

---

ESTUDIO DEL RIESGO GENERADO POR LA EROSIÓN HIDRICA DE SUELO EN LA  
MICROCUENCA QUEBRADA MANCILLA DEL MUNICIPIO DE FACATATIVÁ,  
CUNDINAMARCA, MEDIANTE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO.

---

VICTOR ALFONSO AYALA CORTES

LUIS CARLOS LOZANO ANGULO

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director

ALONSO OCHOA HURTADO

Ing. Metalúrgico

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL

FACATATIVA

2016

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos primeramente a Dios, a nuestros padres que fueron las personas que siempre creyeron en nosotros y sin ellos la culminación de esta meta no hubiera sido posible.

Al cuerpo docente de la universidad de Cundinamarca por todos los conocimientos brindados con pasión y esfuerzo.

A nuestro director de trabajo de grado Alonso Ochoa Hurtado, el cual con mucha dedicación estuvo al frente de este proyecto.

A Carlos Parra por su colaboración brindada y aportes constructivos.

A los Evaluadores del proyecto, Ing. Gloria Patricia y el Ing. Camilo Monroy quienes de manera constructiva aportaron a este fin.

Agradecemos a la entidad pública CORPOICA por acogernos en sus instalaciones y brindarnos los conocimientos y las herramientas necesarias para el adecuado desarrollo de nuestro trabajo de grado

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mi madre Melva Cortes y Vladimir Ayala por sus consejos en los momentos difíciles, a mi Abuela Judith rey y Mi abuelo Alfonso Ayala, por el apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida porque sin ellos no estaría hoy en el lugar que me encuentro. A mis hermanos y hermanas por esa voz de aliento en los momentos que siempre necesite una sonrisa. A mi tía Carolina Ayala por el apoyo incondicional que me brindo en el trascurso de mi carrera profesional, a mi tío Stiven Ayala, por su dedicación en los momentos que necesitaba comprender algo, siempre encontró la forma para trasmitirme sus conocimientos. A mi Novia Mildred que con su apoyo siempre me motivo a no desfallecer, y siempre me impulso a culminar esta meta, gracias por todos los momentos vividos y conocimientos brindados.

**Víctor Alfonso Ayala Cortes**

Dedico este logro alcanzado primeramente a Dios, a mi madre Luz Mery Angulo y mi padre José Luis Lozano quienes me apoyaron siempre, me llenaron de su fortaleza y sabiduría para trazar este triunfo son mi motor y bendición. A mis abuelos Dina Angulo Y Horacio Calvo quienes fueron la inspiración para realizar mis estudios, ese anhelo de ver a su nieto realizarse como profesional fue el motor de esta lucha. A mi novia Dayana Suarez por su apoyo incondicional y sus buenos consejos.

**Luis Carlos Lozano Angulo**

**NOTA DE ACEPTACIÓN:**

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la universidad de Cundinamarca para optar al título de Ingeniero Ambiental.

---

Jurado

---

Jurado

## TABLA DE CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| 1. RESUMEN .....   | 14 |
| 2. INTRODUCCION .....  | 15 |
| 3. ANTECEDENTES .....  | 17 |
| 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                                     | 19 |
| 5. JUSTIFICACIÓN. ....   | 20 |
| 6. OBJETIVOS.....  | 22 |
| 6.1 Objetivo General.....  | 22 |
| 6.2 Objetivos específicos .....  | 22 |
| 7. MARCO TEORICO .....   | 23 |
| 7.1 Descripción Física del municipio de Facatativá, Cundinamarca. .... | 23 |
| 7.2 Zona de estudio y características municipio de Facatativá .....    | 24 |
| 7.3 El suelo.....  | 26 |
| 7.3.1 Clasificación del suelo por su capacidad de uso.....             | 27 |
| 7.4 Estimación del riesgo de erosión hídrica .....                     | 31 |
| 7.5 Modelo USLE .....  | 33 |
| 7.5.1. Erosividad.....   | 38 |
| 7.5.2 Erodabilidad .....   | 38 |
| 7.5.3 Longitud e Inclinación de pendiente.....                         | 38 |
| 7.5.4 Cobertura del suelo.....   | 39 |
| 7.6 Erosión .....  | 39 |
| 7.6.1. Erosión y tipos de erosión .....                                | 39 |
| 7.7.2 Agentes de la erosión.....                                       | 42 |
| 8. MATERIALES UTILIZADOS.....  | 43 |

|   |     |
|---|-----|
| 8.1 Materiales de campo.....  | 43  |
| 8.2 Materiales de laboratorio.....  | 43  |
| 9. METODOLOGÍA.....   | 44  |
| 9.1 Proceso de recopilación de información.....   | 44  |
| 9.2 Proceso análisis de la información.....   | 45  |
| 9.2.1 Sistemas de referencia utilizada.....   | 45  |
| 9.2.2 Metodología de investigación.....   | 45  |
| 9.2.3 Tipo de investigación.....  | 46  |
| 9.3 Modelo USLE.....  | 48  |
| 9.3.1 Factor R.....   | 52  |
| 9.3.2 Factor K.....   | 57  |
| 9.3.3 Factor LS.....  | 75  |
| 9.3.4 Factor C.....   | 83  |
| 10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....   | 86  |
| 10.1 USLE.....  | 86  |
| 10.1.1 Factor R.....  | 86  |
| 10.1.2 Factor K.....  | 88  |
| 10.1.3 Factor LS.....   | 95  |
| 10.1.4 Factor C.....  | 99  |
| 10.2 Mapa de pérdida de suelo USLE (mapa A).....  | 102 |
| 10.3 Propuesta de diseño de bioingeniería para el control y recuperación de una zona de ladera..... | 106 |
| 10.3.1 Implementación de terrazas.....  | 109 |
| 10.3.2 Proceso de reforestación.....  | 115 |
| 10.3.3 Muros de contención (gaviones de caja).....  | 123 |
| 11. Conclusiones.....   | 128 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 12.  | RECOMENDACIONES.....  | 130 |
| 13.  | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                     | 131 |
| 14.  | ANEXOS.....   | 141 |
| 14.1 | Anexo N°1 - Estaciones pluviométricas y datos de precipitación..... | 141 |
| 14.2 | Anexo N°2 – Tablas de cálculos IFM e Ie30.....                      | 146 |
| 14.3 | Anexo N°3 – Metodología pruebas físico-químicas del suelo.....      | 151 |
| 14.4 | Anexo N°4 - Plano propuesta de diseño obra de bioingeniería.....    | 160 |
| 14.5 | Anexo N°5 – Evidencias fotográficas.....                            | 161 |

## Índice de Imágenes

|  |    |
|--|----|
| Imagen 1. Microcuenca Mancilla .....   | 25 |
| Imagen 2. Localización satelital Microcuenca Mancilla, Facatativá – Cundinamarca.....                      | 26 |
| Imagen 3. Mapa de suelos de micro-cuenca quebrada Mancilla del municipio de Facatativa - Cundinamarca..... | 28 |
| Imagen 4. . Erosión Hídrica .....  | 40 |
| Imagen 5. Erosión Eólica .....   | 41 |
| Imagen 6. Erosión Antrópica .....  | 41 |
| Imagen 7. Modelos digitales de elevación .....   | 49 |
| Imagen 8. Mapa Raster de las direcciones de los cauces de la zona.....                                     | 50 |
| Imagen 9. Mapa Raster de las direcciones de los cauces de la zona.....                                     | 51 |
| Imagen 10. Delimitación de la microcuenca. ....  | 52 |
| Imagen 11. Triangulaciones estaciones meteorológicas.....  | 53 |
| Imagen 12. Estaciones y delimitación micro Cuenca Mancilla .....   | 56 |
| Imagen 13. Generación de Factor R.....   | 56 |
| Imagen 14. Metodología para la recolección de muestra certificada por CORPOICA .....                       | 58 |
| Imagen 15. Mapa de Pendientes.....   | 59 |
| Imagen 16. Puntos de Muestreo.....   | 60 |
| Imagen 17. Triangulo textural.....   | 61 |
| Imagen 18. Diagrama metodológico - determinación de textura (método Bouyoucos).....                        | 66 |
| Imagen 19. Generación de Factor K.....   | 67 |
| Imagen 20. Diagrama metodológico - determinación estructural .....   | 71 |

|  |     |
|--|-----|
| Imagen 21. Diagrama metodológico - determinación de materia orgánica .....                         | 72  |
| Imagen 22. Diagrama metodológico – determinación de conductividad hidráulica.....                  | 73  |
| Imagen 23. Calculo de factor F .....   | 76  |
| Imagen 24. Mapa Factor F .....   | 77  |
| Imagen 25. Calculo factor M.....   | 78  |
| Imagen 26. Mapa del Factor M .....   | 79  |
| Imagen 27. Calculo de factor L .....   | 80  |
| Imagen 28. Calculo factor S .....  | 81  |
| Imagen 29. Calculo factor LS .....   | 82  |
| <i>Imagen 30. Cobertura Vegetal</i> .....  | 84  |
| Imagen 31. Calculo factor C .....  | 85  |
| Imagen 32. Mapa Factor R.....  | 86  |
| Imagen 33. Mapa factor K.....  | 94  |
| Imagen 34. Mapa Factor L.....  | 96  |
| Imagen 35. Mapa Factor S .....   | 96  |
| Imagen 36. Mapa Factor LS (escorrentía) .....  | 98  |
| Imagen 37. Mapa Factor C .....   | 100 |
| Imagen 38. Resultado del Riesgo de erosión hídrica para la micro-cuenca quebrada mancilla<br>..... | 103 |
| Imagen 39. Zona diseño de bioingeniería .....  | 107 |
| Imagen 40. Zona de Estudio – obra de bioingeniería .....   | 108 |
| Imagen 41. Diseño de terrazas .....  | 109 |

|   |     |
|---|-----|
| Imagen 42. Adecuación de terrazas .....                                     | 110 |
| Imagen 43. Vista de perfil del diseño de terrazas .....                     | 111 |
| Imagen 44. Sección de terrazas .....  | 112 |
| Imagen 45. Diseño de reforestación .....                                    | 115 |
| Imagen 46. Sección de reforestación.....                                    | 117 |
| Imagen 47. Diseño de área de reforestación.....                             | 120 |
| Imagen 48. Diseño de gaviones .....   | 123 |
| Imagen 49. Dimensiones de los gaviones.....                                 | 125 |
| Imagen 50. Plano del diseño obra de bioingeniería .....                     | 160 |
| Imagen 51. Toma de muestra con barreno sin disturbar.....                   | 161 |
| Imagen 52. Muestras tamizadas y rotuladas .....                             | 161 |
| Imagen 53. Yoder hidráulico.....  | 162 |
| Imagen 54. Todas las muestras adecuadas para conductividad hidráulica ..... | 162 |
| Imagen 55. Montura de muestras sin disturbar en el permeámetro .....        | 163 |
| Imagen 56. Muestras Aforadas, prueba de Bouyoucos.....                      | 163 |
| Imagen 57. Muestras divididas por tamices, estabilidad estructural.....     | 164 |
| Imagen 58. Verificación de datos, % materia orgánica.....                   | 164 |
| Imagen 59. Zona de diseño obra de bioingeniería .....                       | 165 |

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Valores de C para cobertura vegetal.....  | 36 |
| Tabla 2 Valores de P para prácticas de conservación.....  | 37 |
| Tabla 3. Variables estudiadas.....  | 46 |
| Tabla 4. Estaciones climatológicas utilizadas para el cálculo de la erosividad de la lluvia en la microcuenca de la quebrada mancilla ..... | 54 |
| Tabla 5. Clasificación del IFM para Latinoamérica, propuesto por Lobo et al.(2009).....   | 54 |
| Tabla 6. Clasificación del factor de erosividad (R), propuesto por Rivera y Gómez (1991). .....   | 55 |
| Tabla 7. Corrección de temperatura.....   | 61 |
| Tabla 8. Datos Obtenidos de textura del suelo .....   | 64 |
| Tabla 9. Datos obtenidos de estructura del suelo.....   | 69 |
| Tabla 10. Datos obtenidos de conductividad hidráulica.....  | 74 |
| Tabla 11. Valores de C para cobertura vegetal.....  | 83 |
| Tabla 12. Clasificación de rangos típicos de R anual según (Rivera y Gómez, 1991).....  | 87 |
| Tabla 13. Clasificación de permeabilidad USLE .....   | 88 |
| Tabla 14. Resultados de permeabilidad por muestra.....  | 88 |
| Tabla 15. Resultados de textura por muestra.....  | 90 |
| Tabla 16. Resultados clasificación según triangulo textural por muestra .....   | 90 |
| Tabla 17. Clasificación según el estado de agregación (%) .....   | 91 |
| Tabla 18. Resultados de estructura .....  | 91 |
| Tabla 19. Resultados determinación de materia orgánica.....   | 92 |
| Tabla 20. Erodabilidad del suelo (K) .....  | 93 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 21. Valores del factor c, en cada unidad de vegetación de la microcuenca.....                    | 101 |
| Tabla 22. Calificación de pérdidas del suelo .....   | 104 |
| Tabla 23. Clasificación de acuerdo a la Perdida de suelo propuesta por Pérez, 2008 para Colombia. .... | 105 |
| Tabla 24. coordenadas zona de diseño.....  | 106 |
| Tabla 25. Costos de fabricación del taraceo .....  | 114 |
| Tabla 26. Costos de reforestación.....   | 122 |
| Tabla 27. Capacidad volumétrica de los gaviones .....  | 126 |
| Tabla 28. Costos de gaviones.....  | 127 |
| Tabla 29. Precipitación estación el Acomodo.....   | 141 |
| Tabla 30. Precipitación estación Venecia .....   | 142 |
| Tabla 31. Precipitación estación de Manjui.....  | 143 |
| Tabla 32. Precipitación estación el Tesoro .....   | 144 |
| Tabla 33. Precipitación estación las Margaritas.....   | 145 |
| Tabla 34. índices de fournier modificado "imf" y su adaptación a "ie30" Estación el Acomodo            | 146 |
| Tabla 35 índices de fournier modificado "imf" y su adaptación a "ie30" Estación Venecia.....           | 147 |
| Tabla 36. índices de fournier modificado "imf" y su adaptación a "ie30" Estación de Manjui....         | 148 |
| Tabla 37 índices de fournier modificado "imf" y su adaptación a "ie30" Estación el Tesoro.....         | 149 |
| Tabla 38. índices de fournier modificado "imf" y su adaptación a "ie30" Estación las Margaritas .....  | 150 |
| Tabla 39 Determinación de textura (Método de Bouyoucos).....   | 151 |
| Tabla 40 Determinación de estructura (método de estabilidad estructural Yoder). ....                   | 153 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 41 Determinación de MO (materia orgánica)..... | 156 |
| Tabla 42 Determinación de permeabilidad .....        | 158 |

## 1. RESUMEN

En el municipio de Facatativá, Cundinamarca, es muy reducida la información en cuanto a las zonas afectadas por procesos de erosión, desprendimiento y arrastre de las partículas de suelo causado por el agua y el viento, generando que no se tenga conocimiento del estado actual de este, por tal motivo la importancia del análisis del riesgo para determinar las áreas de mayor vulnerabilidad a la erosión hídrica en la microcuenca quebrada Mancilla.

El presente proyecto ha estructurado la siguiente metodología; primero, desarrollar recopilación de documentación de textos especializados de la temática propuesta, es decir la implementación de la ecuación Universal de Pérdida de Suelo, que sirva como base sólida para el desarrollo metodológico y su aplicación en condiciones locales, junto a la revisión de información, que permita estimar la estructura de la micro-cuenca; obteniendo así características socioeconómicas y otros aspectos que logren dar solución a la aplicación de la (USLE- Universal Soil Loss Equation). Luego realizar un registro de toda esta información recopilada, clasificada y destinada a la descripción de la micro-cuenca, para la aplicación del modelo matemático y finalmente generar un análisis del desarrollo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Este estudio pretende generar una interpretación, proyección y análisis de los resultados obtenidos en el proyecto.

Para el desarrollo del proyecto se implementó la plataforma digital ArcGis 10.2, el cual genero los mecanismos para la interpretación de los resultados obtenidos con la USLE, mediante diferentes “mapas de análisis”, con los cuales se identificó que la zona de la micro-cuenca quebrada Mancilla presenta un rango de erosión hídrica en toda su área de muy baja a baja, con un rango de erosión más alto de 5,31 a 7,44 Ton\*ha\*Año y de esta manera se propuso una obra de bioingeniería para la recuperación de una zona de ladera que presentaba problemas de erosión hídrica.

## 2. INTRODUCCION

Según la “Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura” (FAO - Food and Agriculture Organization), La generación de erosividad en una cuenca hidrográfica tiene incidencia directa en la vida útil de los afluentes. Los altos niveles de erosión en los ríos dan lugar a la perturbación física de las características hidráulicas del cauce. Ello puede tener efectos por la disminución de la profundidad, y favorecer a la ocurrencia de inundaciones, por la reducción de la capacidad del flujo de agua (R. Roose, 1982). En el municipio de Facatativá, Cundinamarca, las prácticas agrícolas, el cambio drástico en el uso del suelo, los diferentes procesos de urbanización dispersa, la actitud negativa de la población y la contaminación de los cuerpos de agua, generan un aumento de erosión en los suelos del municipio. (alcandía Facatativá, 2012). más específicamente en Microcuenca Quebrada Mancilla

Es por esto, que surge la iniciativa de estimar la erosión del suelo de la microcuenca quebrada Mancilla ubicado en el municipio de Facatativá, en el departamento de Cundinamarca - Colombia, lo cual se evalúa a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE- Universal Soil Loss Equation), propuesta por Wischmeier, W. y Smith, D., 1958.

Los SIG (Sistemas de Información Geográfica) y la USLE, permiten obtener resultados cuantitativos sobre el riesgo que genera un suelo degradado y como es necesario medir o estimar la erosión hídrica para un correcto manejo de una microcuenca garantizando mejorar la sinergia del ecosistema.

Según el “Plan de desarrollo económico, social, ambiental y de obras públicas todos somos Facatativá”, (consejo del municipio de Facatativá ,2012). son pocos los estudios que se han realizado integrando las medidas de conservación y protección de los recursos naturales dentro del municipio, tales como: agua, suelo, aire, fauna y vegetación. Esto ha influido en la reducción de terrenos óptimos para la agricultura, desaparición de bosques y cobertura vegetal, entre otros aspectos. La planificación integral de las cuencas busca definir el plan de manejo y desarrollo de una cuenca,

considerando criterios económicos, ambientales, sociales y de sostenibilidad para la región intervenida.

### 3. ANTECEDENTES

Previos al desarrollo del presente proyecto se encontraron dos estudios realizados en Colombia, específicamente en la región del eje cafetero y en la cuenca hidrográfica del río Sisga. A continuación, se presenta una breve descripción de los principales resultados:

- **Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de Caldas.**

En la zona cafetera colombiana la erosión constituye uno de los problemas agrícolas y ambientales más serios, debido a lluvias de gran intensidad y duración, a la diversidad de suelos y las fuertes pendientes. por esta razón es necesario conocer su magnitud para realizar planes de uso y manejo eficientes y focalizar esfuerzos donde realmente se necesitan. La investigación del Centro Nacional de investigación de Café (Cenicafé) se propuso con el objetivo de generar un instrumento para estimar el riesgo a la erosión, allí ellos emplearon la ecuación universal de pérdida de suelo con modificaciones (RUSLE) utilizando el análisis multiplicativo de los factores erosividad (R), erodabilidad (K), longitud y gradiente de la pendiente (L y S).

La erosividad del estudio de Cenicafé se determinó mediante el Índice de Erosividad EI30 calculado a partir del índice de Fournier modificado  $IFM = E (p^2/P)$  y espacializados mediante interpolación Kriging; la erodabilidad o factor K se determinó en forma directa en el laboratorio, utilizando un simulador de lluvias y muestras de suelo alteradas, obtenidas en 72 puntos de muestreo, los cuales fueron georreferenciados con el fin de espacializar la información; los factores longitud y el gradiente de la pendiente se determinaron con la ayuda del modelo de elevación digital. Con la información obtenida de las pérdidas de suelo por erosión y la profundidad del horizonte A, fue posible diferenciar zonas con riesgo a la erosión apoyado con sistemas de información geográfica y se encontró que el 78% de la zona estudiada presenta alto riesgo a la erosión potencial. (Ramírez, F & Hincapié, E, 2009)

- **Estimación de la generación de sedimentos en la cuenca hidrográfica del río Sisga con base en la ecuación universal de pérdida de suelo**

Este estudio de trabajo de grado generado por un estudiante de la universidad de la Salle en Bogotá, como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Ambiental y sanitario, tiene como objetivo la estimación cuantitativa de la generación de suelo erosionado de la cuenca Hidrográfica del río Sisga y aportado al embalse que recibe este mismo nombre, ubicado en el municipio de Chocontá, Cundinamarca, mediante la aplicación de La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, la cual comprende los conceptos universalmente conocidos de los agentes generadores de erosión tales como el potencial erosivo de las gotas de lluvia, los componentes topográficos como la longitud y grado de pendiente, además la textura del suelo erodado, el uso/cobertura y prácticas de conservación del suelo.

Para el desarrollo del proyecto de la universidad la Salle. se contó con la herramienta del Sistema de Información Geográfica SIG, que dio los mecanismos para la interpretación de los resultados obtenidos. La cuenca del río Sisga por su configuración morfométrica, tiene potencial en la generación de sedimentos. A partir de los resultados obtenidos en la aplicación de la USLE se estimó que la tasa media de aporte de sedimentos de toda la cuenca hidrográfica al embalse es de 1007,4 Ton/Ha-Año. (Galvis, D, 2008).

#### **4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Las prácticas agrícolas, el cambio drástico en el uso del suelo, los diferentes procesos de urbanización dispersa, la actitud negativa de la población y la contaminación de los cuerpos de agua en el municipio de Facatativá, Cundinamarca más específicamente en Microcuenca Quebrada Mancilla, generan el aumento de erosión. (alcandía Facatativá, 2012). Mediante una deteriorada conservación de la Microcuenca y sus nacederos de agua en la parte alta. Estas acciones se ven reflejadas en la pérdida de suelo, ocasionando movimientos de la tierra que disminuyen la vida útil de los diferentes afluentes que son abastecidos por esta fuente principal de recurso hídrico, debido a la alteración de las características físicas, químicas y biológicas del agua produciendo efectos sobre la salud de los habitantes o el agotamiento de fuentes de agua hasta llegar a tener una mayor escases del recurso.

Debido a la problemática descrita anteriormente, surgió la iniciativa de generar un estudio relacionado con la erosión hídrica en la microcuenca quebrada Mancilla, a través de la siguiente pregunta de investigación. ¿Cuál es el riesgo de erosión hídrica que se genera en la microcuenca quebrada Mancilla del municipio Facatativá, Cundinamarca, en el año 2016?

## 5. JUSTIFICACIÓN.

La mala conservación de las cuencas y sus nacedores de agua en la parte alta, se ve reflejada en la pérdida de suelo, debido a que se generan movimientos de la tierra ocasionando efectos negativos como la sedimentación en las partes bajas de la red de distribución del recurso hídrico, las cuales se ven afectadas con el tiempo porque su capacidad de almacenar agua se va disminuyendo drásticamente, (J. Spears, 1982).

Existen diferentes modelos para determinar y cuantificar la erosión de un suelo determinado, como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Universal Soil Loss Equation) (USLE, Wischmeier y Smith, 1978); el Método OnstadFoster (AOF), (Onstad y Foster, 1975), la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelos (Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE), (Renard et.al.,C.A. Jones R.H. Griggs, J.R. Williams y R. Srinivasan,1992), y la Ecuación Universal de Perdida de Suelo Modificada (MUSLE). Pero para obtener un grado de exactitud elevado la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) en combinación con la (MUSLE), es la opción más acertada, debido a las variables que manejan las ecuaciones y su afinidad con las condiciones de la zona de estudio.

El nuevo modelo RUSLE -USLE revisado- permitirá estimaciones más precisas de pérdidas de suelo, ya que se ha desarrollado un factor de erodabilidad K que varía estacionalmente, nuevos algoritmos para largo y pendiente de laderas, la capacidad de calcular factores LS para laderas con diferentes formas y un nuevo factor para calcular el término manejo C con sub-factores que representan cobertura, dosel y rugosidad (Renard et al., 1991)

A través de su uso se puede estimar la pérdida de suelo en zonas que colinden con una fuente hídrica. Esto ayudará a conocer cuáles son las fuentes antrópicas, climatológicas o naturales que están influenciando en este fenómeno de erosión y poder generar alternativas como planes de contingencia, manejo y de mitigación en las zonas que se establezcan como suelos que sean clasificados como mediana, fuerte o extremadamente Erodable.

La quebrada Mancilla es de vital importancia para la población que se encuentra ubicada en sus alrededores, ya que se constituye en la única fuente de abastecimiento de agua potable. Además, que se utiliza también para actividades económicas como la agricultura y la ganadería, sin omitir que es el eje central de la biodiversidad de la zona y que sin este la micro-fauna, fauna y flora serían los más perjudicados.

## **6. OBJETIVOS.**

### **6.1 Objetivo General.**

Determinar las áreas con riesgo de erosión hídrica, en la microcuenca quebrada Mancilla del municipio Facatativá, mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), utilizando sistemas de información geográfica (S.I.G).

### **6.2 Objetivos específicos**

1. Estimar la pérdida de suelo en ton/año en la microcuenca quebrada Mancilla mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE).
2. Generar mapas para los factores de erosividad (R), erodabilidad (K), Longitud de pendiente (LS) y cobertura vegetal (C) de la micro-cuenca quebrada mancilla.
3. Clasificar las zonas de mayor riesgo de erosión hídrica en la Microcuenca Quebrada Mancilla.
4. Proponer un diseño de bioingeniería para el control y recuperación de una zona de ladera afectada por problemas de erosión hídrica.

## 7. MARCO TEORICO

### 7.1 Descripción Física del municipio de Facatativá, Cundinamarca.

El Municipio de Facatativá, se encuentra ubicado geográficamente en el extremo occidental de la Sabana de Bogotá D.C. a 36 Km de la ciudad capital, cerrándose en dos ramificaciones de la cordillera Oriental, constituidas por los cerros de "Aserraderos" y "Santa Elena", de los cuales uno sigue la dirección de Occidente Sur, formando el cerro de Manjui y el otro de Occidente-Oriente formando los cerros de Churrasi , Piedrecitas y Mancilla, para terminar en el punto de la vuelta del cerro, en el camino que conduce a Subachoque. Dentro de su geografía se destacan el alto de La Tribuna con una altura aproximada de 3.000 metros, ubicado al occidente de la Vía Albán; el alto de Las Cruces con 2800 metros, ubicado al sur de la Vía Anolaima por el Camino Real; el cerro Manjuy con 3150 metros; los caminos reales de Zipacón, Anolaima al Gualivá (Sasaima): sendero vereda Mancilla la Selva San Rafael, Camino Antiguo Ferrocarril Mancilla El Dinte. (Alcandía de Facatativá, 2016)

Presenta una extensión total de 159.6 Km<sup>2</sup> 159.6 Km<sup>2</sup> 159.6 Km<sup>2</sup> (15.960 Has), de los cuales 154.5 Km<sup>2</sup> 154.5 Km<sup>2</sup> 154.5 Km<sup>2</sup> pertenecen a la zona rural, y 5.1 Km<sup>2</sup> 5.1 Km<sup>2</sup> 5.1 Km<sup>2</sup> a la zona urbana. (Plan de ordenamiento territorial Facatativá, 2002)

#### **Vegetación:**

La Flora del municipio de Facatativá es muy variada, cuenta con árboles propios de clima frío, nativos y extranjeros, es decir, traídos de otras latitudes. Entre estos tenemos especies nativas de bosques propios de la Sabana. (Alcandía de Facatativá, 2016)

Las especies más predominantes son:

- Oreopanax spp. (Mano De Oso)
- Vallea Stipullaris (Raque)

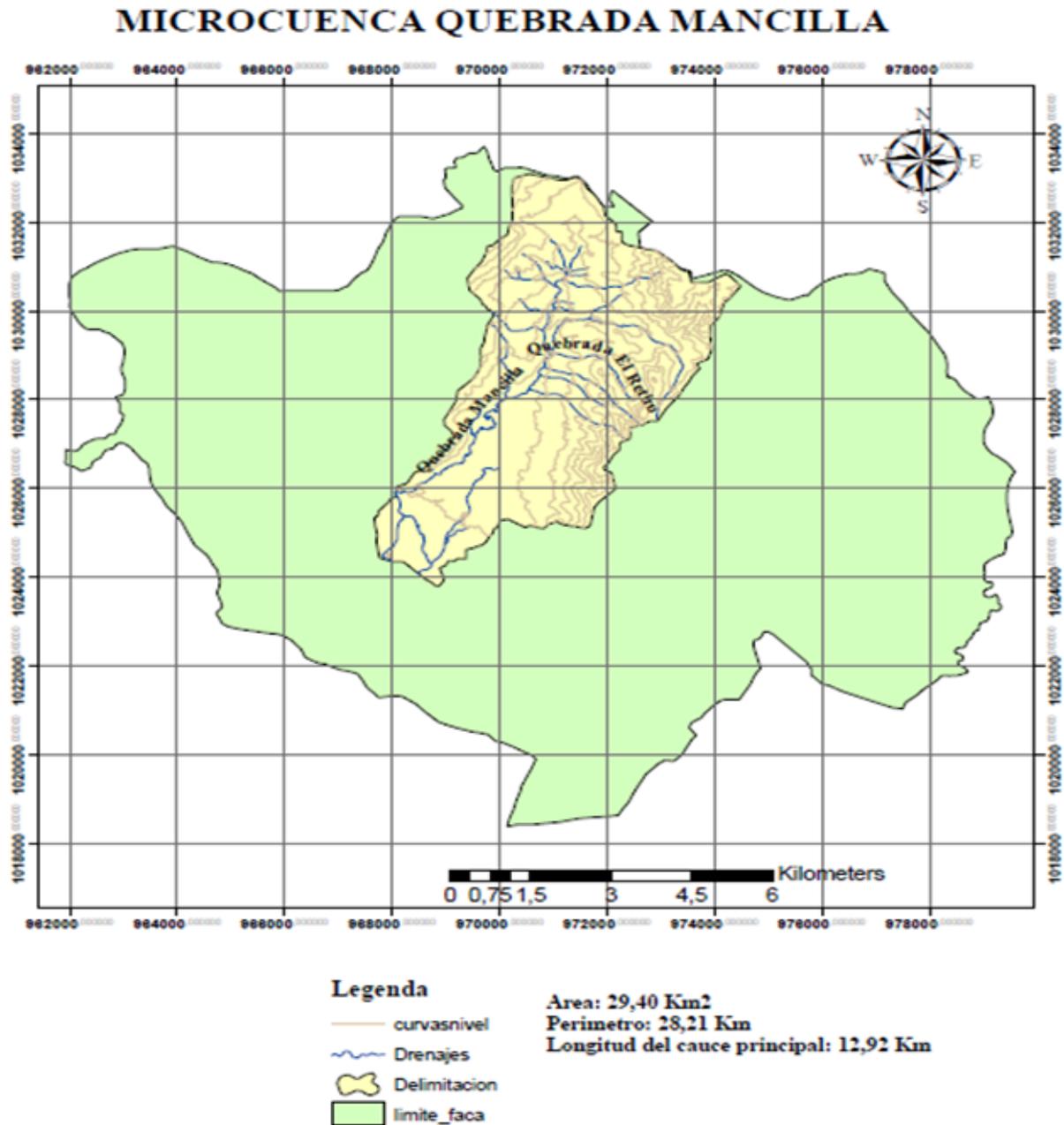
- Myrcianthes Leucoxylla (Arrayan)
- Piper Bogotense (Cordoncillo)
- Xylosma Spiculiferum (Corono)
- Duranta mutisii (Espino garbanzo)
- Miconia Squamulosa (Esmeraldo)
- Tibouchina Grossa (siete Cueros)
- Macleania Rupestris (Uva De Monte)
- Chusquea Scandens (Chusque)
- Gramíneas o Poáceas
- Hesperomeles Spp (mortiño)
- Myrica Parviflora (Laurel)

El relieve del municipio de Facatativá es quebrado, con vegetación natural en algunas áreas, utilizado en agricultura y ganadería; la textura de los suelos es franco-arenosa, rico en material orgánico y ácidos. Es notorio el fenómeno de erosión pluvial consecuencia del fuerte escurrimiento de la tierra en épocas de lluvias, por el avance acentuado de la deforestación (Plan de ordenamiento territorial Facatativá, 2002)

## **7.2 Zona de estudio y características municipio de Facatativá**

El proyecto se realizó en el municipio de Facatativá Cundinamarca más específicamente en Microcuenca Quebrada Mancilla (Imagen N°1).

Imagen 1. Microcuenca Mancilla

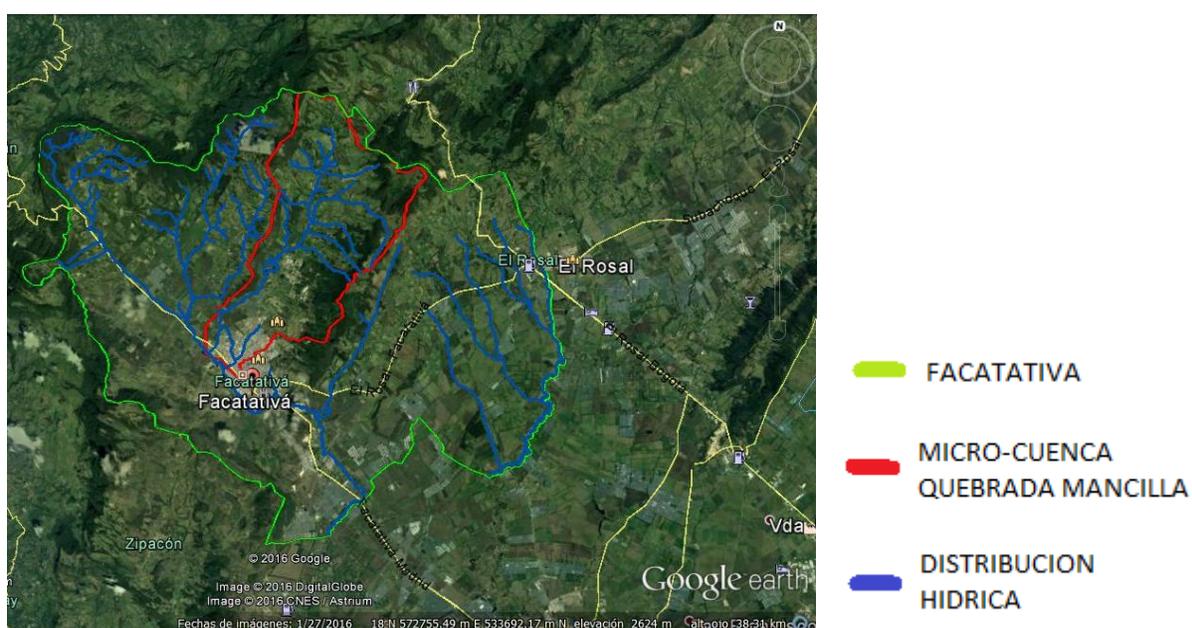


Fuente: autores

La Imagen N°2 muestra la zona de estudio delimitada de color rojo dentro del municipio el cual se encuentra delimitado de color verde y toda la distribución de la red hídrica del municipio la cual se denota de color azul. Consta de un área de 29,40 km<sup>2</sup>, a una altitud de 2586 m sobre el nivel del mar; donde se encuentra ubicadas las

quebradas Mancilla y el Retiro, la vegetación de la zona es muy variada, cuenta con árboles propios de clima frío, como: especies nativas de bosques propios de la Sabana principalmente Cedro nogal, Cedro de altura, Roble, Encenillo, Aguacatillos, Laurel, Amarillo, Tagua, Arrayán, Sietecueros, Gaque, Tuno, Raque, Canelo de páramo, Aliso, Mano de Oso entre otros, y los pastizales o praderas están constituidos por pastos nativos como Calamagrostis, Rabo de zorro, Llantén, pajonales y plantados como kikuyo, ryegrass, falsa poa y tréboles.

Imagen 2. Localización satelital Microcuenca Mancilla, Facatativá – Cundinamarca.



Fuente: Google Earth (27 de enero de 2016)

### 7.3 El suelo

Al suelo se lo considera como una capa arable, un recurso natural generalmente compuesto de un sistema dinámico y muy complejo en la cual se derivan procesos que involucran componentes físicos, químicos e incluso vivos para aportar en el desarrollo de las plantas y fundamental para el desarrollo de cualquier cultivo agrícola.

También considerado como un recurso no renovable debido a lo frágil y difícil que cuesta recuperarlo para que siga aportando al desarrollo de los recursos naturales existentes en nuestro medio.

### 7.3.1 Clasificación del suelo por su capacidad de uso

La clasificación de las tierras por su capacidad de uso, es una interpretación basada en los efectos combinados del clima y de las características poco modificables de las geoformas y los suelos, en cuanto a limitaciones en su uso, capacidad de producción, riesgo de deterioro del suelo y requerimientos de manejo. La evaluación se hace con base en las propiedades de los suelos, relieve, drenaje, erosión y clima, de cada uno de los componentes de las diferentes unidades cartográficas. (IGAC,200)

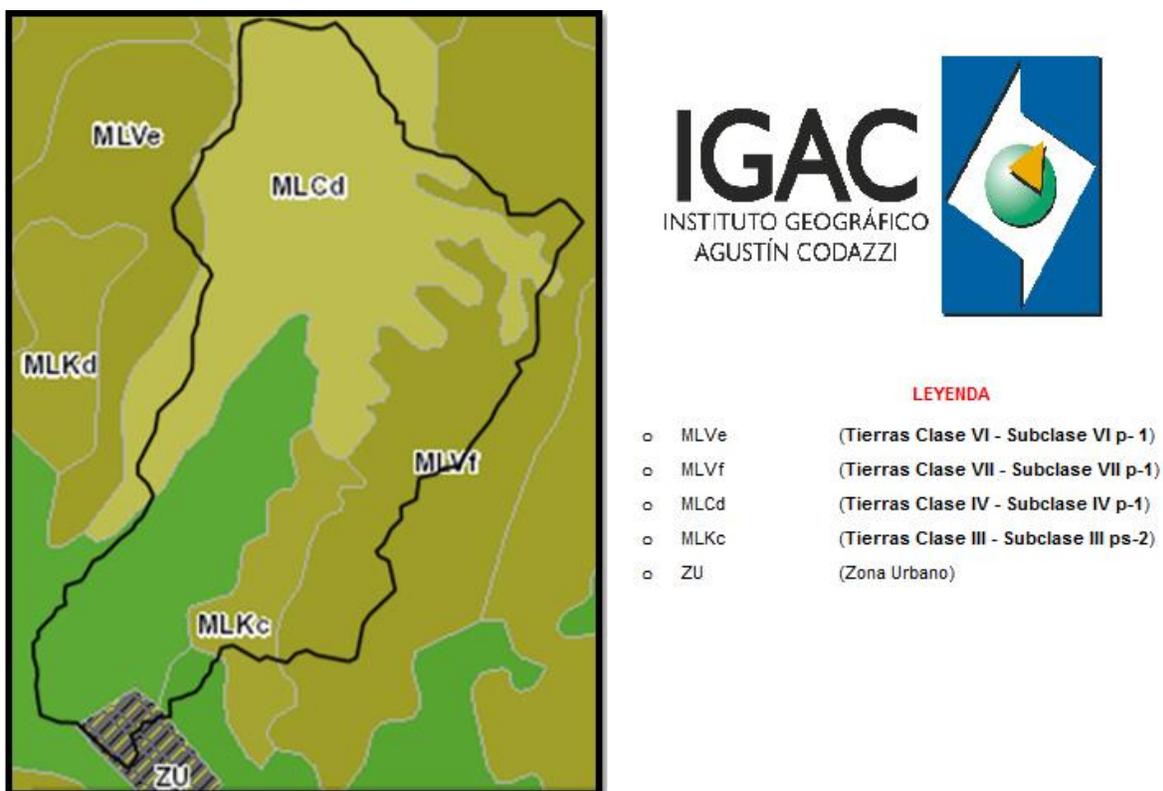
Las Clases de tierras son grupos de suelos que presentan el mismo grado relativo de limitaciones y riesgos, son ocho (8) y se designan con números romanos de I a VIII, el número e intensidad de los limitantes de uso que presentan las tierras aumenta paulatinamente de tal manera que al llegar a la Clase VIII las tierras tienen tantas y tan severas limitaciones que no permiten actividad agropecuaria alguna y solo se recomienda la conservación natural y/o la recreación. (Arévalo, 2012)

Las Subclases son divisiones de la clase que tienen el mismo número y grado de limitaciones. En el departamento de Cundinamarca se definieron 6 clases, 22 subclases y 47 grupos de manejo.

