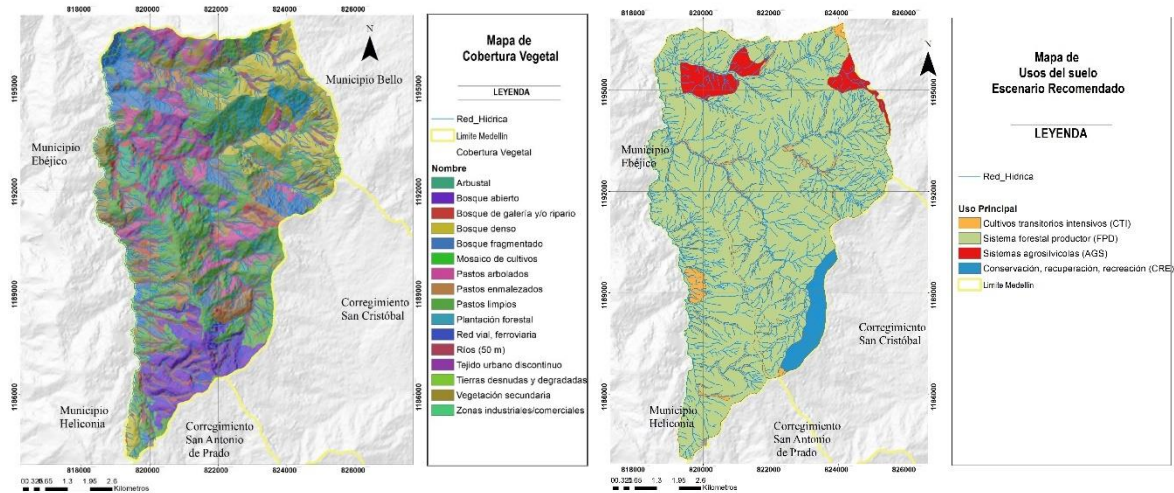


Figura 4: Coberturas y usos del suelo en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas (derecha). Usos del suelo escenario recomendado (izquierda)

Tipo de Cobertura	Porcentaje (%)
Arbustal	6,81
Bosque abierto	7,84
Bosque de galería y/o ripario	13,90
Bosque denso	13,48
Bosque fragmentado	6,51
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0,19
Pastos arbolados	9,54
Pastos enmalezados	6,24
Pastos limpios	25,94
Plantación forestal	0,70
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	0,07
Ríos (50 m)	0,12
Tejido urbano discontinuo	2,99
Tierras desnudas y degradadas	0,44
Vegetación secundaria o en transición	5,22
Zonas industriales o comerciales	0,01

Tabla 3 Porcentaje de cada cobertura en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas

10.2.5 Inventario de residuos sólidos

El registro histórico de datos de los residuos sólidos depositados en el Relleno Sanitario La Pradera provenientes de diferentes municipios del Valle de Aburrá (Medellín, Bello, Caldas, Copacabana, Barbosa, Envigado, Girardota, Sabaneta, Itagüí, La Estrella); se solicitó

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

mediante un formulario PQRS a Emvarias del Grupo EPM. Los datos fueron suministrados con una resolución temporal mes a mes, con peso en toneladas de residuos sólidos. El año de referencia usado para el presente estudio es el año 2019.

Mes	En.	Febr	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Agt.	Sept	Oct.	Nov.	Dic.
Tonela das	99.2 25	88.4 78	97.3 13	96.6 82	103.2 36	94.5 53	100.6 88	97.0 94	93.1 88	101.1 30	100.3 16	105.6 77

Tabla 4 Toneladas de residuos sólidos domésticos dispuestos en La Pradera 2019

11 Metodología

11.1 Estimación pérdida de suelo tendencial

11.1.1 Descripción y cálculo de factores

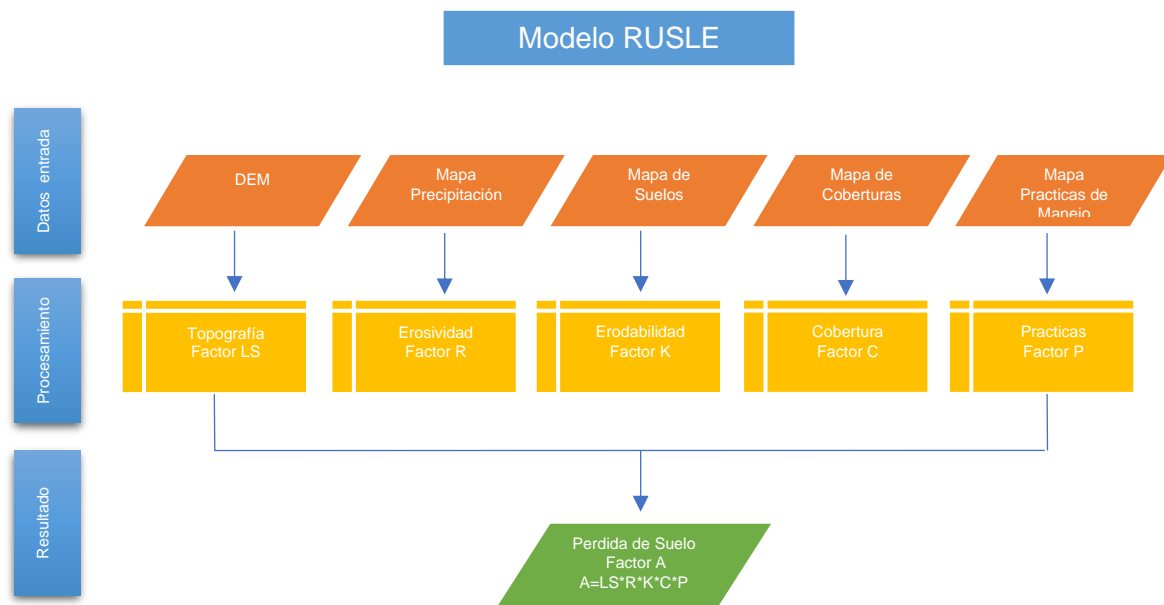


Figura 5 Metodología de aplicación de RUSLE

Para el análisis del proceso erosivo distribuido en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas con el fin de conocer y determinar la pérdida de suelo, se recurrió al software SIG ArcGIS 10.8 el cual es un sistema que permite recopilar, organizar, administrar, calcular y analizar, información geográfica. El conjunto de datos e información que permitió realizar la

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

presente investigación, además, de la descripción del cálculo de cada uno de los factores del modelo Rusle se encuentra descrito a continuación.

11.1.2 Factor de Erosividad (R)

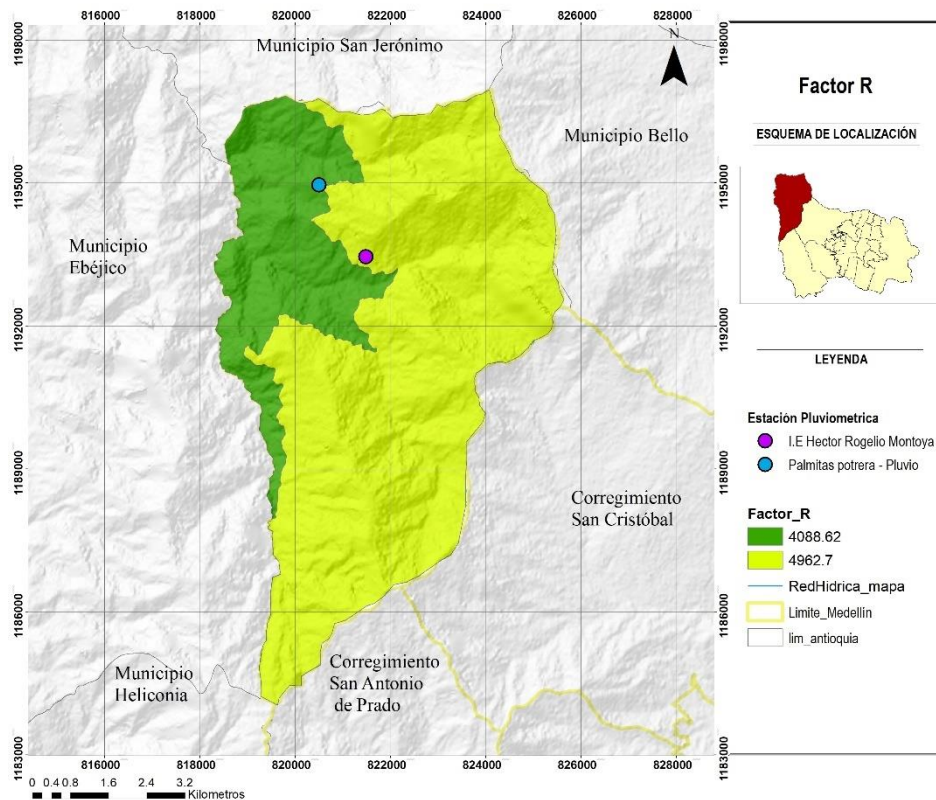


Figura 6 Factor R usando ecuación logarítmica para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas a escala 1:25.000

El factor de erosividad de la lluvia R debe acoplar el efecto del impacto de la lluvia e información relativa sobre la cantidad y tasa de escorrentía probablemente asociada con la lluvia (Ríos, 2018). Según Wischmeier & Smith (1965) el índice de erosión es una medida de la fuerza erosiva de la lluvia para una lluvia determinada. Cuando se mantienen constantes otros factores aparte de la precipitación, las pérdidas de suelo de los campos cultivados son directamente proporcionales a la energía cinética total de la tormenta (E) por la intensidad máxima de 30 minutos (I_{30}), explicando la mayor parte de la pérdida de suelo en las parcelas.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Para Colombia Pérez & Mesa (2002) avanzaron en la evaluación de la erosividad de la lluvia y la precipitación de la región colombiana. Adaptándose al panorama colombiano, donde se presenta déficit en la medición de la precipitación de manera continua. Propusieron dos tipos de regresiones, una línea y la otra potencial, en función de la precipitación promedio anual, donde su aplicación dependía al rango de precipitación media de la zona de estudio. El análisis se basó en las estimaciones de erosividad con datos de precipitación a resolución temporal de 22,5 minutos, obtenidas por 140 estaciones pluviométricas.

