Universidad de La Salle
Ciencia Unisalle

Ingeniería Civil | Facultad de Ingeniería

2017

Estudio y análisis geotécnico de procesos erosivos en el tramo del Río Magdalena en el sector de Fortalecillas

Andrea Catalina Céspedes Alfonso
Universidad de La Salle, Bogotá

Juan Sebastián Valbuena Sáenz
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil

Part of the Civil Engineering Commons

Citación recomendada

Céspedes Alfonso, A. C., & Valbuena Sáenz, J. S. (2017). Estudio y análisis geotécnico de procesos erosivos en el tramo del Río Magdalena en el sector de Fortalecillas. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/139

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Civil by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

ESTUDIO Y ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE PROCESOS EROSIVOS EN EL TRAMO DEL RÍO MAGDALENA EN EL SECTOR DE FORTALECILLAS.

ANDREA CATALINA CÉSPEDES ALFONSO

JUAN SEBASTIÁN VALBUENA SÁENZ.

UNIVERSIDAD DE LA SALLE.
FACULTAD DE INGENIERÍA.
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL.
PROYECTO DE GRADO.
BOGOTÁ, 2017.

Estudio y análisis geotécnico de procesos erosivos en el tramo del río Magdalena en el sector de Fortalecillas.

Juan Sebastián Valbuena Sáenz.
Andrea Catalina Céspedes Alfonso.

Proyecto de grado para optar por el título de
Ingeniero Civil

Director:

Ing. Msc Martín Ernesto Riascos Caipe

Universidad de La Salle.
Facultad de Ingeniería.
Programa de Ingeniería Civil.
Proyecto de grado.
Bogotá, 2017.

Nota de aceptación.

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Director.

_____

Jurado 1.

_____

Jurado 2.

Bogotá, Agosto de 2017.

DEDICATORIA.

Juan Sebastián Valbuena Sáenz

A mis padres por el apoyo incondicional y buena energía en mis momentos de debilidad, por enseñarme que todo lo que empiezo lo debo terminar, viendo en esta frase el resultado que fue culminar mi carrera profesional. A mi abuelita Nubia por estar junto a mí en cada instante de vida, por su paciencia, amor y comprensión. A verónica por ser un motivo más de inspiración para culminar esta etapa académica en mi vida. A Catalina Céspedes, mi compañera de carrera y mejor amiga porque fue un apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera con quien compartir la mayoría de tiempo y sin importar la situación siempre estuvo ahí para ayudarme. Finalmente a mi familia en general ya que me hicieron sentir amado y no permitieron que me rindiera.

.

DEDICATORIA.

Andrea Catalina Céspedes Alfonso

A mis padres por ser quienes estuvieron a mi lado siempre sin importar las circunstancias, al ingeniero Luis Ayala, al ingeniero Martin Riascos, al ingeniero Alejandro Franco, y al ingeniero Alexander Padilla quienes me acompañaron en este proceso y estuvieron siempre dispuesto ayudarme. A mis amigos Andrés Cifuentes, Carlos Plazas quienes siempre estuvieron disponibles y me apoyaron en los momentos difíciles. Por ultimo a Sebastián Valbuena quien fue mi compañero de carrera, mejor amigo y quien estuvo a mi lado en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Al director de nuestro proyecto de grado Martin Riascos por su paciencia y apoyo a lo largo de esta investigación. A Luis Borja por ser nuestra guía en los laboratorios y a los docentes que hicieron parte de este camino por compartir su conocimiento y contribuir a nuestra formación como ingenieros.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 12
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 13
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 13
2. JUSTIFICACIÓN 14
3. OBJETIVOS 15
3.1 OBJETIVO GENERAL 15
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 15
4. MARCO DE REFERENCIA 16
4.1 Estado del arte 16
4.2 Marco teórico 17
4.2.1 Erosión 17
4.2.2 Factores que generan la erosión 17
4.2.3 Fuerza tractiva 19
4.2.4 Resistencia del suelo a la fuerza tractiva 20
4.2.5 Erosión fluvial 24
4.2.6 Erosión hídrica laminar 25
4.2.7 Ensayos de erosionabilidad 30
4.2.8 Erosión en rios corriente de agua 32
4.2.9 Transporte de sedimentos 37
4.3 MARCO LEGAL 39
4.3 MARCO CONCEPTUAL 41
4.4 DESCRIPCION VISUAL 43
5 METODOLOGÍA 46
5.1 Primera fase: Recopilación de información. 46
5.2 Segunda fase: Digitalización y generación del modelo matemático. 47
5.3 Tercera fase: Realización de la campaña exploratoria. 47
5.4 Cuarta fase: Realización de los modelos 47
6 RESULTADOS 48
6.1 Recuperación de muestras 48
6.2 Caracterización del suelo 49

6.3 Ensayos 53
6.3 Erosión fluvial 56
6.3.1 Cálculo de fuerza tractiva actuante 56
6.4 EROSIÓN LAMINAR HÍDRICA 74
6.4.1 Factor V 79
6.4.2 Factor R 81
6.4.1 Factor ES 86
6.4.1 Factor S 87
6.4.2 Factor K 88
6.4.3 Mapa de susceptibilidad a la erosión laminar hídrica 92
7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS 93
8. CONCLUSIONES 102
9. RECOMENDACIONES 104
10. BIBLIOGRAFÍA 105
11. ANEXO CD ROM