Los limitantes que determinan las Subclases son cinco y se designan con letras minúsculas que se agregan al número de la clase; éstas son: p, pendientes; e, erosión actual; h, exceso de humedad en el suelo por capa de agua o encharcamientos e inundaciones; s, limitaciones en la zona radicular y c, clima adverso. (Arévalo, 2012)

Para la micro-cuenca quebrada Mancilla ubicada en el municipio de Facatativá se identifican 4 clases y subclases de tipos de suelos, según la clasificación por la capacidad de uso, que establece el IGAC,2000 las cuales se describen e ilustran a continuación (ver Imagen n° 3).

Imagen 3. Mapa de suelos de micro-cuenca quebrada Mancilla del municipio de Facatativa - Cundinamarca



Fuente: IGAC

- **Tierras Clase VI - Subclase VI p- 1**

Las tierras integrantes de esta agrupación, conforman las unidades cartográficas MLFe, MKCe, MLVe, MLCe y MLle, dentro de relieves de espinazos, crestones y lomas del paisaje de montaña en clima frío húmedo.

Los suelos son superficiales a moderadamente profundos, bien drenados, de texturas medias a gruesas, fuertemente ácidos, con baja saturación con aluminio y fertilidad baja a moderada. Las limitaciones de uso más severas son las pendientes ligeramente escarpadas con gradientes de 25 a 50%, en menor proporción la fertilidad natural baja y la profundidad efectiva de los suelos, limitada en sectores.

En la actualidad estos suelos se encuentran dedicados a la ganadería extensiva con pastos naturales y en bosques naturales protectores-productores muy intervenidos. La unidad tiene capacidad para utilizarse en ganadería extensiva con pastos naturales,

asociada con actividades de agroforestería (frutales, caucho, pino, eucalipto) o para bosques protectores productores con labores de entresaca controladas o para regeneración espontánea de la vegetación.

Las prácticas recomendadas son implementación de potreros arbolados, evitar el sobrepastoreo, fomentar el crecimiento de la vegetación natural, cultivos de cobertura y cultivos en fajas en contorno, barreras vivas y terrazas de huerto. (IGAC,200)

- **Tierras Clase VII - Subclase VII p-1**

Pertencen a esta subclase las tierras de las unidades MLFf, MKCf, MLVf y MLIf, que se ubican en los tipos de relieve de espinazos, crestones, lomas y filas-vigas dentro del paisaje de montaña en clima frío húmedo.

Los suelos son superficiales a moderadamente profundos, bien drenados, de texturas medias a gruesas, fuertemente ácidos, con baja saturación con aluminio y fertilidad baja a moderada. Los limitantes más severos para el uso de las tierras son las pendientes moderadamente escarpadas que oscilan entre 50 y 75%, la profundidad efectiva limitada de los suelos y el bajo contenido nutricional.

Gran parte de la unidad conserva la vegetación natural, pero en los últimos años se ha realizado una tala selectiva de las especies de mayor valor comercial degradando el bosque. Las áreas sometidas a tala total se han dedicado a la siembra de cultivos transitorios de bajo rendimiento y a pastos, para ganadería extensiva.

Esta unidad tiene vocación forestal para producción, conservación y protección de los recursos naturales. Es importante en la explotación de las especies forestales dar un manejo técnico e integral, realizando prácticas que protejan la vegetación y conserven el equilibrio del ecosistema. Se deben evitar talas y quemas del bosque nativo y disminuir la extracción de madera con labores de entresaca (IGAC,200).

- **Tierras Clase IV - Subclase IV p-1**

Conforman esta agrupación las tierras de las unidades MKCd, MLVd, MLTd, MLCd, MLKd y MLJd, propias de los relieves de lomas, cuevas, crestones, abanicos aluviales y glacis coluviales dentro del clima frío húmedo y en menor proporción muy húmedo.

Los suelos se caracterizan por derivarse de cenizas volcánicas poco evolucionadas, son profundos, de texturas medias y finas, bien drenados, con fertilidad baja a moderada, moderadamente ácidos y baja saturación de aluminio. Los mayores limitantes para el uso de estas tierras son las pendientes fuertemente inclinadas con gradientes hasta del 25%, la fertilidad natural baja de los suelos y la aparición sectorizada de fenómenos de remoción en masa.

Actualmente se dedican a cultivos de subsistencia y a la ganadería extensiva con pastos naturales e introducidos, igualmente hay sectores con cobertura de bosque natural intervenido.

Estas tierras tienen vocación para ser utilizadas con cultivos anuales de subsistencia (papa, arveja, fresa), algunos frutales y pastos introducidos (azul orchoro y falsa poa) para ganadería semi-intensiva y extensiva para producción múltiple. Algunas prácticas y tratamientos especiales requeridas por estos suelos consisten en aplicación de fertilizantes, implementación de sistemas de potreros arbolados y siembras en contorno, evitando el sobrepastoreo que origina procesos de remoción en masa (soliflujión). En las zonas que existen procesos remontantes actuales, se sugiere la siembra de especies arbóreas de raíces profundas, impedir el pastoreo sin control y las prácticas culturales y mecanización agrícola excesiva antes de la siembra (IGAC,2000).

- **Tierras Clase III - Subclase III ps-2**

Conforman esta subclase las tierras de las unidades MLTc, MLCc, MLKc, MLJb, MLJc, MLNa y MLNb, localizadas en relieves de cuevas, lomas, glacis coluvial, abanicos y vallecitos dentro del clima frío húmedo. Los suelos son moderadamente profundos a profundos, bien drenados, de fertilidad moderada, moderadamente ácidos y de texturas medias. Las limitaciones más severas de uso de los suelos se deben a la pendiente moderadamente inclinada, que restringe la plena mecanización agrícola, a la fertilidad moderada, la reacción moderadamente ácida y la presencia por sectores de fragmentos pedregosos en la superficie.

En la actualidad estas tierras se encuentran dedicadas a cultivos transitorios y semi-permanentes como maíz, papa, frutales y potreros con pastos naturales e introducidos

para ganadería extensiva. La unidad tiene aptitud para agricultura con cultivos anuales semi-comerciales como maíz, papa, frutales, hortalizas, arveja, fresa y pastos introducidos, para ganadería semi-intensiva de doble propósito. Presentan algunas restricciones para el uso de maquinaria agrícola, por tanto se sugiere su control. Se deben implementar algunas prácticas especiales como la aplicación periódica de fertilizantes y de enmiendas, rotación de cultivos y potreros, control eficiente de malezas, plagas y enfermedades (IGAC,200).

#### **7.4 Estimación del riesgo de erosión hídrica**

En la actualidad se vienen empleando diversos modelos de erosión empíricos ampliamente ensayados que permiten predecir y calcular un aproximado en la degradación de los tipos de suelos, tanto en erosión hídrica (lluvia), como eólica (viento). Se tienen algunos modelos que se vienen utilizando en ensayos tomando muy en cuenta su ubicación geográfica y sus tipos de modelos como los siguientes: U.S.L.E, ANSWERS, EPIC, RUSLE, EROSIÓN 3D, USPED, SEAGIS entre otros.

En los suelos se presentan varios factores que son los causantes de generar la erosión, estos causantes por lo general son: la temperatura, la vegetación, la lluvia y el suelo, siendo los principales generadores del desgaste y desequilibrio de sus componentes, lo cual ocasiona el desprendimiento de sus partículas que conforman el suelo.

Algunos factores que intervienen en este proceso son:

- La intensidad y frecuencia de las lluvias de acuerdo a la precipitación.
- El relieve del terreno
- La longitud de la pendiente
- La cobertura vegetal existente
- El Tipo de suelo

- El manejo o conservación del suelo

En los estudios para la estimación de la erosión del suelo, se pueden aplicar dos métodos importantes para obtener resultados en un lugar determinado, estos métodos son conocidos como: directo e indirecto. Los métodos directos son las aplicaciones en los estudios técnicos de investigación por método de parcelas experimentales obteniendo resultados acordes a la metodología aplicada. Los métodos indirectos están diseñados para obtener mediante modelos matemáticos las estimaciones en las pérdidas de suelo (Martin J , 2008).

Según Morgan (1999): “La erosión es un daño que tradicionalmente se ha asociado a la agricultura en zonas tropicales y semiáridas, y es importante por sus efectos a largo plazo sobre la productividad y sostenibilidad agrícola. Pero es, sin embargo, un problema que presenta mayor significación al afectar además a las tierras forestales, al transporte y áreas de espaciamiento. También la describe a la erosión como un proceso de desgaste del suelo, generalmente lento debido a la influencia de algún factor físico o agente erosivo de los cuales el agua y aire son los principales causantes. Este proceso mecánico consta de dos fases, una de ellas es el desprendimiento de las partículas del suelo y el otro consiste en el arrastre de estas partículas, teniendo efectos directos sobre la fertilidad del suelo, ya que en la capa superficial es donde se concentran gran parte de los nutrientes; pérdidas de recursos hídricos ya que al no haber nutrientes no crecen las plantas que son quienes ayudan a retener el agua en el subsuelo”.

Los efectos negativos que puede conllevar la erosión del suelo son diversos: sobre terrenos agrícolas la erosión puede desencadenar la disminución de la profundidad cultivable y la fertilidad de los suelos, intensificando así la dependencia de fertilizantes y causando incluso el abandono de los terrenos agrícolas. En otros casos si la erosión es muy intensa puede alterar el funcionamiento de los ríos, la capacidad de retención de zonas inundables e incluso la colmatación y eutrofización de los embalses y masas de agua. (L.C. Alatorre & S. Beguería, 2009).

Por lo visto la erosión hídrica viene a ser una pérdida progresiva de los componentes del suelo como consecuencia de la dispersión de sus agregados, los cuales son arrastrados por el agua hasta los lugares más bajos, contribuyendo a la degradación del suelo y a la pérdida de su fertilidad, siendo una amenaza para la productividad agrícola en la zona de la microcuenca quebrada Mancilla.

## 7.5 Modelo USLE

La USLE, (Ibañez Asensio, S.; Moreno Ramón, H.; Gisbert Blanquer, JM, 2012), consta de un modelo cuantitativo de evaluación directa de la pérdida de suelo por erosión, ayudar a calcular la pérdida que estos tienen en un lapso de tiempo, espacio y características específicas.

Este modelo se estima a partir de la modelización en un SIG, de la respuesta del sistema natural del suelo frente a la precipitación fluvial, y toma como datos de ingreso diversos factores que influyen en el proceso de erosión tales como la erosividad, erodabilidad, las características topográficas de relieve, el uso del suelo y las prácticas de conservación que, mediante su fácil aplicabilidad y resultados puntuales de la USLE, se estiman la pérdida de suelo en Toneladas\*ha\*año.

El Modelo USLE ha permitido estimar las pérdidas por efecto de la erosión hídrica en diferentes partes del mundo, dada la facilidad de su aplicación, en la Ecuación (1) se encuentra el modelo USLE

$$A = R * K * L * S * C * P \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Dónde:

- R = un factor de erosividad de la lluvia,
- K = un factor de erodabilidad del suelo,
- L = el factor longitud de pendiente
- S = un factor pendiente,

- C= un factor de cultivo y
- P= un factor prácticas de cultivo.

A continuación, se da una descripción de los anteriores factores:

- **Factor "R."**

Para el cálculo de la ecuación USLE El factor R es determinado con base a los datos suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), por medio del índice modificado de Fournier (Ecuación 2) reportada por Arnoldus (1978).

$$R = IFM$$

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{Pt^2}{Pi} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

IMF: Índice Modificado de Fournier

Pt: Precipitación media anual en milímetros (mm)

Pi: Precipitación media mensual en milímetros (mm)

- **Factor "K".**

Es el valor más complejo de obtener debido a la toma de datos que se debe realizar "Insitu" a la zona de estudio. Se toman muestras de suelo para obtener los valores correspondientes a:

- Textura
- Estructura
- % de materia orgánica
- Permeabilidad

Con el conjunto de valores obtenidos se calcula el promedio de K para cada suelo, a partir del cual se establece una ecuación de regresión en función de las variables representativas de sus propiedades físicas.

La regresión establecida viene expresada por la Ecuación 3:

$$100 * K = 10^{-4} * 2,71 * M^{1,14} * (12 - a) + 4,20 * (b - 2) + 3.23 * (c - 3) \quad (\text{Ecuación 3})$$

El factor de erodabilidad del suelo (factor K) es un valor cuantitativo que para su cálculo es necesario contar con información de las características físicas del suelo, tales como:

- **M=** factor representativo de la textura.

Se calcula mediante la Ecuación 4.

$$M = [100 - \% \text{ arcilla}] * [\% (\text{limo} + \text{arena muy fina})] \quad (\text{Ecuación 4})$$

- **a=** % de materia orgánica
- **b=**número correspondiente a la estructura
- **c=** clase de permeabilidad del perfil, según la codificación del *USDA-Soil Survey*

- **Factor “LS”.**

Para determinar el factor LS se utilizaron los mapas de curvas de nivel del municipio de Facatativá y de esta manera, hallar las pendientes de la micro-cuenca quebrada mancilla.

**El factor L,**

Longitud de la ladera viene definido por la Ecuación 5:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde  $\lambda$  es la longitud en metros y  $m$  un exponente influenciado principalmente por la interacción entre la longitud y la pendiente.

El exponente de longitud de pendiente “m”, puede ser calculado con la Ecuación 6:

$$m = 0.1342 * (LN(\Theta)) + 0.192 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Dónde:

m = Exponente de la longitud de la pendiente

$\Theta$  = Angulo de pendiente [%]

### Factor S

El factor de inclinación de la pendiente (S) se expresa por la Ecuación 7.

$$S = \frac{0,43 + 0,30s + 0,043s^2}{6.613} \quad (\text{Ecuación 7})$$

s=% de pendiente de la ladera

- **Factor “C”.**

El factor C se establece tomando como base el mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra obtenida a partir de las orto-fotos, asignándole los valores de (C) de factor de cobertura vegetal tomados de la Tabla N°1 el cual es propuesto por Motta, 1999.

*Tabla 1 Valores de C para cobertura vegetal*

| USO DEL SUELO  | FACTOR C |
|--|----------|
| Zonas industriales o comerciales                         | 1,0      |
| Zonas de extracción minera                               | 1,0      |
| Viñedos  | 0,525    |
| Tierras de labor secano                                  | 0,435    |
| Terrenos regados permanentemente                         | 0,507    |
| Terrenos principalmente agrícolas con vegetación natural | 0,435    |
| Tejido urbano discontinuo                                | 1,0      |
| Tejido urbano continuo                                   | 1,0      |
| Pastizales naturales                                     | 0,130    |

| USO DEL SUELO                                   | FACTOR C |
|---|----------|
| Olivares  | 0,525    |
| Mosaico de cultivos                             | 0,435    |
| Matorrales esclerófilos                         | 0,153    |
| Matorral boscoso en transición                  | 0,153    |
| Bosque de frondosas (superior al 7%)            | 0,041    |
| Bosque de coníferas (inferior al 2%)            | 0,186    |
| Bosque de coníferas (>2% hasta <7%)             | 0,086    |
| Bosque de coníferas (superior al 7%)            | 0,041    |
| Lámina de agua                                  | 0,0      |
| Frutales  | 0,525    |
| Espacios con vegetación escasa                  | 0,900    |
| Cultivos anuales asociados cultivos permanentes | 0,435    |
| Bosque mixto (inferior al 2%)                   | 0,186    |
| Bosque mixto (>2% hasta 7%)                     | 0,086    |
| Bosque mixto (superior al 7%)                   | 0,041    |
| Bosque de frondosas (inferior al 2%)            | 0,186    |
| Bosque de frondosas (>2% hasta <7%)             | 0,086    |

Fuente: Motta, 1999.

- **Factor “P”.**

Para la determinación de este factor se hace un reconocimiento de la zona de estudio y de forma visual se determinan diferentes prácticas de conservación, y así mediante de factor de conservación que propone Wischmeier y Smith, (1978) y asignarle un valor (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de P para prácticas de conservación

| Pendiente (%) | Cultivo en contorno o curvas de nivel |                               | P para cultivo en terrazas |
|---------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
|               | P*                                    | Longitud máxima de ladera (m) |                            |
| 1-2           | 0.6                                   | 122                           | 0.12                       |
| 3-5           | 0.5                                   | 91                            | 0.1                        |
| 6-8           | 0.5                                   | 61                            | 0.1                        |
| 9-12          | 0.6                                   | 37                            | 0.12                       |
| 13-16         | 0.7                                   | 24                            | 0.14                       |
| 17-20         | 0.8                                   | 18                            | 0.16                       |
| 21-25         | 0.9                                   | 15                            | 0.18                       |

Fuente: Wischmeier y Smith, (1978)

### **7.5.1. Erosividad**

Se constituye en la capacidad que tienen factores externos al suelo para erosionarlo de esta manera se puede tomar como erosividad al factor clima, precipitación, viento Etc, (Jorgan et al, 2000).

En el factor de erosividad la lluvia se convierte en el factor principal, ya que esta se relaciona directamente a través de la fuerza con la que caen las gotas de agua y la energía que crea el arrastre de las partículas del suelo que al final constituyen el factor R en la USLE.

### **7.5.2 Erodabilidad**

La erodabilidad del suelo o como se puede interpretar en la Ecuación Universal de Perdida de Suelo “factor K”, es una descripción cuantitativa que indica la susceptibilidad del suelo al ser erosionado, junto con el factor de erosividad son considerados los factores más importantes para la predicción de la erosión y refleja el hecho que diferentes suelos se erosionan a diferente tasa cuando los demás factores que afectan la erosión son los mismos.

El cálculo del factor K en el modelo USLE, requiere de mucho tiempo, equipos y mano de obra, lo que hace de este factor costoso, por lo que en la mayoría de los casos se busca modelar a partir de relaciones estadísticas, resultados experimentales y las propiedades del suelo del área objeto de estudio.

### **7.5.3 Longitud e Inclinación de pendiente**

Lo que corresponde a la longitud de la pendiente y la influencia del relieve puede ser determinante de la cantidad de suelo perdido a consecuencia de una lluvia.

En cuanto al ángulo de la pendiente este modifica el tiempo de permanencia de la lámina de agua que se desliza por la superficie del terreno, independiente del volumen de la escorrentía generado. En terrenos donde la inclinación es baja el agua

tiene mayor posibilidad de infiltrarse que en terrenos de inclinación considerada, en las que la escorrentía se desliza más rápido hacia zonas de menos cota.

Por otro lado, cuanto mayor sea la longitud y el ángulo de inclinación de una ladera mayor será mayor la energía cinética que alcanzara el agua por la superficie, por lo que será mayor su capacidad de desagregación y transporte que se refleja en el poder erosivo.

#### **7.5.4 Cobertura del suelo**

Este factor muestra el efecto de la cubierta vegetal en la pérdida de suelo y se puede interpretar como la relación entre la pérdida de suelo de un área con una vegetación dada y un sistema de manejo específico y la pérdida de suelo en un área o parcela limpia, arada en el sentido de la pendiente a intervalos regulares. Los valores del factor C son bajos cuando el suelo está protegido del impacto de la lluvia y de la acción de la escorrentía superficial, y viceversa, es decir que cuando se obtienen valores altos del Factor C, el suelo es más propenso a la erosión.

En concreto el Factor C, para el modelo USLE es el efecto de las prácticas de manejo de los suelos, donde se tienen en cuenta la cobertura de la zona y el uso del suelo.

### **7.6 Erosión**

#### **7.6.1. Erosión y tipos de erosión**

La erosión consta del arrastre de partículas de suelo por diversas variables como la acción del agua y el viento. Principalmente es un proceso natural, es decir que sucede de manera normal en el tiempo. Pero si bien es un proceso natural, las acciones del hombre hacen que este proceso suceda en un tiempo más corto de lo normal, alterando el equilibrio en la formación de los suelos y su conservación; Teniendo en cuenta lo anterior se dicen que existen dos tipos de erosión: Natural y Antrópica.

## **Erosión del suelo de forma natural:**

*Erosión Hídrica:* este tipo de erosión es aquella que se produce por el agua lluvia, consta de las consecuencias de esta precipitación a través del golpeteo de sus gotas sobre la superficie del suelo y el cambio de factores en los regímenes de humedad generando el arrastre y desprendimiento de partículas, generando la pérdida de masa del suelo (ver Imagen n° 4).

Este tipo de erosión depende de una serie de factores que son vitales a la hora de determinar el grado de afectación entre los cuales se encuentra: la intensidad de la lluvia que se puede citar como el factor primordial ya que la velocidad de penetración del agua al suelo en determinado lapso de tiempo establece o no, la generación escorrentía; otro factor que incide en este proceso es la Pendiente la cual depende a su vez del Grado y Longitud del terreno, estos pueden incrementar la velocidad y volumen de escorrentía.

Imagen 4. . Erosión Hídrica



Fuente: [carm.org](http://carm.org)

*Erosión Eólica:* este tipo de erosión se presenta o tiene lugar cuando las partículas sueltas que se hallan sobre la superficie del suelo son barridas, arrastradas o levantadas por el aire (ver Imagen n° 5).

Imagen 5. Erosión Eólica



Fuente: [www.astromia.com](http://www.astromia.com)

**Erosión del Suelo de forma Antrópica:**

Este tipo de erosión como hace alusión, se presenta por acción del hombre, ya que en esta no intervienen directamente las fuerzas naturales, sino la intervención humana mediante sus prácticas y tecnologías (ver Imagen n° 6).

Imagen 6. Erosión Antrópica



Fuente: [www.cridlac.org](http://www.cridlac.org)

## 7.7.2 Agentes de la erosión

En la erosión encontramos que los principales agentes que intervienen en el proceso de la erosión en el suelo vienen a ser el agua y el viento. Ahí tenemos que cuando el agente causal es el agua, la erosión se denomina hídrica, mientras que cuando el agente causal es el viento, se denomina eólica y se da en áreas de desierto y zonas costeras que en muchos casos forman las llamadas dunas de arena. Existen otros agentes causantes de la erosión que en menor escala y extensión causan movimientos en el suelo, tales como la gravedad, la maquinaria, y algunos procesos biológicos.

### 7.7.2.1 Precipitación

La precipitación se la puede definir como el conjunto de nubes que se conforman con la saturación de la vaporación del agua y la atmósfera que generan cuando cae a la superficie en forma de lluvia, llovizna, nieve y granizo. La precipitación es cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre, incluyendo toda forma de agua (lluvia, nieve, granizo, escarcha).

Las precipitaciones se distribuyen en la superficie como respuesta a variaciones temporales en el ámbito de un año, en efecto siempre hay meses en que las precipitaciones son mayores que en otros.

## 8. MATERIALES UTILIZADOS

### 8.1 Materiales de campo

- ✓ Cartografía básica escala 1:25000 del área objeto de estudio (227-II-A,227-II-C,227-I-D)
- ✓ GPS
- ✓ PBOT 2002 del municipio de Facatativá
- ✓ Fotografías aéreas del área objeto de estudio
- ✓ Cámara fotográfica
- ✓ Software Arcgis 10,2,2

### 8.2 Materiales de laboratorio

- Para realizar la recolección de muestras se utilizó:
  - ✓ Hidrómetro 152H
  - ✓ Cronometro.
  - ✓ Tubos PVC de 15 a 30cm
  - ✓ Herramientas para excavación (palas, picas, barretón,).
  - ✓ Bolsas herméticas para la recolección de muestras de suelo.
- Para el análisis de las muestras y recolección será necesario usar:
  - ✓ Laboratorios con disposición para el análisis de las muestras de suelos, laboratorio Universidad de Cundinamarca, extensión Facatativá.
  - ✓ Laboratorios con disposición para el análisis de las muestras de suelos, laboratorio CORPOICA, via Bogotá-Funza Carretera 50, Mosquera, Cundinamarca.
  - ✓ Para el almacenamiento de las muestras se requiere de bolsas herméticas con su respectivo rotulado.
  - ✓ Permeámetro

## 9. METODOLOGÍA

### 9.1 Proceso de recopilación de información

La metodología se basó en un diseño experimental; debido a que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental.

El diseño experimental brinda una serie de pautas, que permiten identificar las variables más pertinentes que se deben manipular, de qué manera, cuántas veces es necesario repetir el experimento y en qué orden, y de esta forma poder establecer la necesidad de una relación de causa-efecto.

Para el estudio de la erosión en la Microcuenca de la quebrada mancilla mediante el método de la Ecuación de Pérdidas de Suelo, se requirió de datos pluviométricos procedentes de estaciones climatológicas ubicadas dentro y fuera del área en estudio (el Tesoro, el Acomodo, las Margaritas, Venecia, Manjui). También se emplearon los sistemas de información geográfica, así como el software informático del programa ArcGis 10.2 y sus herramientas Desktop de ESRI, utilizando varias aplicaciones como: ArcMap, ArcToolbox y ArcCatalog, para la generación de mapas geográficos cuyo resultado es una geodatabase representada mediante un modelo digital. Se procedió a recopilar y evaluar información digital básica de coberturas y bibliografías de estudios realizados de erosión hídrica en el área de estudio, así como datos de edafología, clima, topografía de la micro-cuenca y aspectos agrícolas capturados y procesados por las siguientes Instituciones Públicas como: El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) el cual se encarga del manejo de la información científica, hidrológica, meteorológica y todo lo relacionado con el medio ambiente en Colombia, y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (C.A.R) del municipio de Facatativá.

Para este proyecto se tuvieron en cuenta distintos puntos de muestreo, los cuales se distribuyeron en la quebrada Mancilla desde su nacedero hasta la desembocadura al río Botello.

## 9.2 Proceso análisis de la información

### 9.2.1 Sistemas de referencia utilizada

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC, entidad gubernamental encargada de los sistemas geodésicos nacionales de referencia, desea que sus usuarios sean partícipes del proceso de apropiación, modernización y aprovechamiento de los avances científicos y técnicos relacionados con la generación de datos espaciales de alta calidad. En consecuencia, el IGAC promueve la adopción de MAGNA-SIRGAS como sistema de referencia oficial del país, en reemplazo del Datum BOGOTÁ, definido en 1941. MAGNA-SIRGAS garantiza la compatibilidad de las coordenadas colombianas con las técnicas espaciales de posicionamiento, por ejemplo los sistemas GNSS (Global Navigation Satellite Systems), y con conjuntos internacionales de datos georreferenciados. (IGAC, 2004)

### 9.2.2 Metodología de investigación.

Dentro de la metodología empleada se utilizó la propuesta por (U.S.D.A), Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, donde se determina que la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, es el método más óptimo para la realización de estudios de erosión del suelo. El Modelo USLE ha permitido estimar las pérdidas por efecto de la erosión hídrica en diferentes partes del mundo, dada la facilidad de su aplicación, (FAO, 2000)

Los datos obtenidos se interpretaron a través de la ecuación empírica USLE, para la obtención de un dato cuantitativo de la erosión hídrica en la Microcuenca Quebrada Mancilla. Por medio de una herramienta digital (ARGIS 10.2) el cual es un software especializado para los sistemas de información geográfica (SIG), determinando cada una de las variables mediante diferentes mapas geográficos. Por medio de información recopilada, in-situ, gráfica y bibliográficamente.

Se procedió a recopilar información de vital importancia como lo es (textura, estructura, permeabilidad, % de materia orgánica) del suelo mediante trabajos de campo cuya información se analizó con el programa ArcGis 10.2 y también se recurrió a datos de

estudios anteriores relacionados con los factores de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (R, K, LS, C, P) como, “Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de Caldas” (Ramírez, F & Hincapié, E, 2009) y Estimación de la generación de sedimentos en la cuenca hidrográfica del río Sisga con base en la ecuación universal de pérdida de suelo (Galvis, D, 2008), siendo necesario entrar en contacto con instituciones encargadas de realizar los estudios geográficos como son: El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (C.A.R) del municipio de Facatativá; para así poder elaborar, ordenar y codificar la información en una base de datos para el estudio con información confiable y actualizada, a su vez insertar en el sistema de información geográfica (S.I.G), el mapa geográfico del municipio de Facatativá, el cual fue de vital importancia para la obtención de elementos importantes como: estado y uso de la tierra, drenaje superficial, curvas de nivel (cada 10m), geología, y realizar una adecuada delimitación del área de estudio.

Una vez obtenida la información alfanumérica se procedió a realizar diferentes procesos para digitalizar la información como: interpolación, intersección y elaboración de tablas en Excel, cada uno de los procesos aplicados dieron resultados, los mapas de las variables (R, K, LS, C, P), de la ecuación USLE del área estudiada.

### 9.2.3 Tipo de investigación

Para el adecuado desarrollo de la investigación se tuvieron en cuenta diferentes variables a identificar como se puede observar a continuación (ver Tabla 3).

Tabla 3. Variables estudiadas.

| <b>Variable</b> | <b>Descripción</b> | <b>Indicador</b> | <b>Escala</b> | <b>Instrumento/<br/>investigación</b> |
|-----------------|--------------------|------------------|---------------|---------------------------------------|
| Erosión hídrica | Pérdida de suelo   | USLE             | Ton/ha/año    | Método indirecto<br>USLE              |
| factor r        | Precipitación      | Formula de       | Valores de    | Excel - ArcGis                        |

| Variable                   | Descripción                                     | Indicador                                      | Escala  | Instrumento/<br>investigación            |
|----------------------------|---|--|---|--|
| (erosividad)               |   | Fournier<br>modificado                         | precipitación (mm)  | 10.2 (spline)                            |
| Factor K<br>(erodabilidad) | Propiedades<br>físico-<br>químicas del<br>suelo | Textura  | Arena, limo, arcilla<br>(%)   | Método de<br>Bouyucos                    |
|                            |   | Estructura                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Granular Muy fina (&lt;1mm).</li> <li>• Granular Fina (&lt;1-2 mm).</li> <li>• Granular Medio (2-10 mm).</li> <li>• Blocosa, laminar, masiva.</li> </ul> | Método de<br>tamizado                    |
|                            |   | Conductividad<br>hidráulica<br>(permeabilidad) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rápida.</li> <li>• Rápida moderada.</li> <li>• Moderada.</li> <li>• Moderada a lenta.</li> <li>• Lenta.</li> <li>• Muy lenta</li> </ul>                  | Método de<br>carga<br>constante          |
|                            |   | materia<br>orgánica                            | % de materia<br>orgánica  | Análisis de<br>carbono<br>orgánico total |
| Factor de<br>relieve (LS)  | Longitud del<br>terreno.                        | DEM<br>(Modelo digital                         | Msnm (metros sobre<br>el nivel del mar)   | ArcGis 10.2                              |

| <b>Variable</b>            | <b>Descripción</b>        | <b>Indicador</b>                           | <b>Escala</b>   | <b>Instrumento/<br/>investigación</b> |
|----------------------------|---------------------------|--|---|---------------------------------------|
|                            | Grado de pendiente.       | de elevaciones)                            |   |                                       |
| Factor de vegetación (C)   | Cobertura Vegetal         | Imágenes Landsat 7 y Rapid Eye             | Tabla de valores del factor C, valores que fluctúan entre 1,0 a 0,001 | ArcGis 10.2                           |
| Factor de Conservación (P) | Prácticas de Conservación | Orto fotos y reconocimiento visual in-situ | Protección y cobertura vegetal  | ArcGis 10.2                           |

Fuente: autores

En el factor P (Prácticas de conservación del suelo), no se realizó el respectivo cálculo por la falta de información disponible dentro de la micro-cuenca quebrada Mancilla y por no existir prácticas relevantes de conservación en la zona de estudio, por tal motivo se le asignó un valor de “1” a dicho factor.

### 9.3 Modelo USLE.

#### RECOPILACION DE INFORMACION PRIMARIA

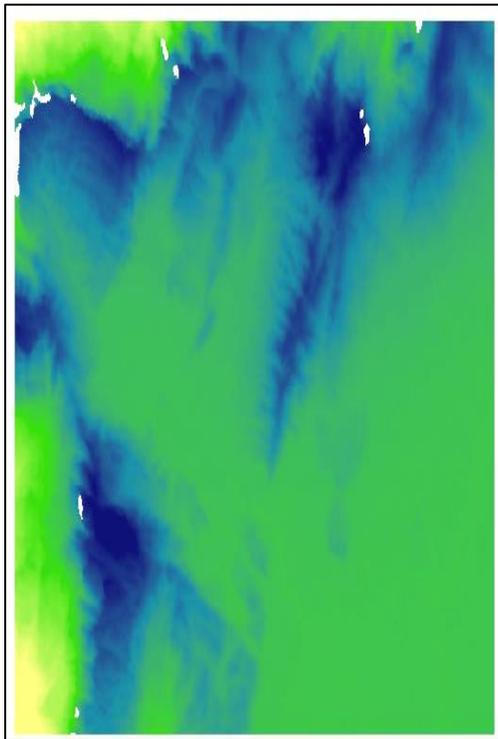
Para realizar el estudio de la erosión en la micro-cuenca quebrada Mancilla mediante la metodología y ecuación universal de pérdida de suelo (U.S.L.E), se hizo un análisis bibliográfico acerca del tema de interés, posteriormente se recolectaron datos de las estaciones climatológicas y meteorológicas que están dentro y por fuera de la Microcuenca, las cuales son propuestas por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). De igual manera se recopiló del PBOT de la alcaldía municipal de Facatativá los mapas de cobertura vegetal y usos del suelo del año 2014.

#### DELIMITACION DE LA MICROCUENCA QUEBRADA MANCILLA

Para realizar la delimitación de la microcuenca Quebrada Mancilla se requirió del Software Arcgis 10.2.2 en donde:

1. Se introdujeron los modelos digitales de elevación de la zona recolectados del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC (ver Imagen 7).

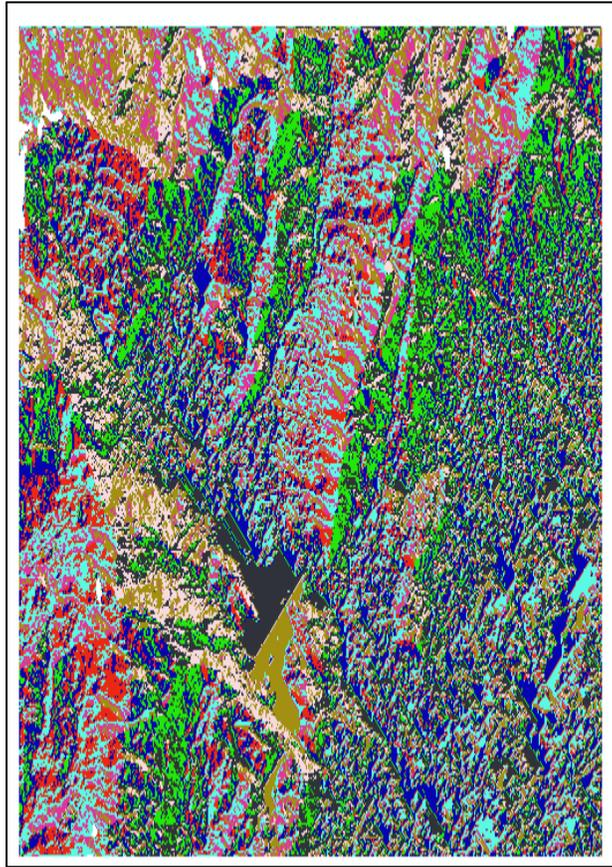
Imagen 7. Modelos digitales de elevación



Fuente: autores

2. Seguido a esto se procede a seleccionar en el arctoolbox la opción de (spatial analyst tools/ hidrology/ fill), allí se crea un mapa raster de la zona.
3. Posterior a esto se selecciona la opción (spatial analyst tools/ hidrology/ Flow direction), en donde se generará un mapa raster de las direcciones de los cauces de la zona (ver Imagen 8).

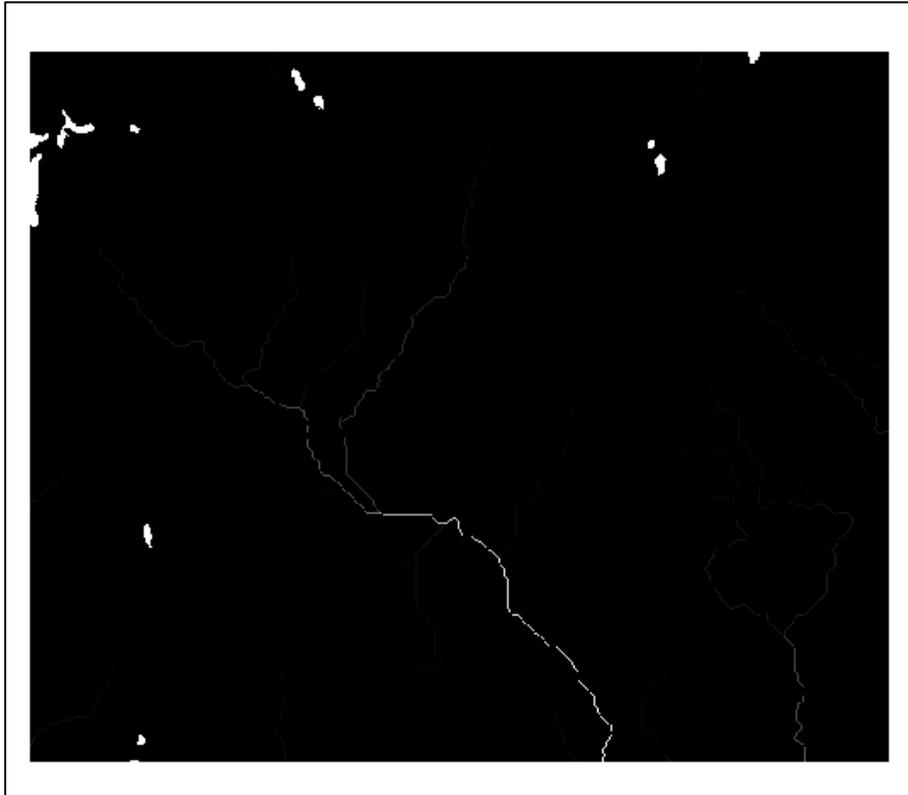
Imagen 8. Mapa Raster de las direcciones de los cauces de la zona.



Fuente: autores

4. A continuación de esto se selecciona la opción (spatial analyst tool/ hidrology/ Flow accumulation ), en donde se genera un mapa raster de ponderación en donde se evidencia la mayoría de los cauces de la zona de estudio en un color blanco (ver Imagen 9).

Imagen 9. Mapa Raster de las direcciones de los cauces de la zona.