La ecuación de tipo lineal, solo es válida cuando la precipitación media anual es superior a 1.240 mm/año; con valores inferiores, esta ecuación no es válida ni representativa.

2 Ecuación lineal

$$R = - 8,831 + 0,0071263 PMA \quad (2) \quad \text{Ecuación)}$$

Donde:

$R = \text{factor de erosividad de la lluvia promedio anual } [(KJ/m^2) (mm/h)]$

$PMA = \text{Precipitación media anual } \left[\frac{mm}{hora} \right]$

Mientras que la ecuación de tipo exponencial que describe esta misma relación, representa adecuadamente los valores bajos de precipitación.

3 Ecuación exponencial

$$R = 0,00001193PMA^{1,70148} \quad (3) \quad \text{Ecuación)}$$

Donde:

$R = \text{factor de erosividad de la lluvia promedio anual } \left[\left(\frac{KJ}{m^2} \right) \left(\frac{mm}{h} \right) \right]$

$PMA = \text{Precipitación media anual } [mm/hora]$

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Por otro lado, (Ríos, 2018) usó las ecuaciones propuestas por Pérez y Mesa (2002) para estimar la erosividad de la lluvia (R) en el Altiplano de Santa Rosa de Osos y dos de sus importantes frentes erosivos, al oriente el Río Grande y al occidental el Río San Andrés; empleando datos de precipitación con una resolución temporal (15 minutos) con el fin de realizar un nuevo modelo a partir de datos con mejor resolución temporal, a los cuales (Pérez & Mesa, 2002) no tuvieron disponibles en su época.

Adicionalmente, (Ríos, 2018) generó otro tipo de modelo para la erosividad R, usando la ecuación de tipo logarítmico (Ecuación 4) Figura 8 en función de la precipitación media multianual.

4 Ecuación logarítmica

$$R = 9.319,7 \ln(PMA) - 65.962 \quad (4) \quad \text{Ecuación)}$$

Donde:

$$R = \text{factor de erosividad de la lluvia promedio anual} \left[\left(\frac{KJ}{m^2} \right) \left(\frac{mm}{h} \right) \right]$$

PMA = Precipitación media anual [mm/hora]

Después de estimar (R) para cada una de las ecuaciones Ríos (2018) observó que los valores estimados por los modelos lineal (Figura 7) (Pérez & Mesa, 2002) y logarítmico (4 Ecuación 4) (Figura 8) presentaron mejor capacidad predictiva que el modelo exponencial (3 Ecuación 3) que se veía muy afectado por valores extremos. También es necesario indicar que cada modelo presenta un límite de aplicación inferior, es decir, el modelo lineal es aplicable para precipitaciones medias multianuales (PMA) mayores a 1.013 mm/ año, el logarítmico para PMA mayores a 1.186 mm/ año y el exponencial es aplicable en todo rango pero con una capacidad de predicción limitada (Ríos, 2018).

En la Figura 7, Figura 8 y Figura 9 se observa la comparación entre los coeficientes de determinación de cada uno de los modelos mencionados, allí se puede observar que los modelos lineal y logarítmico tiene un mayor ajuste a la variable R, por otro lado, para la ecuación exponencial es menor el ajuste, siendo este modelo un poco menos fiable en comparación.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

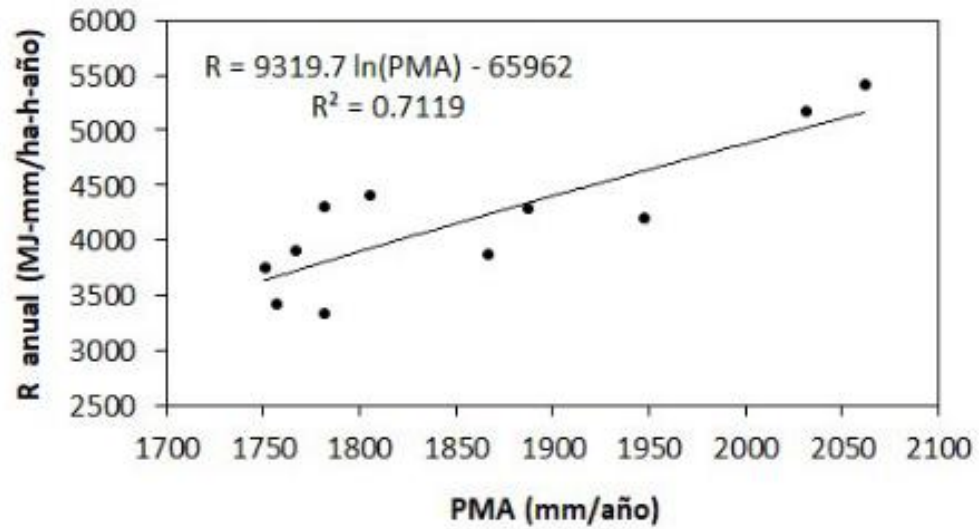


Figura 7 Modelo logarítmico para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora Propuesto por Ríos (2018). Extraído de Ríos (2018)

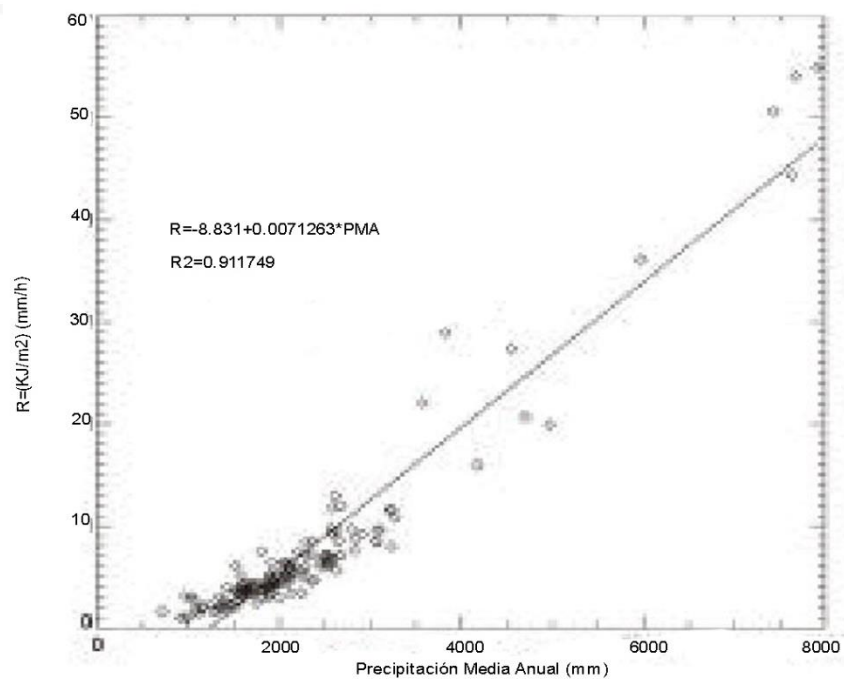


Figura 8 Modelo lineal para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora Propuesto por Pérez & mesa (2002). Extraído de Pérez & Mesa (2002)

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

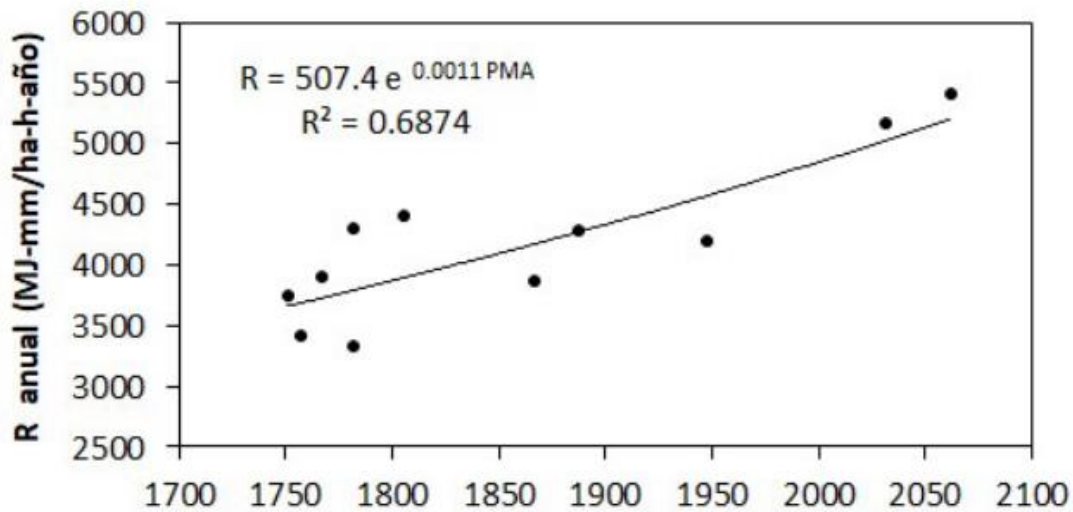


Figura 9 Modelo exponencial para la erosividad de la lluvia (R) en función de la precipitación promedio anual o multianual (PMA) en mm/hora, propuesto por Pérez & Mesa (2002). Extraído de Ríos (2018)

En base a lo anterior, en el presente trabajo para el cálculo del factor de erosividad de la lluvia (R) se empleó el modelo lineal propuesto por Pérez y Mesa (2002) y el modelo logarítmico propuesto por Ríos (2018) en función de la precipitación media anual, ya que son los que tienen coeficiente de determinación mayor.