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de doble hidrómetro 32
Tabla 2 Clasificación de los depósitos de sedimentos (adaptada de Veri.tech) 1998 34
Tabla 3 Clasificación del tamaño de partículas 36
Tabla 4 Variables de la carga de fondo 38
Tabla 5 Tipo de transporte de sedimentos 39
Tabla 6 Coordenadas de los apiques 50
Tabla 7 Resumen resultados de ensayos de laboratorio 53
Tabla 8 Valores de calibración año 2006 59
Tabla 9 Valores para un periodo de retorno de dos años 60
Tabla 10 Valores para un periodo de retorno de diez años 61
Tabla 11 Valores para un periodo de rtorno de veinticinco años 61
Tabla 12 Fuerza tractiva actuante para diferentes periodos de retorno 62
Tabla 13 resultados fuerza tractiva resistente 63
Tabla 14 Factor de seguridad para un periodo de retorno de dos años 65
Tabla 15 Factor de seguridad para un periodo de retorno de diez años 66
Tabla 16 Factor de seguridad para un periodo de retorno de veinticinco años 66
Tabla 17 Resultados ensayos Crumb 68
Tabla 18 Erosión de acuerdo al ensayo de dispersión 69
Tabla 19 Resultados porcentaje de dispersión, y probabilidad de erosión 69
Tabla 20 Cálculo del % de los tipos de eventos 74
Tabla 21 Presencia de variables en los tipos de eventos 75
Tabla 22 Cálculo de la constante inicial para cada factor 77
Tabla 23 Valores de la constante modificada 78
Tabla 24 Constantes obtenidas para el sector de Fortalecillas 78
Tabla 25 valor V para cada tipo de cobertura 79
Tabla 26 precipitación mensual media de las estaciones utilizadas 82
Tabla 27 resultados de IMF, R y valor del parámetro intensidad 83
Tabla 28 valores para determinar la regresion lineal 83
Tabla 29 Valor asignado para cada pendiente 87
Tabla 30 Información geológica de la estratigrafía del área de estudio 90

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 4.1 Representación esquemática de las etapas de los ríos en áreas de montaña tropical...23

Figura 4.2 Diagrama de fuerzas sobre una partícula en la orilla de un cauce.....31

Figura.4.3 Playón generado por el desplazamiento del rio hacia el centro poblado de Fortalecillas……40

Figura 4.4. Zona colindante con la margen derecha de la ribera del rio Magdalena con vegetación predominante……..41

Figura 4.5. Habitante de Fortalecillas indicando el nivel máximo del rio Magdalena en la zona donde se presenta mayor susceptibilidad a la erosión……41

Figura 4.6 Tramo del rio donde se evidencia un desprendimiento del suelo a causa del impacto del rio Magdalena……...42

Figura 4.7. Recuperación de muestra en la zona utilizada para cultivos de arroz……42

Figura 6.1 Recuperación de muestra apique 1……...47

Figura 6.2 Recuperación muestra apique 5.....47

Figura 6.3 Ubicación apiques.....49

Figura 6.4 Perfiles del suelo encontrado en el margen derecha e izquierdo del tramo del Rio Magdalena ubicado en el sector de Fortalecillas – Huila……...52

Figura 6.5 Ensayo doble hidrómetro ASTM D 4221-90, USBR 5405-9……..54

Figura 6.6 Ensayo gravedad especifica INV E – 128 – 13 54

Figura 6.7 Ensayo de Crumb 55

Figura 6.8 Ensayo de corte directo INV E – 154-13.....55

Figura 6.9 Niveles de agua para diferentes períodos de retorno y cota. 57

Figura 6.10 Localización en planta de las 17 secciones transversales utilizadas en la modelación hidráulica.....58

Figura 6.11 Tipo de eventos.....74

Figura 6.12 Presencia de variables en eventos.....75

Figura 6.13 Factor v 79

Figura 6.14 Interpolación entre punto máximo y mínimo 83

Figura 6.15 Factor R 84

Figura 6.16 Factor ES……----…….85

Figura 6.17 Factor S……..87

Figura 6.18 Factor K……..90

INTRODUCCIÓN

La erosión es la capacidad que tiene un suelo a ser desprendido y transportado por fenómenos hídricos, en la cual, se presenta desprendimiento, transporte y sedimentación de partículas de suelo; los fenómenos de erosión se presentan dependiendo del tipo de suelo. Los factores que afectan la erosión son tamaño, distribución de las partículas, resistencia al corte (cohesión), índice de plasticidad, contenido de arcilla, porcentaje de arena, porcentaje de limo, dispersión, tamaño de los iones absorbidos, temperatura y humedad natural (antes de la lluvia).

Para este proyecto se desarrolló él estudió y el análisis de las zonas más susceptibles a fenómenos de erosión fluvial y erosión laminar hídrica en el tramo del río Magdalena del municipio de Fortalecillas en el departamento del Huila. La erosión fluvial es generada por la energía del agua donde ocurre el transporte de partículas de suelo, las cuales experimentan una fuerza actuante generada por el agua, debido a esto las partículas de suelo ejercen una fuerza resistente.

Por otro lado para el análisis de la erosión laminar hídrica se tuvo en cuenta la ecuación universal de pérdida del suelo USLE, esta contempla factores como la pendiente (S), cobertura vegetal (V), escorrentía (ES), geología (K) y precipitación (R), con el fin de plantear un modelo matemático que permita calcular la susceptibilidad en esta zona; también, se realizó un trabajo de campo que consistió en la toma de muestras para identificar propiedades del suelo mediante ensayos, luego se analizaron los resultados obtenidos con el propósito de definir mediante un mapa las zonas que pueden llegar a presentar dichos fenómenos.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuáles son las características que poseen los suelos aledaños a la ribera del río Magdalena en el tramo de Fortalecillas en el departamento del Huila que determinan la susceptibilidad a fenómenos de erosión en este sector?

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Los suelos próximos al cauce del río Magdalena en el sector de Fortalecillas son susceptibles a fenómenos de erosión debido a sus características, un factor que aumenta la susceptibilidad de los suelos en esta zona es el paso del río, esto implica que las zonas pobladas que limitan con los meandros de este cauce estén expuestos al debilitamiento de los taludes a causa del continuo choque del agua contra las paredes del canal, cuyas formaciones estratigráficas de depósitos aluviales (Qal) pueden perder material al tener contacto con el agua generando una posible erosión.

Las zonas de diferente grado de susceptibilidad podrían presentar fenómenos erosivos cercanos a los centros poblados, poniendo en riesgo a una población del tramo en estudio mediante muestras tomadas en puntos estratégicos como lo son las geoformas identificadas y a su vez con ayuda del mapa geológico las cuales serán sometidas a ensayos de laboratorio para determinar sus propiedades y poder especificar las características del lugar.

2. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto es de gran importancia en la zona de Fortalecillas (Huila) ya que debido a su constante crecimiento poblacional se han presentado asentamientos en zonas de alta susceptibilidad a la erosión. Con este proyecto se pretende identificar las zonas propensas a fenómenos de erosión fluvial y erosión laminar hídrica provocados por el río, como también las zonas aptas para la construcción y localización de comunidades mediante un mapa.

El tramo escogido no presenta estudios previos en las zonas mencionadas, por lo cual será un recurso importante para el Plan de Ordenamiento Territorial de la región ya que permitirá la localización de las comunidades en zonas que no presenten riesgo de derrumbe o debilitación de los taludes a causa del río.

Se analiza un área de 0.714822 Km^2 que limita con la carretera Neiva-Tello en las coordenadas 869239.28 E, 826436.76 N y 869616.224 E, 827057.473 N; por otro lado colinda con una carretera rural, la cual se conecta con el centro poblado e inicia en la coordenada 868260.39 E, 827794.075 N. el cual comprende el centro poblado de donde se obtiene la información necesaria para identificar las zonas más expuestas, esto se realiza mediante un modelo matemático de susceptibilidad obtenido a partir de los parámetros de la ecuación universal de perdida de suelo.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar mediante diferentes técnicas geotécnicas y geológicas, las características del suelo y las condiciones de susceptibilidad a la erosión en el sector de Fortalecillas - Huila en la ribera del río Magdalena.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las propiedades de los suelos de la zona de estudio mediante ensayos de laboratorio que permitan determinar características cualitativas y cuantitativas respecto a su resistencia en presencia de agua.
- Analizar las características del suelo y determinar su resistencia a la erosión fluvial mediante un mapa de la zona estudiada.
- Determinar la susceptibilidad de los suelos a procesos de erosión laminar hídrica teniendo en cuenta las variables que influyen en el proceso.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 Estado del arte

El tramo del rio Magdalena comprendido desde las coordenadas (3° 1'46.5"N- 75°15'19.20"O) y las coordenadas (3°2'2.82"N - 75°15'29.55"O) con una longitud de 1 km no posee estudios previos en cuanto a fenómenos de erosión en las zonas colindantes del rio con los centros poblados, por ende la fundamentación teórica que se utilizara para este proyecto será la encontrada en los siguientes artículos realizados por la Universidad militar Nueva Granada, la Universidad Surcolombiana y la Universidad Industrial de Santander:

El Geólogo Roberto Vargas Cuervo realizo un artículo acerca de la geomorfología y amenazas geológicas del municipio de Neiva en donde muestra que por su ubicación geográfica y geológica esta ante varios riesgos y amenazas de tipo geomorfológico, geológico e hidro-metereologico donde cabe resaltar el trabajo realizado por la Universidad Nacional de Medellín y el POT realizado para la ciudad por parte de la Universidad de Los Andes clasifican los diferentes tipos de amenazas donde es importante especificar que todos estos fenómenos suceden en la zona de Neiva que presenta características del suelo similares a las de los centros poblados aledaños los cuales pueden sufrir las mismas consecuencias al presentarse una amenaza alta por erosión donde se generan cárcavas y surcos que provocan derrumbes cercanos a los taludes y procesos de inestabilidad para la construcción, esto también implica que debido a la dinámica del rio Magdalena cerca de la ciudad se genere un socavamiento lateral de los cauces desestabilizando los taludes aledaños y afectando las construcciones rivereñas.

4.2 Marco teórico

4.2.1 Erosión

La erosionabilidad o erodabilidad, es la susceptibilidad o facilidad con que un suelo es desprendido y transportado por los fenómenos erosivos.

El problema de la erosión no es un problema de corte profundo sino un problema de fuerzas en la superficie del suelo; la influencia de la geometría y la localización de las partículas tienen gran influencia. Las partículas en la superficie están expuestas a fuerzas netas menores que las que están debajo de la superficie y cuando existe orientación de la partícula, la erosión es mucho menor. La iniciación del movimiento de una partícula de suelo debido a la acción hidráulica se define como el instante en el cual las fuerzas generadas por el fluido arrancan y levantan la partícula produciendo su movimiento, excediéndose por lo tanto la fuerza estabilizante debida a la gravedad y las fuerzas de fricción y cohesión. (Díaz, 2001, pág. 48).

4.2.2 Factores que generan la erosión

La erosionabilidad depende de las propiedades del suelo y del agua. Según Agena y Saad (1995) cuantifican la erosionabilidad por medio de tres factores: dispersión de las arcillas, erosión propiamente dicha y granulometría del suelo. Vanoni expresa que los factores básicos que definen la erosionabilidad de un suelo son:

a. Tamaño y distribución de las partículas

b. Resistencia al corte (Cohesión)

c. Índice de plasticidad

d. Contenido de arcilla

e. Porcentaje de arena, limo y arcilla

f. Tipo de arcilla

g. Dispersibilidad de la arcilla

h. Valencia de los Iones absorbidos

i. Tamaños de los Iones absorbidos

j. Porcentaje y tipo de los suelos disueltos

k. Temperatura

l. Orientación de las partículas

m. Factores geométricos (estado de esfuerzos)

n. Humedad natural antes de la lluvia

o. Área expuesta

p. Intensidad de la lluvia

q. Pendiente del terreno

r. Rata de escorrentía

s. Profundidad de la escorrentía

t. Velocidad de la escorrentía

u. Longitud de recorrido de la escorrentía

v. Características de la cobertura vegetal

Para suelos granulares (arenas y gravas) las fuerzas que resisten el movimiento son causadas principalmente por el peso propio de las partículas. Los suelos finos (arcillosos) en cambio deben ésta fuerza generalmente a la cohesión. (Citado en Díaz, pág. 48).