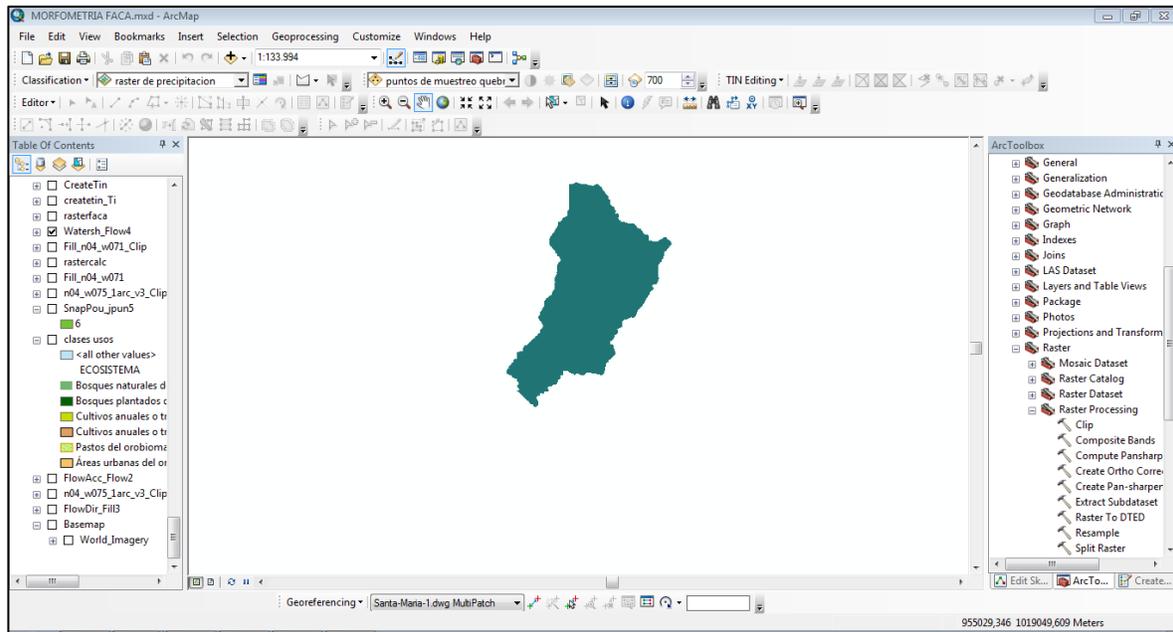


Fuente: autores

5. El siguiente proceso es hacer un zoom al raster anteriormente generado y selecciona un punto a partir del cual se delimitará la microcuenca hidrográfica, para este caso se seleccionó en la convergencia entre la Quebrada Mancilla y Rio Botello, para esto se selecciona la opción arcCatologo en donde se creará un nuevo feature class, para crear una capa de tipo punto, el cual será el punto que se va a trazar la cuenca.
6. Posteriormente se selecciona la opción (spatial analyst tolos/ extraction/extract values to point), esta opción extraerá los atributos del punto generado en el paso anterior.

7. Luego se selecciona la opción (spatial analyst tolos/ hidrology/ watershed), la cual generara la delimitación de la microcuenca (ver Imagen 10).

Imagen 10. Delimitación de la microcuenca.



Fuente: autores

8. Por último se selecciona la opción (conversión tolos/ from raster/ raster to polygon), allí se convertirá el mapa raster generado de la Microcuenca Quebrada Mancilla en formato polígono o shapefile.

### 9.3.1 Factor R.

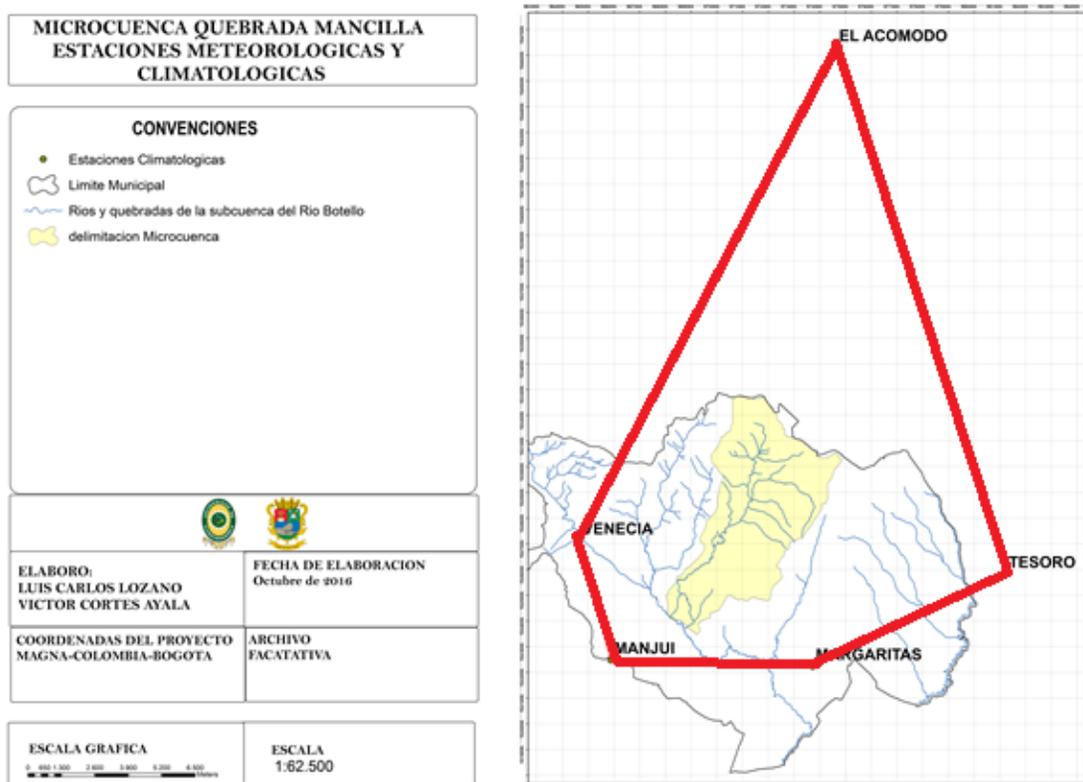
El factor R determina la agresividad o erosividad de la lluvia, lo cual se expresa en  $(Mj \cdot mm / ha \cdot hr \cdot año)$ , Para el cálculo de la ecuación USLE es determinado con base a los datos suministrados por El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

- Para el valor cuantitativo exacto, La micro-cuenca de la quebrada mancilla, no cuenta con estaciones pluviográficas que permitan extraer los datos de

intensidad de la lluvia a intervalos de 30 minutos, debido a esto, se tomó la decisión de evaluar el factor mediante el índice modificado de Fournier, (IFM) donde:

Para la determinación del factor de erosividad se utilizaron los registros mensuales de lluvia de 5 estaciones pluviográficas (Tabla 4), con un registro de lluvia de 11 años entre el año 2005 y 2015 (Tablas de precipitación Anexo N° 1), estas se encontraban ubicadas cerca a la micro-cuenca quebrada mancilla, para que en el momento de realizar la triangulación de las mismas (Imagen N°11), abarcaran la totalidad del área de estudio.

Imagen 11. Triangulación de las estaciones meteorológicas



Fuente: autores

Tabla 4. Estaciones climatológicas utilizadas para el cálculo de la erosividad de la lluvia en la microcuenca de la quebrada mancilla

| # | Código  | Nombre     | Latitud       | Longitud      | Altitud | Promedio precipitación media anual (mm) 2005-2015 |
|---|---------|------------|---------------|---------------|---------|---|
| 1 | 2306516 | El acomodo | 05° 01' 3,6"  | 74° 18',34,8" | 2046.5  | 2232,6  |
| 2 | 2120629 | Venecia    | 04°50' 39,2"  | 74° 23' 58,2" | 846.1   | 923,06  |
| 3 | 2120174 | Manjui     | 04°48' 88"    | 74° 23' 18,4" | 922.7   | 1006,65   |
| 4 | 2120069 | Tesoro     | 04° 48' 72"   | 74° 18' 23.1" | 774.3   | 844,76  |
| 5 | 2120071 | Margaritas | 04° 49' 57,1" | 74° 15' 0,7 " | 1804.5  | 1974,04   |

Fuente: autores

Para los valores faltantes de precipitación en cada una de las estaciones se procedió a completar los registros de intensidad de lluvia por medio del método de regresión lineal.

Mediante los registros de lluvia y la Ecuación (2), reportada por Arnoldus (1978), mencionada anteriormente, se obtuvo el IFM de cada estación para cada año, los cuales fueron promediados y clasificados de acuerdo a los rangos descritos por lobo *et al.* Para el índice modificado de Fournier (IFM) en Latinoamérica ver Tabla N° 5.

Tabla 5. Clasificación del IFM para Latinoamérica, propuesto por Lobo et al.(2009)

| Clasificación | Clase | Rango       |
|---------------|-------|-------------|
| Muy bajo      | 1     | Menor de 60 |
| Bajo          | 2     | 60 a 90     |
| Moderado      | 3     | 90 a 120    |
| Alto          | 4     | 120 a 160   |
| Muy alto      | 5     | Mayor a 160 |

Fuente: autor

Para obtener una aproximación de factor (R) de la ecuación universal de pérdida de suelo a partir del IFM, se correlacionaron los valores promedios mensuales del IFM obtenidos, con los valores promedios mensuales del factor R o EI30 de la USLE. Estimado por Rivera y Gómez, en el período de 11 años (Tablas de cálculos IFM e I30 Anexo N°2).

Rivera y Gómez (1991) evaluaron la erosividad anual de las lluvias para la zona cafetera de Colombia por el método de Hudson (Tabla N° 6).

Tabla 6. Clasificación del factor de erosividad (R), propuesto por Rivera y Gómez (1991).

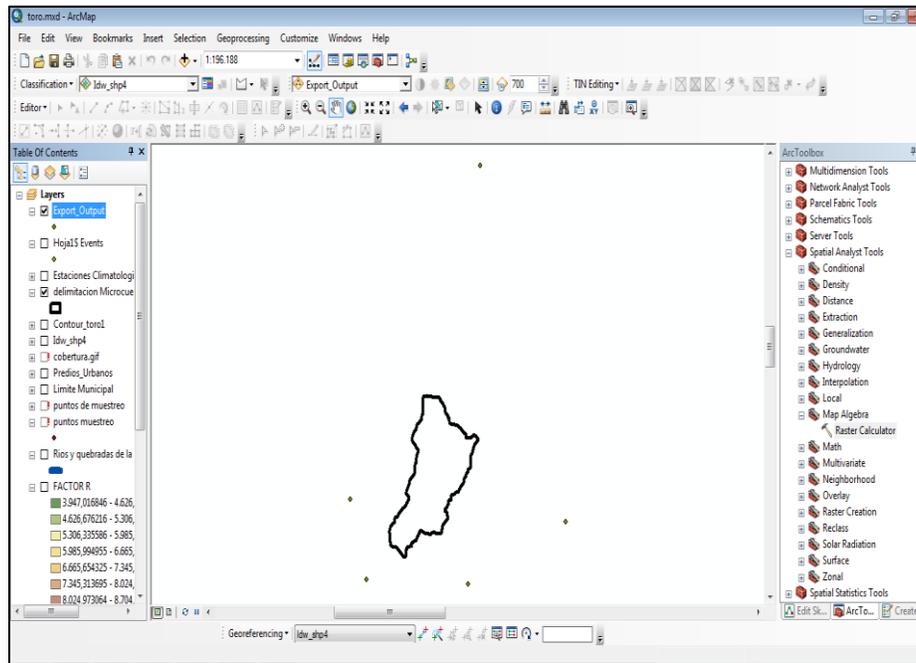
| <b>Clasificación</b>             | <b>Código</b> | <b>Erosividad (R)<br/>(Mj*mm/ha*hr*año),</b> |
|----------------------------------|---------------|--|
| <b>Natural</b>                   | 1             | Menor de 1.000                               |
| <b>Muy bajo</b>                  | 2             | 1.000 - 2.500                                |
| <b>Bajo</b>                      | 3             | 2.500 – 5.000                                |
| <b>Moderada</b>                  | 4             | 5.000 – 7.500                                |
| <b>Alta</b>                      | 5             | 7.500 – 10.000                               |
| <b>Muy alta</b>                  | 6             | 10.000 – 15.000                              |
| <b>Severa</b>                    | 7             | 15.000 – 20.000                              |
| <b>Extremadamente<br/>severa</b> | 8             | Mayo a 20.000                                |

Fuente: autores

Posteriormente, se elaboró el mapa del factor R (erosividad). Para la realización del mapa, se interpolaron los datos de precipitación media anual obtenidos por las 5 estación pluviométrica, más cercanas al área de estudio a través de una herramienta digital (ArcGis), descrita a continuación.

1. Inicialmente se tomaron 5 estaciones climatológicas y meteorológicas de la CAR, las cuales rodean la Microcuenca Quebrada Mancilla (Imagen 12).

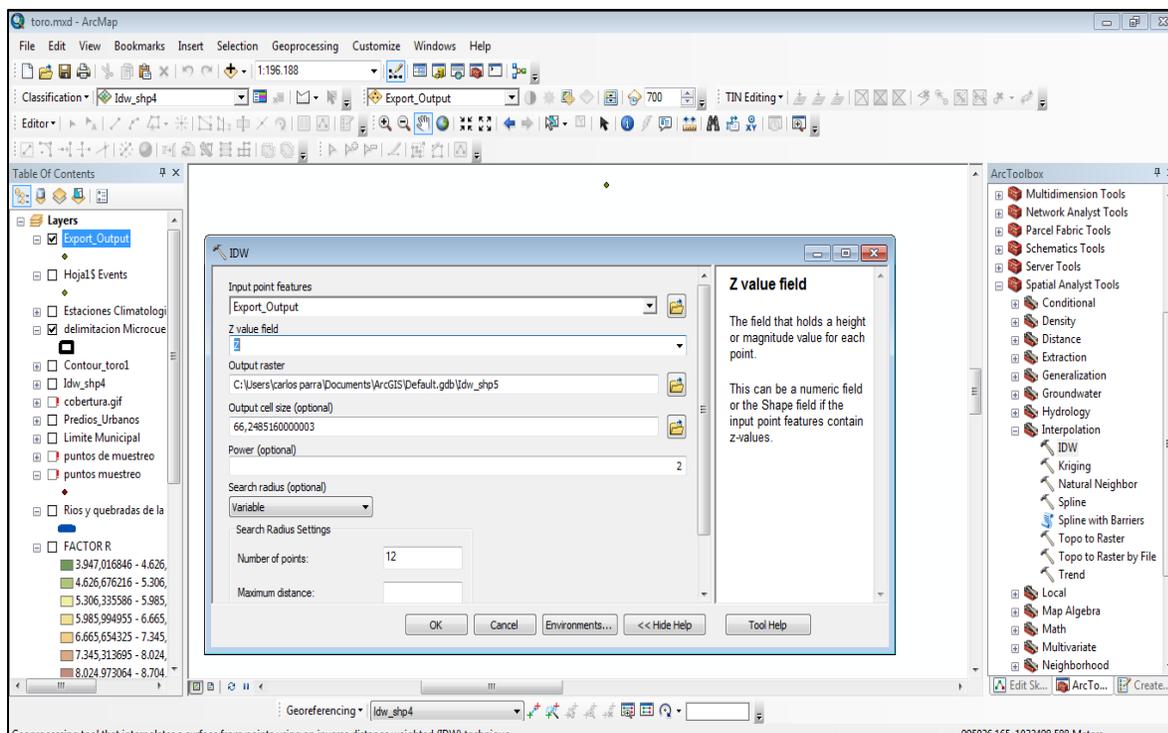
Imagen 12. Estaciones y delimitación micro Cuenca Mancilla



Fuente: autores

2. Seguido a ello se procedió a calcular la precipitación media mensual y media multianual de cada una de ellas.
3. Posteriormente se adjuntan al Arcgis a través de la opción ArcCatalogo en donde se selecciona el archivo Excel con las estaciones y precipitaciones ya calculadas, allí se da click izquierdo y se selecciona la opción X,Y, seguido se procede a dar click izquierdo Exportar como shapefile.
4. A continuación, se carga el shapefile de las estaciones anteriormente generadas y se procede seleccionar la opción (spatial analyst tolos/Interpolation/IDW), allí se genera una pestaña en donde se seleccionan el shapefile de estaciones y la precipitación, y así generar el Factor R (Imagen 13).

Imagen 13. Generación de Factor R



Fuente: autores

### 9.3.2 Factor K.

Se tomaron muestras de suelo a través de la metodología de recolección certificada por la entidad de Corpoica como se observa en la Imagen N°14 utilizando diferentes materiales como: Pala, Pica, Barretones, Bolsas, anillos metálicos, gasa, material para rotulado de muestras y demás implementos necesarios para una adecuada toma de datos.

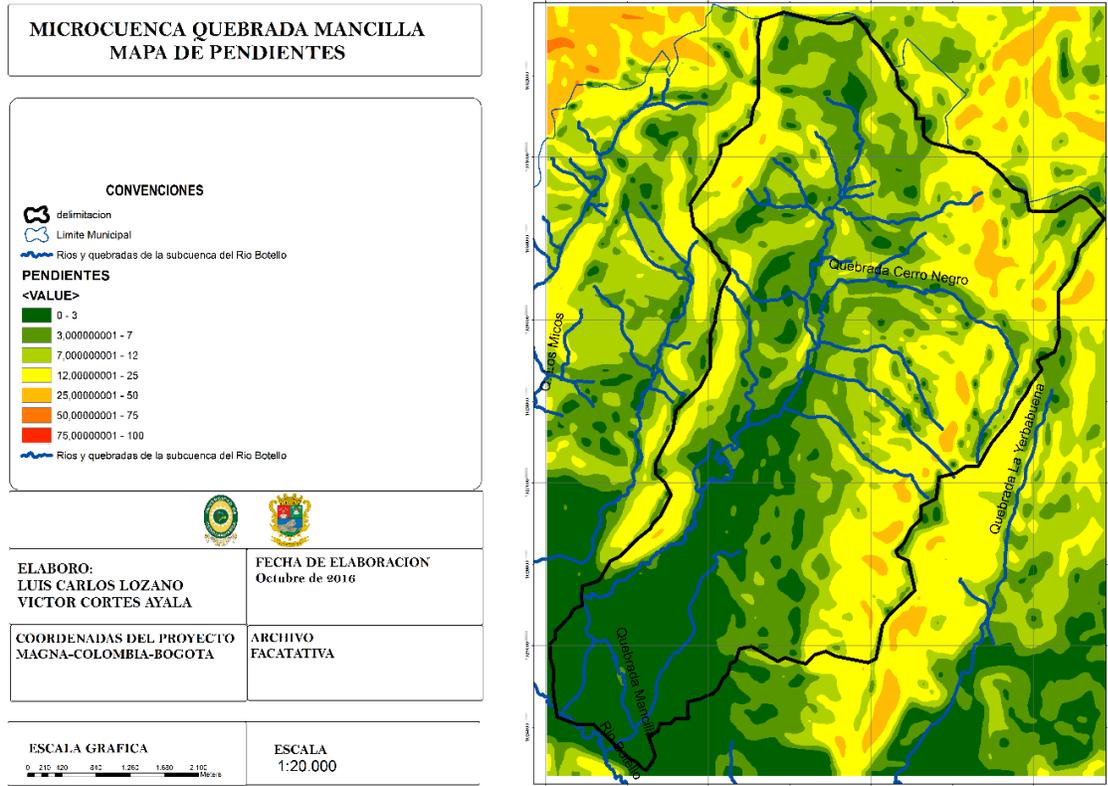
Imagen 14. Metodología para la recolección de muestra certificada por CORPOICA



Fuente: CORPOICA

Se generó un mapa de pendientes en el programa de información geográfica ArcGis como se observa en la Imagen N°15, el cual facilitó la ubicación de los puntos de muestreo, teniendo en cuenta el grado de la pendiente y una distribución que abarcara la totalidad de la zona de estudio para obtener unos puntos verídicos que arrojaran la información correspondiente para el estudio.

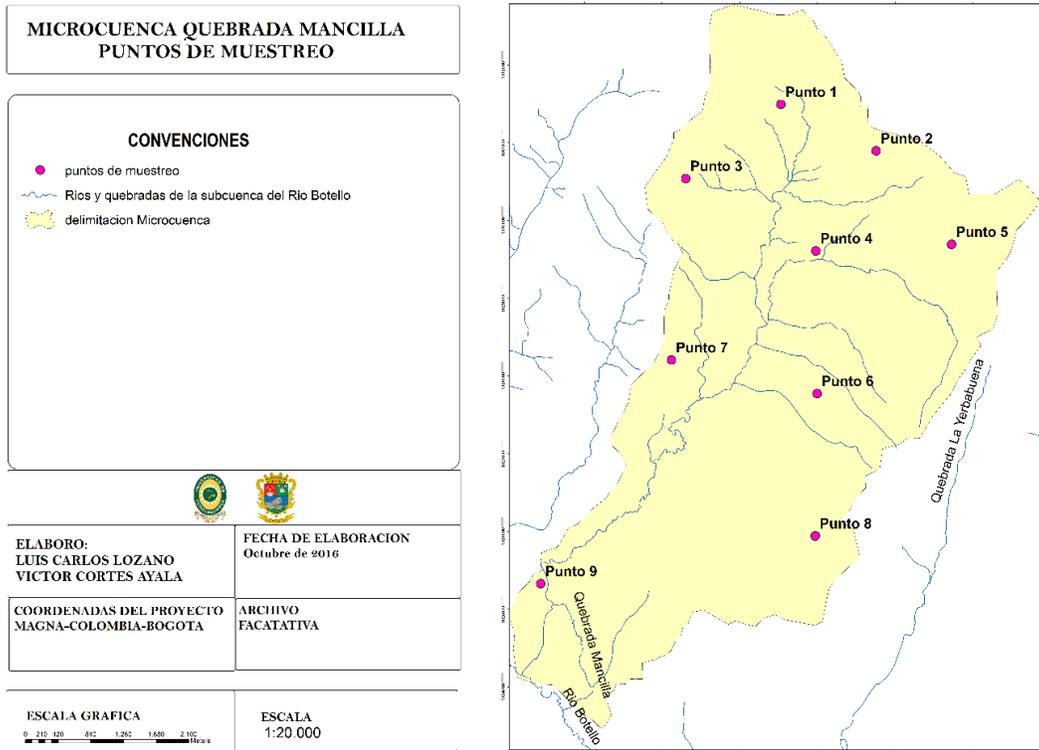
Imagen 15. Mapa de Pendientes



Fuente: autores

Luego del análisis y revisión bibliográfica asesorada por la Entidad pública descentralizada Corpoica, se ubicaron los puntos de muestreo (Imagen 16) desde su zona más alta hasta la parte más baja, distribuidos estratégicamente según los 8 rangos de pendientes, que establece el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, mostrando una cobertura vegetal y características físico-químicas diferentes de estos en la microcuenca quebrada Mancilla, los cuales limitan el uso del suelo a medida que va aumentando el porcentaje de pendiente.

Imagen 16. Puntos de Muestreo

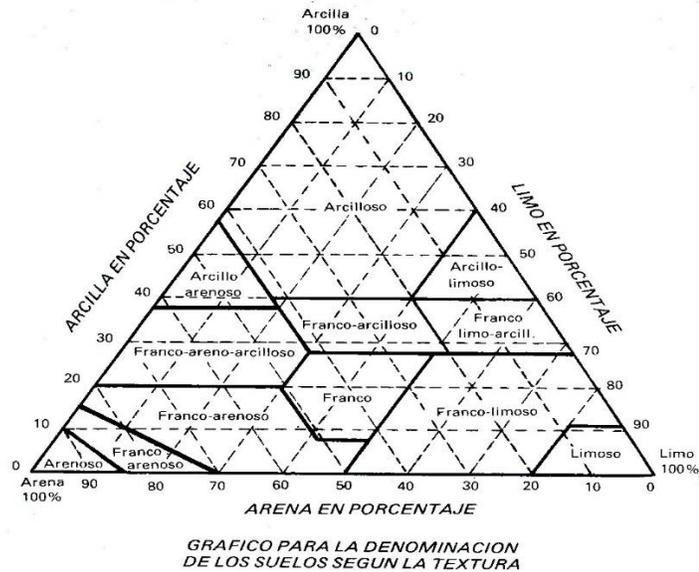


Fuente: autores

Las muestras de suelo se llevan a laboratorio para ser analizadas, para cada una de las cuatro pruebas que son necesarias para el desarrollo del factor K. El análisis de las muestras fue llevado a cabo cumpliendo con la metodología certificada por el instituto geográfico Agustín Codazzi y modificado por la entidad de Corpoica, cuya metodología se describe para textura en la tabla N°39 del Anexo 3, estructura (ver Tabla 40), materia orgánica (ver Tabla 41) y permeabilidad (ver Tabla 42).

Luego de obtener los datos mediante la metodología de “Textura por Bouyoucos” se relaciona con el diagrama del triángulo textural ver (Imagen 17).

Imagen 17. Triangulo textural



Fuente: [www.UNAD.com](http://www.UNAD.com)

En la Tabla N° 7 se puede observar los diferentes rangos de temperatura a los que pueden ser sometidos las muestras de suelo para la prueba de textura, y sus respectivos valores de corrección por temperatura.

Tabla 7. Corrección de temperatura

| TABLA DE CORRECCION DE TEMPERATURA |            |
|------------------------------------|------------|
| °C                                 | Corrección |
| 15,0                               | -0,8       |
| 15,5                               | -0,7       |
| 16,0                               | -0,6       |
| 16,5                               | -0,5       |
| 17,0                               | -0,4       |
| 17,5                               | -0,3       |
| 18,0                               | -0,2       |

| TABLA DE CORRECCION DE TEMPERATURA |      |
|------------------------------------|------|
| 18,5                               | -0,1 |
| 19,0                               | 0,0  |
| 19,5                               | 0,1  |
| 20,0                               | 0,2  |
| 20,5                               | 0,3  |
| 21,0                               | 0,4  |
| 21,5                               | 0,5  |
| 22,0                               | 0,6  |
| 22,5                               | 0,7  |
| 23,0                               | 0,8  |
| 23,5                               | 0,9  |
| 24,0                               | 1,0  |
| 24,5                               | 1,1  |
| 25,0                               | 1,2  |
| 25,5                               | 1,3  |
| 26,0                               | 1,4  |
| 26,5                               | 1,5  |
| 27,0                               | 1,6  |
| 27,5                               | 1,7  |
| 28,0                               | 1,8  |
| 28,5                               | 1,9  |

Fuente: Corpoica

### Ecuaciones de textura:

- La Ecuación N°8 se usa para calcular el % de arenas

$$\%Arenas = \frac{100 - (\text{Lectura Corregida a los 40 seg} * 100)}{\text{Peso de la muestra en g}}$$

Peso de la muestra en g

Ecuación 8

- La Ecuación N°9 se usa para calcular el % de arcillas

$$\%Arcillas = \frac{(\text{Lectura Corregida 2 horas} * 100)}{\text{Peso de la muestra en g}}$$

Peso de la muestra en g

Ecuación 9

- La Ecuación N°10 se usa para calcular el % de limos

$$\%Limos = (100 - (\% Arcillas + \% Arenas))$$

Ecuación

La Tabla N°8, indica las dos lecturas obtenidas a través del hidrómetro 152h, la cual será fundamental para el cálculo de porcentajes de la textura (arena, arcilla, limo) de las muestras tomadas.

Tabla 8. Datos obtenidos de textura del suelo

| TEXTURA (METODO DE BOUYOCOS) |                          |  |                |                            |                   |   |                |                            |                   |
|------------------------------|--------------------------|--|----------------|----------------------------|-------------------|---|----------------|----------------------------|-------------------|
| # DE MUESTRA                 | PESO DEL SUELO SECO (gr) | PRIMER LECTURA CON EL HIDROMETRO (40 SEGUNDOS) |                |                            |                   | SEGUNDA LECTURA CON EL HIDROMETRO (2 HORAS) |                |                            |                   |
|                              |                          | TEMPERATURA (°C)                               | LECTURA (gr/L) | CORRECCION POR TEMPERATURA | LECTURA CORREGIDA | TEMPERATURA (°C)                            | LECTURA (gr/L) | CORRECCION POR TEMPERATURA | LECTURA CORREGIDA |
| 1                            | 50                       | 19   | 17             | 0                          | 17                | 19  | 4              | 0                          | 4                 |
| 2                            | 50                       | 19   | 18             | 0                          | 18                | 19  | 8              | 0                          | 8                 |
| 3                            | 50                       | 19   | 19             | 0                          | 19                | 19  | 6              | 0                          | 6                 |
| 4                            | 50                       | 19   | 21             | 0                          | 21                | 19  | 5              | 0                          | 5                 |
| 5                            | 50                       | 19   | 17             | 0                          | 17                | 19  | 6              | 0                          | 6                 |
| 6                            | 50                       | 19   | 14             | 0                          | 14                | 19  | 3              | 0                          | 3                 |
| 7                            | 50                       | 19   | 19             | 0                          | 19                | 19  | 10             | 0                          | 10                |
| 8                            | 50                       | 19   | 21             | 0                          | 21                | 19  | 4              | 0                          | 4                 |
| 9                            | 50                       | 19   | 26             | 0                          | 26                | 19  | 4              | 0                          | 4                 |

Fuente: autores

En la Imagen N° 18 se puede observar el proceso adecuado para realizar la prueba de determinación de textura.

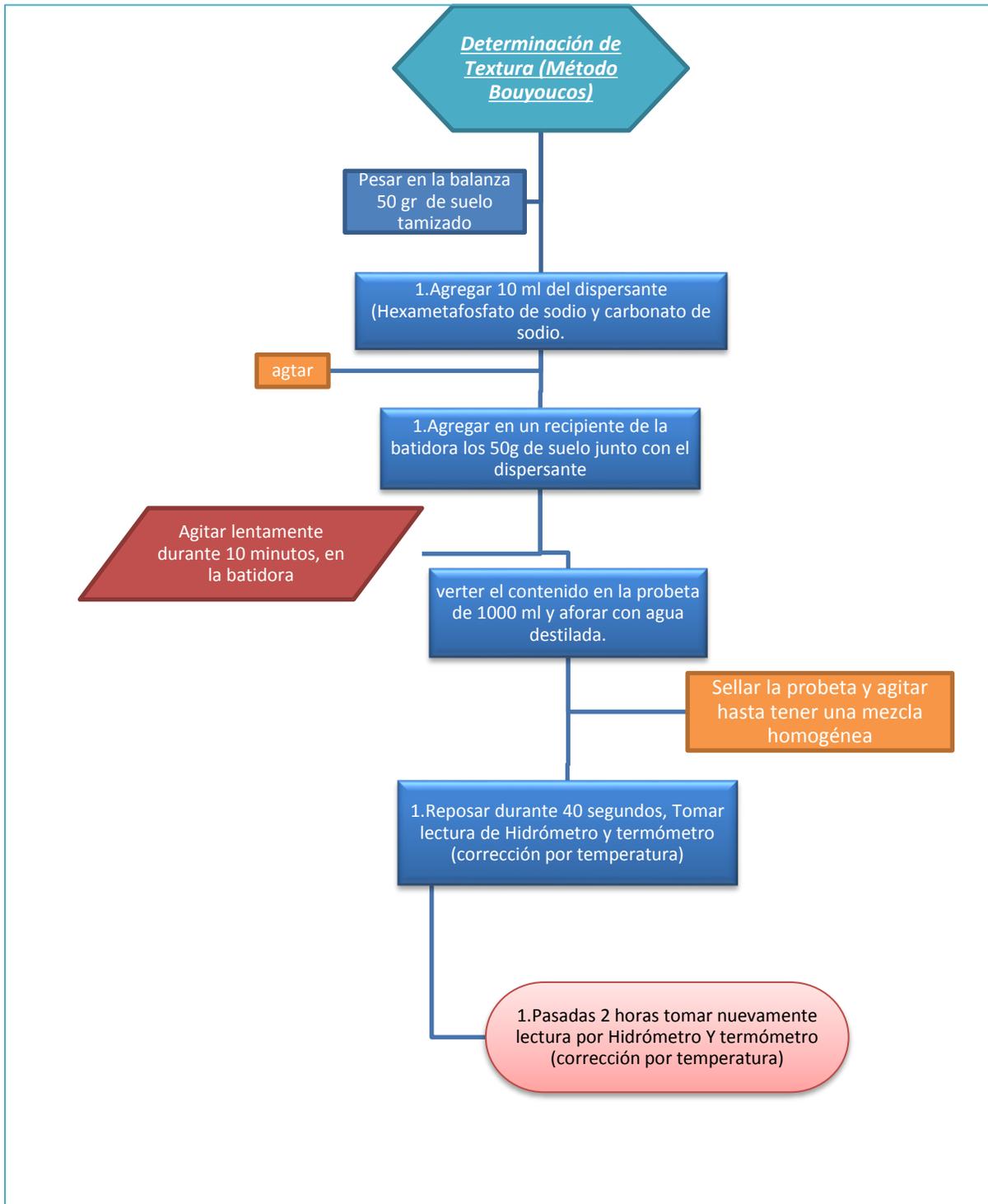


Imagen 18. Diagrama metodológico - determinación de textura (método Bouyoucos)

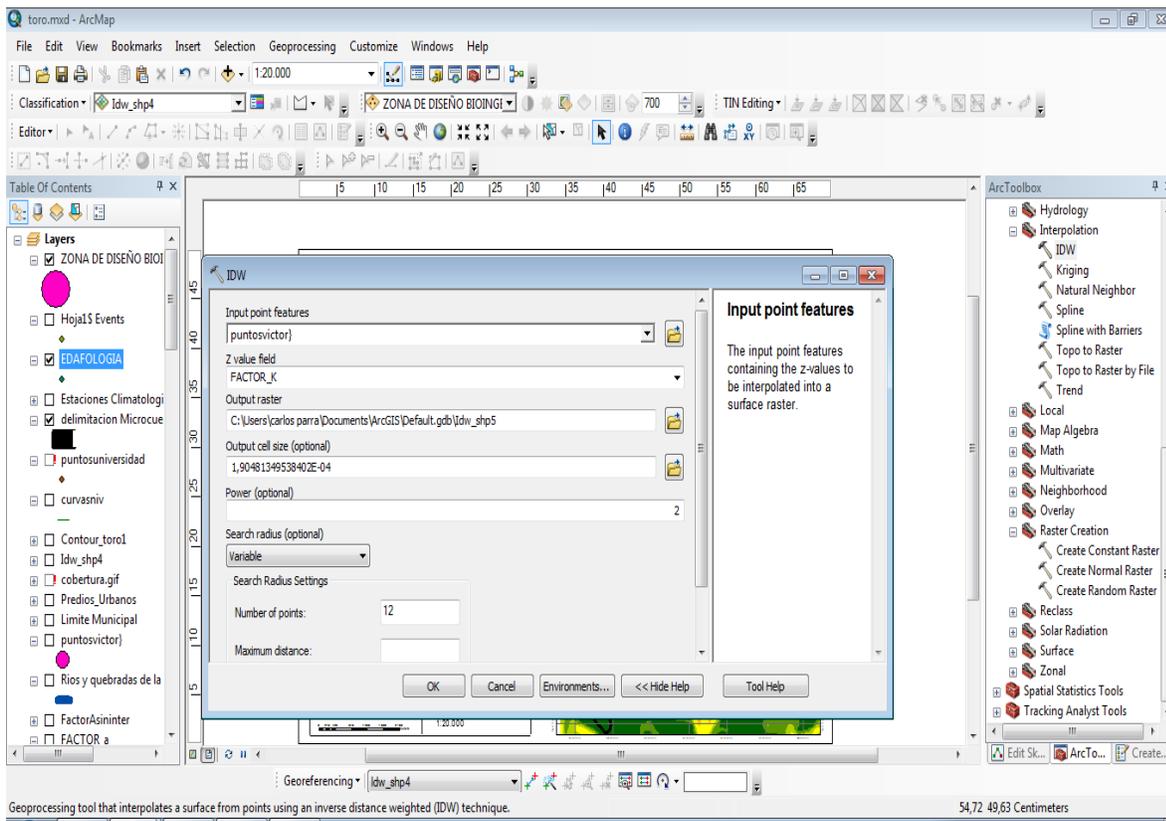
Fuente: IGAC modificado por CORPOICA

- **Calculo de erodabilidad del suelo “FACTOR K”**

Para la obtención de este factor se realizó:

1. Se tomaron 9 puntos de muestreo a través de la Microcuenca Quebrada Mancilla, en donde se evaluaron parámetros como: textura, porcentajes de limo, arena y materia orgánica, estructura, permeabilidad. Con estos valores obtenidos en laboratorio se procedió al cálculo del Factor K.
2. Con el valor del factor K obtenido se procedió a introducir las estaciones con este factor en su tabla de atributos, en el software Arcgis 10,2,2
3. Se selecciona la opción (spatial analyst tolos/Interpolation/IDW) seleccionando los puntos de muestreo con su respectivo Factor K (ver Imagen 19).

Imagen 19. Generación de Factor K



Fuente: autores

- **Ecuaciones para determinación de estructura**

- La Ecuación N°11 se usa para calcular el % de humedad de la muestra de suelo

$$\%H = \frac{(sh-ss)}{ss} * 100 \quad \text{Ecuación 11}$$

**%H**= porcentaje de humedad

**Sh**= suelo húmedo

**ss**= suelo seco

- La Ecuación N°12 se usa para calcular el peso real de la muestra de suelo

$$Pr = (100 / (1 + \%H)) / 1 \quad \text{Ecuación 12}$$

**Pr**= Peso real

**%H**= porcentaje de humedad

- La Ecuación N°13 se usa para calcular el resultado por tamiz de la muestra de suelo

$$Rt = (Pss/Pr)*100 \quad \text{Ecuación 13}$$

**Rt**= Resultado por tamiz

**Pss**= Peso de suelo seco.

En la Tabla N° 9 se pueden observar los datos obtenidos de estructura del suelo por el método de estabilidad estructural Yoder, para cada una de las muestras.