Los datos de precipitación fueron suministrados por el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (Siata). Para el cálculo de la precipitación media anual se escogieron las estaciones meteorológicas que representan mayor confiabilidad y calidad de datos en la zona de estudio, las cuales están equipadas con dos pluviómetros cada una y trabajan bajo una resolución temporal de un minuto. Asimismo, se optó por el 2019 como el año que registra menor porcentaje de datos faltantes, además, de mayor concordancia entre pluviómetros. De esta manera la estación IE Héctor Rogelio Montoya caracteriza mejor la precipitación de la zona alta del corregimiento con mayor elevación y la estación La Potrera la precipitación de las zonas más bajas. La elevación en el corregimiento decrece en dirección oriente-occidente, como se observa en la Figura 1.

11.1.3 Factor Topográfico (LS)

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

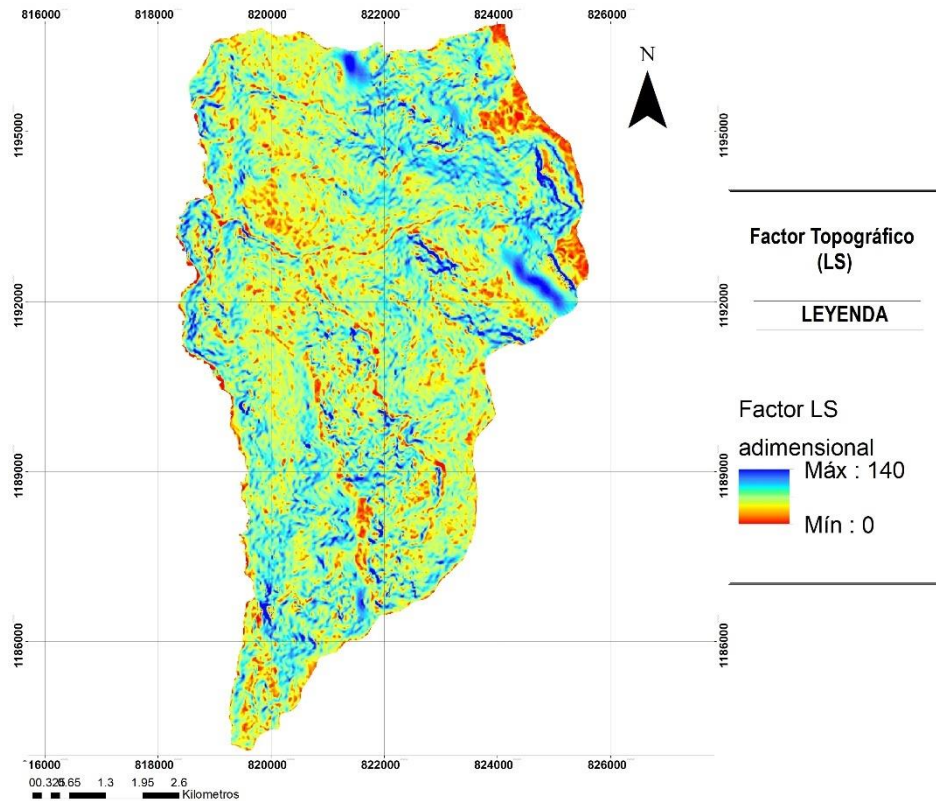


Figura 10 Factor LS para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas a escala 1:25.000

Los efectos específicos de la topografía en la erosión del suelo se estiman mediante el factor adimensional LS, que muestra el efecto combinado de la longitud de la pendiente (L) y la inclinación de la pendiente (S). A medida que aumenta la longitud de la pendiente, la cantidad y la tasa de escorrentía acumulada aumentan. Igualmente, con un aumento de la pendiente del terreno, la velocidad de la escorrentía aumenta, lo que contribuye a la erosión (Ghosal & Das Bhattacharya, 2020).

La parametrización empleada por Renard et al. (1997) para la estimación del factor L en función de la longitud de la pendiente (λ) se expresa como:

$$L = \left(\frac{\lambda}{\psi}\right)^m \quad (8)$$

Donde:

λ : Es la longitud de la trayectoria del flujo (m)

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Ψ : es la longitud de la parcela de escorrentía unitaria, que equivale a 22,13 metros

m : es un exponente variable y estrechamente ligado con relación β de erosión en surcos a entre surcos (causado por el impacto de la gotas de lluvia)

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (9)$$

Donde:

β : es un valor que relaciona la erosión debida a la escorrentía en regueros con la erosión producida por el impacto de la gota en el suelo.

$$\beta = \frac{\left(\frac{\sin \theta}{0,896}\right)}{3 \sin \theta^{0,8} + 0,56} \quad (10)$$

Donde:

θ : es el ángulo de la pendiente.

La longitud de la pendiente se ha definido, en términos generales, como la distancia desde el punto de origen del flujo superficial hasta el punto en el que el gradiente de la pendiente disminuye lo suficiente como para que comience la deposición, o el flujo se concentra en un canal definido (W. H. Wischmeier & Smith, 1978)

Para la estimación del factor de inclinación de la ladera (S), el modelo Rusle presenta la siguiente parametrización:

$$S = 10,8 \sin \theta + 0,03 \quad \text{para Pendiente} < 9\% \quad (11)$$

$$S = 16,8 \sin \theta - 0,50 \quad \text{para Pendiente} \geq 9\% \quad (12)$$

Permitiendo la estimación de dicho factor tanto para pendientes menores al nueve por ciento (9 %) como para pendientes mayores o iguales a dicho valor (Renard et al., 1997).

En el presente estudio para la evaluación de los factores de longitud (L) e inclinación (S) de las laderas se emplearon los datos obtenidos del modelo de elevación digital (DEM) a una escala de 1:25.000 (tamaño de pixel de 12,5m). Además, para el cálculo del factor

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

topográfico (LS) se usaron las herramientas del ArcToolbox del programa de procesamiento geoespacial ArcMap. Específicamente la herramienta Slope para el cálculo del mapa de pendientes, y Map Algebra para procesar las ecuaciones.

Las anteriores parametrizaciones del modelo Rusle (Renard et al., 1997) fueron adoptadas por Ríos (2018) y Ríos et al. (2018) en las cuencas del Río Grande y el Río San Andrés para obtener los campos de los factores L y S, haciendo este modelo aplicable a las cuencas de estudio (Río Grande y San Andrés), donde las pendientes en algunos casos superan el noventa por ciento (> 90 %) al igual que las pendientes presentadas en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas.

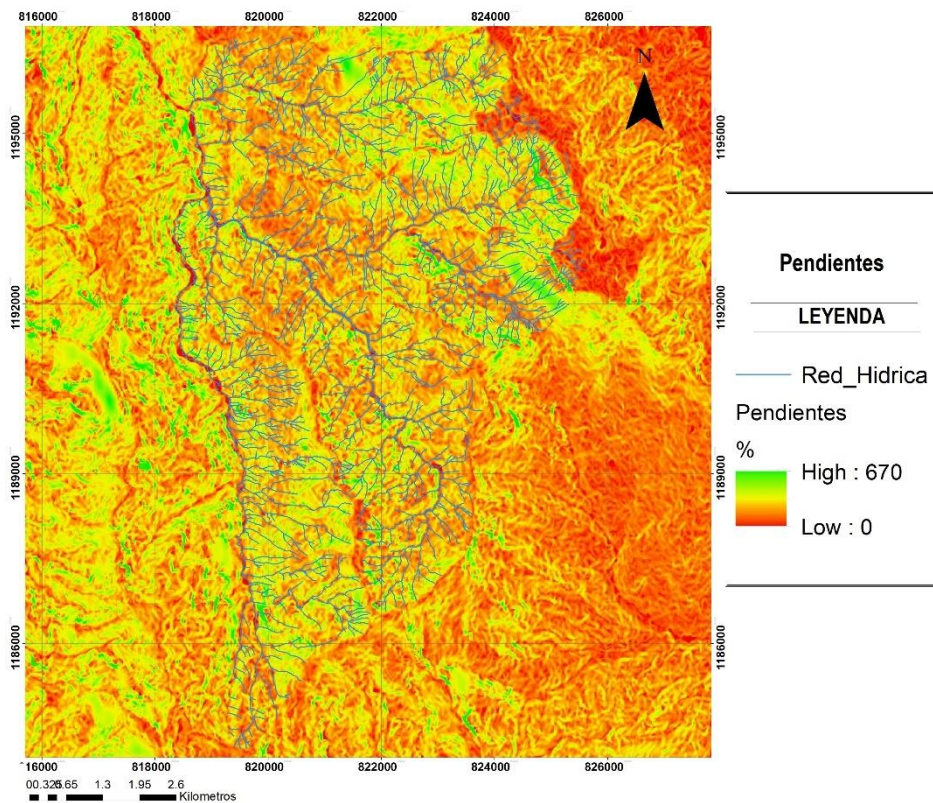


Figura 11 Pendientes para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas a escala 1:25.000