4.2.3 Fuerza tractiva

La fuerza tractiva es la fuerza de corte que ejerce el flujo sobre las partículas del cauce en un determinado punto.

Ecuación general de la fuerza tractiva para un cauce recto y ancho, la fuerza tractiva ejercida por el agua puede determinarse por medio de la formula general (Díaz, pág. 44):

$$\tau_o = \rho v^2 = \rho g * y * i$$

τo : Fuerza tractiva

ρ: Densidad del agua

v: Velocidad de la corriente en la superficie del cauce

g: Aceleración de la gravedad

y: Altura del flujo

i: Pendiente promedio

Ecuación general asumiendo una distribución de velocidades

$$\tau_o = \rho \left[\frac{v_o}{2.5\, ln\left(12.3 \frac{y}{k_s}\right)} \right]^2$$

Vo: Velocidad promedio de la corriente

Ks: Altura media de la rugosidad

Ecuación par un canal no muy ancho

$$\tau_o = \gamma * R_h * i$$

Rh: Radio hidráulico

Murray en 1976 presentó la siguiente ecuación para el cálculo de fuerza tractiva

$$\tau_o = \frac{\rho}{g}\left[\frac{v}{5.75\ log(18.4)^{\frac{R}{K_s}}}\right]^2$$

Donde:

v : Velocidad promedio de la corriente cm/seg

R: Radio hidráulico

K_s: Diámetro promedio de las partículas de arena.

4.2.4 Resistencia del suelo a la fuerza tractiva

Así como el agua ejerce una fuerza tractiva sobre las partículas de suelo a su vez el suelo trata de resistir esa fuerza de corte. Cada suelo tiene una tensión critica máxima τc o resistencia máxima a la fuerza tractiva.

Existen una gran cantidad de expresiones matemáticas para calcular la resistencia del suelo a la fuerza tractiva y ninguna de ellas tiene una aceptación universal del suelo a la fuerza de corte ejercida por el agua, los suelos tienen una resistencia dicha fuerza máxima la cual es denominada tensión crítica máxima. Existen diversas expresiones matemáticas para el cálculo de esta fuerza aunque no tienen una aceptación universal. (Díaz, pág. 46)

Criterios de Schoklistch: estableció las siguientes expresiones en kg/m2

Suelos no cohesivos de granulometría uniforme:

$$\tau_c = \sqrt{0.385\ *\ \gamma_s *\ (\gamma_s - \gamma) * \lambda * v}$$

Donde:

V: Volumen de la partícula

λ: Coeficiente de forma que vale 1 para piedras esféricas de 1.15 a 1.35 para arena, 3.1 para gravas y 3.75 para pizarras

Para suelos no cohesivos de granulometría no uniforme:

$$\tau_c = \frac{\sqrt{(0.385 \ * \ \gamma_s * \ (\gamma_s - \gamma) * \lambda * v)}}{1 + \sqrt[4]{10.5 \ \left[\frac{v}{v_m} - 1\right]}}$$

vm: Volumen medio de las piedras

Schoklistsch también establece:

$$\tau_c = \ \sqrt{0.201 \ * \ \gamma_s * \ (\gamma_s - \gamma) * \beta * d^3}$$

d: Diámetro medio

β: Coeficiente de forma que tiene un valor de 1 para esferas y 4.4 para piedras planas

$$\tau_c = 0.000285 \ (\gamma_s - \gamma) d^{\frac{1}{3}}$$

Para 0.0001 m < d < 0.003 m

$$\tau_c = 0.076 \ (\gamma_s - \gamma) d$$

Para d ≥ 0.006 m

Criterio de Leliavsky: Leliavsky (1995)

$$\tau_c = 1.66d(gm^{-2})$$

d: Diámetro medio en mm

Además de los criterios mostrados se tienen criterios de Shields, Lane y Carson, Miller, Meyer-Peter.

Para suelos cohesivos se tiene el criterio de Dunn

$$\tau_c = 10^{-3}(s_v + 0.876)tang\ \beta$$

sv: Esfuerzo cortante admisible por el material
β: Ángulo en grados
β: 0.6* (% del material más fino de 0.06 mm siempre que este no sea mayor del 90%)
β: 30 + 1.73 lp, si él % es mayor a 90%
lp: Índice de plasticidad del material

Estos criterios son utilizados para determinar el tamaño de la roca para la protección de taludes, revestimientos y cauces, además, se usa para la estimación del transporte de sedimentos. Debido a la variedad de criterios para dichos cálculos se muestra la gran incertidumbre que se puede generar.

Criterio de Lane

Es el criterio más amplio y de uso más frecuente. Lane utilizó una gran cantidad de datos de campo (canales de irrigación en su mayoría) en el cual las partículas variaban desde material fino a grueso. Así también para partículas gruesas con diámetro D_{75}, mayor o igual a 5 mm. También

se observa que los esfuerzos cortantes críticos para sedimentos finos son mayores a los obtenidos por Shields y Yalin-Karahan, posiblemente al hecho de que las partículas finas en la naturaleza se hallan mezcladas con elementos aglutinantes como los son las arcillas y los limos, a diferencia de los materiales que se tienen en laboratorio son más uniformes y están limpios, (Maza A., 1990; García Flores, 1996).

Sí $D \geq 5mm$, utilizar $D = D_{75}$, y el esfuerzo cortante se calcula mediante la expresión

$$\tau_c = 0.0493 * (\gamma_s - \gamma) * D_{75}$$

García (1996), propuso las siguientes ecuaciones para estimar el esfuerzo cortante en sedimentos finos donde D está en milímetros (mm) y Tc en N/m^2:

Sí $D < 5mm$, utilizar $D = D_{50}$

- Para **agua clara**

$$\tau_c = 1.1217 + 0.6520 * D_{50} + 0.1100 * {D_{50}}^2$$

- Para **agua con baja concentración de sedimentos**

$$\tau_c = 2.5532 + 0.2411 * D_{50} + 0.1827 * {D_{50}}^2$$

- Para **agua con alta concentración de sedimentos**

$$\tau_c = 3.7878 + 0.5776 * D_{50} + 0.0999 * {D_{50}}^2$$

4.2.5 Erosión fluvial

La erosión fluvial afecta los cursos de agua. Es el arranque, transporte y depósito de los materiales que conforman el lecho de un cauce. Es propia de los cauces de ríos y quebradas. (Carlos Enrique Escobar Potes, 2017)

A lo largo de una corriente de agua se presentan etapas fácilmente diferenciables y que se requiere identificar para poder evaluar su comportamiento erosivo. Adaptando las clasificaciones clásicas de morfología fluvial y para efectos de la interpretación de los fenómenos de erosión, se deben tomar en cuenta las siguientes etapas: Niñez - Juventud - Madurez y vejez.