***DETERMINACIÓN DE ESTRUCTURA (MÉTODO DE ESTABILIDAD ESTRUCTURAL YODER).***

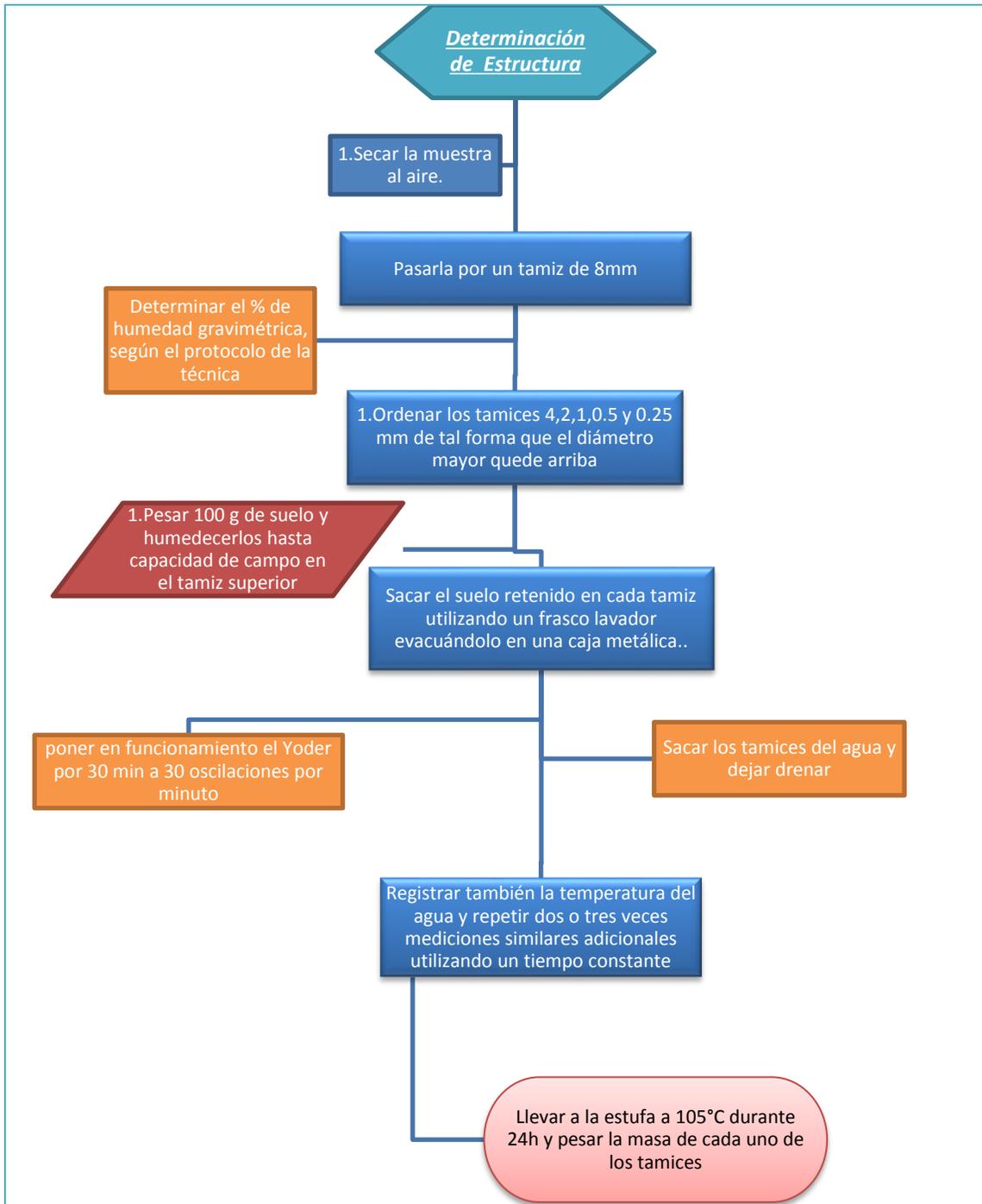
Tabla 9. Datos obtenidos de estructura del suelo

| VALORES SIN CORRECCIÓN |                 |                 |                 |                     |       |       |       |        |         | VALORES CORREGIDOS POR EL % DE HUMEDAD |       |       |        |         |           |        |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|-------|-------|-------|--------|---------|--|-------|-------|--------|---------|-----------|--------|
| Tara (g)               | s.s. + Tara (g) | s.h. + Tara (g) | % Humedad Grav. | Peso Real Suelo (g) | 4 mm  | 2 mm  | 1 mm  | 0,5 mm | 0,25 mm | 4 mm                                   | 2 mm  | 1 mm  | 0,5 mm | 0,25 mm | < 0,25 mm | DPM mm |
| <b>32,85</b>           | 62,38           | 67,17           | <b>16,22</b>    | <b>86,04</b>        | 28,00 | 27,72 | 10,19 | 7,38   | 4,79    | 32,54                                  | 32,22 | 11,84 | 8,58   | 5,57    | 9,25      | 3,20   |
| <b>27,67</b>           | 43,75           | 54,50           | <b>66,85</b>    | <b>59,93</b>        | 17,23 | 18,46 | 11,34 | 9,37   | 1,83    | 28,75                                  | 30,80 | 18,92 | 15,63  | 3,05    | 2,84      | 3,07   |
| <b>37,24</b>           | 60,92           | 72,55           | <b>49,11</b>    | <b>67,06</b>        | 14,50 | 23,27 | 18,36 | 6,20   | 1,21    | 21,62                                  | 34,70 | 27,38 | 9,25   | 1,80    | 5,25      | 2,83   |
| <b>11,21</b>           | 31,91           | 41,43           | <b>45,99</b>    | <b>68,50</b>        | 8,39  | 17,42 | 14,36 | 9,35   | 6,89    | 12,25                                  | 25,43 | 20,96 | 13,65  | 10,06   | 17,65     | 1,98   |
| <b>32,07</b>           | 55,94           | 67,80           | <b>49,69</b>    | <b>66,81</b>        | 30,62 | 20,71 | 9,21  | 2,77   | 0,72    | 45,83                                  | 31,00 | 13,79 | 4,15   | 1,08    | 4,16      | 3,93   |
| <b>27,46</b>           | 50,22           | 58,87           | <b>38,01</b>    | <b>72,46</b>        | 30,41 | 18,01 | 5,84  | 5,24   | 4,53    | 41,97                                  | 24,85 | 8,06  | 7,23   | 6,25    | 11,64     | 3,48   |
| <b>32,98</b>           | 50,09           | 58,71           | <b>50,38</b>    | <b>66,50</b>        | 9,37  | 15,67 | 12,54 | 11,32  | 9,93    | 14,09                                  | 23,56 | 18,86 | 17,02  | 14,93   | 11,53     | 2,04   |
| <b>32,16</b>           | 52,88           | 58,94           | <b>29,25</b>    | <b>77,37</b>        | 33,67 | 20,71 | 6,78  | 3,38   | 1,12    | 43,52                                  | 26,77 | 8,76  | 4,37   | 1,45    | 15,14     | 3,61   |
| <b>32,39</b>           | 55,84           | 58,88           | <b>12,96</b>    | <b>88,52</b>        | 7,58  | 6,84  | 8,05  | 12,05  | 8,74    | 8,56                                   | 7,73  | 9,09  | 13,61  | 9,87    | 51,13     | 1,11   |

Fuente: Autores

En la Imagen N° 20 se puede observar el proceso adecuado para realizar la prueba de determinación de estructura.

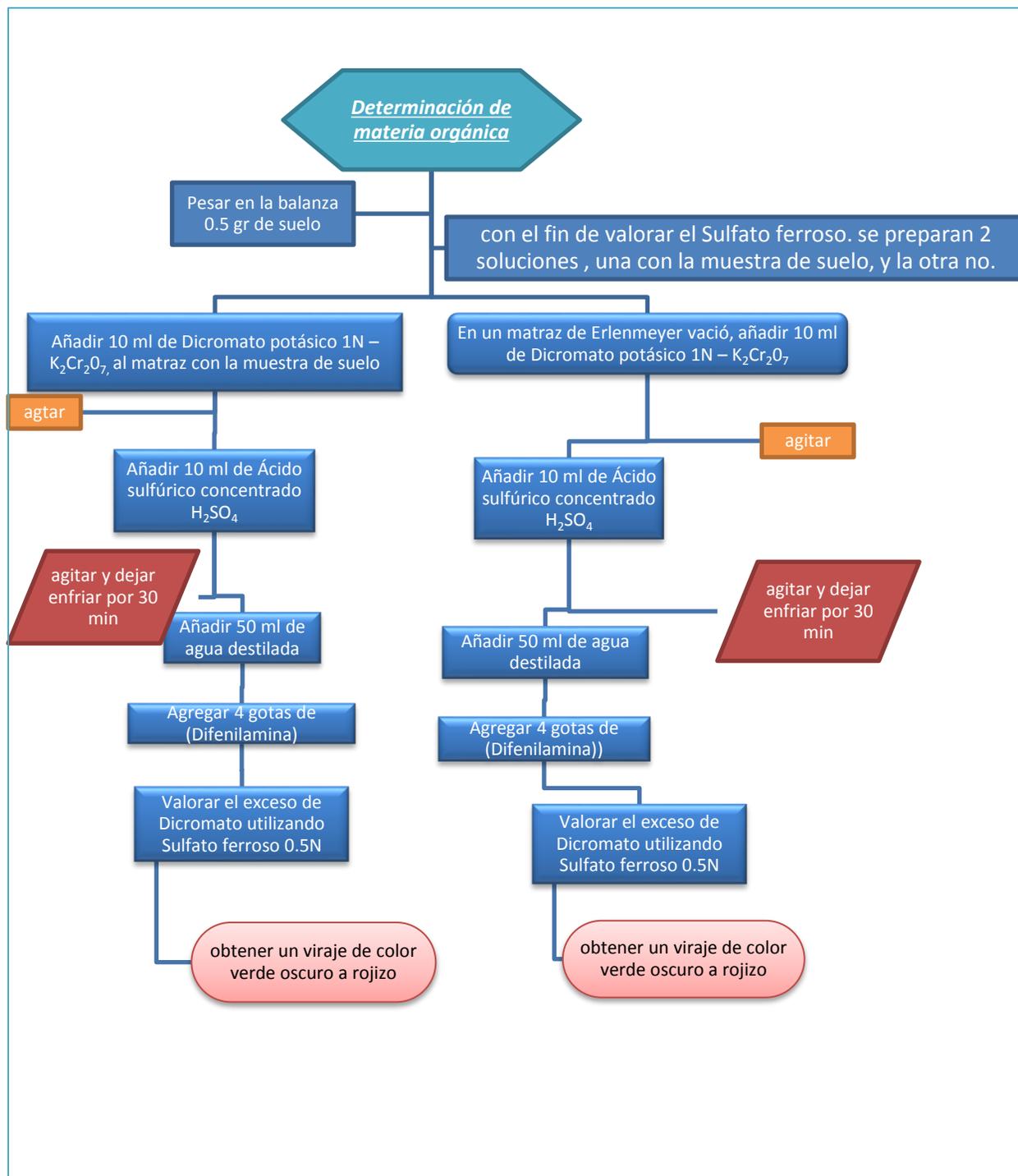
Imagen 20. Diagrama metodológico - determinación estructural



Fuente: IGAC modificado por CORPOICA

En la Imagen N° 21 se puede observar el proceso adecuado para realizar la prueba de determinación de materia orgánica a través de un diagrama metodológico.

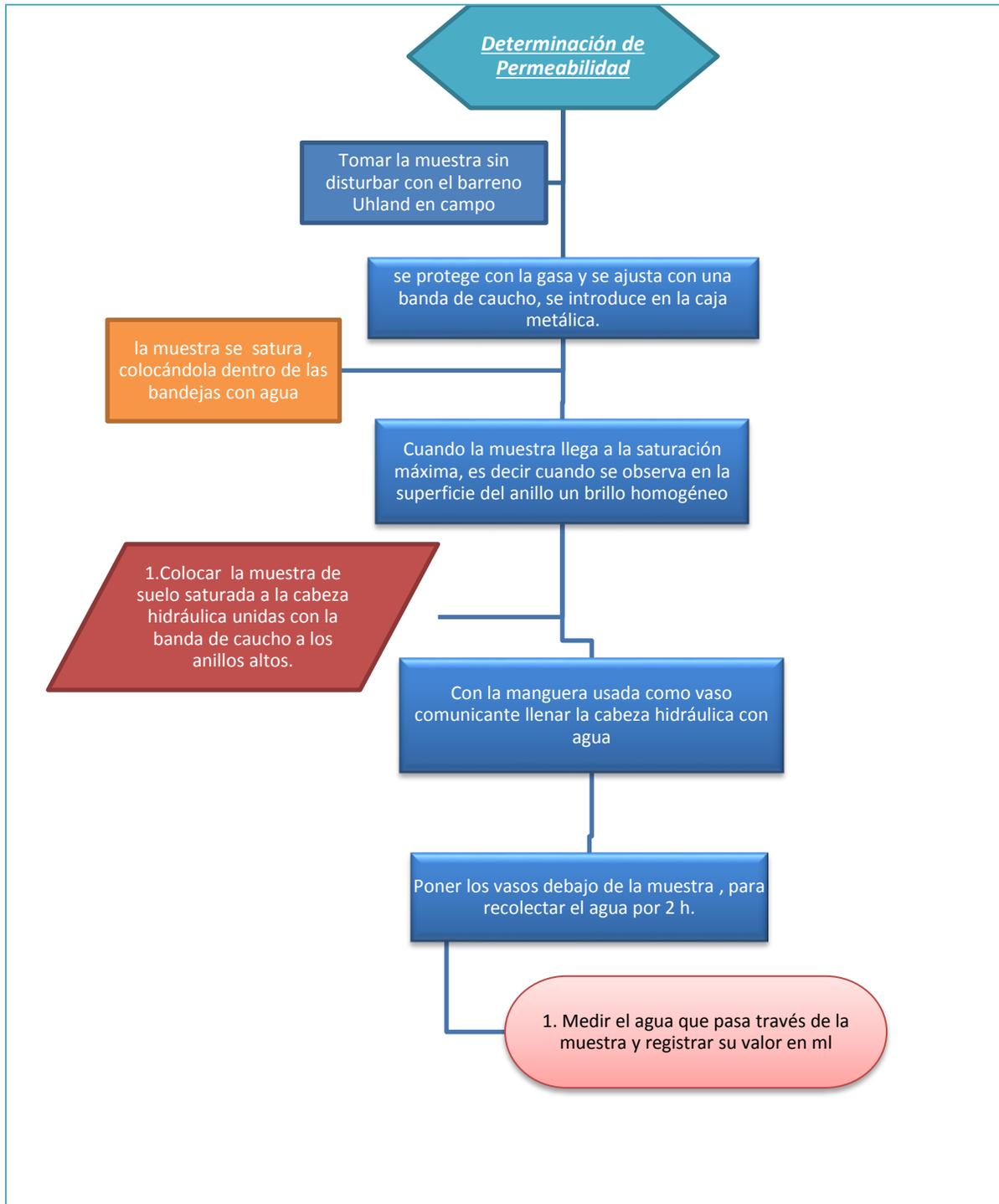
Imagen 21. Diagrama metodológico - determinación de materia orgánica



Fuente: IGAC modificado por CORPOICA

En la Imagen N° 22 se puede observar el proceso adecuado para realizar la prueba de determinación de la permeabilidad a través de un diagrama metodológico.

Imagen 22. Diagrama metodológico – determinación de conductividad hidráulica



Fuente: IGAC modificado por CORPOICA

## Ecuación para la determinación de la conductividad hidráulica

La ecuación N°14 se usa para calcular la conductividad hidráulica (cm/h) de la muestra de suelo.

$$K = \frac{V * L}{t * A * H} \quad \text{O} \quad K = \frac{V * \Delta L}{t * A * \Delta H}$$

Ecuación 14

K= Conductividad hidráulica cm/h

V= Total volumen recolectado en cm<sup>3</sup> en las diferentes lecturas

L= Altura del anillo en cm donde está la muestra de suelo

t = Tiempo total de minutos

A= Área del anillo de la muestra (cm<sup>2</sup>)

H= Cabeza hidráulica (altura de la muestra y del anillo donde deposita el agua)

$\Delta L/\Delta H$ = Gradiente hidráulico.

A continuación, se expresan los datos del proceso de determinación de conductividad hidráulica, necesario para la identificación del código de permeabilidad para la ecuación de USLE (ver Tabla 10).

Tabla 10. Datos obtenidos de conductividad hidráulica

| CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (METODO DEL PERMEAMETRO DE CABEZA CONSTANTE) |  |                        |              |                                    |                   |                                   |
|---|--|------------------------|--------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| # DE MUESTRA  | VOLUMEN RECOLECTADO (CM <sup>3</sup> ) | ALTURA DEL ANILLO (cm) | TIEMPO (MIN) | ÁREA DEL ANILLO (cm <sup>2</sup> ) | CABEZA HIDRÁULICA | K = CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA CM/H |
| 1   | 248                                    | 3                      | 120          | 22,9                               | 9                 | 1,8049                            |
| 2   | 20                                     | 3                      | 120          | 22,9                               | 9                 | 0,1456                            |

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (METODO DEL PERMEAMETRO DE CABEZA CONSTANTE)

| # DE MUESTRA | VOLUMEN RECOLECTADO | ALTURA DEL | TIEMPO (MIN) | ÁREA DEL | CABEZA HIDRÁULICA | K = CONDUCTIVIDAD |
|--------------|---------------------|------------|--------------|----------|-------------------|-------------------|
| 3            | 220                 | 3          | 120          | 22,9     | 9                 | 1,6012            |
| 4            | 100                 | 3          | 120          | 22,9     | 9                 | 0,7278            |
| 5            | 1749                | 3          | 120          | 22,9     | 9                 | 12,7293           |
| 6            | 210                 | 3          | 120          | 22,9     | 9                 | 1,5284            |
| 7            | 352                 | 3          | 120          | 22,9     | 9                 | 2,5619            |
| 8            | 248                 | 3          | 120          | 22,9     | 9                 | 1,8049            |
| 9            | 620                 | 3          | 120          | 22,9     | 9                 | 4,5124            |

Fuente: autores

Con el conjunto de valores obtenidos en cada una de las pruebas realizadas se calcula el promedio de K para cada suelo, a partir del cual se establece una ecuación de regresión en función de las variables representativas de sus propiedades físicas.

La regresión establecida viene expresada por la ecuación N°3 mencionada anteriormente.

### 9.3.3 Factor LS.

Para determinar el factor LS se utilizarán los mapas de curvas de nivel cada 50m del municipio de Facatativá (Cundinamarca), en donde se encuentra ubicada la microcuenca mancilla, midiendo la distancia desde el origen de la escorrentía superficial hasta el inicio del depósito.

- **Factor L**

La longitud de la ladera viene definida por la ecuación N°5 mencionada anteriormente.

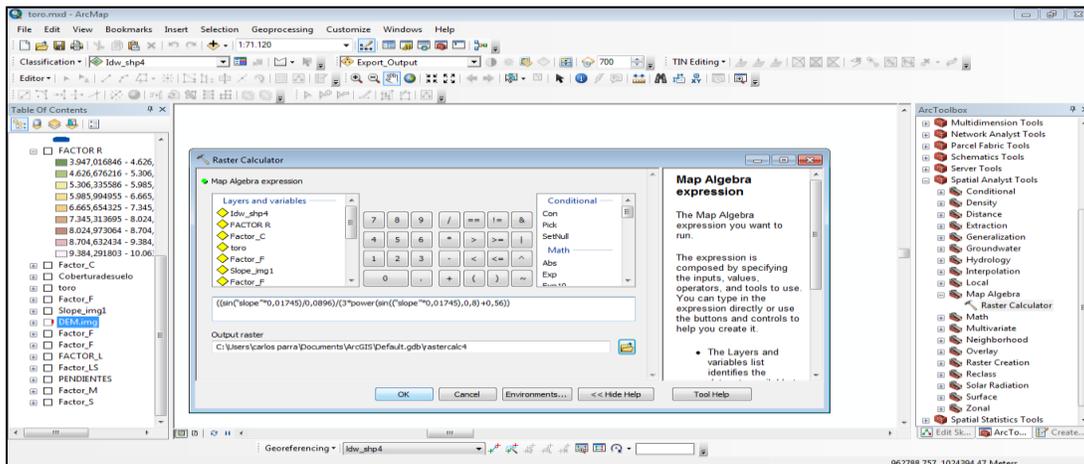
Para obtener la longitud de la pendiente o factor L, se realizaron los siguientes procedimientos:

1. Insertar en el Arcgis 10.2.2 el modelo digital de elevación para la zona.
2. Generar a partir del DEM o modelo digital de elevación un Raster fill a través de la opción (spatial analyst tolos/ hidrology/ fill).
3. Procede a realizar un mapa de pendientes o raster de pendientes de la zona de estudio para lo cual se selecciona la opción (spatial analyst tolos/ surface/ slope), en donde se genera las pendientes de la Microcuenca Quebrada Mancilla Con el Raster de pendientes se procede a obtener el factor F, para la obtención de este factor se selecciona la opción (Map algebra en arctoolbox), allí se genera un cuadro de raster calculator en donde se insertará la Ecuación N°15, como se evidencia en la Imagen 23 y así se genera el factor F como se observa en la Imagen 24.

$$\frac{(\sin("slope"*0,01745)/0,0896)}{(3*power(\sin(("slope"*0,01745),0,8)+0,56))}$$

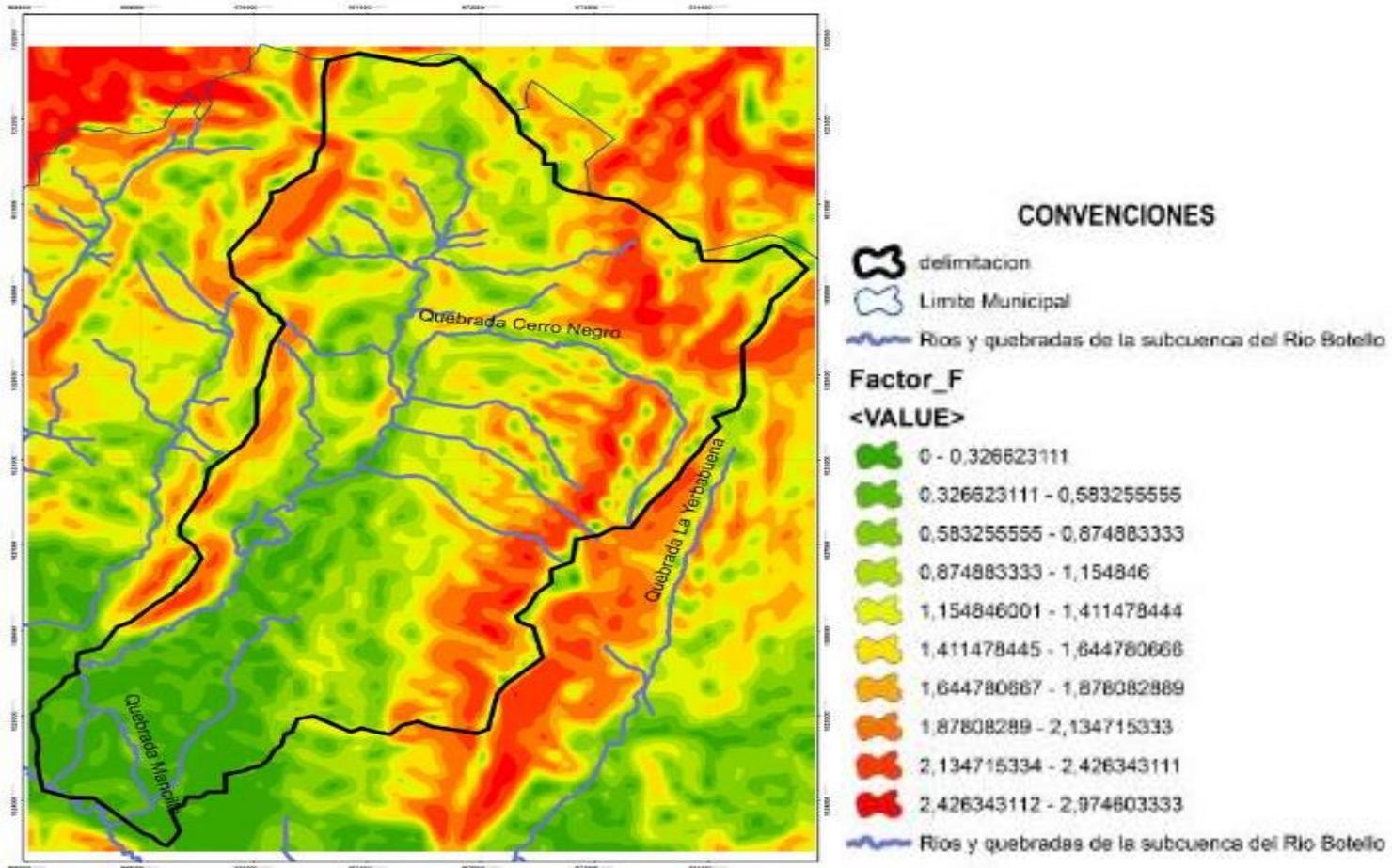
Ecuación 15

Imagen 23. Calculo de factor F



Fuente: autores

Imagen 24. Mapa Factor F



Fuente: autores

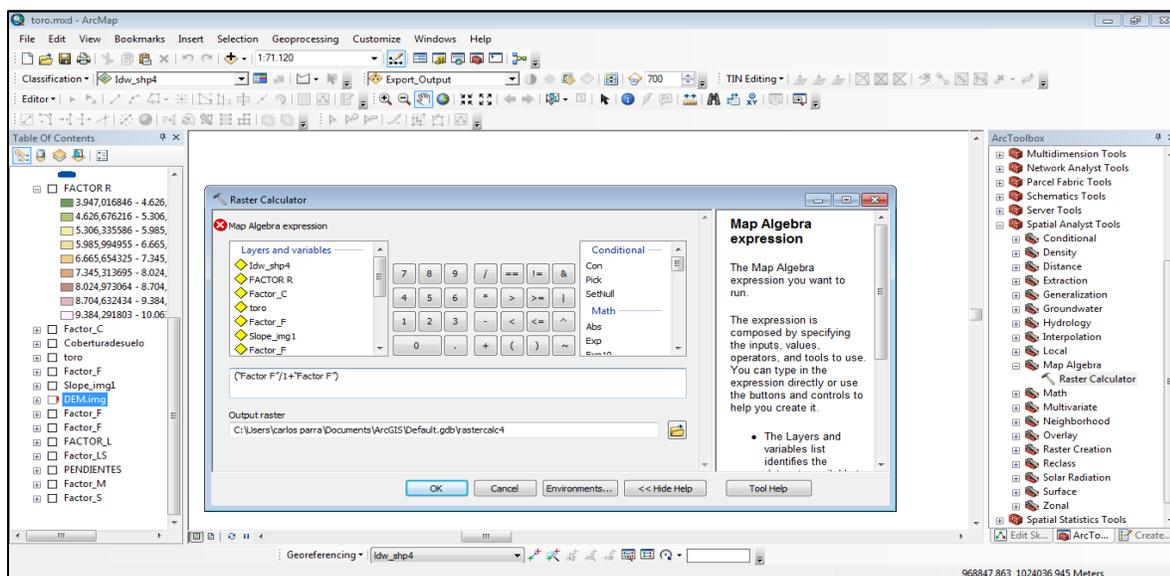
Como se aprecia en la Imagen 24, se obtuvo un mapa del factor F, de pendiente, donde su punto más bajo corresponde a 0, 326 y el punto más alto corresponde a 2,97, se observa una diferencia o un rango considerable. El rango predominante en la zona corresponde a 1.154 y 1.411, este dato es indispensable para generar el factor M.

4. Posteriormente se procede a generar el Factor M insertando la Ecuación N°16 en el Raster calculator: (ver en la Imagen 25).

$$\text{"Factor F"} / 1 + \text{"Factor F"}$$

Ecuación 16

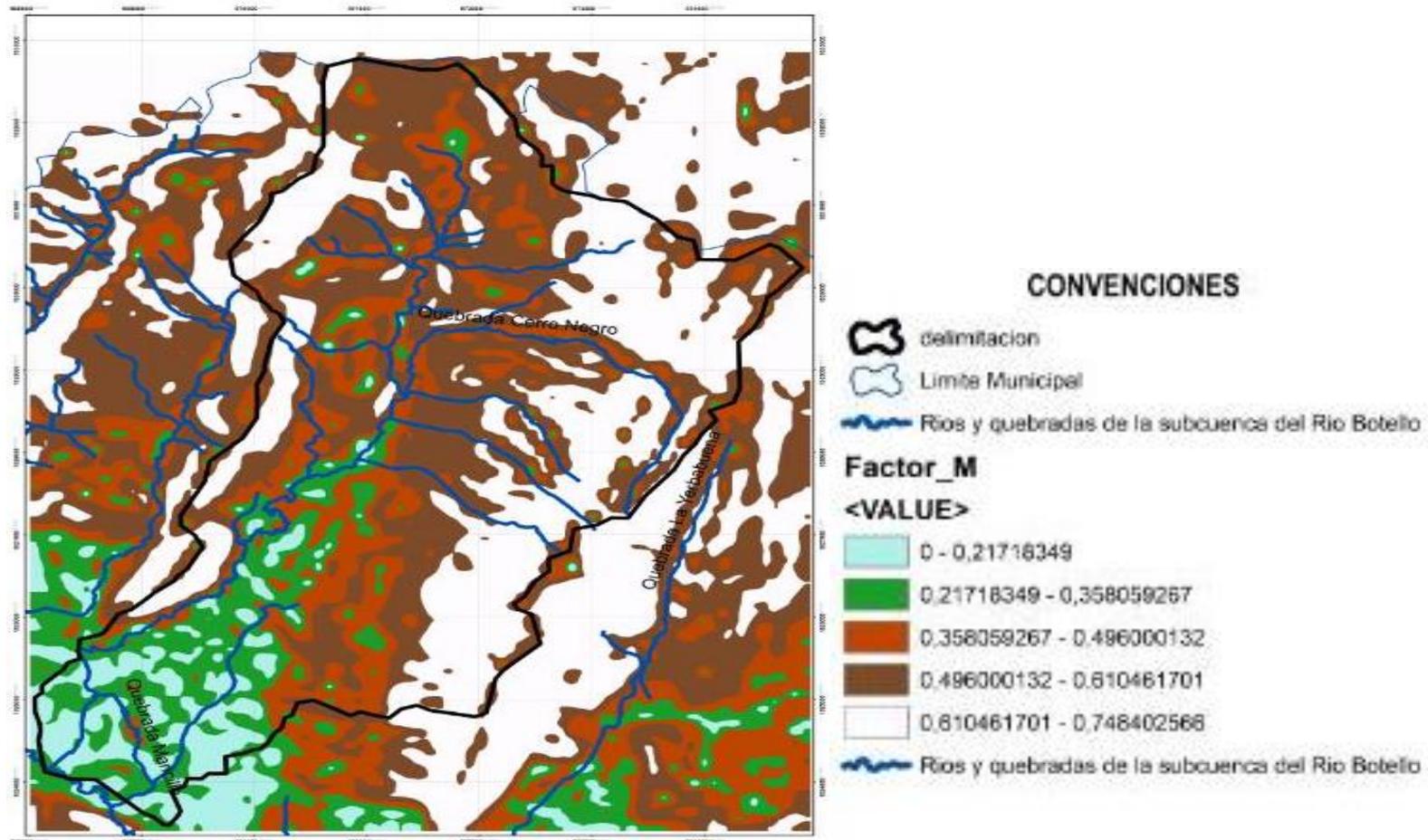
Imagen 25. Calculo factor M



Fuente: autores

Luego del procedimiento anterior se genera el mapa del factor M (ver en la Imagen 26), este factor varía en función de la intensidad de la lluvia; por consiguiente (m) aumenta de valor en relación a los incrementos de la intensidad de la lluvia, se observa que el resultado más bajo corresponde a valores por debajo de 0,21 y el más elevado corresponde a 0,74 , existiendo diversos gradientes de pendiente en la zona entre los que sobresale un gradiente que oscila entre el 3% y el 5%.

Imagen 26. Mapa del Factor M

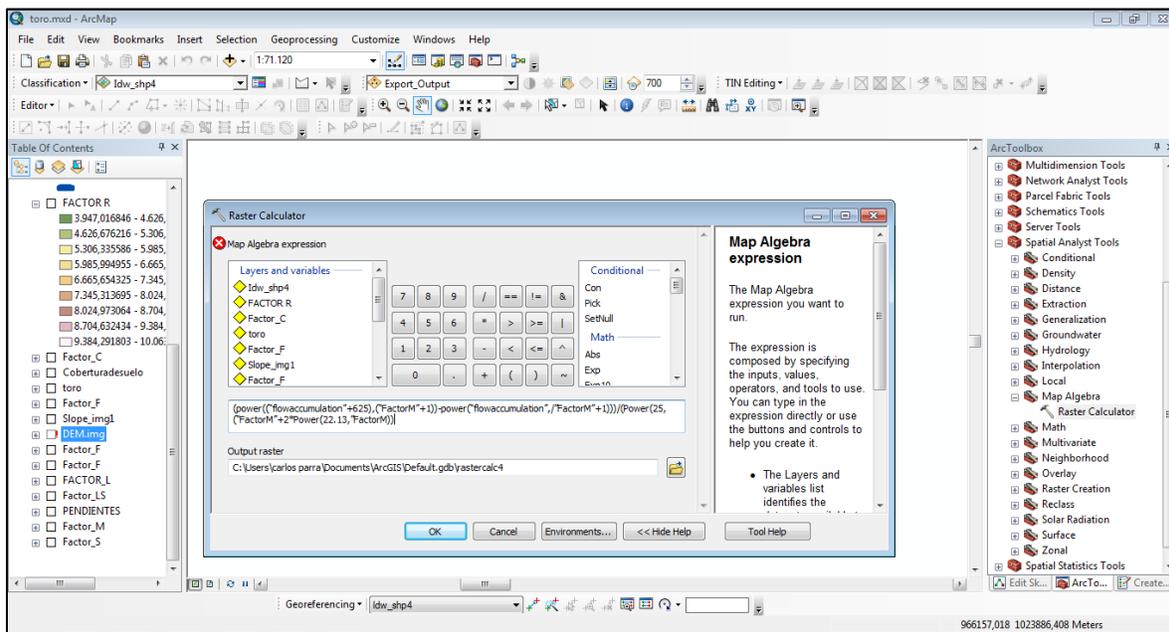


Fuente: autores

- Por ultimo para la generación del Factor L o longitud de la pendiente, se ingresan los flow accumulation al Arcgis 10,2,2 y el Flow direccction, los cuales fueron ya generados en la delimitación de la Microcuenca. Luego se selecciona la opción (Map algebra) y en el Raster calculator se ingresó la Ecuación N°17, (ver en la Imagen 27).

$$\frac{\text{power}(\text{"flowaccumulation"}+625),(\text{"FactorM"}+1))-\text{power}(\text{"flowaccumulation"},/\text{"FactorM"}+1))}{\text{Power}(25,(\text{"FactorM"}+2*\text{Power}(22.13,\text{"FactorM"})))} \quad \text{Ecuación 17}$$

Imagen 27. Calculo de factor L



Fuente: autores

- **Factor S**

El factor se expresa por la Ecuación N°7 descrita anteriormente.

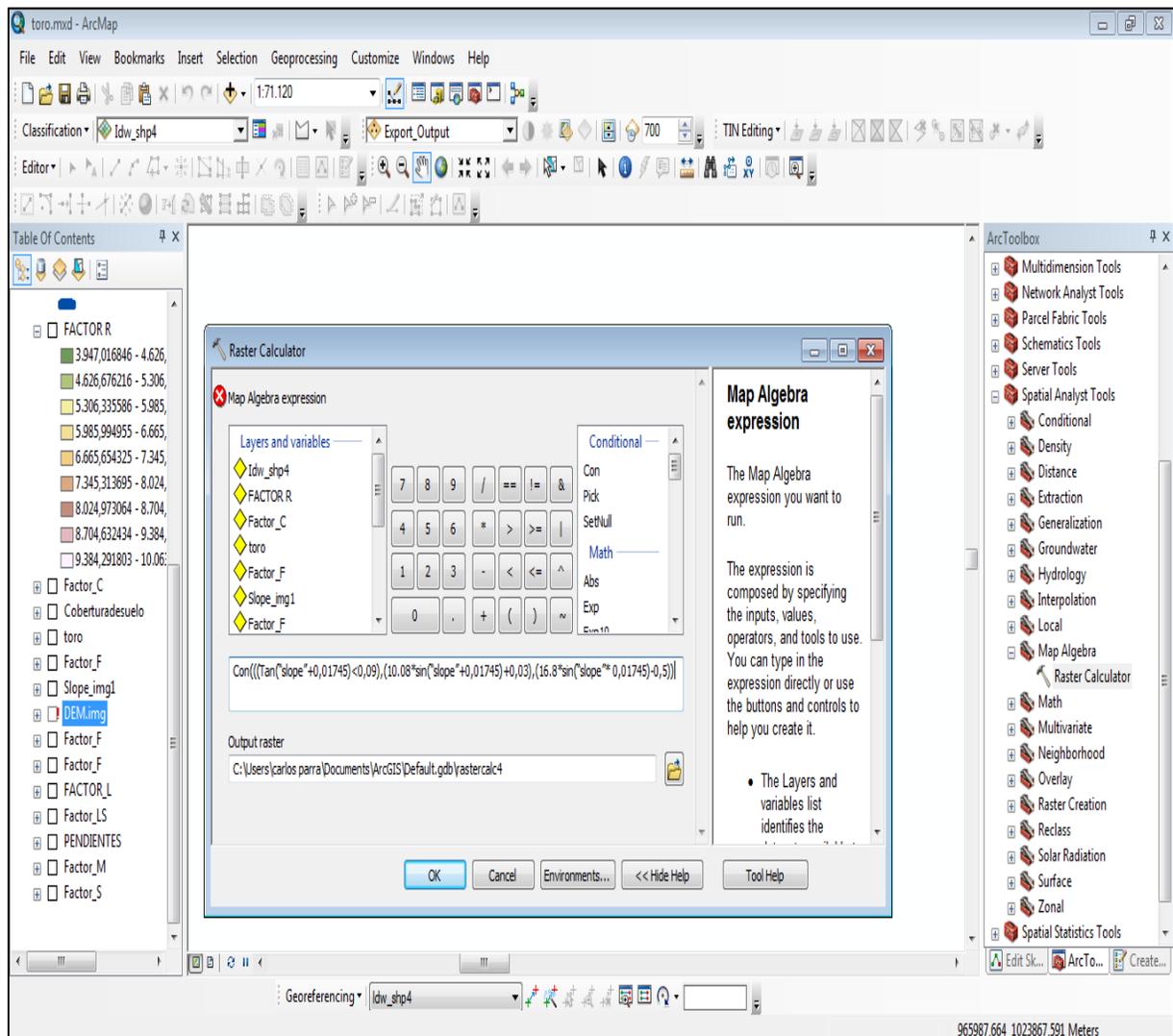
Para el cálculo del factor “S” se realizó:

1. Selección de la opción (Map algebra) de Arcgis 10,2,2, allí se abre la pestaña Raster Calculator en donde se procedió a insertar la siguiente Ecuación N°18, (ver en la Imagen 28).

$$\text{Con}(((\text{Tan}(\text{"slope"}+0,01745)<0,09), (10.08*\sin(\text{"slope"}+0,01745)+0,03), (16.8*\sin(\text{"slope"}** 0,01745)-0,5)))$$

Ecuación 18

Imagen 28. Calculo factor S



Fuente: autores

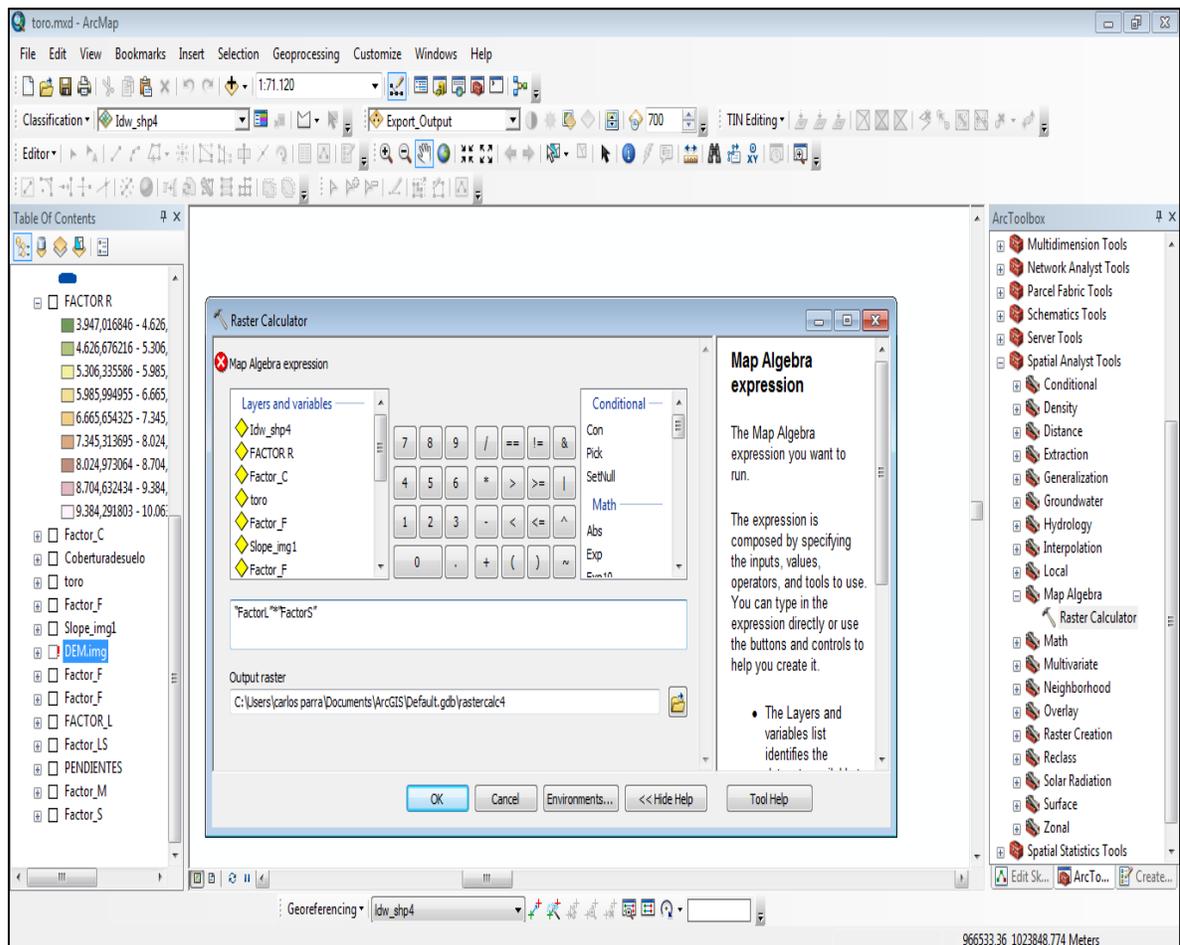
## CALCULO DE LA LONGITUD Y PENDIENTE O FACTOR LS

1. Como se observa en la Imagen 29, para realizar este cálculo se tuvo en cuenta los dos raster ya generados, L y S, por lo cual se procedió a seleccionar la opción Map Algebra y en la pestaña generada de Raster calculator se introdujo la Ecuación N°19:

$$\text{FACTOR L} * \text{FACTOR S}$$

Ecuación 19

Imagen 29. Calculo factor LS



Fuente: autores

### 9.3.4 Factor C.

El factor C se estable tomando como base el mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra obtenida a partir de las orto-fotos, asignándole los valores de (C) de factor de cobertura vegetal tomados de la Tabla N°11.