11.1.4 Factor de erodabilidad (K)

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

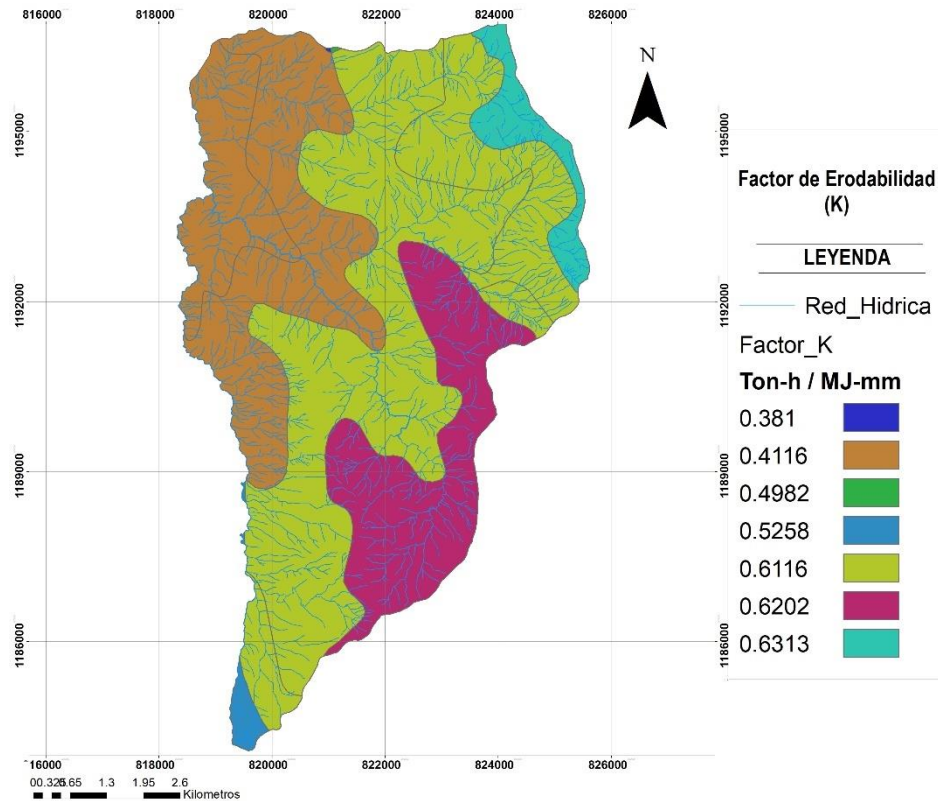


Figura 12 Factor K para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas a escala 1:25.000

La erodabilidad del suelo se entiende como la resistencia del suelo a desprenderse ya sea por el impacto de las gotas de lluvia, por escorrentía o por ambas. El factor erodabilidad K se considera así como la tasa de pérdida de suelo por unidad de fuerza o energía externa aplicada por las gotas de lluvia y el flujo superficial (Renard et al., 1997). Considerando además que la susceptibilidad del suelo a erodarse está sujeta a las características del suelo y/o características geológicas, como el material parental, la textura, la estructura, el contenido de materia orgánica, la porosidad y la catena (Ghosal & Das Bhattacharya, 2020), debido a estas propiedades intrínsecas dependerá si los suelos son más o menos erodables en un escenario bajo las mismas condiciones climáticas, de coberturas vegetales y morfometría de las laderas (inclinación y longitud de la pendiente) (Ríos, 2018).

Hacia finales de la década de los setenta Wischmeier & Smith (1978) observaron que el factor de erodabilidad del suelo depende de la textura del suelo (porcentajes de arena, limo y arcilla en la capa superficial), el contenido de materia orgánica, la estructura del suelo y su permeabilidad. Así, formularon una expresión numérica para calcular factor K en función

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

de estas características. Más adelante, Renard et al. (1997) hacen avances permitiendo una evaluación más sistemática y ampliando aplicabilidad del modelo.

Sin embargo, ya que para la estimación del factor K se usaron como referencia parcelas con tipos de suelos pertenecientes a el territorio norteamericano, dicha metodología tiene limitantes en suelos de origen volcánico, suelos orgánicos como la turba, subsuelos (Horizonte C o material parental), oxisoles, suelos arcillosos de baja actividad, suelos calcáreos y suelos con alto contenido de mica (Usda, 2001). Ríos (2018) confirma las restricciones anteriormente mencionadas en el uso de la expresión numérica, en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés del departamento de Antioquia; encontrando que para las unidades cartográficas de suelo representadas por perfiles modales con porcentajes de materia orgánica (% MO) mayores al doce por ciento (12,0 %) la expresión numérica arroja valores negativos. Considerándose como un obstáculo su aplicación en zonas de montaña tropicales donde los suelos presentan altos contenidos de materia orgánica.

Por otro lado Sharpley & Williams (1990) emplean otra metodología para el cálculo del factor de erodabilidad del suelo (K) implementado en el modelo Epic (Erosion/Productivity Impact Calculator), considerando el contenido de carbono de la capa superior del suelo, donde observaron consistencia en los resultados con los obtenidos en otros estudios donde usaron dicha metodología.

El factor de erodabilidad (K) propuesta de Sharpley & Williams (1990) está dado por la ecuación:

5 Ecuación Factor K Rusle

$$K_{USLE} = f_{sand} * f_{clsi} * f_{orgc} * f_{hisa} \quad (5)$$

Ecuación)

$$f_{sand} = [0,2 + 03 e(-0,0256 SAN(1 - \frac{SIL}{100}))]$$

$$f_{clsi} = \left(\frac{SIL}{CIA * SIL} \right)^{0.3}$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0,25C}{C * e(3,72 - 2,95C)} \right)$$

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0,7 SN1}{SN1 + e(-5,51 + 22,9SN1)}\right)$$

$$SN1 = \frac{1 - SAN}{100}$$

Donde:

SAN: % contenido de arena

SIL: % contenido de limo

CLA: % contenido de arcilla

C: % contenido de carbono orgánico del suelo

SAN: % contenido de arena

Con lo mencionado anteriormente, en el presente trabajo para el cálculo del factor de erodabilidad (K) se utilizará la metodología propuesta por Sharpley & Williams (1990) para cada unidad de suelo existente en la zona de estudio, basándose en lo registrado en documentada en el *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia a escala 1:100.000* (Igac, 2007). Se consideró que dicha ecuación (5 Ecuación 5) es la más adecuada ya que gran parte de los suelos del corregimiento de San Sebastián de Palmitas se han desarrollado a partir de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas recubiertas en algunos sectores por cenizas volcánicas, además, de que algunos suelos tienen como material parental depósitos orgánicos.

Para la determinación de los porcentajes de contenido de arenas, limos, carbono orgánico en el presente estudio se recurrió a los anexos del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia. Donde se pudo extraer información sobre las propiedades de cada una asociación de suelo presentes la zona de estudio, tales como los porcentajes de cada perfil de suelo, sus respectivos porcentajes de arenas, limos, arcillas, carbono orgánico, profundidad, clase textural, entre otros.

11.1.5 Factor de Cobertura y Gestión (C)

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

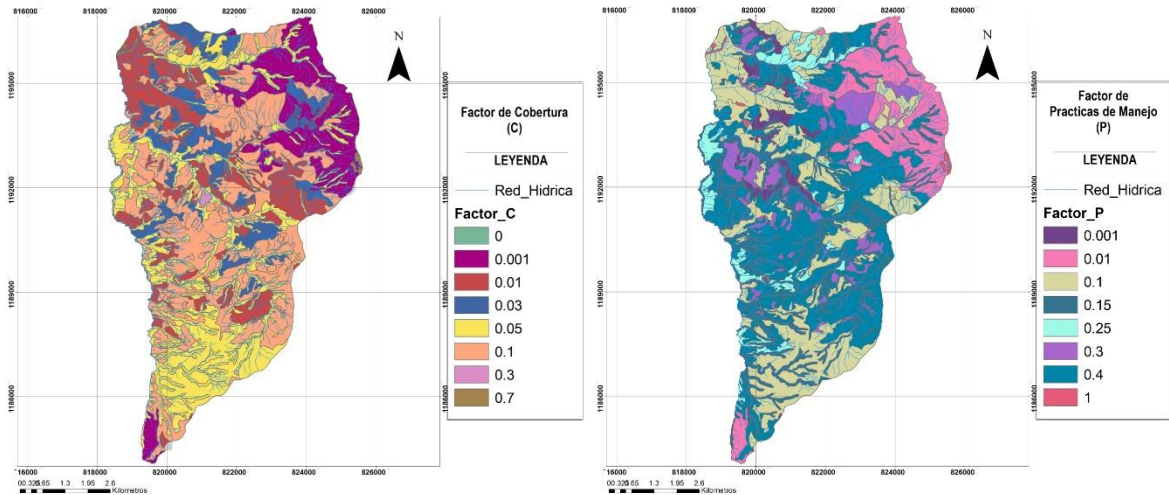


Figura 13 Factor C y Factor P para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas a escala 1:25.000

La cobertura del suelo es un factor muy influyente en la erosión junto con la longitud de la pendiente y el factor de inclinación. Dependiendo del tipo de cobertura, este servirá como agente protector o potencializador de la erosión. La cubierta vegetal impide que las gotas de lluvia impacten directamente sobre la superficie del suelo, ayudando a disipar la energía de las gotas de lluvia antes de alcanzar la superficie (Ghosal & Das Bhattacharya, 2020). Considerándose así a los suelos provistos de vegetación como menos susceptibles a la pérdida de suelo.