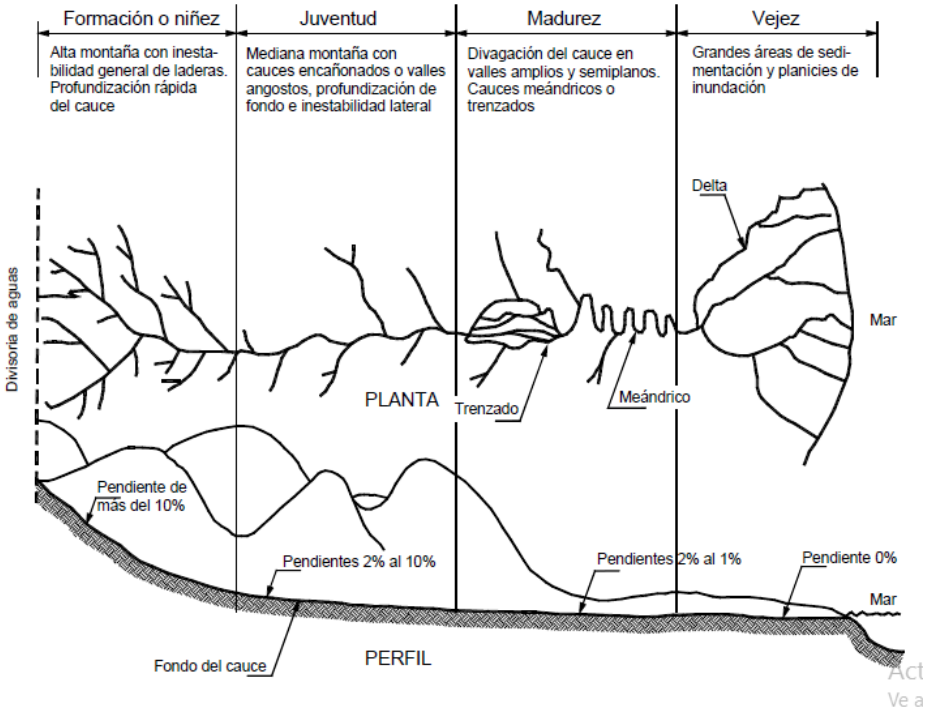


Figura 4.1. Representación esquemática de las etapas de los ríos en áreas de montaña tropical

Fuente: Control de erosión en zonas tropicales, Suarez Díaz Jaime, pág. 87

4.2.6 Erosión hídrica laminar

Es el proceso mediante el cual el suelo y sus partículas son separados por el agua. Es capaz de separar materiales en forma de capas. (Michelena, 2017)

Para determinar el potencial de erosión en campos agrícolas se desarrollaron una gran cantidad de ecuaciones con base en los diversos parámetros que afectan la erosión. Estos métodos han sido utilizados como una forma de evaluar el potencial de erosión de un área determinada.

De estos modelos empíricos el más conocido es la Ecuación Universal de Pérdidas de suelo desarrollada por Smith y Wischmeier (Tragsa, 1994) citado por (Díaz, 2001, pág. 38). El modelo paramétrico permite la evaluación de las pérdidas de suelo, incluyendo tanto la erosión laminar como la erosión en surcos mediante la expresión:

$$A = R * K * S * L * C * P$$

Donde:

A: Es la perdida de suelo por unidad de superficie, que se obtiene por el producto de resto de factores (Ton/hectárea).

R: Factor lluvia es el número del índice de erosión pluvial, $E.I_{30}$, en el periodo considerado, y mide la fuerza erosiva de una lluvia determinada; ($J.m^{-2}.cm.hora^{-1}$).

K: Factor erosionabilidad de es el valor de la erosión por unidad de índice de erosión pluvial para un suelo determinado, con una pendiente del 9% y una longitud de declive de 22.1 metros.

$$K\left[\frac{t.m^2.hora}{ha.J.cm}\right]$$

L: Factor longitud de la ladera es la relación entre la perdida de suelo para una longitud determinada y la perdida en una longitud de 22.1 metros del mismo tipo de suelo (adimensional).

S: Factor de pendiente es la relación entre las pérdidas para una pendiente determinada y las pérdidas para una pendiente del 9% del mismo tipo de suelo (adimensional).

C: Factor cultivo y ordenación, la relación entre perdidas de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas y las perdidas correspondientes para ese suelo sin cultivo (adimensional).

P: Factor prácticas de conservación del suelo, la relación entre las pérdidas de suelo con cultivo a nivel, en fajas y en terrazas, y las perdida de suelo correspondientes a un cultivo en surcos según la pendiente (adimensional) (Díaz, 2001, pág. 38).

Este proyecto se basó en la ecuación propuesta por (Darney de J, 2012), que tiene como base el modelo general de la ecuación universal de perdida de suelo (USLE). Esta ecuación es adaptada a cada zona de estudio mediante el cálculo de constantes para cada factor. La ecuación propuesta fue:

$$S_e = C_1 * V + C_2 * L_m + C_3 * ES + C_4 * S + C_5 * K$$

Donde:

$V: Cobertura\ vegetal$

$R: Lluvias$

$ES: Escorrentía$

$S: Pendiente$

$K: Factor\ geológico, teniendo\ en\ cuenta\ la\ permeabilidad\ de\ la\ zona.$

4.2.6.1 Factor V

Este factor hace referencia a la cobertura vegetal del sitio, se debe revisar la información disponible de la zona. Es importante tener una cartografía donde se defina bien la actividad que tiene el suelo con el fin de poder realizar una clasificación de acuerdo a esto.