Tabla 11. Valores de C para cobertura vegetal

| USO DEL SUELO  | FACTOR C |
|--|----------|
| Zonas industriales o comerciales                         | 1,0      |
| Zonas de extracción minera                               | 1,0      |
| Viñedos  | 0,525    |
| Tierras de labor seco                                    | 0,435    |
| Terrenos regados permanentemente                         | 0,507    |
| Terrenos principalmente agrícolas con vegetación natural | 0,435    |
| Tejido urbano discontinuo                                | 1,0      |
| Tejido urbano continuo                                   | 1,0      |
| Pastizales naturales                                     | 0,130    |
| Olivares   | 0,525    |
| Mosaico de cultivos                                      | 0,435    |
| Matorrales esclerófilos                                  | 0,153    |
| Matorral boscoso en transición                           | 0,153    |
| Bosque de frondosas (superior al 7%)                     | 0,041    |
| Bosque de coníferas (inferior al 2%)                     | 0,186    |
| Bosque de coníferas (>2% hasta <7%)                      | 0,086    |
| Bosque de coníferas (superior al 7%)                     | 0,041    |
| Lámina de agua   | 0,0      |
| Frutales   | 0,525    |
| Espacios con vegetación escasa                           | 0,900    |
| Cultivos anuales asociados cultivos permanentes          | 0,435    |
| Bosque mixto (inferior al 2%)                            | 0,186    |
| Bosque mixto (>2% hasta 7%)                              | 0,086    |
| Bosque mixto (superior al 7%)                            | 0,041    |
| Bosque de frondosas (inferior al 2%)                     | 0,186    |
| Bosque de frondosas (>2% hasta <7%)                      | 0,086    |

Fuente: Estimación de los riesgos y niveles de erosión hídrica Río Negro, Guatemala.

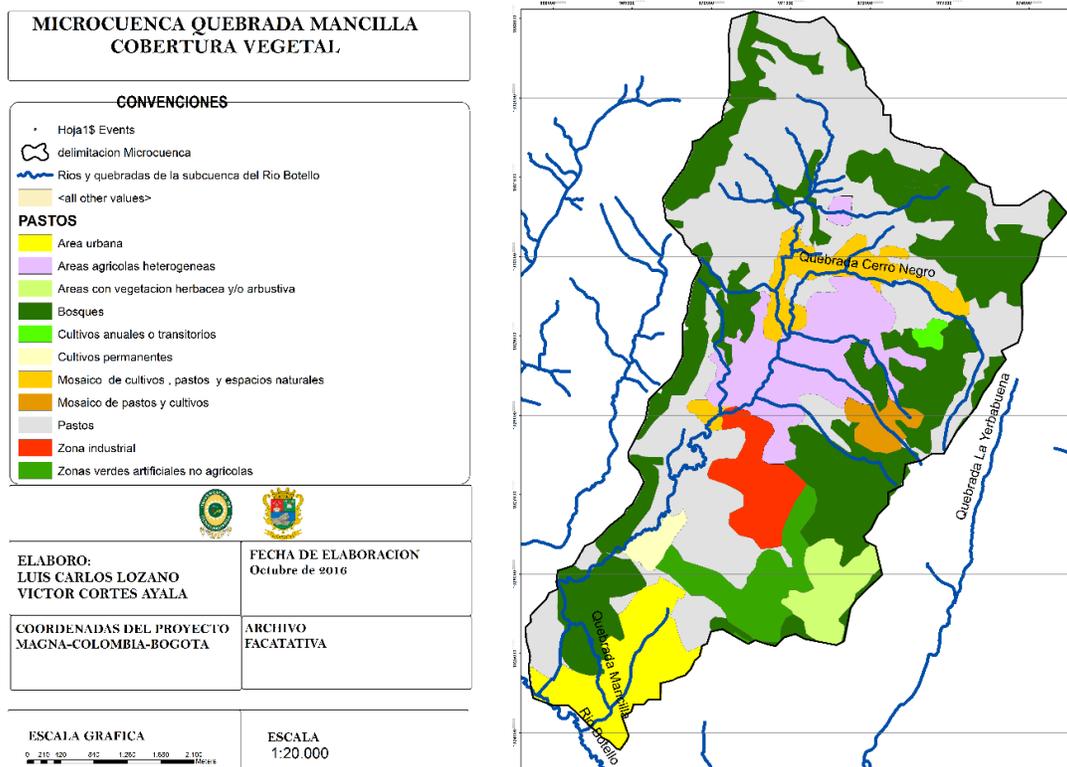
2010

- **Mapa de cobertura vegetal propuesto por la alcaldía municipal de Facatativá**

La cobertura vegetal se realizó a través del software Arcgis 10,2 en donde se realizaron los siguientes pasos:

1. Georreferenciación del mapa de cobertura vegetal propuesto por la alcaldía municipal de Facatativá.
2. Introducción de la delimitación de la microcuenca Quebrada Mancilla.
3. Digitalización de las zonas de cobertura vegetal que se encuentran dentro de la Microcuenca Quebrada Mancilla
4. Obtención de la cobertura vegetal para la microcuenca.
5. Obtener a través de los atributos generados en el shapefile de Arcgis el total de hectáreas por cobertura existente para la microcuenca quebrada mancilla.

*Imagen 30. Cobertura Vegetal*



Fuente: Alcaldía municipal de Facatativá

El mapa de cobertura vegetal (ver Imagen 30) nos indica el estado de la protección vegetal y la capacidad de amortiguar el cual permite disminuir el efecto erosivo que se produce por las precipitaciones; mediante el análisis realizado se identificaron 11 tipos

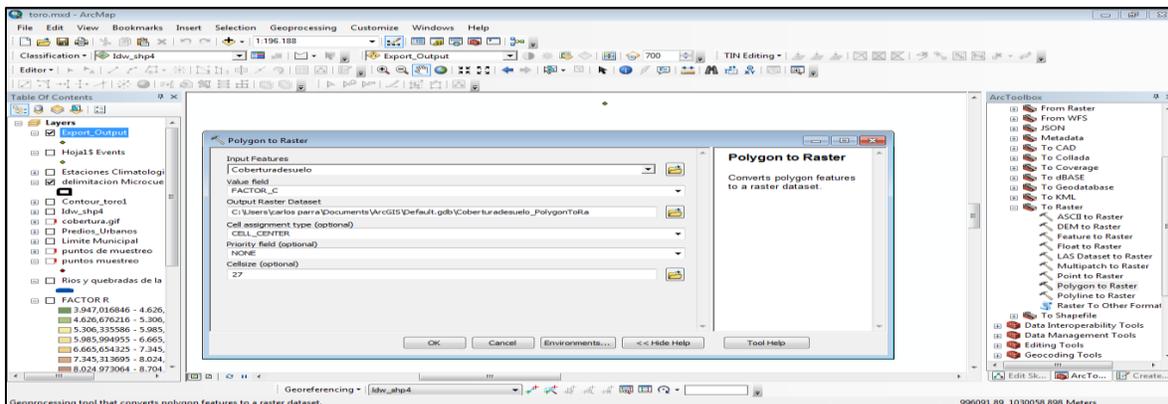
de uso de suelo en la Microcuenca quebrada Mancilla, observando que el uso de pastos es el de mayor extensión con el 36,11 % del área de la zona de estudio.

## CALCULO DE COBERTURA O FACTOR C

El factor C se generó a través de los siguientes procedimientos:

1. Se añadió la capa de cobertura vegetal de la Microcuenca Quebrada Mancilla al archivo Arcgis 10,2,2.
2. Seguido a ello dependiendo la cobertura vegetal se procedió a añadir en la tabla de atributos el Factor C correspondiente, el cual va de 0 a 1, dependiendo la metodología utilizada.
3. Luego se seleccionó la opción (conversion tools/ To raster/ polygon to raster), a continuación, se genera una pestaña en donde se debe seleccionar el shapefile de cobertura y el valor de factor C como se observa en la Imagen 31, para generar el mapa Raster de Factor C.

Imagen 31. Calculo factor C



Fuente: autores

Por último, se da click derecho sobre la capa generada en propiedades y se selecciona clasificar y así clasificar en las diferentes coberturas existentes de la Microcuenca Quebrada Mancilla.

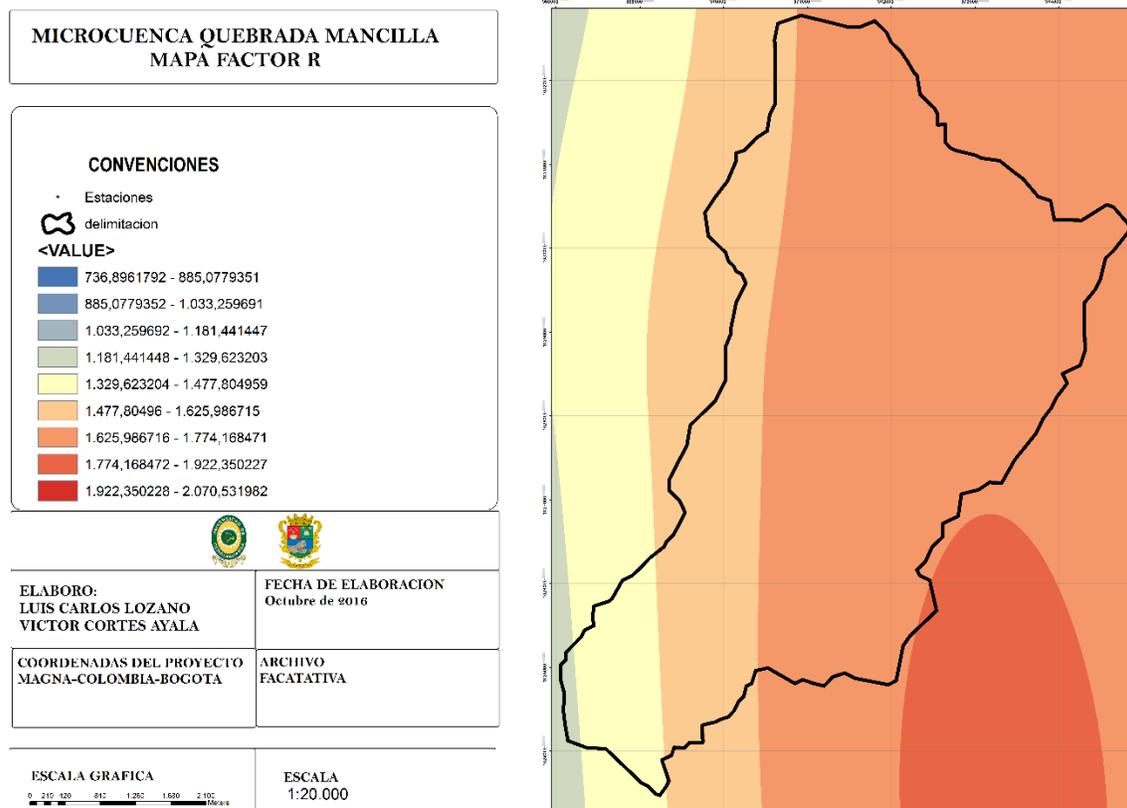
## 10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 10.1 USLE

#### 10.1.1 Factor R

El mapa del factor R (ver Imagen 32), obtenido basándose en los datos suministrados por la Corporación Autónoma Regional del municipio de Facatativá (CAR) con la precipitación da como resultado un rango de valores que fluctúa entre 1181 y los 1922. Esto significa que existe un rango de diferencia considerable y aunque existe una diferencia del 38% entre el dato superior e inferior; gran parte de la zona presenta una erosividad cercana al valor medio que corresponde a 1551 en el área de la microcuenca quebrada mancilla.

Imagen 32. Mapa Factor R



Fuente: autores

Según el análisis del mapa del factor R, la erosividad de la zona de estudio arroja los valores dentro de un rango de erosividad muy bajo correspondiente al intervalo entre 1000 y 2500 ( $Mj \cdot mm/ha \cdot hr \cdot año$ ) según la tabla de clasificación (ver Tabla 12). Sin embargo, es importante resaltar que la red nacional de estaciones pluviométricas existentes es muy deficiente, existiendo una distancia considerable entre ellas. Esto ha provocado que la interpolación de los puntos de dichas estaciones sea complicada y los resultados mostrados corresponderían prácticamente a la influencia de unas cuantas estaciones pluviométricas.

Tabla 12. Clasificación de rangos típicos de R anual según (Rivera y Gómez, 1991)

| <b>Clasificación</b>             | <b>Código</b> | <b>Erosividad (R)<br/>(<math>Mj \cdot mm/ha \cdot hr \cdot año</math>),</b> |
|----------------------------------|---------------|---|
| <b>Natural</b>                   | 1             | Menor de 1.000  |
| <b>Muy bajo</b>                  | 2             | 1.000 - 2.500   |
| <b>Bajo</b>                      | 3             | 2.500 – 5.000   |
| <b>Moderada</b>                  | 4             | 5.000 – 7.500   |
| <b>Alta</b>                      | 5             | 7.500 – 10.000  |
| <b>Muy alta</b>                  | 6             | 10.000 – 15.000   |
| <b>Severa</b>                    | 7             | 15.000 – 20.000   |
| <b>Extremadamente<br/>severa</b> | 8             | Mayo a 20.000   |

Fuente: Revista facultad nacional de agronomía, vol. 63 núm. 1 (2010)

### 10.1.2 Factor K

#### **CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (METODO DEL PERMEAMETRO DE CABEZA CONSTANTE)**

Para los análisis de las muestras de suelo correspondiente a la conductividad hidráulica, utilizando el método de permeámetro de cabeza constante, el resultado se hizo en base de la clasificación de permeabilidad USLE (Tabla 13), arrojando una serie de resultados para cada una de las muestras como se observa en la Tabla 14.

Tabla 13. Clasificación de permeabilidad USLE

| CODIGO USLE | CATEGORIA DE PERMEABILIDAD |
|-------------|----------------------------|
| 1           | Rápida a muy rápida        |
| 2           | Moderada a rápida          |
| 3           | Moderada                   |
| 4           | Moderadamente lenta        |
| 5           | Lenta                      |
| 6           | Muy lenta o nula           |

Fuente: CORPOICA

Tabla 14. Resultados de permeabilidad por muestra

| # DE MUESTRA | clasificación según ( soil survey staff. 1981 citado por morgan y montenegro) | CODIGO USLE |
|--------------|---|-------------|
|--------------|---|-------------|

| # DE MUESTRA    | clasificación según ( soil survey staff 1981 citado por | CODIGO USLE |
|-----------------|---|-------------|
| 1               | Moderadamente lenta                                     | 4           |
| 2               | Lenta   | 5           |
| 3               | Moderadamente lenta                                     | 4           |
| 4               | Moderadamente lenta                                     | 4           |
| 5               | Moderada a Rápida                                       | 2           |
| 6               | Moderadamente lenta                                     | 4           |
| 7               | Moderada  | 3           |
| 8               | Moderadamente lenta                                     | 4           |
| 9               | Moderadamente   | 3           |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>Moderadamente lenta</b>                              |             |

Fuente: Autores

### **TEXTURA (METODO DE BOUYUCOS)**

Para los análisis de las muestras de suelo correspondiente a la textura, utilizando el método de Bouyoucos, se obtuvo los resultados de textura y sus respectivos porcentajes de arenas, arcillas y limos para cada una de las muestras como se evidencia en la Tabla 15 y el resultado basado en el triángulo textural para cada una de las muestras se puede ver en la Tabla 16, evidenciando que la mayoría de las muestras corresponden a un suelo de textura franco-arenoso.

Tabla 15. Resultados de textura por muestra

| # DE MUESTRA | TEXTURA |          |       |
|--------------|---------|----------|-------|
|              | ARENAS  | ARCILLAS | LIMOS |
| 1            | 66      | 8        | 26    |
| 2            | 64      | 16       | 20    |
| 3            | 62      | 12       | 26    |
| 4            | 58      | 10       | 32    |
| 5            | 66      | 12       | 22    |
| 6            | 72      | 6        | 22    |
| 7            | 62      | 20       | 18    |
| 8            | 58      | 8        | 34    |
| 9            | 48      | 8        | 44    |

Fuente: Autores

Tabla 16. Resultados clasificación según triangulo textural por muestra

| # DE MUESTRA | CLASIFICACION SEGÚN EL TRIANGULO TEXTURAL |
|--------------|---|
| 1            | Franco arenoso                            |
| 2            | Franco arenoso                            |
| 3            | Franco arenoso                            |

| # DE MUESTRA    | CLASIFICACION SEGÚN FI |
|-----------------|------------------------|
| 4               | Franco arenoso         |
| 5               | Franco arenoso         |
| 6               | Franco arenoso         |
| 7               | Franco areno Arcilloso |
| 8               | Franco arenoso         |
| 9               | Franco                 |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>Franco arenoso</b>  |

Fuente: Autores

### **ESTABILIDAD ESTRUCTURAL (METODO DE YODER)**

Para los análisis de las muestras de suelo correspondiente a la estructura, utilizando el método de Yoder, el resultado se hizo en base de la clasificación según el estado de agregación (Tabla 17), arrojando una serie de resultados para cada una de las muestras como se observa en la Tabla 18, en los cuales predominan la estructura granular grueso.

Tabla 17. Clasificación según el estado de agregación (%)

| ESTADO DE AGREGACIÓN (%) | CLASE ESTRUCTURAL (USLE)    |
|--------------------------|-----------------------------|
| <30                      | 1. Granular muy fino        |
| 30-60                    | 2. Granular fino            |
| 60-80                    | 3. Granular medio           |
| >80                      | 4. Granular grueso o grumos |

Fuente: CORPOICA

Tabla 18. Resultados de estructura

| # DE MUESTRA    | CLASIFICACION ESTRUCTURAL (USLE)   |
|-----------------|------------------------------------|
| 1               | 4. Granular grueso o grumos        |
| 2               | 4. Granular grueso o grumos        |
| 3               | 4. Granular grueso o grumos        |
| 4               | 3. Granular medio                  |
| 5               | 4. Granular grueso o grumos        |
| 6               | 4. Granular grueso o grumos        |
| 7               | 3. Granular medio                  |
| 8               | 4. Granular grueso o grumos        |
| 9               | 2. Granular fino                   |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>4. Granular grueso o grumos</b> |

Fuente: Autores

### DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA (WALKEY- BLACK)

Para los análisis de las muestras de suelo correspondiente a la determinación de materia orgánica, utilizando el método de Walkey-Black, se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las muestras como se observa en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados determinación de materia orgánica.

| # de muestra | % de materia orgánica |
|--------------|-----------------------|
| 1            | 10,29                 |
| 2            | 9,11                  |

|                 |             |
|-----------------|-------------|
| <b>3</b>        | 10,95       |
| <b>4</b>        | 10,9        |
| <b>5</b>        | 11,75       |
| <b>6</b>        | 5,68        |
| <b>7</b>        | 7,84        |
| <b>8</b>        | 11,83       |
| <b>9</b>        | 8,88        |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>9.69</b> |

Fuente: autores

Después de obtener todos los datos necesarios para la determinación del factor k (textura, estructura, materia orgánica, conductividad hidráulica, se procede a hacer uso de la Ecuación N°3.

A continuación, en la Tabla 20 se presentan los resultados de la erodabilidad del suelo

Tabla 20. Erodabilidad del suelo (K)

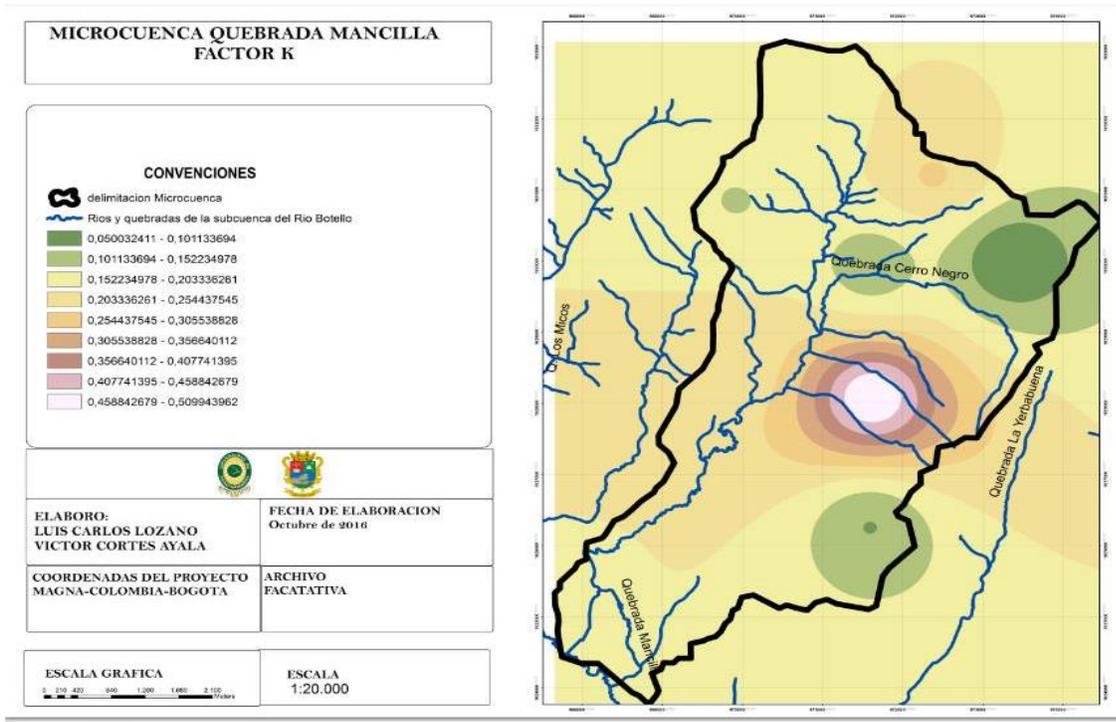
| # de Muestra | textura (M) | % materia orgánica (a) | estructura (b) | Conductividad hidráulica (C.) | Erodabilidad del suelo (K) |
|--------------|-------------|------------------------|----------------|-------------------------------|----------------------------|
| 1            | 8464        | 10,29                  | 4              | 4                             | 0,20                       |
| 2            | 7056        | 9,11                   | 4              | 5                             | 0,26                       |
| 3            | 7744        | 10,95                  | 4              | 4                             | 0,15                       |
| 4            | 8100        | 10,9                   | 4              | 4                             | 0,16                       |
| 5            | 7744        | 11,75                  | 4              | 2                             | 0,05                       |
| 6            | 8836        | 5,68                   | 4              | 4                             | 0,51                       |
| 7            | 6400        | 7,84                   | 4              | 3                             | 0,26                       |
| 8            | 8464        | 11,83                  | 4              | 4                             | 0,10                       |
| 9            | 8464        | 8,88                   | 2              | 3                             | 0,20                       |

Fuente: Autores

El mapa del factor K (ver Imagen 33), se ha obtenido en base a una serie de muestras de suelo tomadas estratégicamente en la microcuenca quebrada Mancilla. Luego del análisis de muestras se determinó el valor de erodabilidad K para cada una de ellas,

identificando que los valores predominantes se encuentran en un rango de 0,15 a 0,25 donde se presentan suelos de textura franco arenosa como el principal tipo de suelo en el área objeto de estudio. Las áreas con menor porcentaje de materia organica, con un valor de 0,3 a 0,51, corresponde a los valores mas elevados de erodabilidad de la zona de estudio

Imagen 33. Mapa factor K



Fuente: autores

Los suelos de textura franco-arenosa como los predominantes en la microcuenca presentan partículas de gran tamaño, estas partículas tienden a desprenderse por su acción erosiva, pero poseen la característica de permitir una velocidad de infiltración más rápida, por consiguiente, estos suelos son susceptibles a erosionarse y dependerán de otras propiedades como la cobertura vegetal.

### 10.1.3 Factor LS

En este caso se hizo necesario calcular el factor LS a través de un sistema de información geográfica ArcGis 10.2 debido a la extensión de la microcuenca y la cual posee diferentes condiciones topográficas.

Para la generación del mapa del factor L en el software ARCGIS, fue necesario haber generado dos mapas adicionales los cuales corresponden al factor F (ver Ecuación N°20) y al factor M (ver Ecuación N°21) como se observa en la Imagen (24 y 26), respectivamente.

$$m = \left( \frac{F}{1+F} \right) \quad \text{Ecuación 20}$$

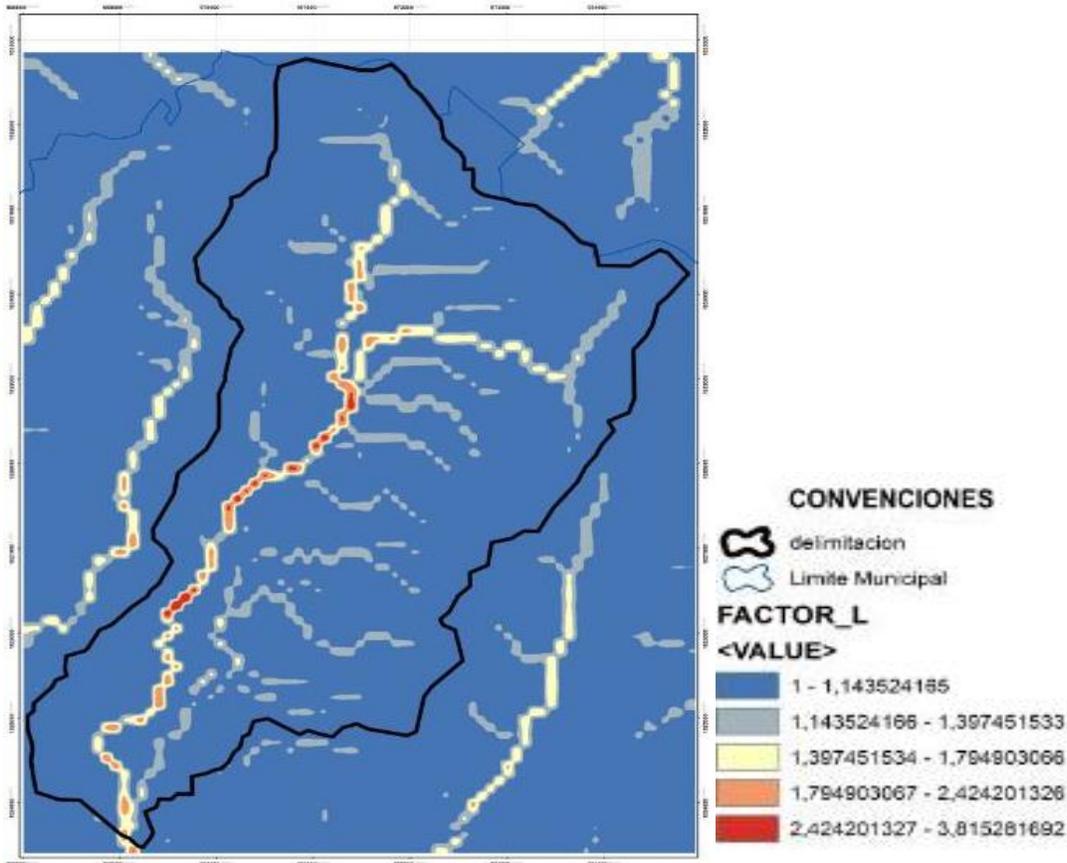
$$F = \left( \frac{\sin \frac{\beta}{0,0896}}{3(\sin \beta)^{0,8} + 0,56} \right) \quad \text{Ecuación 21}$$

En cuanto a la influencia del relieve puede ser un factor determinante de la cantidad de suelo erosionado ya que es una parte fundamental del proceso, depositando las partículas de suelo en la parte más baja de la pendiente, debido al arrastre del agua desde las partes de mayor altitud, generando afectación en la zona por los diferentes procesos de sedimentación.

A consecuencia de las precipitaciones se tienen en cuenta dos motivos:

- 1) Se tiene que cuando mayor sea la longitud y el ángulo de la inclinación del terreno, mayor será la energía cinética del agua que fluye por la superficie por lo tanto mayor será su capacidad erosiva.
- 2) El ángulo de la pendiente modifica el tiempo de permanencia de la lámina de agua que fluye por la superficie del terreno, independientemente del volumen de escorrentía generado. En los terrenos de poca inclinación el agua tiene más posibilidad de infiltrarse que en los terrenos de mayor inclinación, es en estos donde la escorrentía fluye más rápidamente hacia la zona de menor cota.

Imagen 34. Mapa Factor L

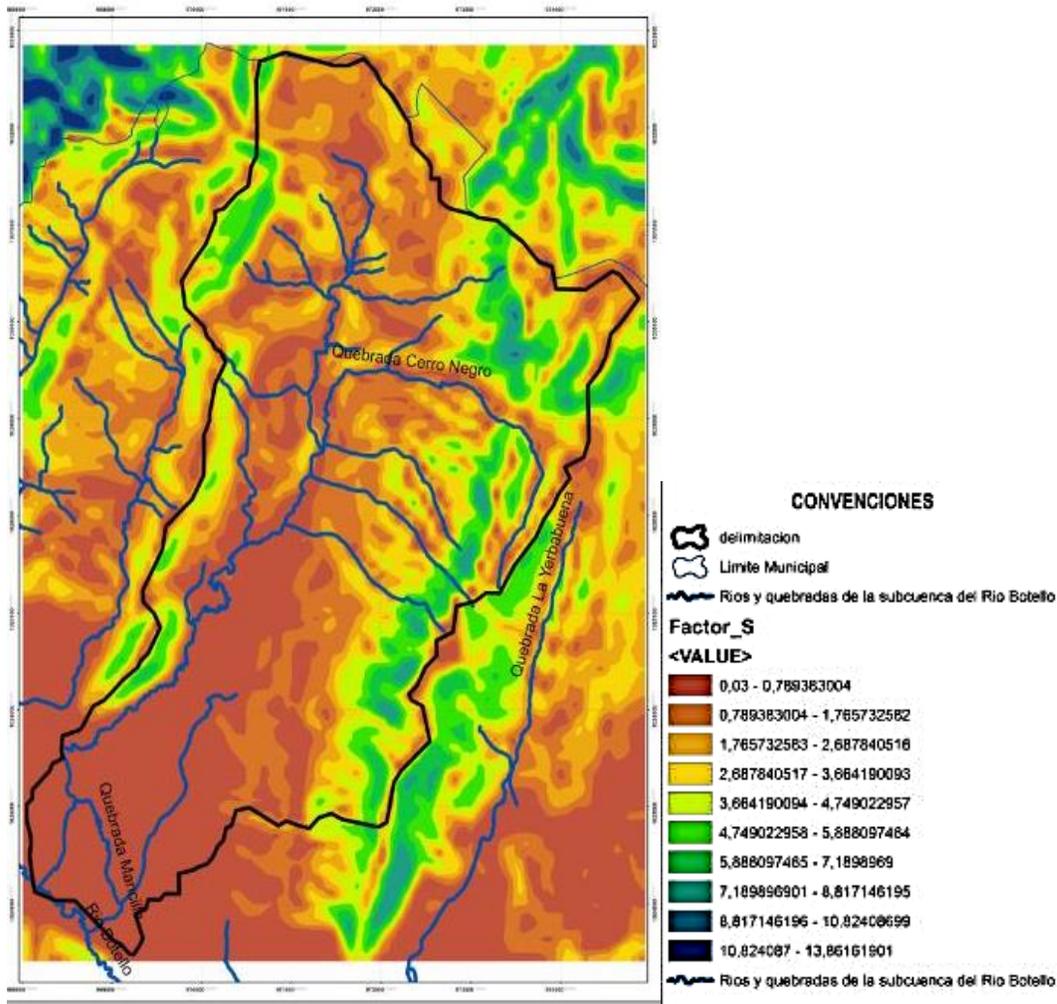


Fuente: autores

El factor L (ver Imagen 34) representa el efecto de la longitud de la pendiente sobre la erosión. Como se puede observar en el mapa generado a través del software ArcGis, se puede identificar de color azul en la Imagen 34 como existe una predominancia de rangos mínimos entre 1 y 1,14 esto se debe a que existen pendientes bajas y una menor proporción de pendientes altas.

En los resultados de los valores del factor L se tiene una longitud del cauce principal de 12.92km.

Imagen 35. Mapa Factor S



Fuente: autores

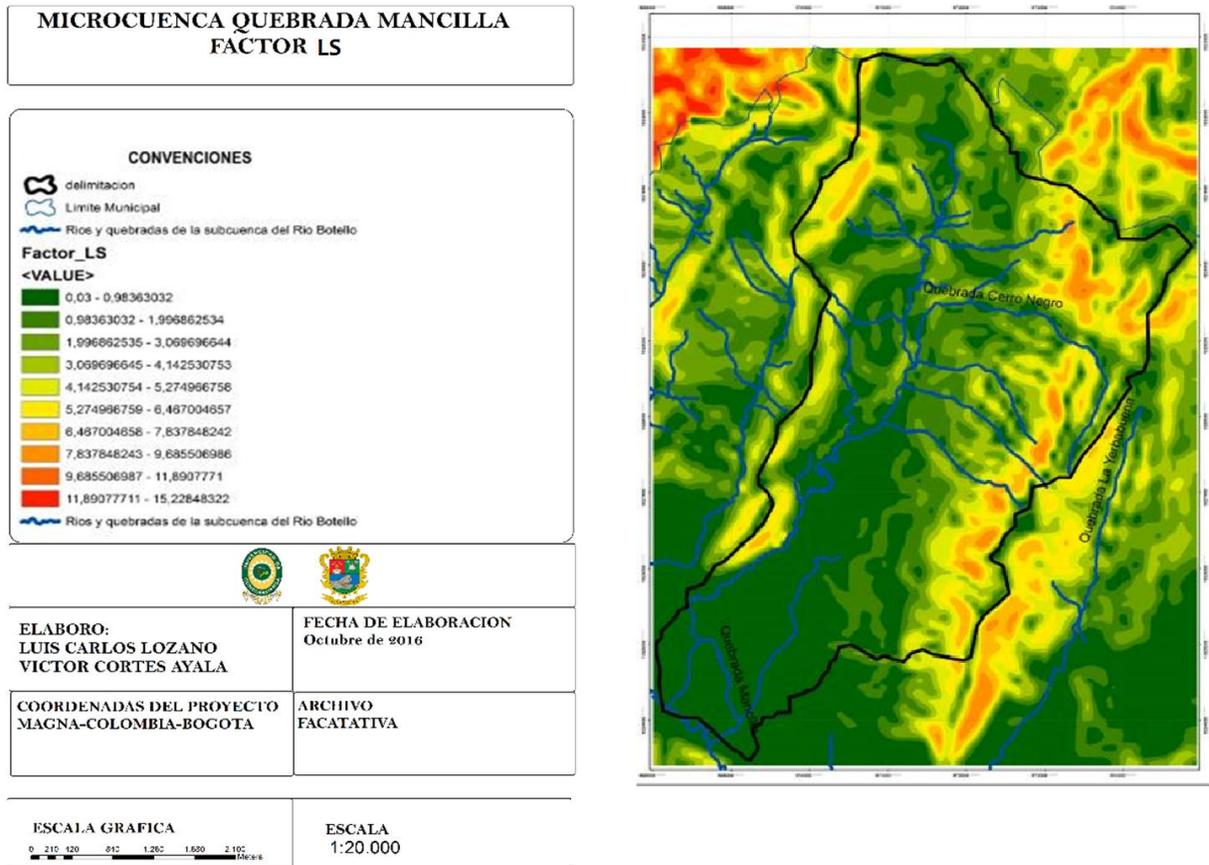
En cuanto al factor S (Imagen 35), se debe tener en cuenta la forma en que se relaciona el efecto del grado de la pendiente sobre la erosión teniendo una relación proporcional donde consecuentemente a mayor grado de pendiente mayor erosión se tendrá como resultado. El mapa de grado de pendiente se determinó en base al mapa obtenido de pendientes (Imagen N°15) y se puede apreciar un rango de valores mucho más extenso que el que se observa en los rangos del mapa del factor L.

En cuanto al rango de valores en el mapa se puede observar que se encuentra entre 0,03 y 13,86, encontrando los valores más elevados en las partes altas de las cuencas y en parte media del mapa donde existe una diferenciación de la pendiente. debido a que la inclinación no superan los 6 grados en mas del 60% del área total de

la zona de estudio, sus efectos de erosión hídrica por el arrastre de partículas va a ser bajo.

Después de haber generado el mapa de longitud de pendiente (L) y el de grado de pendiente (S) se procede a realizar el mapa del factor de relieve (LS) ver Imagen 36.

Imagen 36. Mapa Factor LS (escorrentía)



Fuente: autores

Como se puede observar en el mapa de este factor LS, encontramos una zona predominante en la zona de estudio de color verde con un rango entre 0,03 a 4,14 la cual nos indica que carece de terrenos de inclinación pronunciada, por tal motivo al ocurrir el evento natural de las precipitaciones sobre el terreno de la microcuenca quebrada Mancilla, este tiene una mayor capacidad de resistir a la erosión hídrica a través de la escorrentía, pues estas pendientes bajas disminuyen la velocidad de la

misma, y proporcionalmente disminuye la energía cinética ocasionando un proceso a de infiltración en el terreno.