El factor C en Rusle refleja el efecto de las prácticas de cultivo y de gestión en las tasas de erosión, además, es útil para comparar los impactos relativos de las opciones de gestión en los planes de conservación. C indica cómo afectará el plan de conservación a la pérdida media anual de suelo y cómo se distribuirá ese potencial de pérdida de suelo en el tiempo durante las actividades de construcción, rotaciones de cultivos u otros esquemas de gestión (Renard et al., 1997).

El Usda en 1972 desarrolló por primera vez el factor de gestión de cobertura en función de las masas de agua, los terrenos agrícolas, la vegetación escasa, la vegetación densa, los terrenos áridos y los terrenos edificados. Luego (W. H. Wischmeier & Smith, 1978) modificaron la ecuación propuesta por Usda y generaron una mayor variación de la cubierta terrestre para el factor C como la relación entre la pérdida de suelo en una parcela cultivada bajo condiciones específicas y la pérdida de suelo en una parcela similar cultivada en barbecho y con labranza continua.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

En Morgan (2005), se generó un modelo que muestra la relación lineal entre el factor C y el Ndvi (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado), concepto desarrollado por McFarlane et al. (1991). Siendo este un método óptimo para estimar los valores del factor C de las clases de cobertura del suelo de grandes áreas en poco tiempo, como lo afirman diversos autores (Karaburun, Irvem et al. (2007), Pal and Shit (2017).

No obstante, en el presente trabajo se usó la metodología del sistema estandarizado para la clasificación del uso y coberturas de la tierra Corine Land Cover, adaptada por el Ideam para Colombia (Ideam, 2010), para la clasificación y posterior análisis de los diferentes tipos de cobertura de la zona de estudio. Las coberturas fueron delimitadas apoyándose en el Mapa de cobertura y usos actuales de la tierra en escala 1:25.000 (Corantioquia, 2018).

Para el modelo Rusle, los valores de C se asignaron basándose en tablas y recomendaciones dispuestas por diferentes autores (W. H. Wischmeier & Smith, 1978), (Renard et al., 1997), (Haregeweyn et al., 2017), (Morgan, 2005). Dichos valores son estimados por medio de la clasificación de coberturas del suelo, en un rango de variación entre cero (0) y uno (1), representando los valores cercanos a cero (0) suelos menos vulnerables a la erosión y los valores cercanos a uno (1) suelos más propensos a procesos erosivos. Los valores de C para la zona de estudio se resaltan en la Tabla 5.

Por otro lado, se estimaron los valores del Factor C para las coberturas y usos de la tierra propuestos en el mapa de capacidad de uso de las tierras en el Pomca del Río Aurrá. Para poder evidenciar la pérdida del suelo en escenarios recomendados propuestos por expertos en la zona de estudio. Los cuales fueron clasificados, en tipo de cobertura, gestión de manejo, clase y subclase del suelo (Corantioquia, 2018), teniendo en cuenta sus principales limitantes y aptitudes para ser utilizados, garantizando el desarrollo sostenible del recurso suelo. Los valores de C para un escenario recomendado se resaltan en la Tabla 6.

Cobertura	Factor C	Factor P
Arbustal	0,003	0,3
Bosque abierto	0,005	0,1
Bosque de galería y/o ripario	0,005	0,15
Bosque denso	0,001	0,01
Bosque fragmentado	0,01	0,1
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0,1	0,4
Pastos arbolados	0,14	0,1
Pastos enmalezados	0,01	0,4

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Cobertura	Factor C	Factor P
Pastos limpios	0,038	0,4
Plantación forestal	0,02	0,1
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	0.003	1
Ríos (50 m)	0	1
Tejido urbano discontinuo	0,001	0,001
Tierras desnudas y degradadas	0,75	1
Vegetación secundaria o en transición	0,005	0,25
Zonas industriales o comerciales	0,001	0,001

Tabla 5 Coberturas Corine Land Cover, Factores De Cobertura (C) Y De Prácticas De Manejo (P)

11.1.6 Factor de prácticas de manejo (P)

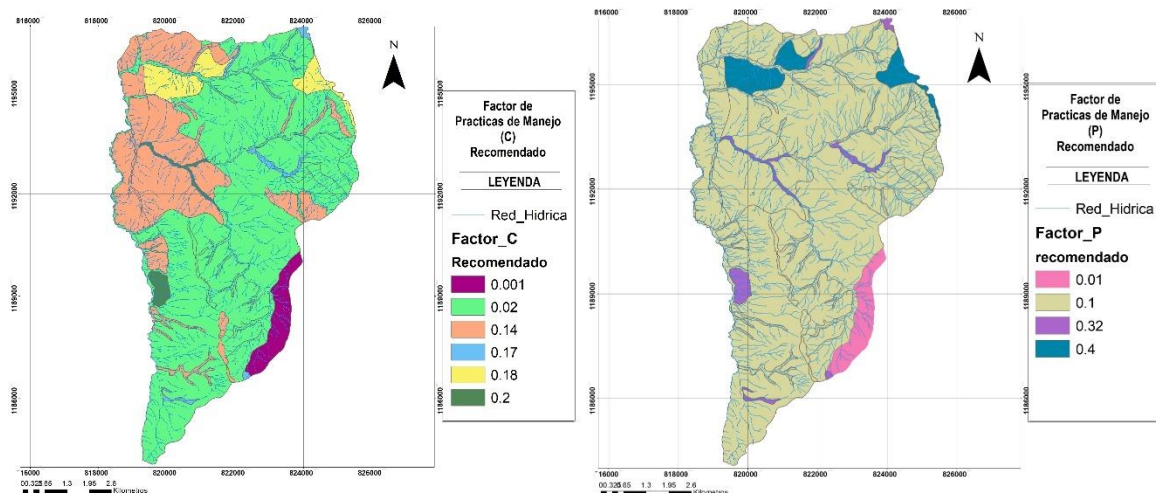


Figura 14 Factor C y Factor P para un escenario recomendado según la capacidad de carga del suelo

El factor P en Rusle es la relación entre la pérdida de suelo después de realizar una práctica de conservación y la pérdida de suelo asociada a laderas con labranza y siembra de tipo descendente o en la dirección. Las prácticas de manejo afectan principalmente a la erosión modificando el patrón de flujo, la pendiente o la dirección de la escorrentía superficial y reduciendo la cantidad y la tasa de escorrentía (Renard et al., 1997).

Las prácticas de apoyo más comunes son: la agricultura en curvas de nivel (en contorno), el cultivo en terrazas, el cultivo en franjas, el cultivo a través de la pendiente y las vías de agua con césped. Los valores del factor P oscilan entre 0 y 1. Entre estos valores, el valor más alto se asigna a las zonas en las que no hay ninguna práctica de conservación (es decir, los pastizales y las zonas abiertas), y los valores mínimos se asignan a las zonas de

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

plantación con cultivos en contorno y a las terrenos edificados (Ghosal & Das Bhattacharya, 2020).

Para asignar los valores de P para los tipos de coberturas presentes en el área de estudio se usaron los valores sugeridos por (W. H. Wischmeier & Smith, 1978), Renard et al. (1997), Haregeweyn et al. (2017) Morgan (2005). Las prácticas de manejo fueron delimitadas apoyándose en el mapa de cobertura y usos actuales de la tierra en escala 1:25.000 (Corantioquia, 2018), el cual también fue usado para la determinación del factor C. Los valores de P para la zona de estudio se resaltan en la Tabla 5.

Asimismo, se estimó el campo del factor P en base a las coberturas y usos de la tierra propuestos en el Mapa de capacidad de uso de las tierras en el Pomca del Río Aurrá (Corantioquia, 2018). Los cuales fueron clasificados, en tipo de cobertura, gestión de manejo, clase y subclase del suelo (Corantioquia, 2018), teniendo en cuenta sus principales limitantes y aptitudes para ser utilizados, garantizando el desarrollo sostenible del recurso suelo. Los valores de P para un escenario de uso recomendado se resaltan en la Tabla 6.

Cobertura	Clase	Factor C	Factor P
Áreas para la conservación y/o recuperación de la naturaleza, recreación (CRE)	Clase 8	0,001	0,01
Cultivos transitorios intensivos (CTI)	Clase 2	0,17	0,32
Cultivos transitorios intensivos (CTI)	Clase 2	0,17	0,32
Cultivos transitorios intensivos (CTI)	Clase 2	0,2	0,32
Cultivos transitorios intensivos (CTI)	Clase 2	0,2	0,32
Cultivos transitorios intensivos (CTI)	Clase 2	0,17	0,32
Sistema forestal productor (FPD)	Clase 6	0,02	0,1
Sistema forestal productor (FPD)	Clase 7	0,14	0
Sistema forestal productor (FPD)	Clase 6	0,02	0,1
Sistema forestal productor (FPD)	Clase 7	0,14	0,1
Sistema forestal productor (FPD)	Clase 6	0,02	0
Sistema forestal productor (FPD)	Clase 7	0,14	0,1
Sistema forestal productor (FPD)	Clase 7	0,14	0,1
Sistema forestal productor (FPD)	Clase 6	0,14	0,1
Sistema forestal productor (FPD)	Clase 6	0,02	0,1
Sistema forestal productor (FPD)	Clase 7	0,14	0,1
Sistemas agrosilvícolas (AGS)	Clase 4	0,18	0,4
Sistemas agrosilvícolas (AGS)	Clase 4	0,18	0,4
Sistemas agrosilvícolas (AGS)	Clase 4	0,18	0,4

Tabla 6 Factores de cobertura y gestión (C) y de prácticas de manejo (P) Escenario recomendado según la capacidad de uso del suelo del Pomca Río Aurrá 2018

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

11.2 Residuos orgánicos domésticos-Compost

Las grandes ciudades producen cantidades de residuos sólidos en orden de toneladas mensualmente, las cuales son dispuestas en rellenos sanitarios que en su mayoría evidencian fallas reiteradas en términos técnicos, ambientales, de planeación y de contingencia, conforme con reportes del Departamento Nacional de Planeación (DEP). Según Alviar (2014) después de hacer una valoración de los residuos sólidos domiciliarios entregados a los carros recolectores, se aprecia que la mayor cantidad está constituida por materia orgánica (MO). A pesar de que la MO es el elemento más abundante en la bolsa de basura en los hogares, actualmente no se tiene una buena gestión de está, generando grandes problemas ambientales en los sitios de disposición final ya que está en su proceso de descomposición anaeróbica se transforma en una fase líquida (lixiviado), y otra gaseosa, (gas metano principalmente). Los lixiviados terminan en las fuentes de agua contaminándolas y los gases en la atmósfera contaminándola también (Alviar, 2014). En la mayoría de las veces se recoge con diferentes residuos no óptimos para reciclaje, aumentando los procesos de contaminación.