4.2.6.2 Factor R

El factor de lluvias tambien denominado erosión pluvial, se define como el producto de la energía cinética de las lluvias por su máxima intensidad en un tiempo de 30 minutos.

La energía cinética se calcula:

$$E = 210.2 + 89 \log_{10} I$$

Donde.

E: Energía cinética de las lluvias

I: Intensidad de la lluvia en el periodo considerado.

El índice de erosión pluvial R se define por:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^{n} \left(210.2 + 89 \log_{10} I_J\right) * \left(I_j . T_J\right) * I_{30}}{100}$$

Donde:

R: Índice de erosión pluvial.

T_j: Periodo de tiempo (horas) para intervalos homogéneos de lluvia durante el aguacero

J: Intervalos homogéneos del aguacero

n: Número de intervalos.

El valor R de cada año será la sumatoria de los valores R de cada una de las lluvias registradas en ese tiempo. Para tener una confiabilidad en este dato se debe tener mínimo un registro de 10 años. Si esta cantidad de datos no se tiene este factor se puede calcular por métodos alternativos como el método modificado de Fournier.

4.2.6.3 Factor escorrentía

El coeficiente de escorrentía (ES) representa la fracción de agua del total de lluvia precipitada que realmente genera escorrentía superficial una vez se ha saturado el suelo por completo. Su valor depende de las características concretas del terreno que determinan la infiltración del agua en el suelo. Los diferentes métodos utilizados para su cálculo (todos ellos de naturaleza empírica) difieren tanto en su fiabilidad como en su complejidad; lógicamente, a más información utilizada más complejidad y fiabilidad y viceversa, pero, en cualquier caso, es fundamental tener en cuenta la mayor o menor homogeneidad de la cuenca. (Sara Ibañez, 2017)

4.2.6.4 Factor Pendiente

El factor S se denomina como el factor de la pendiente y se expresa como:

$$S = \frac{0.43 + 0.30s + 0.043s^2}{6.613}$$

Dónde:

S: Pendiente en %

4.2.6.5 Factor índice de erosionabilidad del suelo

El factor K del suelo se evalúa de forma experimental para parcelas tipo. Para cada suelo se mide la relación entre el peso de suelo perdido (t. ha-1) y el número de unidades del índice de erosión pluvial correspondientes, en condiciones sin cultivo continuo. 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. (Díaz, pág. 39)

La regresión establecida viene expresada por la ecuación:

$$100K = 10^{-4} * 2.71M^{1.14}\,(12 - a) + 4.20(b - 2) + 3.23(c - 3)$$

Donde:

M: Factor representativo de la textura. Se calcula como el producto del porcentaje de partículas de suelo comprometidas entre 0.002 – 0.1 mm de diámetro, expresado en %, por el porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0.002 – 2 mm de diámetro, expresado en % o lo que es igual a 100 menos el % de arcilla de la muestra.

$$M = [100 - \%arcilla] * [\%(limo + arena\ muy\ fina)]$$

a: Porcentaje de materia orgánica

b: Número correspondiente a la estructura del suelo según las siguiente codificación

- 1: Grano muy fino (<1mm)
- 2: Grano fino (1-2 mm)
- 3: Grano medio (2-5mm) y granulo grueso (5-10mm)
- 4 : Grano liso, prismático, columnar y muy grueso (>10mm)

C: Clase de permeabilidad del perfil, según la siguiente codificación del USDA-Soil Survey Manual

- 1: Rápida a muy rápida
- 2: Medianamente rápida
- 3: Moderada
- 4: Moderadamente lenta
- 5: Lenta
- 6: Muy lenta

Los valores de la textura, materia orgánica y estructura se refieren a los 15 – 20 cm, superiores del suelo y los de permeabilidad a todo su perfil.

Los valores más elevados calculados para K son de 0.92 y corresponden a suelos en que la fracción limo más arena muy fina, representa virtualmente la totalidad de la muestra y es nulo el contenido de materia orgánica. (Díaz, pág. 39)

Sin embargo el factor K también se puede determinar por el método gráfico:

4.2.7 Ensayos de erosionabilidad

4.2.7.1 Ensayo Crumb (USBR 5400-89)

Ensayo físico desarrollado como un procedimiento sencillo para identificar el comportamiento dispersivo de los suelos. Este consiste en la preparación de una muestra cúbica de 15 mm de lado luego la muestra es colocada cuidadosamente alrededor de 250 ml de agua destilada. La muestra o espécimen de suelo comienza a hidratar y se observa la tendencia de las partículas coloidales para deflocularse y entrar en suspensión.

Los resultados interpretan unos intervalos de tiempo, los cuales se distinguen en cuatro grados de reacción:

- Ninguna reacción: el desmoronado puede esparcirse en el fondo del recipiente como una muestra plana, pero no hay ningún signo de agua turbia causada por coloides en suspensión.
- Reacción ligera: simple insinuación de nubosidad en la superficie del agua.
- Reacción moderada: La nube coloidal fácilmente reconocible en suspensión. Usualmente diseminado en trazas delgadas en el fondo del molde.
- Reacción fuerte: nubosidad coloidal cubre casi la totalidad de fondo del molde, usualmente en una superficie muy delgada. En casos extremos, toda el agua en el recipiente se vuelve turbia.

4.2.7.2 Ensayo del doble hidrómetro (ASTM D 422-99)

Es uno de los métodos más desarrollados para evaluar la dispersión en suelos de campo.

El ensayo consta en la toma de una muestra de suelo, la cual debe ser enviada a laboratorio en un recipiente hermético con el fin de que la muestra no pierda su humedad. La prueba se realiza con un contenido de agua natural. Donde la distribución del tamaño de partículas es determinada empleando primero el ensayo estándar del hidrómetro en el que la muestra del suelo es esparcida en agua destilada con una fuerte agitación mecánica y con un dispersante químico.