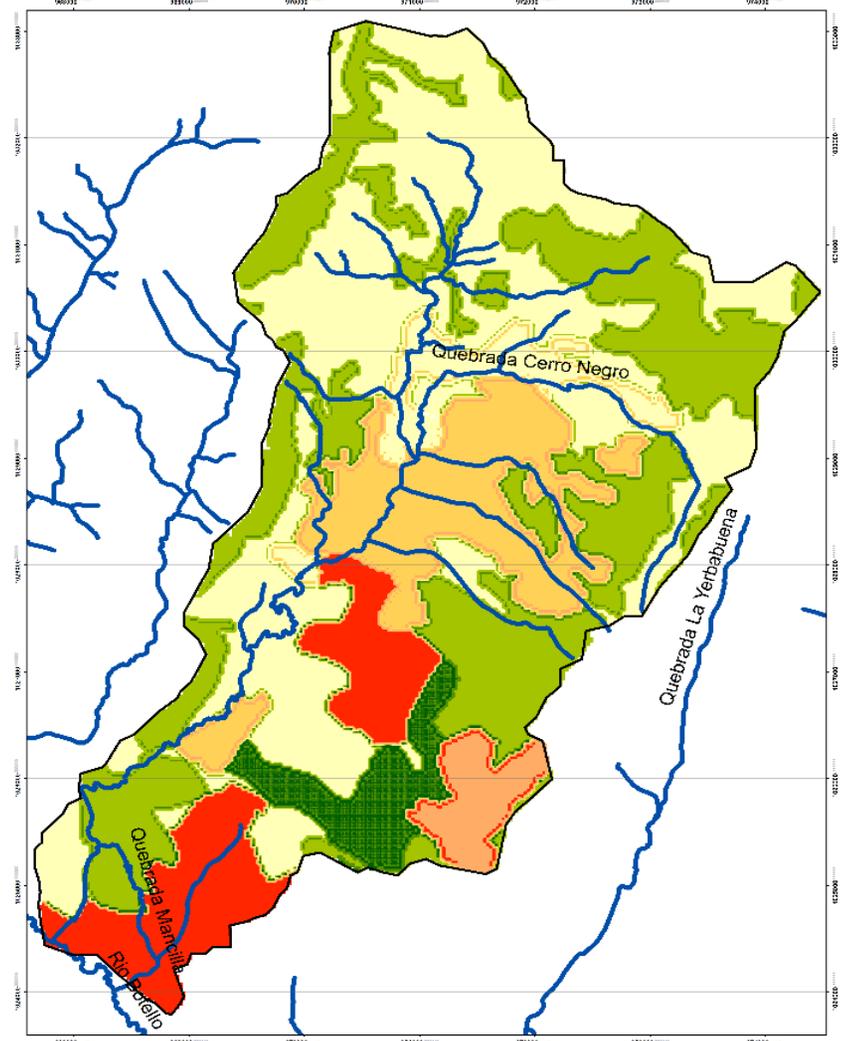
En el factor LS se observa una marcada predominancia de valores menores a 1 o cercanos a este, por lo que se puede deducir que al momento de contextualizar en la ecuación de USLE, el arrastre de partículas de suelo, la escorrentía causada por los fenómenos de precipitación y la forma de relieve de la zona de estudio no va a generar un arrastre de sedimentos considerable al cauce principal de la quebrada mancilla.

Sin embargo, en el mapa existen sectores donde los valores son mayores a 15; aunque estos sectores son mínimos y se encuentran totalmente distantes a la media son valores que existen en la realidad y que van a ser determinantes para la obtención de la erosión de esta área.

#### **10.1.4 Factor C**

El mapa del factor C (ver Imagen 37), este nos indica el estado de la protección vegetal y la capacidad de amortiguar el cual permite disminuir el efecto erosivo que se produce por las precipitaciones; para la obtención del uso y cobertura del suelo se valoró las coberturas vegetales presentes de la Tabla N° 21, que corresponde a la vegetación y uso de suelo del área de la microcuenca quebrada Mancilla propuesto por la alcaldía municipal de Facatativá.

Imagen 37. Mapa Factor C



Fuente: Autor

Con el fin de conocer de forma más segura y completa la información sobre los cultivos existentes y su debida incidencia sobre el proceso erosivo, se realizó verificaciones en campo mediante un análisis comparativo de la cobertura y su uso actual por parte de los habitantes que residen en el área objeto de estudio.

Luego del análisis realizado se identificaron 11 tipos de uso de suelo en la Microcuenca quebrada Mancilla considerando al Factor C, como un factor relevante que ocasione un impacto erosivo en la microcuenca, pero visualizando su gran importancia en la protección que ofrece al suelo frente a problemas erosivos por precipitación.

Los tipos de uso de suelos que se encontraron son: área Urbana, área agrícola heterogénea, área con vegetación, bosques, cultivos anuales, cultivos permanentes, mosaico de cultivos pastos y espacios naturales, mosaico de pastos y cultivos, pastos, zona industrial, zonas verdes no agrícolas como se observa en la Tabla 21. Teniendo en cuenta los resultados y análisis, el sector ganadero es el de mayor porcentaje de superficie ocupando dentro de la microcuenca quebrada Mancilla con un 36,11% del área total, por ser una zona dedicada a la ganadería y sus derivados lácteos, también se encuentra un buen porcentaje de bosque con un 31,04 % beneficiando directamente el suelo, ya que estas coberturas poseen características que protegen el suelo de la erosión hídrica y al existir una extensa zona protegida por estas coberturas la microcuenca tiende a tener bajos porcentajes de erosión. Además, cultivos que favorecen los procesos que conllevan a la erosión hídrica como son los cultivos anuales y permanentes que tienen la menor presencia en la zona con un 0,25 % y 0,82% respectivamente.

Tabla 21. Valores del factor c, en cada unidad de vegetación de la microcuenca

| Uso Del Suelo | Área (ha) | Área (%) | Factor C |
|---------------|-----------|----------|----------|
| Área Urbana   | 178       | 6,07     | 1        |

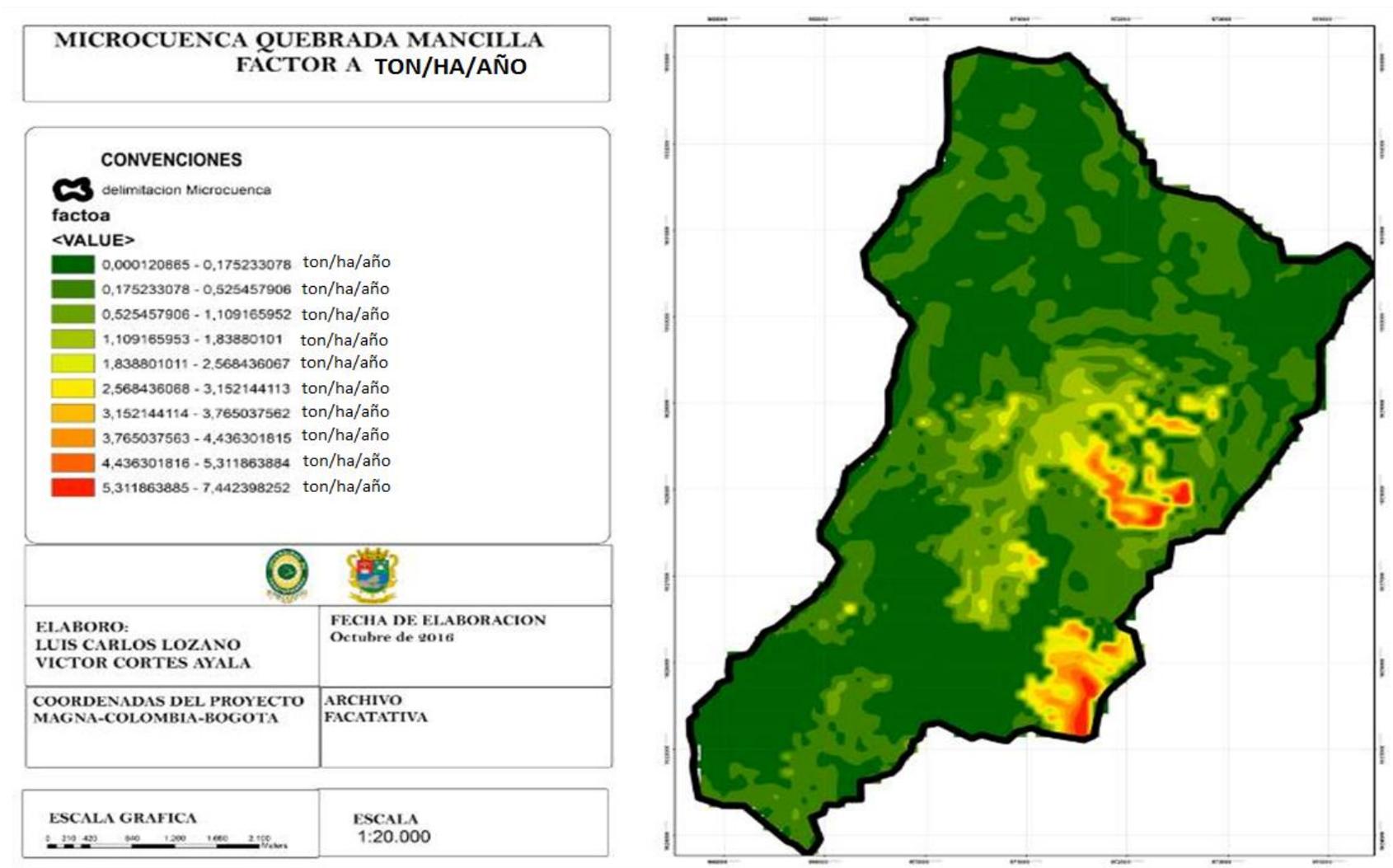
| Uso Del Suelo                                    | Área (ha)                      | Área (%) | Factor C |
|--|--------------------------------|----------|----------|
| Área agrícola heterogénea                        | 285                            | 9,70     | 0.435    |
| Área con vegetación                              | 82                             | 2,79     | 0.900    |
| Bosques  | 913                            | 31,04    | 0.041    |
| Cultivos anuales                                 | 7                              | 0,25     | 0.435    |
| Cultivos permanentes                             | 24                             | 0,82     | 0.435    |
| Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales | 122                            | 4,15     | 0.130    |
| Mosaico de pastos y cultivos                     | 38                             | 1,31     | 0.435    |
| Pastos   | 1.062                          | 36,11    | 0.07     |
| Zona industrial                                  | 103                            | 3,51     | 1        |
| Zonas verdes no agrícolas                        | 125                            | 4,26     | 0.001    |
| <b><u>TOTAL</u></b>                              | 2.940ha (29.4km <sup>2</sup> ) | 100%     |          |

***Fuente: autores***

## 10.2 Mapa de pérdida de suelo USLE (mapa A).

La elaboración del mapa de estados erosivos de la microcuenca quebrada mancilla (ver Imagen 38) según la USLE, resultante de la superposición de los factores (K, C, LS, R), utilizando el sistema de información geográfica Arcgis 10.2, permitió un mapeo de las zonas afectadas por los distintos grados de destrucción de los suelos, agrupando los valores en una serie de intervalos que nos permitieron localizar, de manera precisa, las zonas donde existe el mayor riesgo de erosión.

Imagen 38. Resultado del Riesgo de erosión hídrica para la micro-cuenca quebrada mancilla



Fuente: autores

Mediante el análisis de este mapa de erosión A, se establece que el proceso de erosión aplicando la ecuación universal de pérdida de suelo U.S.L.E y sus niveles establecidos, arroja que la superficie de la microcuenca quebrada Mancilla presenta una erosión predominante que oscila entre 0 a 2 ton\*ha\*año perteneciendo a los rangos establecidos como muy baja y baja (0 -10 Ton\*ha\*año) según la clasificación de erosión del suelo como se observa en la Tabla 22; por otro lado en la Tabla 23 se encuentra la clasificación de pérdida del suelo para Colombia según Pérez, donde la microcuenca marca un rango de erosión clase 1 siendo este una erosión ligera (0 -10 Ton\*ha\*año), indicando que la zona objeto de estudio presenta una resistencia alta al proceso de erosión hídrica.

Tabla 22. Calificación de pérdidas del suelo

| Calificación de pérdidas del suelo | Rango de erosión (ton/ha*año) |
|------------------------------------|-------------------------------|
| Erosión muy baja                   | 0-5                           |
| Erosión baja                       | 5-10                          |
| Erosión leve                       | 10-25                         |
| Erosión moderada                   | 25-50                         |
| Erosión grave                      | 50-100                        |
| Erosión muy grave                  | 100-200                       |

Fuente: Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de Caldas.

Cenicafe. 2009

Se constató que no se presenta erosión potencial teniendo como los valores más altos de 5,31 a 7,44 (Ton\*ha\*año) estos rangos donde se presenta mayor riesgo de erosión corresponden a zonas específicas de mayor pendiente y precipitación, siendo estas las zonas más afectadas por el proceso erosivo, lo contrario se evidencio en la mayoría de la zona de la microcuenca donde no se encontraban pendientes pronunciadas y la precipitación no tiene mayores consecuencias a causa de la buena cobertura vegetal con la que cuenta la zona objeto de estudio.

Tabla 23. Clasificación de acuerdo a la Perdida de suelo propuesta por Pérez, 2008 para Colombia.

| Clase | Perdida de suelo (ton*ha/año) | Calificación de perdidas |
|-------|-------------------------------|--------------------------|
| 1     | Menores de 10                 | Ligera                   |
| 2     | 10 a 25                       | Baja                     |
| 3     | 26 a 50                       | Moderada                 |
| 4     | 51 a 100                      | Alta                     |
| 5     | Mayores de 100                | Muy alta                 |

Fuente: Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de Caldas. Cenicafe. 2009

Las zonas de mayor riesgo de erosión se vienen presentando a causa de la intervención antrópica, siendo estas utilizadas en actividades agropecuarias que han generado un mal manejo y uso del suelo, generando impactos ambientales como la tala de bosques, implementando monocultivos en las áreas de mayor pendiente, siembra de pastos sin tecnificación que dejan el suelo sin cobertura vegetal y desprotegido frente al efecto de la lluvia cuando se presente la temporada invernal.

### 10.3 Propuesta de diseño de bioingeniería para el control y recuperación de una zona de ladera.

Debido a que la zona objeto de estudio arrojó un rango de erosión correspondiente a muy bajo y bajo, y en la verificación y reconocimiento de campo, no se encontraron zonas con un grado considerable de erosión, en la cual se pudiera implementar una propuesta de bioingeniería para el control y recuperación de la zona de ladera en la micro-cuenca quebrada mancilla, se identificó una ladera que fue afectada por un incendio forestal (ver Imagen 39) ocurrido dentro de la zona de estudio (Tabla N°24) en el año 2015.

Tabla 24. Coordenadas zona de diseño

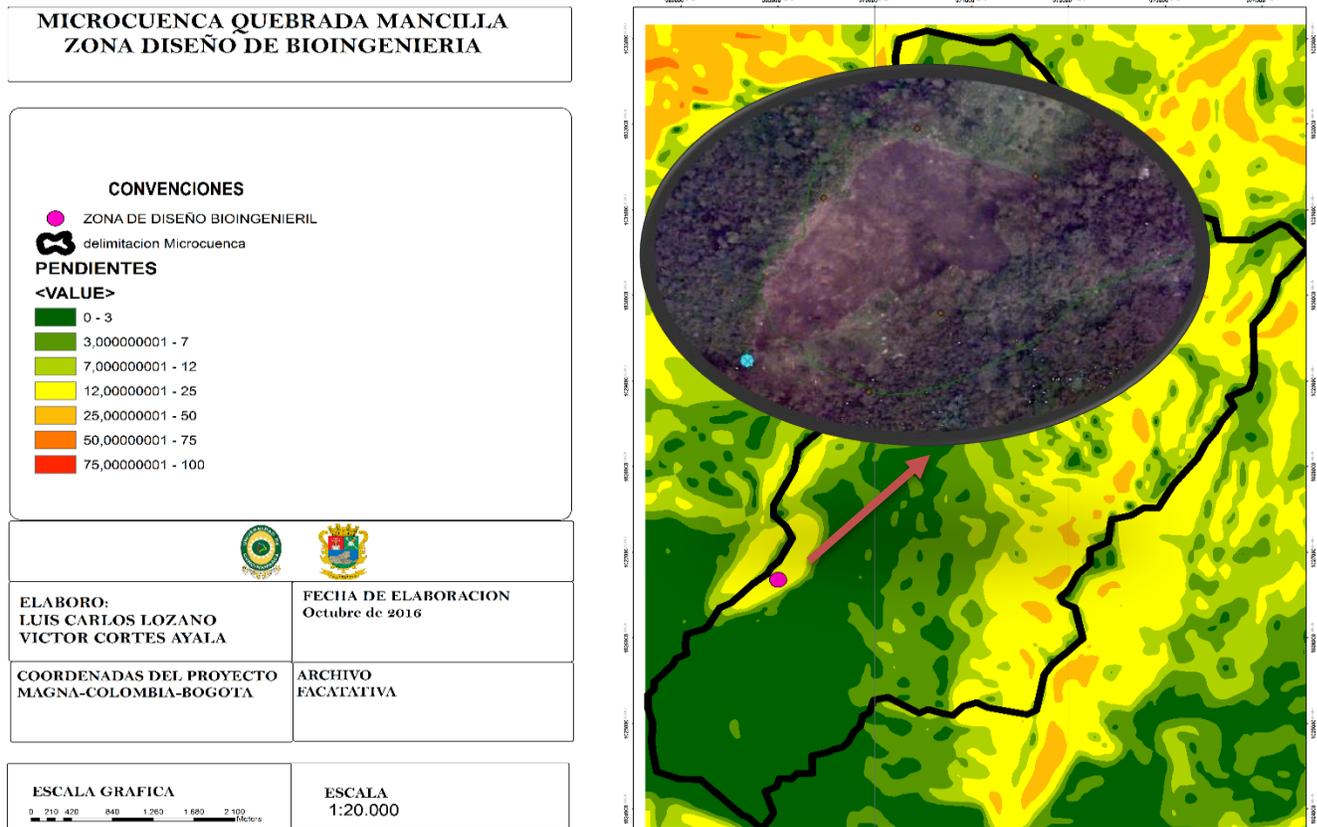
| COORDENADAS DEL ÁREA DE DISEÑO EXPERIMENTAL – OBRA BIOINGENIERÍA |         |       |      |
|--|---------|-------|------|
|  | X       | y     | Z    |
| <b>Zona de diseño</b>  | -74.358 | 4.836 | 2681 |

Fuente: Autores

La recuperación de esta zona es de vital importancia, debido a la intervención antrópica que posee actualmente. La ladera sufrió en la última estación de verano un grave daño de la flora nativa, a raíz de un incendio que arrasó con gran parte de la vegetación existente, permitiendo que los fenómenos erosivos fueran más propensos a ocurrir en cualquier sección de la ladera.

En el momento del reconocimiento en campo de la zona de estudio se consideró importante hacer diseños estratégicos que pudieran mitigar y controlar los efectos más importantes de erosión hídrica que se pudieran presentar.

Imagen 39. Zona diseño de bioingeniería



Fuente: autores

Las características geomorfológicas que presenta la zona son:

- La parte más alta de la zona está ubicada a 2694 msnm, la parte más baja se ubica a 2681 msnm.
- Zona de ladera que tiene una longitud promedio desde la cima hasta la base de la ladera de 77m metros.
- Pendiente del 10.08%
- La vegetación presente en la zona de estudio tiene un porcentaje de cobertura del 10%
- Se identifica en la ladera problemas de erosión hídrica en surcos y tala indiscriminada de árbol.

- Se identificó posibles problemas de remoción en masa debido a la acumulación de material vegetal (madera), su pronunciada pendiente (11°) y su tipo de suelo (ver Imagen 40).

*Imagen 40. Zona de Estudio – obra de bioingeniería*



Fuente: Autores

El objetivo de la propuesta de diseño, fue implementar diferentes obras de bioingeniería para poder realizar una recuperación “total” de la zona de ladera afectada por diferentes factores en la micro-cuenca quebrada mancilla:

Por tal motivo la propuesta elaborada, cumple a cabalidad, la recuperación de las zonas afectadas con las problemáticas propuestas. Por medio de la fabricación e implementación de las siguientes obras.

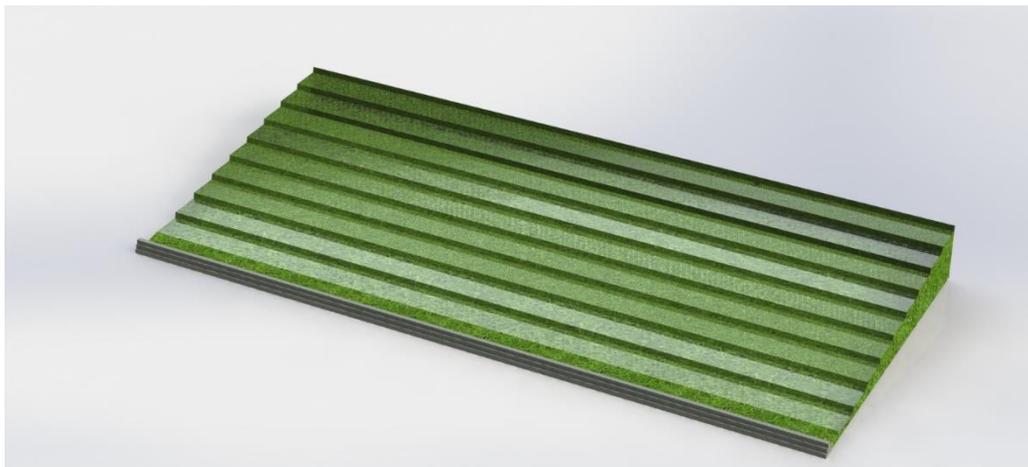
1. Implementación de Terrazas
2. Reforestación
3. Muros de contención (Gaviones)

El plano del diseño - obra de bioingeniería se puede observar en el anexo N°4 (Imagen 49)

### 10.3.1 Implementación de terrazas

En el área objeto de estudio correspondiente, luego de la sección previa de gaviones de caja, se implementará un proyecto sobre terrazas de banco a gran escala, el cual consta principalmente de 9 secciones de proporciones similares, donde se realizaron cortes secuenciales con ayuda de las curvas de nivel quedando en forma de escalones (Imagen N°41). Estas terrazas se implementaron con el objeto de facilitar la generación de una serie de plantaciones forestales en cuanto a un enfoque de proyección de recuperación del área.

Imagen 41. Diseño de terrazas



Fuente: Autor (solidworks 2016)

Además, teniendo en cuenta las condiciones de la zona, donde se produjo un incendio de grandes magnitudes, dejando como resultado un suelo desnudo en gran parte de la zona 90% exactamente, como consecuencia de este factor de cobertura vegetal, se derivan problemas erosión hídrica muy marcados teniendo como factores, la erosión en surcos.

Analizando la problemática del área objeto de estudio en la mayor parte de sus condiciones se implementaron terrazas, que aterrizando distintos factores tienen

como principal función, no permitir que la tierra siga siendo arrastrada por el agua, con fundamentos tales como: disminuir la velocidad y el volumen de escorrentía, disminuir las pérdidas de semillas y abonos a la hora de implementar el proceso de reforestación, aumentar las condiciones de humedad en el suelo, mejorando la tasa de infiltración del agua a largo plazo, además mejorar y suavizar la topografía del terreno.

○ Metodología:

Como primer paso para la construcción de las terrazas a gran escala, se marcan las líneas guía desde la parte baja de la zona, teniendo en cuenta el nivel superior de los gaviones, y se marcarán justo un metro (1m) antes de dicho nivel, cuyas razones serán justificadas posteriormente, y se marcarán los límites de las secciones respecto a las curvas de nivel cada 50m metros.

Como segundo paso se procederá a generar un corte en forma de triángulo, desde la parte superior (dejando una leve inclinación en la excavación de manera que el agua se desplace hacia la parte interna del talud); luego este suelo removido será implantado justo en la parte inferior, este proceso será secuencial desde la parte alta de la zona para obtener 9 plataformas finales ver Imagen 42.

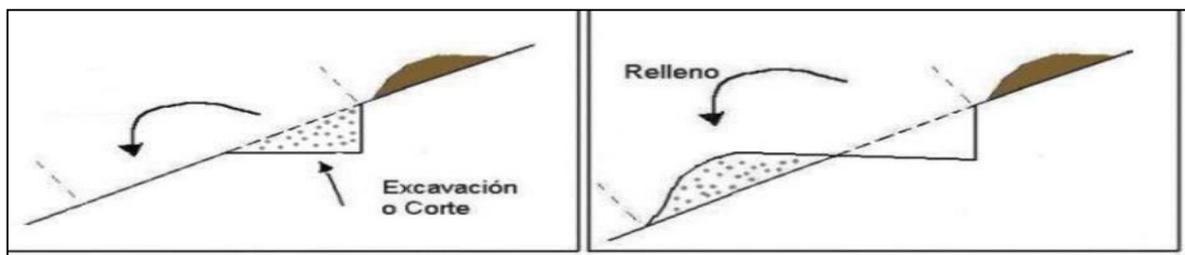


Imagen 42. Adecuación de terrazas

Fuente: web

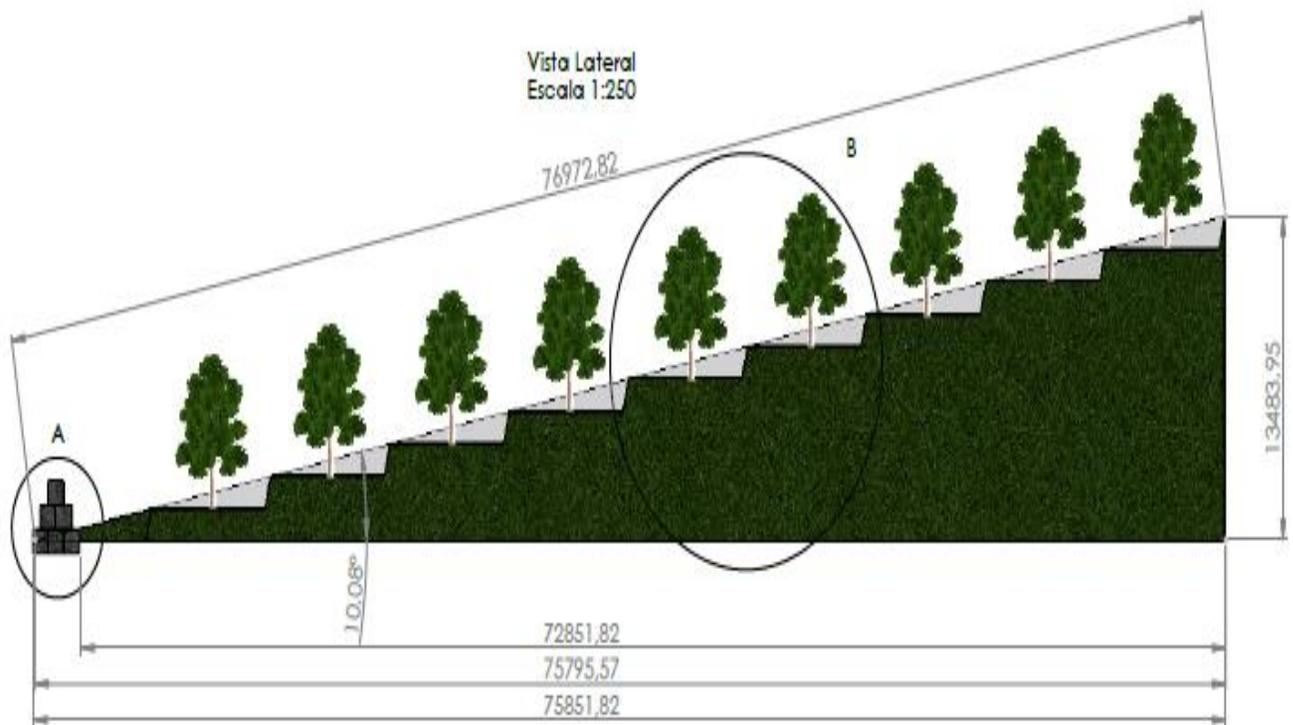
- Luego se genera un proceso de compactación y apisonamiento del suelo en la parte de los bordes de las terrazas, para ser asegurados con una

geogrilla; puesto que es un elemento estructural que aporta resistencia permitiendo aumentar la capacidad de soporte y bajando con esto los costos de construcción, y sobre todo pueden reforzar taludes a cualquier altura, con estas estructuras reforzaremos todas laminas verticales de cada una de las 9 plataformas de la terraza.

- Dimensiones y diseño

En la (Imagen 43), se muestra el diseño de las terrazas con sus respectivas dimensiones.

Imagen 43. Vista de perfil del diseño de terrazas

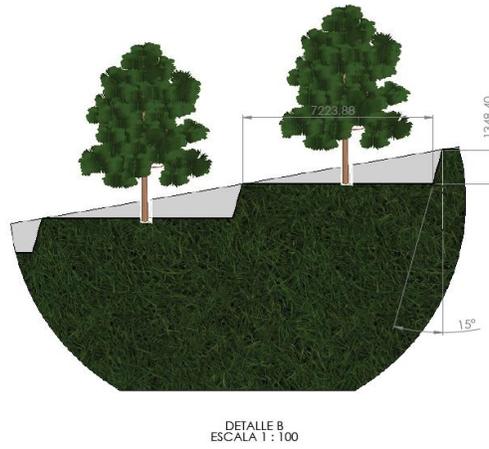


Fuente: Autor (solidworks 2016)

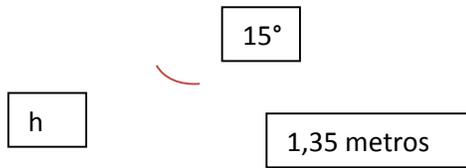
Dimensión por secciones:

En la (Imagen 44), se muestra una sección de la terraza con sus respectivas dimensiones

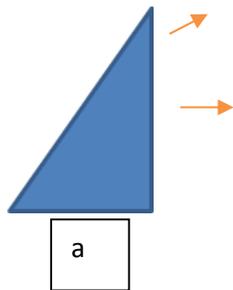
Imagen 44. Sección de terrazas



Fuente: Autor (solidworks 2016)



- Por lámina vertical:



$$\text{Cos}(15)^\circ = \frac{a}{h}$$

$$h = \frac{a}{\cos(15)}$$

$$h = 1,39$$

$$a = \sqrt{h^2 - b^2}$$

$$a = \sqrt{1,39^2 - 1,35^2}$$

$$a = 0,33\text{m}$$

- Área del rectángulo:

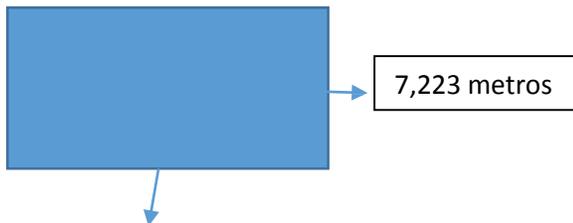
base x altura 1,39 metros x

$$167,32\text{metros} = 232.5 \text{ M}^2$$

-  $232.5 \text{ M}^2 \times$  (número de láminas verticales en la totalidad de las terrazas)

Laminas verticales: 9 secciones verticales

$$232.5 \text{ M}^2 \times 9 = 2092.5 \text{ M}^2$$



• Por lámina horizontal (plataforma):

$$167,325 \text{ metros}$$

• Área del rectángulo:

$$\text{largo x ancho } 7,223 \text{ metros x } 167,325 \text{ metros} = 1208.6 \text{ M}^2$$

- 1208.6 M<sup>2</sup>x (número de láminas horizontales en la totalidad de las terrazas)

- Láminas horizontales: 9 secciones horizontales

$$1208.6 \text{ M}^2 \times 9 = 10877.4 \text{ M}^2$$

• Área total:

$$2092.5 \text{ m}^2 + 10877.4 = 12969.9 \text{ m}^2 (1.29\text{ha})$$

○ Costos

En la Tabla N° 25 se encuentran registrados los costos totales de la fabricación de la obra de bioingeniería “taraceo”.

Tabla 25. Costos de fabricación del taraceo

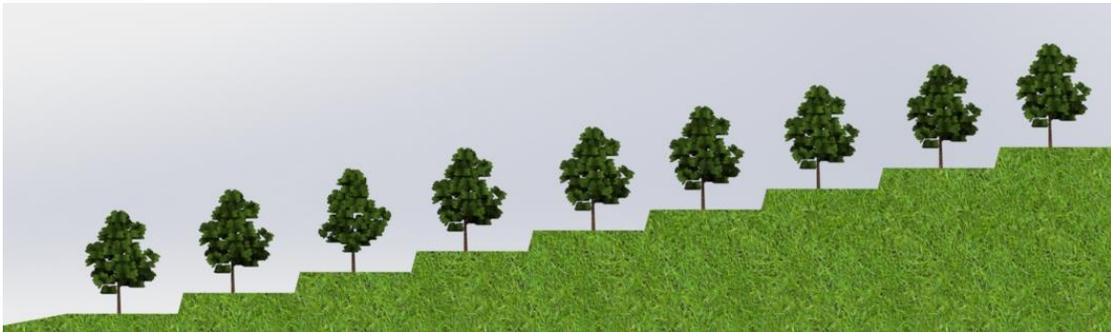
| ESTRUTURA U OBRA   | Precio C/U              | Costo Por Ha | Costo de la obra (1.29ha) |
|--|-------------------------|--------------|---------------------------|
| Geogrilla para láminas verticales y horizontales Grapas de alambrón. | 800 \$ x M <sup>2</sup> | \$ 8´000.000 | \$ 10´320.000             |
| <b>TOTAL</b>   |                         |              | <b>\$ 10´320.000</b>      |

Fuente: autores

### 10.3.2 Proceso de reforestación

Este proceso de reforestación se realiza luego de la implementación estructural de la terraza, teniendo esta una zona firme y fijada donde se puede trabajar con tranquilidad, (Imagen 45).

Imagen 45. Diseño de reforestación



Fuente: Autor (solidworks 2016)

Analizando la problemática y teniendo en cuenta las condiciones de la zona, donde se produjo un incendio de grandes magnitudes, que dejó como resultado un suelo desnudo en gran parte de la zona, como consecuencia de este factor de cobertura vegetal en el terreno es de 10%, un factor muy bajo el cual potencializa la erosión, además de tener un suelo de baja fertilidad debido a su porcentaje de materia de materia orgánica, el cual corresponde a un índice nulo.

Se pretende generar un proyecto de recuperación de la zona en cuanto a cobertura vegetal para disminuir el factor de erosión y dar una mejor fijación al terreno, para esto se implementará una reforestación sobre las terrazas que consta de diversas actividades.

- Metodología

1. Como primera medida se colocará una capa superficial de suelo abonado con bovinaza, con la ventaja que no será necesario arar el suelo pues a la hora de generar las terrazas el suelo fue totalmente mezclado, y se utilizará este tipo de abono pues es orgánico y contiene muy buenos componentes de

nutrientes para el suelo, y su bajo costo en un municipio que se caracteriza por la actividad ganadera.

2. Como segundo paso se implementará una fijación de esta lamina de suelo abonado a la superficie de las paredes verticales y horizontales de las terrazas, esta fijación se realizará con un textil orgánico como lo es mallas en fique, por su buen funcionamiento en estos procesos, su disponibilidad y su bajo costo, antes de la fijación en las láminas verticales se hará la aspersion de semilla del cultivo seleccionado.

3. Luego se seleccionará la vegetación correspondiente para una adecuada reforestación, por medio de la revisión de documentos y condiciones climáticas ambientales, y la flora en el municipio de Facatativá, se pudieron seleccionar ciertos tipos de vegetación.

4. Para las láminas verticales de las terrazas se implementaran cultivos de gramíneas, pues en este tipo de pendientes y condiciones son las que mejor se adaptan a ellas; para ello se eligió el pasto vetiver, pues es una gramínea que ha generado mucho interés a nivel mundial como una tecnología tradicional para la conservación de los suelos y agua, tiene muy buenas condiciones de resistencia, y cuenta con un sistema radical que puede crecer hasta una profundidad de 5 metros, y bajo la superficie del suelo se forma una barrera en raíces que permite que los suelos se estabilicen debido al amarre, lo que lo hace propicio para el terreno.

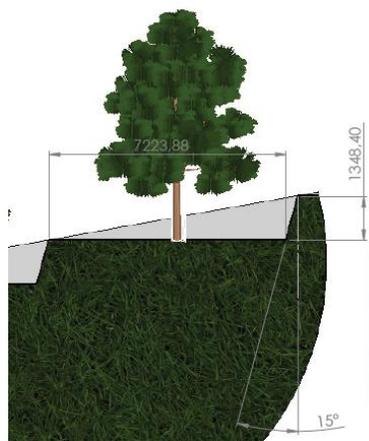
5. En las zonas horizontales se implementaron una técnica de cultivo en surcos alternos entre gramíneas como es el caso del vetiver, y árboles para el cual se escogió una familia nativa de la región; el Sietecueros (*Tibouchina lepidota* Familia, Melastomatácea) que cuenta con las condiciones para su crecimiento en la zona.

○ Dimensiones y Diseño

Dimensión por secciones:

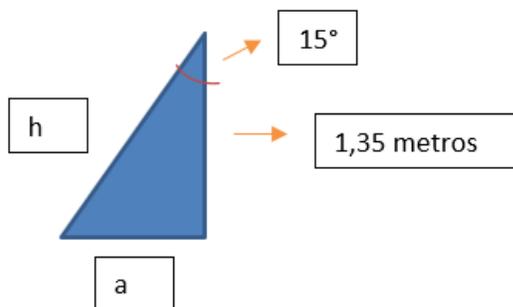
En la (Imagen 46), se muestra una sección del área a reforestar con sus respectivas dimensiones

Imagen 46. Sección de reforestación



Fuente: Autor (solidworks 2016)

• Por lámina vertical:



$$\text{Cos}(15)^\circ = \frac{a}{h}$$

$$h = \frac{a}{\cos(15)}$$

$$h = 1,39$$

$$a = \sqrt{h^2 - b^2}$$

$$a = \sqrt{1,39^2 - 1,35^2}$$

$$a = 0,33\text{m}$$

- Área del rectángulo:

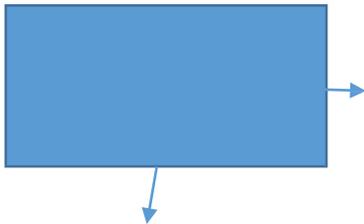
base x altura 1,39 metros x

$$167,32\text{metros} = 232,5 \text{ M}^2$$

-  $232,5 \text{ M}^2 \times$  (número de láminas verticales en la totalidad de las terrazas)

Laminas verticales: 9 secciones verticales

$$232,5 \text{ M}^2 \times 9 = 2092,5 \text{ M}^2$$



• Por lámina horizontal (plataforma):

167,325 metros

7,223 metros

• Área del rectángulo:

largo x ancho 7,223 metros x 167,325 metros= 1208.6 M<sup>2</sup>

- 1208.6 M<sup>2</sup>x (número de láminas horizontales en la totalidad de las terrazas)

- Láminas horizontales: 9 secciones horizontales

$$1208.6 \text{ M}^2 \times 9 = 10877.4 \text{ M}^2$$

• Área total:

$$2092.5 \text{ m}^2 + 10877.4 = 12969.9 \text{ m}^2$$

○ Área a reforestar.

• Reforestación con gramíneas (vetiver) en 1.29 hectáreas que conforman la zona a intervenir.

- 10 kilos de semilla x hectárea.

- 10 kilos de semilla x 1.29Ha = 12.9kg

Se necesitarán 12.9 kg de semilla de la gramínea para reforestar las todas las láminas (48) verticales de la terraza.