Sin embargo, si estos residuos orgánicos domésticos fueran aprovechados, haciendo uso racional de los recursos, se evitaría el despilfarro energético al incursionar la materia orgánica nuevamente en el ciclaje de nutrientes, por tanto, el compostaje proporcionaría la posibilidad de transformar de una manera segura los residuos orgánicos en insumos para la producción agrícola. La FAO define como compostaje a la mezcla de materia orgánica en descomposición en condiciones aeróbicas que se emplea para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes (Zurita-Martínez, 2015).

Acorde a lo presentado por Alviar (2014) sería un acierto considerar el 60% como promedio para establecer la cantidad de materia orgánica de origen doméstico que se despilfarra en los rellenos sanitarios. Conjuntamente, si se pretende convertir la materia orgánica en compost se puede considerar el 25% de conversión de materia orgánica en compost aprovechable para contribuirle al suelo a recuperar su función nutritiva y estructural. Los valores de conversión de los residuos dispuestos en La Pradera se observan en Tabla 7.

Toneladas dispuestas en La Pradera año 2019	
Total	1'177.582
Materia Orgánica	706.549
Compost	176.637

Tabla 7 Potencial de transformación de materia orgánica a compost con los residuos dispuestos en el Relleno Sanitario La Pradera en el año 2019.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

12 Resultados y Discusión

El cálculo de la potencial erosión del suelo en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, es el resultado del producto de cada uno de los factores de la ecuación universal de pérdida de suelo (1 Ecuación 1) en el modelo empírico Rusle. A continuación, se describen los valores estimados para cada uno de los parámetros.

12.1 Factor de erosividad (R)

En la Tabla 8 se relacionan los datos de precipitación media anual para el año 2019, y sus respectivos valores de erosividad, usando cada uno de las ecuaciones propuestas anteriormente.

Estación	Zona	Precipitación Media anual(mm)	Ecuación Lineal (Pérez; Mesa, 2002)	Ecuación Logarítmica (Ríos, 2018)
IE Héctor Montoya	Alta	2.018	5	4.962
La Potrera	Baja	1.837	4	4.088

Tabla 8 Calculo del Factor R para cada estación. Ecuación Lineal y Ecuación Logarítmica

Una vez realizada la estimación de erosividad, se observó que los resultados arrojados por la ecuación lineal subestiman los valores del Factor R en la zona de estudio en un orden de 3 cifras con respecto a la ecuación logarítmica; a pesar de presentar un coeficiente de determinación más bajo. Lo anterior, se contrapone con los valores reportados por Pérez y Mesa (2002) y Ríos (2018), en estudios realizados con precipitaciones registradas en Colombia. Por tanto, para el cálculo del pérdida de suelo (Factor A) se usaron los valores arrojados por la ecuación logarítmica (Figura 6), ya que estos tienen mayor concordancia con los valores registrados en la literatura (Arhem & Freden, 2014).

12.2 Factor Topográfico (LS)

La Figura 11 demuestra los cambios en las pendientes presentes en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas. En esta podemos observar que los valores varían entre el 0% hasta 670%, las zonas con pendientes más altas denotadas con colores verdes y las zonas con pendientes más bajas con colores rojos.

En el mapa del Factor LS se puede advertir que los valores oscilan en un rango entre 0 hasta 140. La característica más notoria de la Figura 10 es que los valores de LS varían

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

bastante a lo largo del corregimiento, presentando cambios abruptos entre valores altos a bajos.

12.3 Factor Erodabilidad (K)

Para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas se identificaron siete tipos de asociaciones de suelos llamadas Horizontes, Llano largo, Ituango, Tequendamita, Tutuná, Yarumal y Zulaibar, para cada una se calculó distintos valores de K dependiendo de sus porcentajes de arenas, limos, arcillas y carbono orgánico, cuya distribución espacial se puede observar en la Figura 12.

Factor K tonelada*h/MJ*mm	Asociación De Suelo
0,52	Horizontes
0,63	Llano largo
0,41	Ituango
0,61	Tequendamita
0,38	Tutuná
0,49	Yarumal
0,62	Zulaibar

Tabla 9 Valores de Factor K relacionados con los diferentes tipos de asociaciones del suelo

De acuerdo con lo planteado por Usda (2001) y los resultados obtenidos, la zona occidental del corregimiento San Sebastián de palmitas presenta valores medios de K (0,25– 0,45) tonelada*h/MJ*mm, indicando suelos de texturas medias como los suelos franco, siendo moderadamente susceptibles al desprendimiento y produciendo escorrentías moderadas. Por otro lado, el resto de la cuenca presentan valores elevados de K (0,45– 0,65) tonelada*h/MJ*mm, lo que indica que son suelos con alto contenido en limo y son especialmente susceptibles a la erosión, estos suelos tienden a desprenderse fácilmente y a producir grandes cantidades y tasas de escorrentía.

12.4 Factor (C)

12.4.1 Escenario tendencial

La categorización de las coberturas de San Sebastián de Palmitas se puede observar en la Figura 13. Los valores establecidos de C se pueden observar en la Tabla 5, estos varían

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

en un rango entre 0 a 0,7. Los valores más bajos se le asignaron a las coberturas que son menos susceptibles a la erosión, que para el área de estudio corresponden específicamente a zonas con coberturas boscosas de un grado alto a moderado de densidad de dosel, además, de suelo cubierto por hojarasca y raíces que permiten su estabilidad (bosques densos, bosques abiertos, bosques riparios, arbustales, plantación forestal); estas coberturas disminuyen el impacto directo de las gotas de lluvia en la superficie del suelo. También, los valores bajos, corresponde a zonas edificadas o ríos donde no es posible la erosión y el posterior arrastre de sedimentos. Las coberturas con menor susceptibilidad a la degradación corresponden al 51% del área total del corregimiento como se puede observar en la Tabla 3.

Los valores altos representan las zonas con suelos más desprotegidos de vegetación, por tanto, más susceptibles a procesos erosivos. Para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, corresponden a zonas de pastizales (limpios, arbolados y enmalezados), además de mosaicos de cultivos y terrenos altamente degradadas. Las coberturas anteriormente mencionadas, coinciden con ganadería extensiva y sistemas agrícolas campesinos con cultivos de cultivos de cebolla, café, plátano, caña de azúcar, árboles frutales y hortalizas. Las coberturas con mayor susceptibilidad a la degradación corresponden al 49% del área total del corregimiento, siendo los pastizales limpios las coberturas con mayor extensión en el corregimiento, como se puede observar en la Tabla 3.

12.4.2 Escenario Recomendado

La distribución espacial de las coberturas y uso de las tierras de San Sebastián de Palmitas para el escenario recomendado se puede observar en la Figura 4. Los valores de C para dicho escenario se determinaron teniendo en cuenta las características de los usos principales y las clases de suelo propuestas por el Pomca (Corantioquia, 2018) en su análisis de capacidad de carga del suelo, además del grado de pendiente del terreno en el que está situado. Los valores de C y su distribución espacial se pueden ver en la Figura 14.

Los valores más bajos de C les corresponden a las áreas asignadas a la conservación y a la restauración de la naturaleza (0,001). Algunas áreas destinadas a sistemas productivos forestales también tienen valores bajos de C, pero otras tienen valores alto. Lo anterior se debe a que tienen distintas clases de suelo, lo que significa que tienen diferentes tipos de limitaciones y aptitudes, variando los valores de C dependiendo de que tan susceptibles son a la erosión.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

12.5 Factor (P)

Los valores del factor P se establecieron respecto a las prácticas de manejo que se implementan en cada tipo de cobertura y uso del suelo respectivamente. Se usaron diferentes herramientas de planeación y gestión territorial (Alcaldía Municipio de Medellín, 2014; Corantioquia, 2018), para conocer el tipo de prácticas usadas en el escenario tendencial. Para el escenario recomendado, se tuvieron en cuenta las practicas propuestas por el Pomca según la capacidad de carga del suelo. Los valores más alto se les asignaron a las zonas en las que existen prácticas de conservación deficientes. La distribución espacial de los valores de P tendencial y P recomendado se pueden ver en la Figura 13 y Figura 14, respectivamente.