El porcentaje de dispersión es la relación de transformación de las partículas de 0.005 mm de diámetro del segundo ensayo al primero, expresado en porcentaje.

El criterio para la evaluación del grado de dispersión usando los resultados del ensayo del doble hidrómetro es:

Tabla 1 Clasificación de doble hidrómetro

Porcentaje de dispersión	Grado de dispersión
< 30%	no dispersivo
30% - 50%	intermedio
> 50%	dispersivo

Fuente: Muestreo tomado del ensayo doble hidrometría (Gary Porteros, Hilda y Alva Hurtado, Jorge E.2012)

Ensayo de erosión por chorro de agua

Este ensayo fue creado por Jaime Suarez Díaz, el cual permite medir un volumen de suelo erosionado durante un determinado tiempo, aplicando un chorro de agua sobre una muestra de suelo a diferentes ángulos de incidencia.

4.2.8 Erosión en rios corriente de agua

El movimiento del agua que circula por el cauce de una corriente de agua produce el desprendimiento y transporte de los materiales que conforman su perímetro mojado. En una cañada o río pueden ocurrir dos tipos de erosión general que afectan el cauce:

a. Erosión lateral que amplía su ancho, aumentando la altura de los taludes.

b. Profundización del cauce.

La erosión en ambos casos depende de las características geotécnicas de materiales del fondo y los taludes, su geometría, pendiente y características del flujo de agua. La estabilidad del talud en sí depende de los parámetros de resistencia (c’. φ’), el peso unitario, la altura, pendiente y la presencia y características de discontinuidades geológicas.

Para cada tipo de suelo hay una velocidad a la cual se produce arrastre. En un ensayo sencillo de laboratorio en el cual se simula un canal revestido de suelo, se encuentra la velocidad a la cual se produce el arrastre de las partículas, como se indicó en el capítulo 1.

La erosión se inicia con el desprendimiento de la partículas en el perímetro del cauce por acción de la fuerza tractiva (Ilustración 4.3). El proceso de erosión es complejo y se pueden desarrollar modelos que permiten predecir las cantidades de erosión, incorporando factores geotécnicos e hidráulicos. Estos modelos son generalmente válidos para ríos de pendientes bajas, pero no son aplicables a los torrentes y ríos en áreas montañosas. Existen, sin embargo, algunos criterios de orden general que pueden emplearse para poder predecir los fenómenos en forma cualitativa (Díaz, pág. 94).

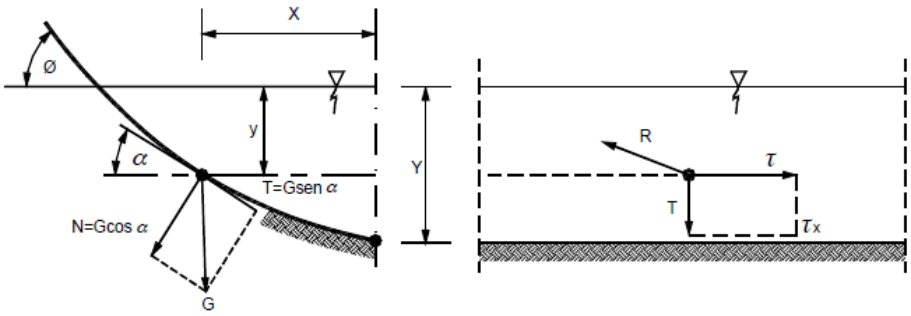


Figura 4.2. Diagrama de fuerzas sobre una partícula en la orilla de un cauce

Fuente: Control de erosión en zonas tropicales, Suarez Díaz Jaime, pág. 94

Para predecir la cantidad de erosión que se puede presentar se han desarrollado diversos modelos, los cuales se emplean para ríos de baja pendiente utilizando factores hidráulicos geotécnicos, pero no se aplican para ríos en zonas montañosas. Aunque se debe tener en cuenta que hay criterios generales que permiten realizar una predicción cualitativa de este fenómeno.

Origen de los sedimentos

El origen de los sedimentos se da en diferentes lugares, como lo muestra la tabla N°2 con sus características respectivas.

Tabla 2 Clasificación de los depósitos de sedimentos (adaptada de Veri.tech) 1998

Lugar de depositación	Nombre de los depósitos	Características
Centro del canal	Depósitos transitorios	Depósitos temporales, quietos en el centro del canal. Al aumentar el caudal trata de moverse en la dirección del canal.
	Depósitos retrasados	Partículas de gran tamaño más persistentes que los depósitos transitorios. Se requieren grandes velocidades para su transporte.
	Rellenos de canal	Acumulaciones en canales o segmentos de canal abandonados.
Margen del canal	Depósitos laterales de acreción	Barras de punto o depósitos de márgenes, los cuales pueden en un momento dado ser transportados lateralmente por las inundaciones.
Planos de inundación	Depósitos verticales de acreción	Depósitos generalmente finos de carga suspendida sobre los planos de inundación.
	Depósitos sesgados	Acumulaciones locales de materiales en forma entre cruzada sobre los planos de inundación.
Márgenes del valle	Coluviones	Debido al lavado y erosión en los valles laterales.
	Depósitos de flujos y avalanchas	Depósitos en abanico de flujos hiperconcentrados y avalanchas en los cauces laterales.
Terrazas	Terrazas altas	Antiguos planos de inundación, los cuales fueron abandonados al profundizarse el valle.

Fuente: Control de erosión en zonas tropicales, Suarez Díaz Jaime, pág. 98

Los materiales transportados por las corrientes concentradas, los torrentes y las cañadas son el principal origen de los sedimentos, los cuales son llevados hacia el cauce del agua; esto es denominado erosión *in situ* en varias áreas de la cuenca. Por otro lado la depositación de sedimentos en el valle es un medio mediante el cual los sedimentos son llevados a varios sitios de la corriente, teniendo en cuenta que este proceso afecta los procesos de erosión; este proceso puede ocurrir de diversas formas dependiendo de cómo los sedimentos se encuentran depositados.