• Reforestación de lámina horizontal o plataforma:

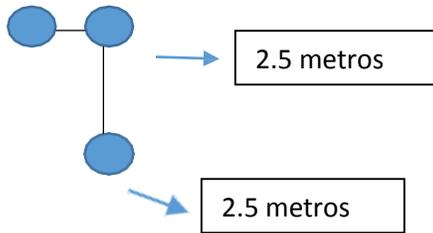
Se plantarán árboles para el cual se escogió una familia de árboles nativo de la región; el Sietecueros (Tibouchina lepidota Familia, Melastomatácea).

Estas plantaciones se estructurarán a lo ancho y largo de la plataforma por cada una de las láminas horizontales:

- A lo largo de la plataforma cuenta con 167.32 metros y la distancia entre arbustos será de 2.5 metros.

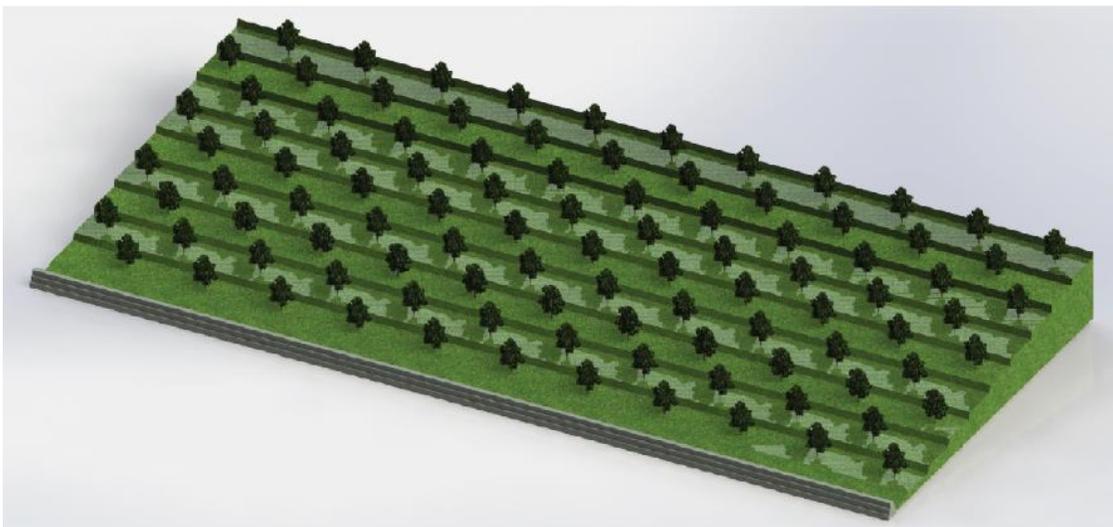
- A lo ancho de la plataforma cuenta con 7.223 metros y la distancia entre arbustos será de 2.5 metros.

Distancia entre arbustos:



Para tales dimensiones se distribuyó un diseño de 67 árboles x 2 árboles, lo cual nos indica que para cada plataforma se utilizarán 134 árboles; este por la totalidad de láminas en las terrazas equivalentes a 9, se obtendrá un valor de 1206 árboles totales para reforestar el área total (Imagen 47).

Imagen 47. Diseño de área de reforestación



Fuente: Autor (solidworks 2016)

o **costos**

En la Tabla N° 36 se encuentran registrados los costos totales de la reforestación para la zona de estudio.

Tabla 26. Costos de reforestación

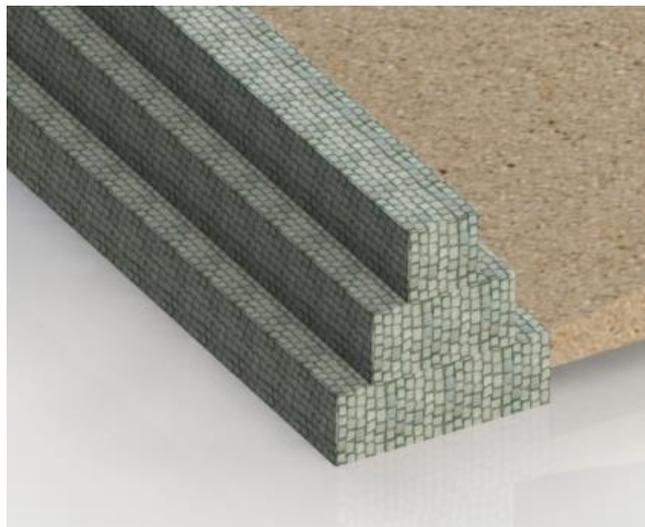
| ESTRUTURA U OBRA           | Precio C/U             | Costo Por Ha | Costo de la obra Total |
|----------------------------|------------------------|--------------|------------------------|
| Plantaciones de gramíneas. | \$9000- 1kg de semilla | \$90000      | \$ 117.000             |
| Plantación de árboles      | \$30000 x unidad       |              | \$ 36´180.000          |
| <b>TOTAL</b>               |                        |              | <b>\$ 36´297.000</b>   |

Fuente: autores

### 10.3.3 Muros de contención (gaviones de caja)

Debido a su elevada pendiente y sus múltiples problemas en los que identifica, erosión en surcos, por efectos de la erosión hídrica, se ha decidido implementar un muro de contención, más conocido como Gaviones tipo caja, debido a que desde el punto de vista técnico y económico, poseen un conjunto de características funcionales que no existen en otros tipos de estructuras a pesar de su baja complejidad en la fabricación.

Imagen 48. Diseño de gaviones



Fuente: Autor (solidworks 2016)

El gavión tipo caja (ver Imagen 48) es una estructura metálica, en forma de paralelepípedo, producida a partir de un único labrado de malla hexagonal de doble torsión, con las que se forman todas sus caras y sus divisiones internas.

Estas estructuras poseen diferentes ventajas y por este motivo se desean implementar en la parcela afectada en el municipio de Facatativá:

- La ventaja principal para su fabricación es que, en zonas aledañas a la ladera afectada, se encuentra Una cantera donde se obtiene rocas de todos los tamaños de alta densidad y empresas Metalúrgicas para la elaboración de geomallas y alambre para construir gaviones
  - Los cajones de gaviones forman una sola estructura, y esto hace que tenga mayor resistencia al volteo y al deslizamiento
  - Debido a que el objetivo es recuperar la capacidad de infiltración que tenía el suelo de la ladera. Es importante una estructura que contenga cualquier desplazamiento de suelo, en la parte inferior y permita el flujo normal del agua
  - Controlan eficientemente la erosión en cárcavas de diferentes tamaños.
- **Metodología:**
1. Es necesario realizar un acondicionamiento de la zona debido a que ya ha tenido problemas de deslizamiento.
  2. Las “Cajas” que conformar la estructura del gavión serán confeccionadas con redes de malla hexagonal de doble torsión de material metálico con el menor espaciado posible (producida con alambres de acero con bajo contenido de carbono, revestidos con una aleación de zinc, aluminio (5%) y un revestimiento Galfan y un revestimiento con un compuesto termoplástico a base de PVC,), que confiere protección definitiva contra la corrosión.
  3. Las cajas tendrán una dimensión de 1m ancho, 1m alto, 4m de largo y 4 compartimientos, para una mejor repartición del peso.
  4. Luego se procederá a llenar cada caja con piedras con un tamaño inferior dejando como máximo el 20% de la caja vacía.
  5. Después se procederá a que todas las unidades queden firmemente unidas entre sí a través de costuras con alambres de igual calibre a los de la malla, formando de esta manera una

estructura continúa. (Por motivos de diseño se ha considerado un ancho total de muro de 3m y un alto de 3m, las cuales son dimensiones optimas, para la contención de cualquier tipo de deslizamiento u remoción en masa que se genere en un futuro).

6. Se procederá a armar un gavión con forma piramidal de 3 escalones debido a que brinda la mayor estabilidad y resistencia posible.
7. Se procederá a que todas las unidades de los cajones queden firmemente unidas entre sí, hasta formar una longitud de 167.5 (metros), la cual es la longitud total de la ladera afectada en el municipio de Facatativá.

○ **CARACTERISTICAS DEL BLOQUE**

- Volumen de la caja y volumen de roca:  $V=1m*1m*4m$

$V=4m^3$  volumen de la caja= Volumen total de roca por C/u de caja

- Cantidad de cajas que conforman el gavión con forma piramidal de 5 escalones (10m ancho X 10m alto), (ver Imagen 49)

Imagen 49. Dimensiones de los gaviones



Fuente: Autor (solidworks 2016)

En la Tabla N°27 se muestra la relación entre el número de cajas a utilizar y la capacidad volumétrica en m<sup>3</sup> que cada una cuenta para almacenar las rocas.

Tabla 27. Capacidad volumétrica de los gaviones

| ESCALON<br>PIRAMIDAL #            | # DE CAJAS | CAPACIDAD VOLUMETRICA<br>DE ROCA |
|-----------------------------------|------------|----------------------------------|
| 1                                 | 3          | 12 m <sup>3</sup>                |
| 2                                 | 2          | 8m <sup>3</sup>                  |
| 3                                 | 1          | 4m <sup>3</sup>                  |
| <b>TOTAL, CAJAS</b>               | 6          |                                  |
| <b>TOTAL, VOLUMEN DE<br/>ROCA</b> |            | 24 m <sup>3</sup>                |

Fuente: autores

Estas cantidades de cajas serían las necesarias para fabricación de los gaviones en 4 m de longitud X 3 m de profundo, valores necesarios para conocer la cantidad de material a usar en los 167.5m de longitud que tiene la ladera con problemas de deslizamientos.

- Cantidad de estructuras piramidales en 167.5m

$$Ce = \frac{167.5m}{4m}$$

$$Ce = 41,8$$

$$Ce = 42 \text{ estructuras}$$

- Cantidad de cajas de conforman toda la estructura en los 167.5m

$$\text{Cajas(totales)} = 42 \text{ estructuras} * 6 \text{ cajas}$$

Cajas(totales)= 252 Cajas

- Volumen total de roca para las cajas:

$$\text{Volumen roc(totales)} = 252 \text{ cajas} * 4\text{m}^3$$

$$\text{Volumen Roc(totales)} = 1008\text{m}^3$$

- **COSTOS**

En la Tabla N° 28 se encuentran registrados los costos totales de la fabricación de la obra de bioingeniería “gaviones”.

Tabla 28. Costos de gaviones

| DESCRIPCIÓN  | Unidad  | Cantidad           | Valor      | Valor total    |
|--|---|--------------------|------------|----------------|
| Volumen de roca ( tamaño inferior a 30cm de diámetro)                    | Viaje (6m*3)  | 1008m <sup>3</sup> | \$ 400.000 | \$ 67.200.000  |
| Cajas prefabricadas de en malla hexagonal de doble torsión sombra (lona) | 1   | 252 cajas          | \$ 150.000 | \$ 37.800.000  |
| SUBTOTAL   |   |                    |            | \$ 105.000.000 |
| Mano de obra   | Se tiene en cuenta el valor del proyecto más un 30% |                    |            | \$ 31.500.000  |
| TOTAL  |   |                    |            | \$ 136.500.000 |

Fuente: autores

## **11. Conclusiones.**

Mediante el análisis obtenido de los datos entre los años 2005-2015 de las 5 estaciones pluviométricas, se estableció que la estación, el Acomodo presento las precipitaciones promedio más relevantes en el momento del análisis de la erosividad de la lluvia, con una precipitación media anual de (2232,6), y la estación el Tesoro presento la precipitación promedio más baja en comparación con la demás estaciones pluviométricas, con una precipitación media anual de (844,7) siendo esta la menos influyente en el factor de erosividad (R).

Mediante el análisis de las prácticas de laboratorio para las respectivas muestras tomadas en el área de estudio se identificó una clasificación textura predominante de suelo franco-arenoso, una permeabilidad moderadamente lenta, estructura granular gruesa o grumoso y un porcentaje de materia orgánica de 9,7; siendo estas características óptimas para el sector agrícola.

Mediante el análisis del Factor de riesgo de erosión (A), se identificó que la zona de la micro-cuenca quebrada Mancilla presenta un rango de erosión hídrica en toda su área de muy baja a baja, con su rango de erosión más alto de 5,31 a 7,44 Ton\*ha\*Año siendo esta un área resistente a los problemas de erosión hídrica.

En cuanto al rango de valores en el mapa del factor de pendientes (LS),se observaron que las pendientes oscilan entre en el rango de (0,03 - 13,86), evidenciándose los valores más altos en las partes de mayor altitud de la micro-cuenca, siendo estas las zonas más afectadas por el proceso erosivo, lo contrario se evidencio en la mayoría de la zona de la microcuenca donde no se encontraban pendientes pronunciadas y la precipitación no tiene mayores consecuencias a causa de la buena cobertura vegetal con la que cuenta la zona objeto de estudio.

Mediante el análisis del factor de cobertura vegetal (C), se determinó que un 67,15% de la cobertura pertenece a un uso de suelo de bosques y pastos, beneficiando directamente el suelo, ya que estas coberturas poseen características que protegen el suelo de la erosión hídrica y al existir una extensa zona protegida por estas. La microcuenca tiende a tener bajos porcentajes de erosión. Además, cultivos que favorecen los procesos que conllevan a la erosión hídrica como son los cultivos anuales y permanentes que tienen la menor presencia en la zona con un 0,25 % y 0,82% respectivamente.

El diseño de obra-bioingeniería se planteó y ubicó en un terreno afectado por un incendio forestal teniendo en cuenta el bajo porcentaje de erosión hídrica (ton\*ha\*año) encontrado en la totalidad de la micro-cuenca quebrada Mancilla, debido a que no se pudo evidenciar en revisión de campo problemas considerables de erosión, a los cuales adecuar una obra bio-ingenieril de consideración.

## 12. RECOMENDACIONES.

Para que el grado de precisión del factor R en la Ecuación Universal De Perdida de suelo sea más elevado. Se recomienda hacer uso de base de datos de estaciones pluviométricas más cercanas a la zona de estudio, las cuales posean un registro de datos más completo de la intensidad de la lluvia y de ser posible en intervalos de 10 minutos, permitiendo de esta manera hacer uso de variables importantes como lo son, la energía cinética y la intensidad de la lluvia.

Se recomienda implementar la metodología propuesta, para futuras investigaciones en la micro-cuenca quebrada mancilla, y realizar futuras correcciones de los datos, mediante monitoreos de los diferentes factores influyentes en la USLE que nos indiquen el nivel actual de erosión hídrica dentro de la micro-cuenca. Permitiendo la toma de decisiones pertinentes a la mitigación, contención, y protección del recurso suelo.

Es recomendable aplicar una labranza conservacionista en los usos del suelo de cultivos permanentes y temporales, como lo son siembra directa o labranza cero en el área de la microcuenca quebrada Mancilla, en conjunto con vegetación nativa de la zona para el fortalecimiento de las características físico-químicas del suelo, en procura de mejorar su resistencia de efectos destructivos de la erosión eólica e hídrica.

Se recomienda la utilización de la información espacial-shapefile, obtenida en el proceso a través el SIG (ArcGis 10.2), Para futuros proyectos en beneficios de la protección de los recursos naturales existentes (suelo, agua, vegetación natural), dentro de la micro-cuenca quebrada Mancilla.

Se recomienda la generación de proyectos y programas de capacitación en conservación y buen manejo en rotaciones de cultivos para poder realizar la caracterización de la zona e Implementar en futuros estudios el factor P (manejo y conservación de los suelos) en la micro-cuenca quebrada mancilla con el apoyo de las

instituciones de investigación como: Universidad de Cundinamarca, SENA, CAR y demás instituciones ambientales y agrícolas de la región.

### 13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Camino, E. (2014). análisis y simulación de pérdida de suelos aplicados a la gestión forestal. Septiembre 11, 2015, de Universidad del País Vasco, Recuperado de: <http://www.ingeba.org/lurralde/lurranet/lur37/37%20edorta%20caminoBR.pdf>
2. Oyarsun, E.(1998). Evaluación del modelo U.S.L.E. para predecir pérdidas de suelo en áreas forestadas de la cuenca del río Bío-Bío. septiembre 12, 2015., de Instituto de Geociencias, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile Sitio web: <http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v14n1/art06.pdf>
3. Curfs, M. & Imeson. (2007). la erosión del suelo. agosto 29, 2015, de Lucinda Recuperado de: [http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/booklets/B1\\_Booklet\\_Final\\_ES.pdf](http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/booklets/B1_Booklet_Final_ES.pdf)
4. Universidad de Alicante. (2005). Mediterránea Serie de Estudios Biológicos. 2015, de Espagrafic Recuperado de: <http://publicaciones.ua.es/filespubli/pdf/02105004RD23527678.pdf>
5. Serrano, M. Torrado, L. Pérez, D. Estrategia de transferencia de conocimiento sobre nuevas prácticas para estudios de suelos. Agosto 27, 2015, de Universidad Pontificia Bolivariana Bucaramanga, Colombia.
6. León, J.(2006). Métodos experimentales para el seguimiento y estudio de la erosión hídrica . Agosto 28, 2015, de Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín Recuperado de: [http://www.unalmed.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan%20Diego/Plnaifi\\_Cuencas\\_Pregrado/art%EDculo%20estudio%20de%20la%20erosi%F3n.pdf](http://www.unalmed.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan%20Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregrado/art%EDculo%20estudio%20de%20la%20erosi%F3n.pdf)

7. Martínez, F.(2010). Practicas biomecánicas para la recuperación de suelos erosionados. Agosto 29, 2015, de Ingeniero Agrónomo Recuperado de: <http://www.buscagro.com/biblioteca/MartinezAstudillo/MartinezAstudillo.html>
8. P.A. Slaney and A.D. Martin. (1997). The Watershed Restoration Program of British Columbia: Accelerating Natural Recovery Processes . 2015, de CAWQ Recuperado de: [http://digital.library.mcgill.ca/wqrj/pdfs/WQRJ\\_Vol\\_32\\_No\\_2\\_Art\\_07.pdf](http://digital.library.mcgill.ca/wqrj/pdfs/WQRJ_Vol_32_No_2_Art_07.pdf).
9. Clérici y García P., . (Julio 9,2001). Aplicaciones del modelo usle/rusle para estimar pérdidas de suelo por erosión en uruguay y la región sur de la cuenca del río de la plata. Septiembre 10, 2015, de Agrociencia. (2001) Vol.V N° 1 Recuperado de: <http://www.fagro.edu.uy/~agrociencia/VOL5/1/p92-103.pdf>
10. Clérici y García P., . (Julio 9,2001). Aplicaciones del modelo usle/rusle para estimar pérdidas de suelo por erosión en uruguay y la región sur de la cuenca del río de la plata. Septiembre 10, 2015, de Agrociencia. (2001) Vol.V N° 1 Recuperado de: <http://www.fagro.edu.uy/~agrociencia/VOL5/1/p92-103.pdf>
11. Suarez Díaz, J. (2001). Control de Erosion en Zonas Tropicales. Bucaramanga – Colombia. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos — Ingeniería de Suelos Ltda,
12. Suarez Díaz, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga – Colombia. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos — Ingeniería de Suelos Ltda,
13. Leon Pelaez J.D.. (Mayo 8,2007). MÉTODOS EXPERIMENTALES PARA EL SEGUIMIENTO Y ESTUDIO DE LA EROSIÓN HÍDRICA. Septiembre 13, 2015, de Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. A.A. 568 Recuperado de: [http://www.unalmed.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan%20Diego/Plnaifi\\_Cuencas\\_Pregrado/art%EDculo%20estudio%20de%20la%20erosi%F3n.pdf](http://www.unalmed.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan%20Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregrado/art%EDculo%20estudio%20de%20la%20erosi%F3n.pdf)

14. Ramirez Ortiz F.A.. (2006). EVALUACIÓN DEL RIESGO POR EROSIÓN POTENCIAL DE LA ZONA CAFETERA CENTRAL DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS. Septiembre 10, 2015, de Universidad del Tolima Recuperado de: [http://desarrollo.ut.edu.co/tolima/hermesoft/portal/home\\_1/rec/arc\\_5981.pdf](http://desarrollo.ut.edu.co/tolima/hermesoft/portal/home_1/rec/arc_5981.pdf)
15. Nuñez, J. (2001). Manejo Y Conservación de Suelos. Septiembre 13, 2015, de Editorial Universidad Estatal a Distancia San Jorge.
16. Balocchi, F. & Brea, J.. (2007). Procesos de erosión y sedimentación. Septiembre 11, 2015., de programa hidrológico internacional de la UNESCO. Volumen 1.
17. López , F.. (2006). la degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación. Septiembre 12,2015., de editorial universidad de Murcia.
18. Borja, M. & Collado, M. (2009). Cálculo de la erosión potencial del suelo. Septiembre 12, 2015., de Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes (ETSIAM) de Albacete, Universidad de Castilla-La Mancha.
19. De la Horra, J. Serrano, F. Carlevaris, J.. (2008). Estudio de los suelos. Septiembre 13, 2015., de Editorial: Universidad Castilla-la-Mancha; Consejo Superior de Investigaciones Científicas
20. Viguera, J.. (2005). ESTUDIO DE SUELOS Y SU ANALITICA.. Septiembre 13, 2015., de Editorial ABECEDARIO
21. Galvis Martin D.X.. (2008). Estimación de la ecuación universal de pérdida de suelo. Septiembre 12, 2015, de Universidad de la Salle Recuperado de: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14543/T41.09%20G139e.pdf?sequence=1>
22. Bellati, Jorge I.(1957). Conservación del suelo y del agua -Publicación N° 416-, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Dirección General de Investigaciones Agrícolas, Instto. de Suelos y Agrotecnia, Buenos Aires. Recuperado de:

atalogobiblioteca.agro.uba.ar/Agro/wwwi32.exe/[in=AgroF.in]?tag300=SUELOS %20AGRICOLAS/(122)&tag301=AGRO&tag333=N&tag310=71&tag320=1&tag311=20&tag312=1&tag390=&tag399=20161023&tag305=ES

23. Casas, Roberto R. (2004). El suelo, un recurso estratégico, Clarín Rural, Buenos Aires. Recuperado de: [http://www.clarin.com/rural/agricultura/video-productividad-degradacion-suelos\\_0\\_1374462795.html](http://www.clarin.com/rural/agricultura/video-productividad-degradacion-suelos_0_1374462795.html)

24. Gavande, Sampat A. (1973). Física de suelos -Principios y aplicaciones-, Cap. 1 (Manejo de suelo y agua), Editorial Limusa-Wiley S.A., México. Recuperado de: <file:///C:/Users/Victor%20Ayala/Downloads/DEGRADACI%C3%93N%20Y%20CONSERVACI%C3%93N%20DE%20SUELOS%202013-14.pdf>

25. Lorenzatti, Santiago. (2004). Cortar la directa tiene riesgos, Clarín Rural, Buenos Aires. Recuperado de: [http://www.clarin.com/rural/agricultura/Riesgo-seguro\\_agropecuario\\_0\\_1349265344.html](http://www.clarin.com/rural/agricultura/Riesgo-seguro_agropecuario_0_1349265344.html)

26. Olivier, Henry. (1975). Riego y Clima" -Nuevos métodos para la planeación y desarrollo de los recursos hidráulicos-, Compañía Editorial Continental S.A. Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342011000200001](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000200001)

27. UNESCO. (1991). Agua, vida y desarrollo -Tomo 3: técnicas-, UNESCO-ORCYT (Oficina Regional de Ciencia y Tecnología), Montevideo, Uruguay. Recuperado de: <http://www.unesco.org.uy/aniversario/historia.html>

28. Miliarium, Ingenieria Civil y Ambiental. (2004). Modelo de la ecucion de Perdida de suelos revisado (RUSLE). Recuperado de: <http://www.miliarium.com/prontuario/medioambiente/suelos/Rusle.htm>

29. Guevara,D,M. (2008). Conversiones de unidades en climatologia, meteorologia y contaminacion atmosferica. Recupera de. <https://books.google.com.co/books?id=BTDARE2QvgsC&pg=PA29&lpg=PA29&>

dq=mj%20mm%20ha-1%20h-  
1&source=bl&ots=0tObIW6\_lx&sig=3YQours5T9u9st-\_IEcli1suMvg&hl=es-  
419&sa=X&ved=0ahUKEwj4iPqM3O3PAhVBNSYKHQwfBIAQ6AEIHzAB#v=one  
page&q=mj%20mm%20ha-1%20h-1&f=false

30. Casanellas, P,J & Reguerin, L,M. (2005). Agenda de Campo de suelos, Informacion de suelos para la agricultura y el medio ambiente. Recuperado de: [https://books.google.com.co/books?id=LeL1GF6X0yQC&pg=PA422&lpg=PA422&dq=mj%20mm%20ha-1%20h-1&source=bl&ots=aUw77wZmV3&sig=a9LMGTqTHJ9AL\\_NSEL-nVBU0FV0&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj4iPqM3O3PAhVBNSYKHQwfBIAQ6AEIKjAE#v=onepage&q=mj%20mm%20ha-1%20h-1&f=false](https://books.google.com.co/books?id=LeL1GF6X0yQC&pg=PA422&lpg=PA422&dq=mj%20mm%20ha-1%20h-1&source=bl&ots=aUw77wZmV3&sig=a9LMGTqTHJ9AL_NSEL-nVBU0FV0&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj4iPqM3O3PAhVBNSYKHQwfBIAQ6AEIKjAE#v=onepage&q=mj%20mm%20ha-1%20h-1&f=false)

31. Albuquerque, A,W.; Lombardi, N,F.; Cataneo, A. & Srinivasan,V,S. (1998). Rainfall and runoff erosivity parameters correlated with soil losses of a haplargids (Paraiba state, Brazil). Recuperado de: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06831998000400020&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06831998000400020&script=sci_abstract)

32. Toy, J, T. & Foster, R,G. (1998). Guidelines for the Use of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Version 1.06 on Mined Lands, Construction Sites, and Reclaimed Lands. Recuperado de: <http://web.archive.org/web/20120617115503/http://www.greenfix.com/Channel%20Web/pdfs/RUSLE%20Guidelines.pdf>

33. Wischmeier, W.H. & Smith,D,D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA-SEA, US. Govt. Printing Office, Washington, DC. 58pp. Recuperado de: <https://naldc.nal.usda.gov/naldc/download.xhtml?id=CAT10827029&content=PDF>

34. Wischmeier, W. H. & Smith, D.D. (1958) . A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. Trans. Int. Congr. Soil Sci., 7th, p. 418-425. Recuperado de: <http://www.jswnonline.org/content/46/1/30.short>
35. USDA SCS. (1965). USDA Agriculture Handbook 282. Recuperado de: <http://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79716376/PDF#page=17>
36. PROCAMPO. (s.f.). Terrazas para contralar. Recuperado de: <http://www.agritotal.com/nota/2640/>
37. Lamphier, W. (s.f.). Prediccion y Monitoro de la erosion de suelos. Recuperado de: <http://biblovirtual.minambiente.gov.co:3000/DOCS/MEMORIA/MMA-0036/MMA-0036-CAPITULO10.pdf>
38. Ortiz, A,F. & Gomez, H,E. (2009). Riesgo a la erosion en la zona cafeteria central del departamento de Caldas. Recuperado de: <http://biblovirtual.minambiente.gov.co:3000/DOCS/MEMORIA/MMA-0036/MMA-0036-CAPITULO10.pdf>
39. Ortiz, A,F.; Gomez, H,E.; Sadeghian-Khalajabadi, S. & Gomez, P,U. (2007). Erosividad de las lluvias en la zona cafeteria central y occidental del departamento de Caldas. Recuperado de: [http://www.ut.edu.co/academi/images/archivos/Fac\\_Forestal/Documentos/ARTICULOS\\_CIENTIFICOS/Articulo%20erosividad%20de%20lluvias%20zona%20cafetera%20Uriel%20Perez.pdf](http://www.ut.edu.co/academi/images/archivos/Fac_Forestal/Documentos/ARTICULOS_CIENTIFICOS/Articulo%20erosividad%20de%20lluvias%20zona%20cafetera%20Uriel%20Perez.pdf)
40. Rivera,P,J. (s.f.). Cuasas y consecuencias de la erosion de los suelos de ladera Colombiana. Recuperado de: [http://www.oocities.org/biotropico\\_andino/cap11.pdf](http://www.oocities.org/biotropico_andino/cap11.pdf)
41. Echeverri,T,L. & Obando, M,F.(2010). Erosividad de las lluvias en la region centro-sur del departamento de caldas, Colombia. Recuperado de: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame/rt/printerFriendly/24951/36985>

42. Pérez, J.D. (2001). Estimación del factor de Erosividad de la Lluvia en Colombia, Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/4281/1/DA3468.pdf>
43. Wischmeier, W.H and Smith, D. D, Rainfall Energy and Its Relationship to Soil Loss, Transactions, American Geophysical Union, Vol 39, No 2, 1958.
44. Santos, L & Gonzalez, C. (1999). Mapa de índices de erodabilidad en la cuenca alta del río Bogotá, utilizando el sistema de información geográfica ARC-INFO. Recuperado de <http://www.Dialnet-MapaDeIndicesDeErodabilidadEnLaCuencaAltaDelRioBog> 4902557.pdf
45. Saavedra, C. 2005. Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition in the Andean region using geo-information techniques: a study case in Cochabamba, Bolivia. Tesis for the award of the degree of Doctor. 244 pp. Wageningen University. Holanda.
46. Quintanilla M. (2007). Producción hídrica y de sedimentos en la cuenca del río Caine del departamento de Cochabamba. Tesis de maestría en evaluación de recursos hídricos. CLAS – UMSS. Cochabamba, Bolivia. Recuperado de: <http://www.senamhi.gov.bo/meteorologia/publicaciones/resumen%20Marlene%20Quintanilla.pdf>.
47. Gallardo S. (2001). Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando sistemas de información geográfica. Escuela de ingeniería química. Universidad Industrial de Santander. Bogota, Colombia. Pp. 77. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/Modeloerosi%C3%B3n.pdf>
48. Loyola, C., Rivas, J., & Gacitua, M.. (2015). Permeabilidad del suelo de la cuenca del río Chillán, entre Estero Peladillas y río Ñuble, Chile. Revista Colombiana de Geografía, , Vol. 24, Núm. 1 , pp 3- 13.

49. Prechac G.. (Julio 9, 2001). Aplicacion del modelo USLE/RUSLE para estimar perdidas de suelo por erosion en uruguay y la region sur de la cuenca del rio la plata. En Agrocienca (92-103). Uruguay: Micelanea.
50. Auza M... (Diciembre 7, 2009). Estimación de la sedimentación en la represa de Zapocó causada por la erosión de las micro cuencas afluentes. Concepción, Bolivia”. En Trabajo de grado (pp 0-61). Concepcion, Bolivia: Clas
51. Echeverri, L., Obando, F. (2010, febrero 2). erosividad de las lluvias en la región centro-sur del departamento de caldas, Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía, vol. 63, 1 p.
52. R. Roose. (octubre 17, 1982). capítulo 2 - contaminación provocada por los sedimentos. Noviembre 6, 2015, Depósito de Documentos de la FAO Sitio web: <http://www.fao.org/docrep/w2598s/w2598s04.htm>
53. Alcaldía Facatativá (noviembre, 12 2012). Fuentes Hídricas Facatativá. Noviembre 8,2015, wikispace sitio web: <https://facatativa.wikispaces.com/fuentes+hidricas>
54. Consejo de municipio de Facatativá. (2012). Plan de desarrollo económico, social, ambiental y de obras públicas todos somos Facatativá. Noviembre 18, 2016, de Municipio de Facatativá Sitio web: <http://www.facatativa-cundinamarca.gov.co/apc-aa-files/32666261396530396563616434656231/plan-desarrollo-todos-somos-facatativa.pdf>
55. C.A. Jones, R.H. Griggs, J.R. Williams y R. Srinivasan. (Julio 27, 1992). Erosion de suelos en America Latina. Octubre 23, 2015, de Deposito de Documentos de la FAO Sitio web: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S00.htm#Contents>
56. J. Spears. (marzo 12, 1982). Conservación del ambiente en las cuencas hidrográficas. Octubre 26, 2015, de Depósito de Documentos de la FAO Sitio web: <http://www.fao.org/docrep/p8250s/p8250s02.htm#TopOfPage>

57. Ramirez, F & Hincapie, E.. (2009). Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de Caldas.. Julio 21, 2016, de Cenicafe Sitio web: [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc060\(02\)173-189.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc060(02)173-189.pdf).
58. Renard et al. (1992). Slope Angle and Slope Length Solutions for GIS. octubre, 2016, de School of Spatial Sciences & Curtin University of Technology Sitio web: [http://www.csun.edu/~sd1229/364/SlopeArticlesGIS/hickey\\_slope\\_length.pdf](http://www.csun.edu/~sd1229/364/SlopeArticlesGIS/hickey_slope_length.pdf)
59. Galvis, D. (2008). ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO SISGA CON BASE EN LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO. Julio 22, 2016, de Universidad de la Salle Sitio web: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14543/T41.09%20G139e.pdf?sequence=1>
60. Ibañez Asensio, S.; Moreno Ramón, H.; Gisbert Blanquer, JM.. (julio 7, 2012). La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). noviembre 20,2016, de Universidad Pólitecnica de Valencia Sitio web: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16849/AD%20USLE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
61. Alatorre, L.C. y Beguería, S. 2009. Identificación de zonas de erosión activa y áreas de riesgo mediante teledetección: Un ejemplo en un paisaje de cárcavas sobre margas en el Pirineo Central Español. Cuadernos de Investigación Geográfica, 35 (2): 171-194.
62. Morgan et al. (1999). Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: A case of the Upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenya. JAG volume 2 Issue
63. Jordan et al. (2000). Erosion prediction models. Revised universal soil loss equation (RUSLE). RUSLE 1,05. RUSLE is an erosion prediction model that predicts. D.F Mexico: Mc Graw - Hill Latinoamericana.

64. Alcaldía Cívica de Facatativa. (2002). Plan de ordenamiento territorial facatativa. noviembre 19, 2016, de Alcaldía de Facacativa Sitio web: [http://facatativa-cundinamarca.gov.co/apc-aa-files/66643232396135396162323765313638/Decreto\\_069\\_de\\_2002\\_\\_P.O.T\\_\\_Facatativ\\_.pdf](http://facatativa-cundinamarca.gov.co/apc-aa-files/66643232396135396162323765313638/Decreto_069_de_2002__P.O.T__Facatativ_.pdf)
65. Alcaldía de Facatativa. (marzo 8, 2016). Nuestro municipio. noviembre 19, 2016, de Alcaldía de facatativa Sitio web: [http://www.facatativa-cundinamarca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.facatativa-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml)
66. Motta Franco, EL. 1999. Estudio de la erosión hídrica del suelo, microcuenca del río Itzapa, Chimaltenango, de 1994 a 1996. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC. 98 p
67. Martín, J.. (2008). Metodología del calculo del factor topografico RUSLE - USPED en, aplicacion del arroyo del lugar Guadalajara, España. noviembre 19, 2016, de Universidad Politécnica de Madrid Sitio web: [http://oa.upm.es/1914/1/MARTIN\\_CRUZ\\_GIMENEZ\\_SUAREZ.pdf](http://oa.upm.es/1914/1/MARTIN_CRUZ_GIMENEZ_SUAREZ.pdf)
68. IGAC. (octubre,2004). Adopcion del marco geocentrico de referencia nacional MAGNA-SIRGAS como DATUM oficial de Colombia. Octubre 5, 2016, de Instituto Geografico Agustin Codazzi Sitio web: <http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/4b831c00469f7616afeebf923ecdf8fe/adopcion.pdf?MOD=AJPERES>
69. Jordan et al. (2000). Erosion prediction models. Revised universal soil loss equation (RUSLE). RUSLE 1,05. RUSLE is an erosion prediction model that predicts. . D.F Mexico: Mc Graw - Hill Latinoamericana.
70. FAO. (2000). Predicción de la erosión de suelos. noviembre 19,2016, de La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Sitio web: <http://www.fao.org/docrep/T2351S/T2351S03.htm>

## 14. ANEXOS.

### 14.1 Anexo N°1 - Estaciones pluviométricas y datos de precipitación

*Tabla 29. Precipitación estación el Acomodo*

| AÑO  | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   | TOTAL  | PROMEDIO |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|
| 2005 | 291,3 | 483,7 | 126,9 | 133,4 | 31,2  | 83    | 12,7  | 131,5 | 120,7 | 333,5 | 303   | 255,6 | 2306,5 | 192,20   |
| 2006 | 211,9 | 272,3 | 177,3 | 240,3 | 137,1 | 120,2 | 26,5  | 102,5 | 101,1 | 291,3 | 209,4 | 226,8 | 2116,7 | 176,39   |
| 2007 | 132,5 | 61    | 227,8 | 225,4 | 243,1 | 47,8  | 40,4  | 73,5  | 83,6  | 249,1 | 115,9 | 198   | 1698,1 | 141,50   |
| 2008 | 233,1 | 322,9 | 227   | 283   | 182,5 | 55,7  | 83,4  | 163,2 | 113,9 | 304   | 471,8 | 293   | 2733,5 | 227,79   |
| 2009 | 150,4 | 197   | 246,1 | 207,8 | 122   | 68,9  | 30    | 35,1  | 35    | 231,2 | 257,2 | 136,5 | 1717,2 | 143,1    |
| 2010 | 36,9  | 210,8 | 41,3  | 249,2 | 279,6 | 96    | 237,5 | 70,8  | 192,8 | 250,2 | 480,1 | 248,5 | 2393,7 | 199,47   |
| 2011 | 132,1 | 92,2  | 290,6 | 540,8 | 300,9 | 98,7  | 53,3  | 26    | 22,6  | 261,3 | 696,4 | 432,1 | 2947   | 245,58   |
| 2012 | 454,8 | 257   | 111,5 | 361,4 | 116,5 | 84,4  | 52,8  | 35,5  | 29,4  | 230,5 | 321,1 | 148,6 | 2203,5 | 183,62   |
| 2013 | 259   | 348,9 | 253,5 | 223,4 | 244,5 | 54,4  | 79    | 81,9  | 67,4  | 258,4 | 399,6 | 270,2 | 2540,2 | 211,68   |
| 2014 | 431,8 | 276,5 | 316,5 | 95,5  | 212,5 | 33,5  | 30,8  | 52,7  | 92,9  | 155,3 | 255,2 | 320   | 2273,2 | 189,43   |
| 2015 | 97,3  | 177,7 | 362,3 | 224,5 | 38    | 13,5  | 50,3  | 67,3  | 80,15 | 206,9 | 144,6 | 166,6 | 1629,1 | 135,75   |

Fuente: Corporación autónoma regional modificado por autores

*Tabla 30. Precipitación estación Venecia*

| AÑO  | ENE  | FEB   | MAR  | ABR   | MAY   | JUN  | JUL  | AGO  | SEP  | OCT   | NOV   | DIC   | TOTAL  | PROMEDIO |
|------|------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|----------|
| 2005 | 57,6 | 40,2  | 31,3 | 37,8  | 95,4  | 9,2  | 51,3 | 19,4 | 96,4 | 101,5 | 29,4  | 27,6  | 597,1  | 49,75    |
| 2006 | 38   | 26    | 190  | 175   | 223   | 66   | 5    | 48   | 24   | 153   | 139   | 47    | 1134   | 94,5     |
| 2007 | 15   | 31    | 89   | 123   | 57    | 67   | 32   | 103  | 32,8 | 156   | 89    | 113   | 907,8  | 75,65    |
| 2008 | 80   | 51    | 141  | 112   | 142,7 | 48   | 66   | 91   | 36   | 137,5 | 303   | 69    | 1277,2 | 106,43   |
| 2009 | 48   | 44    | 107  | 86    | 48    | 93   | 58,8 | 36,2 | 48,4 | 186,6 | 126,1 | 28    | 910,1  | 75,84    |
| 2010 | 5    | 22,5  | 6,7  | 141,6 | 132,9 | 70,6 | 94   | 35   | 59   | 119   | 202,6 | 121,7 | 1010,6 | 84,21    |
| 2011 | 28   | 61    | 133  | 171,6 | 176,2 | 39   | 54   | 35,1 | 40,7 | 162,3 | 215   | 97,3  | 1213,2 | 101,1    |
| 2012 | 62,9 | 52,4  | 82,8 | 152,8 | 49,2  | 30,1 | 53,8 | 68,8 | 20,8 | 131,8 | 84,9  | 73,1  | 863,4  | 71,95    |
| 2013 | 69,9 | 102,1 | 84,8 | 96,5  | 150,7 | 29,1 | 14,1 | 60,4 | 24,7 | 92,4  | 171,6 | 90    | 986,3  | 82,19    |
| 2014 | 45,7 | 49,4  | 73,1 | 66,9  | 92,4  | 48,5 | 31,2 | 19,5 | 29,1 | 188,4 | 124,1 | 44,4  | 812,7  | 67,72    |
| 2015 | 17,2 | 31,2  | 85,1 | 46,3  | 24,5  | 70,3 | 30,7 | 15,9 | 16,6 | 20,9  | 81,1  | 1,5   | 441,3  | 36,77    |