12.6 Pérdida de Suelo Anual (A)

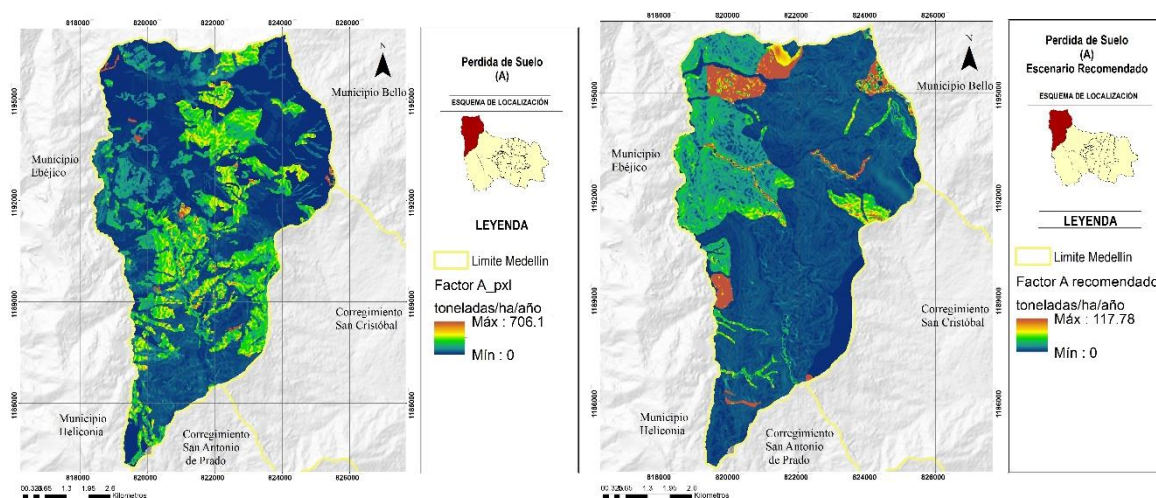


Figura 15 Erosión en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas mediante la aplicación de Rusle para el año 2019. Escenario tendencial (izquierda) y escenario recomendado (derecha).

Los resultados arrojados por el modelo Rusle de producción potencial de pérdida de suelo para el corregimiento San Sebastián de Palmitas, reporta valores entre 0 hasta 706,1 (toneladas/ha/año) para el año 2019. Por otro lado, para el escenario recomendado con prácticas de manejo y cobertura de uso del suelo sugeridas según la capacidad de carga del corregimiento, se reportaron valores de perdida de suelo de 0 hasta 117,7 (toneladas /ha/año).

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Para el escenario tendencial o actual, las zonas que presentaron mayor índice de pérdida de suelo corresponden a coberturas de pastizales en pendientes moderadas a bajas, ubicadas hacia la zona central del corregimiento de San Sebastián de Palmitas; por otro lado, las zonas con menor índice de erosión en este mismo escenario corresponden a las zonas más escarpadas del corregimiento, sin embargo, están cubiertas por bosque (Figura 15).

Para el escenario recomendado los mayores índices de pérdida de suelo corresponden a los sistemas agrosilvícolas y a los sistemas forestal productor de clase 7, lo que significa que son zonas con pendientes quebradas a escarpadas, con una alta susceptibilidad a la erosión, además de presentar suelos con texturas medias, siendo moderadamente susceptibles al desprendimiento y produciendo escorrentías moderadas Tabla 9.

Pérdida de suelo en el año 2019					
Escenario	Área	Total	Máx.	Media	Tasa Denudación
unidades	(ha)	(toneladas/año)	(toneladas/ha/año)	(toneladas/ha/año)	(mm/año)
Tendencial	5.711	4'433.741	706,1	12,1	33,36
Recomendado	5.711	1'815.616	117,7	4,9	13,77

Tabla 10 Pérdida del suelo en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas mediante la aplicación de Rusle para el año 2019

Es necesario aclarar que debido a que el análisis espacial de la zona se analiza a una resolución espacial de 12,5 x 12,5 m (misma resolución del DEM usado), representa la erosión del suelo por unidad de área de cada pixel (156,5 m²), además que el modelo Rusle trabaja en unidades de hectárea. Por tanto, fue necesario ajustar los resultados, dividiendo cada uno de los pixeles del mapa por 64, para evitar la sobre estimación en el área de estudio y así calcular los resultados en hectáreas como indica la ecuación de pérdida de suelo. Por tanto, los valores registrados en la Tabla 10 están corregidos a la resolución espacial.

La pérdida de suelo total para el área de estudio en el año 2019 fue aproximadamente 4'433.741 (toneladas/ha/año) con una media de 12 (toneladas/ha/año). Para el escenario recomendado el total de pérdida de suelo para el mismo año es de aproximadamente 1'815.616 (toneladas/ha/año) con una media de 4 (toneladas/ha/año). Es decir, un 59 % menos que el escenario tendencial actual.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Adicionalmente, se calculó la tasa de denudación para visualizar como el desgaste de la superficie del suelo avanza en la zona de estudio como consecuencia de la erosión hídrica en los diferentes escenarios propuestos. En la Tabla 10 se evidencia que, en condiciones tendenciales actuales, la capa de suelo desprendida es mucho mayor que la pérdida en el escenario recomendado, con actividades propuestas teniendo en cuenta la capacidad de carga del terreno.

12.6.1 Materia Orgánica con uso potencial en los suelos productivos

De acuerdo con lo registrado en la Tabla 7, se evidencia que del total de residuos sólidos que llegaron al Relleno Sanitario La Pradera en el año 2019, 706.549 toneladas tenían el potencial de convertirse en 176.637 de compostaje apto para aplicarse en el suelo productivo de San Sebastián de Palmitas y así restaurar la calidad del suelo. Sin embargo, estas fueron desperdiciadas, además, de generar impactos ambientales innecesarios. Los suelos con poca materia orgánica presentan baja actividad microbiana y por ende poca capacidad nutricia, además, de ser más susceptibles al desprendimiento por el golpe directo de las lluvias provocando erosión y posterior arrastre de la cobertura del suelo.

Para la relación en la enmienda con compost de los suelos degradados, se usó el método propuesto por Cox et al. (2001), el cual indica la incorporación de 110 toneladas por unidad de hectárea en una aplicación al año con el objetivo de mejorar la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos. Por tanto, se consideró la aplicación en las zonas con presencia de actividades agropecuarias, además de aquellas que requieren intervención en su restauración, tales como, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales; pastos limpios y terrenos desnudos y degradados. Las cuales suman un total de 1.536 hectáreas en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas.

Los resultados arrojados demuestran que los residuos dispuestos en el Relleno Sanitario La Pradera hubiera sido tenido un potencial de enmienda de 104%, cubriendo la totalidad de los suelos productivos para el año 2019, garantizando la conservación y restauración del suelo productivo en la zona de estudio. Estos datos se registran en la Tabla 11.

Aplicación de Compost (toneladas/hectárea)	Área suelo productivo (Ha)	Compost Año 2019 (toneladas/año)	Compost aplicado suelos productivos (toneladas)	% de área cubierta con enmienda
110	1.536	176,6	168.960	104%

Tabla 11 Enmienda de compost para los suelos productivos en el año 2019

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Si bien en la literatura se pueden encontrar diversos registros de aplicación del modelo empírico Rusle para diferentes partes del mundo, estos casi siempre se limitan a expresar la cantidad potencial de pérdida de suelo. Sin ánimo de disminuir la importancia y el impacto de dichos resultados, lo que se busca es resaltar los esfuerzos que tuvo el presente estudio en tener una perspectiva integral de la realidad en el Valle de Aburrá, reconociendo la necesidad de denotar la variedad de conexiones en las complejas estructuras ecológicas, usando como hilo conductor la gestión del terreno y el manejo de los residuos orgánicos para recalcar la importancia del retorno de energía a los ciclos biogeoquímicos en la regulación de elementos vitales para la naturaleza.

Este estudio demostró con resultados claros como la concepción de la sociedad del uso y el desuso promueve el desperdicio y el derroche de los recursos, cuando podríamos estar en armonía con la naturaleza atenuando asuntos, tales como, la pérdida de suelo en zonas de ladera y terrenos agrícolas de alta pendiente con precipitaciones altas, escenarios comúnmente encontrados en Antioquia y en el Valle de Aburrá.

Si habláramos de crisis climática la rehabilitación del recurso suelo con materia orgánica sería un factor clave para la sociedad en la mitigación, la adaptación del cambio climático y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la ONU. Un suelo de buena calidad y estructura es un suelo vivo lleno de agua, nutrientes y microorganismos que promueven diversos servicios ecosistémicos. Recordando que el 95% de los alimentos vienen del suelo, cobra mayor importancia que la presencia de materia orgánica atribuya un valioso suministro de nutrientes para las plantas, promoviendo una producción alimentaria sostenible con menor uso de agroquímicos, por tanto, prácticas agrícolas resilientes garantizando la seguridad alimentaria, la producción y consumo responsable. Además, como indica la FAO (FAO et al., 2015), un suelo rico en materia orgánica cumple un papel fundamental en el secuestro de dióxido de carbono (CO₂) uno de los principales gases de efecto invernadero; evitando que este se emita a la atmósfera, a mayor cantidad de materia orgánica presente en el suelo mayor será la retención de CO₂. Igualmente, las presiones ejercidas en el suelo como la intensificación de su uso, el cambio y estabilidad en su estructura, determina el grado de vulnerabilidad de las comunidades y su nivel de respuesta ante los riesgos.

Los resultados obtenidos en este estudio invitan a reconocernos como un eslabón más de las cadenas tróficas, donde nuestras actividades y decisiones tienen repercusiones a diferentes escalas ambientales. Teniendo así, la responsabilidad de plantear estrategias de

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

prevención, mitigación y corrección, garantizando el uso sostenible de los recursos y la protección de la naturaleza.

13 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos se pudo denotar las zonas con mayor peligro de erosión, para cada uno de los sistemas de gestión modelados, los cuales indicaron que para el escenario tendencial o actual, las zonas que presentaron mayor índice de pérdida de suelo corresponden a coberturas de pastizales limpios en pendientes moderadas a bajas; por otro lado, las zonas con menor índice de erosión en este mismo escenario corresponde a las zonas más escarpadas del corregimiento; sin embargo, se encuentran cubiertas por bosque, remarcando así la importancia del tipo de cobertura vegetal y de las buenas prácticas manejo en la mitigación de los procesos erosivos. Por otro lado, se evidenciaron tasas de denudación de 33,3 mm/año y de 13,1 mm/año para el escenario tendencial y el escenario propuesto, respectivamente; además de una diferencia de pérdida de suelo del 59% entre escenarios para el año 2019. Lo que puede llegar a ser muy alarmante ya que la FAO (FAO; Mads, 2018) asegura que hace falta de 100 a 1000 años para generar 1 cm de suelo.

Por otro lado con los cálculos realizados se pudo estimar la cantidad de materia orgánica demandada por los suelos productivos de San Sebastián de Palmitas, indicando que con un total de 706.549 toneladas /año de materia orgánica, dispuesta en La Pradera, podríamos cubrir 104% de toda el área productiva degradada del corregimiento con enmienda de compost; aprovechando así, los beneficios de la materia orgánica doméstica en la restauración, fortalecimiento y mitigación de la erosión en los suelos agrícolas, en vez de que esta sea desperdiciada en rellenos sanitarios provocando problemas ambientales.

Los resultados de pérdida potencial de suelo que se obtuvieron, son consistentes con la erosión reportada por Ríos (2018) en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés en el departamento de Antioquia; así mismo, con los resultados entregados por (Ochoa, 2012) en la cuenca de la quebrada La García en el municipio de Bello Antioquia. Cabe mencionar, que para la zona de estudio la instrumentación fue escasa ya que dentro del área de influencia del corregimiento de San Sebastián de Palmitas solo se contó con dos estaciones pluviométricas, si bien el registro de datos tenía una buena resolución temporal (1 minuto), la caracterización espacial de precipitaciones no era óptima; además, información sobre las prácticas de manejo de los suelos fue escasa y poco clara. Lo anterior, son puntos a tener

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

en cuenta para posteriores estudios, ya que pueden influenciar significativamente la precisión de los resultados del modelo, aumentando su incertidumbre.

Este estudio pretendió ir más allá de predecir netamente la pérdida potencial de suelos productivos rurales, o calcular la cantidad de residuos que se produce actualmente en el Área Metropolitana. Los resultados obtenidos dan luces a alternativas de la gestión integral, cómo acoplando estos dos procesos que generan grandes de impactos ambientales se puedan convertir en un medio para enmendar está pérdida de suelo, garantizando un uso y manejo sostenible de los recursos. Este tipo de estudio no es aplicable exclusivamente para la zona de San Sebastián de Palmitas, también, se puede usar para cualquier otra zona donde utilicemos modelo de pérdida de suelo (Rusle), con el objetivo de identificar los lugares clave que requieran la protección del suelo con enmiendas de residuos orgánicos.

14 Referencias

- Alcaldía Municipio de Medellín. (2014). *Plan de Ordenamiento Territorial POT Medellín. Documento Técnico de Soporte Tabla de Contenidos. Tomo 3e.*
- Alcaldía Municipio de Medellín. (2015). *Plan de Desarrollo PDL Corregimiento San Sebastián de Palmitas.* [https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/SubportalDelCiudadano_2/PlandeDesarrollo_0_17/ProgramasyProyectos/Shared Content/Documentos/2015/Planes de desarrollo Local/COMUNA 50 SAN SEBASTIÁN DE PALMITAS.pdf](https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/SubportalDelCiudadano_2/PlandeDesarrollo_0_17/ProgramasyProyectos/Shared%20Content/Documentos/2015/Planes%20de%20desarrollo%20Local/COMUNA%2050%20SAN%20SEBASTIÁN%20DE%20PALMITAS.pdf)
- Alviar, L. I. (2014). *El ordenamiento de la naturaleza y las pautas de la convivencia humana.* Universidad de Antioquia.
- Arhem, K., & Freden, F. (2014). *Land cover change and its influence on soil erosion in the Mara region , Tanzania* (Issue 334). Lund University.
- Bernache. (2012). Riesgo de Contaminación por disposición final de residuos. Región Centro Occidente de México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 28 Sup., 1, 97–105.
- Caballero, J. (2011). Las Avenidas Torrenciales: Una Amenaza Potencial en el Valle De Aburrá. *Revista Gestión y Ambiente*, 14(3), 45–50.
- Corantioquia. (2018). *Actualización Plan de Ordenación y Manejo dela Cuenca (Pomca) Río Aurrá.*
- FAO; Mads. (2018). *Guía de buenas practicas para la gestión y uso de los suelos en áreas rurales.* www.fao.org/colombia
- FAO, Bot, A., & Benites, J. (2015). The importance of soil organic matter. Key to drought-resistant soil and sustained food and production. In *Fao Soils Bulletin 80* (Vol. 1, Issue 2). <https://doi.org/10.5194/soil-1-707-2015>
- Gascón, S. M., Jiménez, L. M., & Pérez, H. (2015). Óptima ubicación de un relleno sanitario para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá empleando Sistemas de Información Geográfica. *Ingenierías USBMed*, 6(1), 38–45. <https://doi.org/10.21500/20275846.1722>
- Ghosal, K., & Das Bhattacharya, S. (2020). A Review of RUSLE Model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(4), 689–707. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01097-0>
- Giménez, M. (2008). *Metodología de Cálculo del Factor Topográfico, Ls, Integrado en los Modelos Rusle y Usped. Aplicación al arroyo del Lugar, Guadalajara (España).* 646.
- Haregeweyn, N., Tsunekawa, A., Poesen, J., Tsubo, M., Meshesha, D. T., Fenta, A. A., Nyssen, J., & Adgo, E.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

- (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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.019>
- Ideam. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000. In *Area: Vol. TH-62-04-1* (Issue 257).
- Ideam. (2020, October 1). Seguimiento y monitoreo de la deforestación en Colombia primer trimestre de 2020. *Comunicado de Prensa Ideam, 2020*.
- Ideam, Udca, & Mdas. (2015). Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por erosión. In *Ideam - Mads - U.D.C.a.* <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023647/Protocolo-erosion.pdf>
- Igac. (2007). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento de Antioquia* (Issue 235). [http://digilib.unila.ac.id/11478/16/16.BAB II.pdf](http://digilib.unila.ac.id/11478/16/16.BAB%20II.pdf)
- Lince, A., & Castro, A. (2016). Erosividad de la Lluvia en la Región Cafetera de Quindío, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7(1), 37. <https://doi.org/10.22490/21456453.1548>
- Mads. (2007). *Tercer Informe Nacional de Implementación de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía*. 64. http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadYServiciosEcosismaticos/pdf/Zonas-Secas/5638_010610_tercer_informe_desertificacion.pdf
- Ministerio de Ambiente. (2016). Política para la Gestión Sostenible del Suelo. In *Política para la Gestión Sostenible del Suelo*. http://www.andi.com.co/Uploads/Política_para_la_gestión_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*.
- Musgrave, G. (1947). The quantitative evaluation of factors in water erosion: a first approximation. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Ochoa, S. V. (2012). *Modelación de la Erosión Hídrica a Escala de Cuenca en la Zona Alta de la Quebrada la García, Municipio de Bello, Antioquia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Pérez, J. ., & Mesa, O. . (2002). Estimación del Factor de Erosividad de la Lluvia en Colombia. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 5–24.
- Pimentel, D. (2006). Soil erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8(1), 119–137. <https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8>
- Presbitero, A. L. (2003). *Soil Erosion Studies on Steep Slopes of Humid-Tropic Philippines* [Griffith University, Queensland, Australia]. <https://doi.org/https://doi.org/10.25904/1912/3182>
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., Mccool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (Rusle)*.
- Ríos, J. D., Posada, L., & Caballero, H. (2018). Efectos de las escalas espacio temporales sobre los factores R y LS del modelo Rusle. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 48, 241–270.
- Ríos, J. D. (2018). *Erosión hídrica y evolución del relieve en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés, Antioquia – Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Sharpley, A. N., & Williams, J. R. (1990). EPIC: The erosion-productivity impact calculator. *U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin*, 1768, 235. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9403696>
- Smith, D. D., & Whitt, D. M. (1948). Estimating Soil Losses from Field Areas of Claypan Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 12(C), 485–490. <https://doi.org/10.2136/sssaj1948.036159950012000c0108x>
- Usda. (2001). *Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2) HANDBOOK*. 2(March), 81. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs144p2_025079.pdf
- Wischmeier, R. R. (1955). *Group-centered and leader-centered leadership: An experimental study*.

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ALTERNATIVA

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1965). Predicting Rainfall-Erosion Losses From Cropland east of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. In *Agriculture handbook no. 282* (Issue 28).

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. In *USDA Agriculture Handbook 537*.

Zingg, A. W. (1940). Degree and length of land slope as it affects soil loss in run-off. *Agric. Engng.*

Zurita-Martínez, F. (2015). Manual de compostaje del agricultor. In *Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*. <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>