Fuente: Corporación autónoma regional modificado por autores

*Tabla 31. Precipitación estación de Manjui*

| AÑO  | ENE  | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP  | OCT   | NOV   | DIC   | TOTAL  | PROMEDIO |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|--------|----------|
| 2005 | 93,2 | 35,3  | 45    | 83,2  | 134,8 | 21,6  | 24,4  | 45,7  | 71,6 | 281,7 | 84,2  | 52,8  | 973,5  | 81,12    |
| 2006 | 48,7 | 17    | 144,3 | 220,5 | 258,2 | 89,5  | 17    | 48,7  | 45,3 | 188,5 | 241,8 | 124,2 | 1443,7 | 120,30   |
| 2007 | 13,6 | 23,3  | 128,8 | 155   | 104   | 46    | 31    | 105   | 38,8 | 215   | 106,9 | 164,1 | 1131,5 | 94,29    |
| 2008 | 71,7 | 63,5  | 58,1  | 117,8 | 158,2 | 39    | 120,8 | 158,6 | 32,9 | 129,9 | 271,4 | 37,1  | 1259   | 104,91   |
| 2009 | 42,8 | 77,2  | 111,1 | 144,4 | 75,6  | 121,9 | 99,1  | 44,6  | 30   | 142,5 | 84,2  | 31    | 1004,4 | 83,7     |
| 2010 | 39   | 9,7   | 49,2  | 232   | 147,7 | 61,6  | 123,2 | 27    | 50,1 | 106,5 | 144,5 | 46,5  | 1037   | 86,41    |
| 2011 | 43,1 | 115,5 | 238,5 | 295   | 183,5 | 56,7  | 74    | 37,8  | 40,8 | 37,9  | 85    | 49,9  | 1257,7 | 104,80   |
| 2012 | 50,9 | 23    | 136,5 | 118   | 59,3  | 26,7  | 53,4  | 82,8  | 34,3 | 94,2  | 65,8  | 27,9  | 772,8  | 64,4     |
| 2013 | 17,8 | 52,1  | 77,1  | 79,3  | 137,7 | 27,7  | 27,9  | 60,3  | 13,1 | 93,8  | 122,4 | 33,9  | 743,1  | 61,92    |
| 2014 | 1,4  | 46,4  | 31,3  | 53,9  | 145,2 | 96,7  | 85,2  | 22,3  | 73   | 169,6 | 144,4 | 50,8  | 920,2  | 76,68    |
| 2015 | 24,6 | 13,6  | 47    | 79,1  | 78,1  | 69,6  | 50,1  | 28,3  | 23,2 | 31,7  | 72    | 13    | 530,3  | 44,19    |

Fuente: Corporación autónoma regional modificado por autores

*Tabla 32. Precipitación estación el Tesoro*

| AÑO  | ENE  | FEB  | MAR   | ABR   | MAY   | JUN  | JUL   | AGO  | SEP   | OCT   | NOV   | DIC  | TOTAL  | PROMEDIO |
|------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|--------|----------|
| 2005 | 32   | 71   | 246   | 86    | 198,5 | 9,5  | 12,5  | 6    | 165,8 | 162   | 109   | 44,5 | 1142,8 | 95,23    |
| 2006 | 54,6 | 71,2 | 282   | 209,7 | 173,1 | 73   | 28,5  | 30   | 55,3  | 169,5 | 92,6  | 52,9 | 1292,4 | 107,7    |
| 2007 | 32   | 43,9 | 48,1  | 92,6  | 36,8  | 86,3 | 30,1  | 74,1 | 13    | 201,9 | 91,9  | 63,6 | 814,3  | 67,85    |
| 2008 | 41,2 | 23,5 | 35,4  | 123,6 | 138   | 51,8 | 66,9  | 80,9 | 44,1  | 144,1 | 173,3 | 49,7 | 972,5  | 81,04    |
| 2009 | 22,1 | 58,2 | 85,5  | 64,4  | 49,1  | 56,1 | 28,7  | 36,9 | 14,6  | 96,4  | 84,3  | 73   | 669,3  | 55,77    |
| 2010 | 11,7 | 30,5 | 36    | 75,6  | 108,8 | 84,2 | 158,7 | 25   | 69,8  | 59,8  | 177,6 | 62,3 | 900    | 75       |
| 2011 | 21,4 | 23,5 | 97,6  | 114,4 | 150   | 41,3 | 37,2  | 24   | 54,1  | 221,9 | 171   | 75,3 | 1031,7 | 85,97    |
| 2012 | 43,1 | 38,6 | 159,9 | 99    | 74,9  | 25,6 | 48,4  | 60,1 | 9,3   | 88,6  | 65,2  | 33,8 | 746,5  | 62,20    |
| 2013 | 26,1 | 43,2 | 74,6  | 83,7  | 114,2 | 25,1 | 36,6  | 46,9 | 16,4  | 88,4  | 85,4  | 73,3 | 713,9  | 59,49    |
| 2014 | 19   | 33,2 | 78,7  | 88,2  | 111,5 | 36,9 | 14    | 21,9 | 28,8  | 56,9  | 84,9  | 17   | 591    | 49,25    |
| 2015 | 5,5  | 9,4  | 70,8  | 72,6  | 33,8  | 55,1 | 23,2  | 13,1 | 11,6  | 19    | 64,4  | 39,5 | 418    | 34,83    |

Fuente: Corporación autónoma regional modificado por autores

*Tabla 33. Precipitación estación las Margaritas*

| AÑO  | ENE  | FEB  | MAR   | ABR | MAY   | JUN  | JUL  | AGO   | SEP  | OCT | NOV | DIC | TOTAL  | PROMEDIO |
|------|------|------|-------|-----|-------|------|------|-------|------|-----|-----|-----|--------|----------|
| 2005 | 65   | 27,5 | 47    | 175 | 412   | 91,5 | 120  | 165   | 175  | 360 | 315 | 69  | 2022   | 168,5    |
| 2006 | 45   | 45   | 258,2 | 410 | 480   | 440  | 280  | 108,1 | 90   | 452 | 360 | 105 | 3073,3 | 256,10   |
| 2007 | 30   | 50   | 195   | 420 | 335   | 412  | 90   | 345   | 114  | 281 | 177 | 334 | 2783   | 231,91   |
| 2008 | 135  | 200  | 450   | 360 | 465   | 399  | 305  | 355   | 234  | 468 | 427 | 323 | 4121   | 343,41   |
| 2009 | 43   | 157  | 168   | 116 | 61    | 63   | 14   | 53    | 15   | 109 | 114 | 21  | 934    | 77,83    |
| 2010 | 17   | 41   | 11    | 82  | 187   | 88   | 309  | 107   | 70   | 222 | 599 | 353 | 2086   | 173,83   |
| 2011 | 65   | 96   | 252   | 202 | 221   | 151  | 78   | 50    | 57   | 320 | 379 | 163 | 2034   | 169,5    |
| 2012 | 68   | 46   | 252   | 222 | 133   | 27   | 103  | 43    | 69   | 265 | 66  | 48  | 1342   | 111,83   |
| 2013 | 24   | 50   | 65    | 143 | 181   | 55   | 16   | 73,8  | 20,8 | 129 | 146 | 165 | 1068,6 | 89,05    |
| 2014 | 56,7 | 146  | 251,4 | 128 | 252,3 | 108  | 29,2 | 65    | 45   | 206 | 87  | 88  | 1462,6 | 121,88   |
| 2015 | 62   | 48   | 76    | 116 | 20    | 36   | 44   | 29    | 36   | 7   | 149 | 165 | 788    | 65,66    |

Fuente: Corporación autónoma regional modificado por autores

## 14.2 Anexo N°2 – Tablas de cálculos IFM e Ie30

*Tabla 34. Índices de fournier modificado "imf" y su adaptación a "ie30" Estación el Acomodo*

| ENE    | FEB    | MAR    | ABR    | MAY    | JUN    | JUL    | AGO    | SEP    | OCT    | NOV    | DIC    | TOTAL  | IFM    | IE30   |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 84856  | 233966 | 16104  | 17796  | 973,44 | 6889   | 161,29 | 17292  | 14568  | 111222 | 91809  | 65331  | 660968 | 286,57 | 11032  |
| 44902  | 74147  | 31435  | 57744  | 18796  | 14448  | 702,25 | 10506  | 10221  | 84856  | 43848  | 51438  | 443045 | 209,31 | 8065,8 |
| 17556  | 3721   | 51893  | 50805  | 59098  | 2284,8 | 1632,2 | 5402,3 | 6989   | 62051  | 13433  | 39204  | 314069 | 184,95 | 7130,5 |
| 54336  | 104264 | 51529  | 80089  | 33306  | 3102,5 | 6955,6 | 26634  | 12973  | 92416  | 222595 | 85849  | 774050 | 283,17 | 10902  |
| 22620  | 38809  | 60565  | 43181  | 14884  | 4747,2 | 900    | 1232   | 1225   | 53453  | 66152  | 18632  | 326401 | 190,08 | 7327,3 |
| 1361,6 | 44437  | 1705,7 | 62101  | 78176  | 9216   | 56406  | 5012,6 | 37172  | 62600  | 230496 | 61752  | 650436 | 271,73 | 10463  |
| 17450  | 8500,8 | 84448  | 292465 | 90541  | 9741,7 | 2840,9 | 676    | 510,76 | 68278  | 484973 | 186710 | 1E+06  | 423,19 | 16279  |
| 206843 | 66049  | 12432  | 130610 | 13572  | 7123,4 | 2787,8 | 1260,3 | 864,36 | 53130  | 103105 | 22082  | 619860 | 281,31 | 10830  |
| 67081  | 121731 | 64262  | 49908  | 59780  | 2959,4 | 6241   | 6707,6 | 4542,8 | 66771  | 159680 | 73008  | 682672 | 268,75 | 10348  |
| 186451 | 76452  | 100172 | 9120,3 | 45156  | 1122,3 | 948,64 | 2777,3 | 8630,4 | 24118  | 65127  | 102400 | 622476 | 273,83 | 10543  |
| 9467,3 | 31577  | 131261 | 50400  | 1444   | 182,25 | 2530,1 | 4529,3 | 6424   | 42787  | 20909  | 27756  | 329267 | 202,12 | 7789,6 |
|        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 110711 |
|        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | R      | 10065  |

Fuente: Corporación autónoma regional modificado por autores

*Tabla 35 Índices de fournier modificado "imf" y su adaptación a "ie30" Estación Venecia*

| ENE    | FEB    | MAR    | ABR    | MAY    | JUN    | JUL    | AGO    | SEP    | OCT    | NOV    | DIC    | TOTAL  | IFM    | IE30   |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3317,8 | 1616   | 979,69 | 1428,8 | 9101,2 | 84,64  | 2631,7 | 376,36 | 9293   | 10302  | 864,36 | 761,76 | 40758  | 68,259 | 2649,4 |
| 1444   | 676    | 36100  | 30625  | 49729  | 4356   | 25     | 2304   | 576    | 23409  | 19321  | 2209   | 170774 | 150,59 | 5811,1 |
| 225    | 961    | 7921   | 15129  | 3249   | 4489   | 1024   | 10609  | 1075,8 | 24336  | 7921   | 12769  | 89709  | 98,82  | 3823   |
| 6400   | 2601   | 19881  | 12544  | 20363  | 2304   | 4356   | 8281   | 1296   | 18906  | 91809  | 4761   | 193503 | 151,51 | 5846,1 |
| 2304   | 1936   | 11449  | 7396   | 2304   | 8649   | 3457,4 | 1310,4 | 2342,6 | 34820  | 15901  | 784    | 92653  | 101,81 | 3937,6 |
| 25     | 506,25 | 44,89  | 20051  | 17662  | 4984,4 | 8836   | 1225   | 3481   | 14161  | 41047  | 14811  | 126834 | 125,5  | 4847,6 |
| 784    | 3721   | 17689  | 29447  | 31046  | 1521   | 2916   | 1232   | 1656,5 | 26341  | 46225  | 9467,3 | 172046 | 141,81 | 5473,9 |
| 3956,4 | 2745,8 | 6855,8 | 23348  | 2420,6 | 906,01 | 2894,4 | 4733,4 | 432,64 | 17371  | 7208   | 5343,6 | 78216  | 90,591 | 3507   |
| 4886   | 10424  | 7191   | 9312,3 | 22710  | 846,81 | 198,81 | 3648,2 | 610,09 | 8537,8 | 29447  | 8100   | 105912 | 107,38 | 4151,8 |
| 2088,5 | 2440,4 | 5343,6 | 4475,6 | 8537,8 | 2352,3 | 973,44 | 380,25 | 846,81 | 35495  | 15401  | 1971,4 | 80305  | 98,813 | 3822,7 |
| 295,84 | 973,44 | 7242   | 2143,7 | 600,25 | 4942,1 | 942,49 | 252,81 | 275,56 | 436,81 | 6577,2 | 2,25   | 24684  | 55,936 | 2176,2 |
|        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 46047  |
|        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | R      | 4186   |

Fuente: Corporación autónoma regional modificado por autores

*Tabla 36. Índices de fournier modificado "imf" y su adaptación a "ie30" Estación de Manjui*

| ENE    | FEB    | MAR    | ABR    | MAY    | JUN    | JUL    | AGO    | SEP    | OCT    | NOV    | DIC    | TOTAL  | IFM    | IE30   |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 8686,2 | 1246,1 | 2025   | 6922,2 | 18171  | 466,56 | 595,36 | 2088,5 | 5126,6 | 79355  | 7089,6 | 2787,8 | 134560 | 138,22 | 5336,1 |
| 2371,7 | 289    | 20822  | 48620  | 66667  | 8010,3 | 289    | 2371,7 | 2052,1 | 35532  | 58467  | 15426  | 260919 | 180,73 | 6968,3 |
| 184,96 | 542,89 | 16589  | 24025  | 10816  | 2116   | 961    | 11025  | 1505,4 | 46225  | 11428  | 26929  | 152347 | 134,64 | 5198,5 |
| 5140,9 | 4032,3 | 3375,6 | 13877  | 25027  | 1521   | 14593  | 25154  | 1082,4 | 16874  | 73658  | 1376,4 | 185711 | 147,51 | 5692,6 |
| 1831,8 | 5959,8 | 12343  | 20851  | 5715,4 | 14860  | 9820,8 | 1989,2 | 900    | 20306  | 7089,6 | 961    | 102628 | 102,18 | 3952   |
| 1521   | 94,09  | 2420,6 | 53824  | 21815  | 3794,6 | 15178  | 729    | 2510   | 11342  | 20880  | 2162,3 | 136272 | 131,41 | 5074,4 |
| 1857,6 | 13340  | 56882  | 87025  | 33672  | 3214,9 | 5476   | 1428,8 | 1664,6 | 1436,4 | 7225   | 2490   | 215713 | 171,51 | 6614,4 |
| 2590,8 | 529    | 18632  | 13924  | 3516,5 | 712,89 | 2851,6 | 6855,8 | 1176,5 | 8873,6 | 4329,6 | 778,41 | 64771  | 83,813 | 3246,7 |
| 316,84 | 2714,4 | 5944,4 | 6288,5 | 18961  | 767,29 | 778,41 | 3636,1 | 171,61 | 8798,4 | 14982  | 1149,2 | 64508  | 86,81  | 3361,8 |
| 1,96   | 2153   | 979,69 | 2905,2 | 21083  | 9350,9 | 7259   | 497,29 | 5329   | 28764  | 20851  | 2580,6 | 101755 | 110,58 | 4274,6 |
| 605,16 | 184,96 | 2209   | 6256,8 | 6099,6 | 4844,2 | 2510   | 800,89 | 538,24 | 1004,9 | 5184   | 169    | 30407  | 57,339 | 2230,1 |
|        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 51949  |
|        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | R      | 4723   |

Fuente: Corporación autónoma regional modificado por autores

*Tabla 37 Índices de fournier modificado "imf" y su adaptación a "ie30" Estación el Tesoro*

| ENE    | FEB    | MAR    | ABR    | MAY    | JUN    | JUL    | AGO    | SEP    | OCT    | NOV    | DIC    | TOTAL  | IFM    | IE30   |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1024   | 5041   | 60516  | 7396   | 39402  | 90,25  | 156,25 | 36     | 27490  | 26244  | 11881  | 1980,3 | 181257 | 158,61 | 6118,8 |
| 2981,2 | 5069,4 | 79524  | 43974  | 29964  | 5329   | 812,25 | 900    | 3058,1 | 28730  | 8574,8 | 2798,4 | 211715 | 163,82 | 6318,8 |
| 1024   | 1927,2 | 2313,6 | 8574,8 | 1354,2 | 7447,7 | 906,01 | 5490,8 | 169    | 40764  | 8445,6 | 4045   | 82462  | 101,27 | 3916,9 |
| 1697,4 | 552,25 | 1253,2 | 15277  | 19044  | 2683,2 | 4475,6 | 6544,8 | 1944,8 | 20765  | 30033  | 2470,1 | 106740 | 109,76 | 4243   |
| 488,41 | 3387,2 | 7310,3 | 4147,4 | 2410,8 | 3147,2 | 823,69 | 1361,6 | 213,16 | 9293   | 7106,5 | 5329   | 45018  | 67,262 | 2611,1 |
| 136,89 | 930,25 | 1296   | 5715,4 | 11837  | 7089,6 | 25186  | 625    | 4872   | 3576   | 31542  | 3881,3 | 96687  | 107,43 | 4153,6 |
| 457,96 | 552,25 | 9525,8 | 13087  | 22500  | 1705,7 | 1383,8 | 576    | 2926,8 | 49240  | 29241  | 5670,1 | 136866 | 132,66 | 5122,5 |
| 1857,6 | 1490   | 25568  | 9801   | 5610   | 655,36 | 2342,6 | 3612   | 86,49  | 7850   | 4251   | 1142,4 | 64266  | 86,09  | 3334,2 |
| 681,21 | 1866,2 | 5565,2 | 7005,7 | 13042  | 630,01 | 1339,6 | 2199,6 | 268,96 | 7814,6 | 7293,2 | 5372,9 | 53079  | 74,35  | 2883,4 |
| 361    | 1102,2 | 6193,7 | 7779,2 | 12432  | 1361,6 | 196    | 479,61 | 829,44 | 3237,6 | 7208   | 289    | 41470  | 70,169 | 2722,8 |
| 30,25  | 88,36  | 5012,6 | 5270,8 | 1142,4 | 3036   | 538,24 | 171,61 | 134,56 | 361    | 4147,4 | 1560,3 | 21493  | 51,42  | 2002,8 |
|        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 43428  |
|        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | R      | 3948   |

Fuente: Corporación autónoma regional modificado por autores

*Tabla 38. Índices de fournier modificado "imf" y su adaptación a "ie30" Estación las Margaritas*

| ENE    | FEB    | MAR    | ABR    | MAY    | JUN    | JUL    | AGO    | SEP    | OCT    | NOV    | DIC    | TOTAL  | IFM    | IE30   |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 4225   | 756,25 | 2209   | 30625  | 169744 | 8372,3 | 14400  | 27225  | 30625  | 129600 | 99225  | 4761   | 521768 | 258,05 | 9937,2 |
| 2025   | 2025   | 66667  | 168100 | 230400 | 193600 | 78400  | 11686  | 8100   | 204304 | 129600 | 11025  | 1E+06  | 359,85 | 13847  |
| 900    | 2500   | 38025  | 176400 | 112225 | 169744 | 8100   | 119025 | 12996  | 78961  | 31329  | 111556 | 861761 | 309,65 | 11919  |
| 18225  | 40000  | 202500 | 129600 | 216225 | 159201 | 93025  | 126025 | 54756  | 219024 | 182329 | 104329 | 2E+06  | 374,97 | 14427  |
| 1849   | 24649  | 28224  | 13456  | 3721   | 3969   | 196    | 2809   | 225    | 11881  | 12996  | 441    | 104416 | 111,79 | 4321,2 |
| 289    | 1681   | 121    | 6724   | 34969  | 7744   | 95481  | 11449  | 4900   | 49284  | 358801 | 124609 | 696052 | 333,68 | 12842  |
| 4225   | 9216   | 63504  | 40804  | 48841  | 22801  | 6084   | 2500   | 3249   | 102400 | 143641 | 26569  | 473834 | 232,96 | 8973,8 |
| 4624   | 2116   | 63504  | 49284  | 17689  | 729    | 10609  | 1849   | 4761   | 70225  | 4356   | 2304   | 232050 | 172,91 | 6668,2 |
| 576    | 2500   | 4225   | 20449  | 32761  | 3025   | 256    | 5446,4 | 432,64 | 16641  | 21316  | 27225  | 134853 | 126,2  | 4874,2 |
| 3214,9 | 21316  | 63202  | 16384  | 63655  | 11664  | 852,64 | 4225   | 2025   | 42436  | 7569   | 7744   | 244288 | 167,02 | 6442   |
| 3844   | 2304   | 5776   | 13456  | 400    | 1296   | 1936   | 841    | 1296   | 49     | 22201  | 27225  | 80624  | 102,31 | 3957,2 |
|        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 98208  |
|        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | R      | 8928   |

Fuente: Corporación autónoma regional modificado por autores

### 14.3 Anexo N°3 – Metodología pruebas físico-químicas del suelo

Tabla 39 Determinación de textura (Método de Bouyoucos)

| <b>Determinación de Textura (Método Bouyoucos)</b>  |
|---|
| <p><b>OBJETIVO</b></p> <p>Determinar el porcentaje de arenas, limos y arcillas.</p> <p>Proporción de arenas (2 – 0,5mm), limos (0,05 – 0.002mm) y arcillas (menor a 0.002).</p>   |
| <p><b>REACTIVOS</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Solución de Hexametáfosfato de sodio <math>(\text{NaPO}_3)_6 \geq 85\%</math> <math>(\text{NaP}_2\text{O}_7) \geq 15\%</math></li><li>• Carbonato de sodio <math>(\text{Na}_2\text{CO}_3)</math></li><li>• Agua destilada</li></ul>   |
| <p><b>MATERIALES</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Probetas (100, 1000 ml)</li><li>• Balanza analítica</li><li>• Hidrómetros estándar (ASTM-152H)</li><li>• Agitador Manual con embolo</li><li>• Batidoras</li><li>• Cilindros volumétricos 1000 ml</li><li>• Tabla de corrección por temperatura.</li><li>• Frasco lavador</li><li>• Cronómetro</li><li>• Termómetro</li></ul> |
| <p><b>PREPARACIÓN DE REACTIVOS</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Solución dispersante: Pesar 7,94 g de Carbonato de sodio y 35.70 g</li></ul>   |

### **Determinación de Textura (Método Bouyoucos)**

de Hexametáfosfato de sodio, adicionar aproximadamente 1500 ml de agua des ionizada y poner en agitación hasta que se diluyan completamente los reactivos y llevar a volumen a 2 litros en una probeta.

### **CONSIDERACIONES PREVIAS**

- La persona encargada de manipular el suelo debe utilizar guantes.
- Toda muestra de suelo se debe secar antes de iniciar con los análisis de laboratorio.
- Cuando se coloque una muestra de suelo a secar, ésta debe estar debidamente identificada con un número único de laboratorio.
- Cuando las muestras de suelo están muy húmedas, se debe extender sobre papel kraft y la caja de origen debe permanecer junto a la muestra para evitar confusiones.
- Cuando la muestra de suelo llega con aglomerados, la persona encargada del procedimiento debe disgregarlo con las manos, con ayuda de un martillo de madera, o con cualquier otro material que no pulverice la muestra.

Nota: Cuando se utiliza un martillo de palo la muestra debe estar envuelta en papel kraft para evitar contaminación.

- En el proceso de molienda se debe limpiar muy bien el molino entre muestra y muestra, para evitar contaminación. Tamizar el suelo por el tamiz No. 10 (2mm).
- Las bolsas utilizadas para almacenar las muestras de suelo molidas deben estar totalmente limpias.
- La persona encargada de la molienda debe utilizar toda la protección personal necesaria para desarrollar la actividad.
- Una vez identificada la muestra de suelo se debe retirar rastros vegetales como raíces, hojas o piedras y se debe homogenizar con

| <b>Determinación de Textura (Método Bouyoucos)</b>   |
|--|
| las manos en caso de contener aglomerados grandes.   |
| <p><b>METODOLOGÍA</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pesar en la balanza 50 gr de suelo previamente tamizado, con tamiz N° 10.</li> <li>2. Agregar 10 ml del dispersante (Hexametáfosfato de sodio y carbonato de sodio).</li> <li>3. Agregar en un recipiente de la batidora los 50g de suelo junto con el dispersante.</li> <li>4. Agitar lentamente durante 10 minutos, en la batidora.</li> <li>5. Pasado los 10 minutos, verter el contenido en la probeta de 1000 ml con ayuda del frasco lavador y aforar con agua destilada.</li> <li>6. Sellar la probeta y agitar hasta tener una mezcla homogénea.</li> <li>7. Reposar durante 40 segundos, Tomar lectura de Hidrómetro y termómetro (corrección por temperatura).</li> <li>8. Pasadas 2 horas tomar nuevamente lectura por Hidrómetro Y termómetro (corrección por temperatura).</li> </ol> |

Fuente: IGAC modificado por CORPOICA

Tabla 40 Determinación de estructura (método de estabilidad estructural Yoder).

## **Determinación de Estructura (Yoder)**

### **OBJETIVO**

Determinar la estabilidad estructural en el suelo. (Es un indicador para evaluar la degradación de los suelos y la susceptibilidad a la erosión)

### **MATERIALES**

- Aparato de tamizado en húmedo tipo Yoder
- Juego de tamices de 8,4,2,1,0.5 y 0.25 mm
- Balanza analítica
- Estufa de secado
- Cajas Metálicas de aluminio
- Frasco lavador
- Cronómetro
- Bandejas metálicas altura máxima de 3cm
- Espátula metálica de ½ pulgada de ancha

### **CONSIDERACIONES PREVIAS**

- La muestra debe llegar sin disturbar, tal como se tomó en campo (sin alterar su estructura) y con un mínimo de 300g de suelo.

### **METODOLOGÍA**

1. Secar al aire.
2. Pasarla por un tamiz de 8mm.
3. Determinar el % de humedad gravimétrica, según el protocolo de la técnica.
4. Ordenar los tamices 4,2,1,0.5 y 0.25 mm de tal forma que el diámetro mayor quede arriba
5. Pesar 100 g de suelo y humedecerlos hasta capacidad de campo en el tamiz superior
6. Colocar los tamices dentro del soporte para luego introducirlos en un recipiente con agua en forma inclinada para evitar que quede el aire debajo de los tamices.
7. Poner a funcionar el equipo de tamizado por 30 minutos con el motor graduado 30 oscilaciones por minuto.

### **Determinación de Estructura (Yoder)**

8. Sacar los tamices del agua y dejar drenar.
9. Sacar el suelo retenido en cada tamiz utilizando un frasco lavador evacuándolo en una caja metálica.
10. Llevar a la estufa a 105°C durante 24h.
11. Pesar la masa seca de cada uno de los tamices.
12. Anotar en el formato de datos VC-F-94

Fuente: IGAC modificado por CORPOICA

Tabla 41 Determinación de MO (materia orgánica)

| <b>Determinación de materia orgánica (Walkey- Black)</b>  |
|---|
| <p><b>REACTIVOS</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Dicromato potásico 1N – <math>K_2Cr_2O_7</math></li><li>• Ácido sulfúrico concentrado <math>H_2SO_4</math></li><li>• Ácido fosfórico <math>H_3PO_4</math> al 85%</li><li>• Sulfato ferroso 0.5 N <math>-Fe(NH_4)_2(SO_4)_2</math></li><li>• Difenilamina</li><li>• Agua destilada</li></ul>   |
| <p><b>MATERIALES</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Probeta de 50 ml</li><li>• Matraces Erlenmeyer de 250 ml</li><li>• Pipeta de 10 ml</li><li>• Bureta de 25 ml</li></ul>   |
| <p><b>METODOLOGÍA</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Pesar en la balanza 0.5 gr de suelo previamente tamizado en un matraz Erlenmeyer.</li><li>2. Añadir 10 ml de Dicromato potásico 1N – <math>K_2Cr_2O_7</math>, al matraz con la muestra de suelo.</li><li>3. En un matraz de Erlenmeyer vacío, añadir 10 ml de Dicromato potásico 1N – <math>K_2Cr_2O_7</math>, con el fin de valorar el Sulfato ferroso.</li></ol> |

### Determinación de materia orgánica (Walkey- Black)

4. Agitar los matraces.
5. Añadir 10 ml de Ácido sulfúrico concentrado  $H_2SO_4$  al matraz donde se encuentra la muestra de suelo y agitar vigorosamente durante un lapso de tiempo de 1 minuto y dejar enfriar durante 30 minutos.
- 15 Añadir 10 ml de Ácido sulfúrico concentrado  $H_2SO_4$  al matraz donde no se encuentra muestra de suelo y agitar vigorosamente durante un lapso de tiempo de 1 minuto y dejar enfriar durante 30 minutos.
- 16 Añadir 50 ml de agua destilada a ambos matraces y dejar enfriar a temperatura ambiente.
- 17 Agregar unas gotas de indicador (Difenilamina).
- 18 Valorar el exceso de Dicromato potásico ( $K_2Cr_2O_7$ ) para la muestra con suelo utilizando el Sulfato ferroso 0.5N FE  $(NH_4)_2(SO_4)_2$ , Obteniendo un viraje al final de la valoración de verde oscuro a un tono rojizo.
- 19 Valorar el exceso de Dicromato potásico ( $K_2Cr_2O_7$ ) para la muestra en blanco con el Sulfato ferroso 0.5N FE  $(NH_4)_2(SO_4)_2$ , Obteniendo un viraje al final de la valoración de verde oscuro a un tono rojizo.

Fuente: IGAC modificado por CORPOICA

Tabla 42 Determinación de permeabilidad

| <b>Determinación de permeabilidad (permeámetro carga constante)</b>  |
|--|
| <p><b>OBJETIVOS</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Determinar la curva de infiltración</li><li>• Determinar la conductividad hidráulica del suelo.</li></ul>  |
| <p><b>MATERIALES</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Permeámetro de cabeza constante.</li><li>• Barreno Uhland</li><li>• Anillos metálicos de 3 cm. de alto por 5.5 cm. de diámetro, para la muestra de suelo</li><li>• Anillos metálicos de 6 cm. de alto por 5.5 cm. de diámetro, para la cabeza hidráulica</li><li>• Bandas de caucho anchas</li><li>• Manguera plástica de ½ pulgada para la conexión del agua al equipo</li><li>• Manguera plástica de ¾ pulgada de 45 cm. de larga usada como vasos comunicantes</li><li>• Vasos plásticos de 250 ml</li><li>• Gasa</li><li>• Bandejas metálicas altura máxima de 3cm</li><li>• Probetas de vidrio de 100 ml, 250 ml y 1000 ml</li></ul> |
| <p><b>CONSIDERACIONES PREVIAS</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• La muestra debe estar sin disturbar (anillo).</li><li>• Se recomienda que los anillos tengan las siguientes características: 3 cm de alto y 5.5 cm</li><li>• Las muestras pueden llegar sin disturbar utilizando tubos metálicos.</li></ul>  |
|  |

## **Determinación de permeabilidad (permeámetro carga constante)**

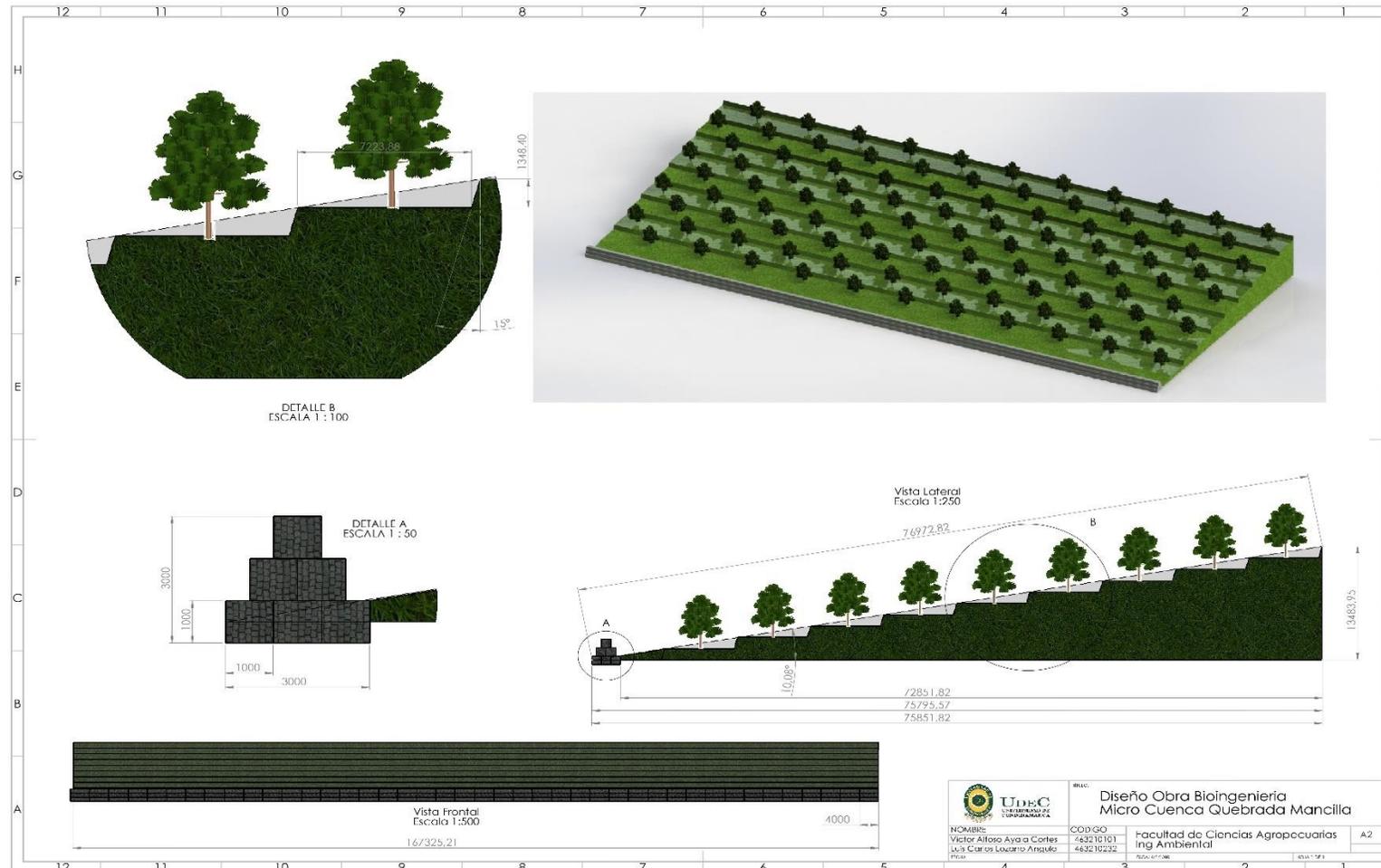
### **METODOLOGÍA**

1. Tomar la muestra sin disturbar con el barreno Uhland directamente en campo.
2. La muestra se protege con la gasa y se ajusta con una banda de caucho, se introduce en la caja metálica.
3. Cada muestra se somete a saturación, colocándolas dentro de las bandejas con agua.
4. Cuando la muestra llega a la saturación máxima, es decir cuando se observa en la superficie del anillo un brillo homogéneo.
5. Colocar la muestra de suelo saturada a la cabeza hidráulica unidas con la banda de caucho a los anillos altos.
6. Con la manguera usada como vaso comunicante llenar la cabeza hidráulica con agua.
7. Poner los vasos plásticos por debajo de la muestra de suelo, para medir el volumen del agua que pasa por la muestra durante dos horas.
8. Medir el agua que pasa través de la muestra y registrar su valor en ml

Fuente: IGAC modificado por CORPOICA

## 14.4 Anexo N°4 - Plano propuesta de diseño obra de bioingeniería

Imagen 50. Plano del diseño obra de bioingeniería



Fuente: Autores

## 14.5 Anexo N°5 – Evidencias fotográficas

Evidencia fotografica trabajo en campo y laboratorio

Imagen 51. Toma de muestra con barreno sin disturbar.



Fuente: Autores

Imagen 52. Muestras tamizadas y rotuladas



Fuente: Autores

*Imagen 53. Yoder hidráulico*



Fuente: Autores

*Imagen 54. Todas las muestras adecuadas para conductividad hidráulica*



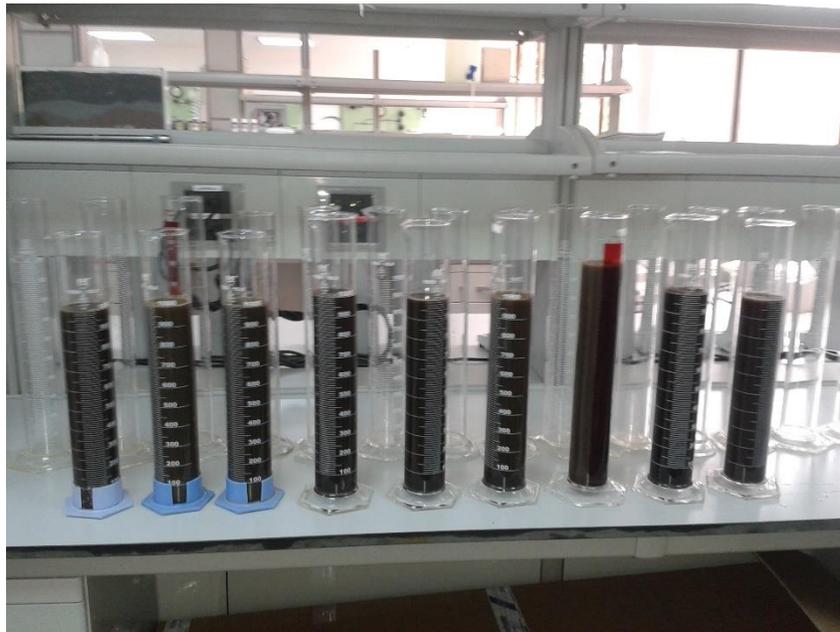
Fuente: Autores

*Imagen 55. Montura de muestras sin disturbar en el permeámetro*



Fuente: Autores

*Imagen 56. Muestras Aforadas, prueba de Bouyoucos*



Fuente: Autores

*Imagen 57. Muestras divididas por tamices, estabilidad estructural*



Fuente: Autores

*Imagen 58. Verificación de datos, % materia orgánica*



Fuente: Autores

*Imagen 59. Zona de diseño obra de bioingeniería*



Fuente: Autores