Propiedades de los sedimentos

Las orillas, cuencas y fondos producen sedimentos que usualmente la corriente transporta y deposita. Las variables que hacen que los sedimentos se vean afectados espacialmente son la vegetación, la influencia del clima, el relieve, la geotecnia y los procesos antrópicos de erosión.

Para la medición de transporte y de carga suspendida se realizan a través de fórmulas empíricas, las cuales se basan en modelos de laboratorio, debido a que las mediciones de fondo en los ríos son poco confiables ya que las corrientes presentan una irregularidad bastante grande lo que dificulta su medición y por consiguiente su cálculo no es exacto presentando un error alto, sin embargo, para la medición y análisis de carga suspendida se combinan las mediciones de campo y las formulas empíricas.

Los sedimentos se clasifican como cohesivos (mezcla de limos y arcillas) y no cohesivos (gravas y arenas). La fuerza de resistencia a la erosión de los no cohesivos es el peso sumergido de sedimentos mientras que en los cohesivos la erosión es controlada por las fuerzas netas de atracción entre partículas y las fuerzas electroquímicas, así mismo, estas fuerzas controlan el comportamiento hidrodinámico de las suspensiones de sedimentos finos. El análisis de erosión y

transporte de los cohesivos se hace más compleja debido a su comportamiento, por el contrario, para los sedimentos no cohesivos es más sencillo.

Las principales características que intervienen en la movilidad de las partículas son su tamaño y la distribución de estas; de acuerdo a su tamaño se clasifican como arcillas, limos, arenas, gravas, guijarros y cantos. En su mayoría las arenas y gravas se componen de cuarzo, el cual tiene un peso específico de 2,65 kg/m3; a continuación, en la tabla N°3 se muestran los tamaños de partículas y su rango de tamaño.

Tabla 3 Clasificación del tamaño de partículas

Partícula	**Rango de tamaño en mm**
Cantos	Más de 256
Guijarros	64 a 256
Grava	2 a 0,064
Arena	0,064 a 2
Limos	0,004 a 0,064
Arcillas	Menos de 0,004

Fuente: Control de erosión en zonas tropicales, Suarez Díaz Jaime, pág. 95

La forma de los sedimentos se calcula mediante el factor de forma, la mayoría de las arenas tienen un factor de forma de 0.7

$$factor\ de\ forma = \frac{c}{(a * b)^{\frac{1}{2}}}$$

a: Dimensión máxima

b: Dimensión intermedia

c: Dimensión mínima

Las dimensiones mencionadas son medidas en tres ejes de la partícula perpendiculares entre sí.

La velocidad de caída es un parámetro que permite ver el equilibrio que hay entre las fuerzas hacia abajo que se debe al peso sumergido y las fuerzas que se oponen a la caída. Teniendo en cuenta que esto se presenta por la fuerza tractiva y la viscosidad del fluido. Por lo tanto, cuando se tiene un número de Reynolds menor a 0,1 para limos y arcillas las fuerzas de inercia se desprecian ya que la viscosidad controla el flujo. Este parámetro depende del tamaño de la partícula; cuando estas tienen un tamaño mayor a 2mm la viscosidad es despreciable.

4.2.9 Transporte de sedimentos

Según (McCuen, 1989) la carga transportada por ríos naturales puede dividirse en tres componentes:

- **Carga de fondo**

La carga de fondo es el material demasiado grueso para ser soportado dentro del flujo de agua por un periodo apreciable de tiempo. El transporte de fondo, incluye todos los tamaños de sedimentos mayores de 0.064 mm transportados por el agua.

La carga de fondo puede moverse rodando, deslizándose o a saltos a velocidades menores que aquellas del flujo alrededor. La carga de fondo es muy importante debido a que es esta la que mayor influencia tiene en los cambios del fondo de los ríos. La rata de transporte de carga de fondo es una función de la capacidad de transporte del flujo.

Generalmente la proporción de carga de fondo es menor del 25% de la carga total transportada.(Citado por Díaz, pág. 96)

- **Carga en suspensión**

Las partículas suspendidas son transportadas y mantenidas dentro del flujo por un proceso de mezcla turbulenta.

La carga en suspensión consiste en partículas de diámetro menor a 0.064 mm., las cuales se transportan suspendidas dentro del flujo.

Tabla 4 Variables de la carga de fondo

Propiedades de flujo	Propiedades del fluido	Propiedades de los sedimentos	Otras propiedades
Caudal Q Velocidad (U) Profundidad de flujo (Y) Ancho (W) Pendiente (S) Resistencia (F)	Viscosidad Cinemática (ν) Densidad (ρ) Temperatura (T) Concentración de carga en suspensión (C)	Densidad (ρs) Tamaño (D) Distribución (σ) Velocidad de caída (ω)	Gravedad (g) Geometría en planta Forma de la sección transversal

Fuente: Control de erosión en zonas tropicales, Suarez Díaz Jaime, pág. 97

La carga disuelta consiste en materiales transportados en solución. Generalmente, se trata de partículas de arcillas o limos muy finos. Al iniciarse la erosión el movimiento de granos en el fondo es intermitente especialmente, en ríos con sedimentos gravosos. En corrientes con fondo de arena los granos tienden a moverse en grupos, generándose una migración de la forma del fondo. El desarrollo de estas formas es el resultado del transporte de sedimentos de las propiedades del material de fondo y de la resistencia y condiciones del flujo en la superficie del fondo. Cada partícula camina distancias cortas y luego temporalmente se detiene. En la tabla 5 se muestra como determinar el tipo de transporte (Díaz, pág. 97).

Tabla 5 **Tipo de transporte de sedimentos**

Velocidad de flujo/ velocidad de caída	**Tipo de transporte**
0 a 0.7	Suspensión
0.7 a 2	Saltación
2 a 6	Carga de fondo

Fuente: Control de erosión en zonas tropicales, Suarez Díaz Jaime, pág. 96

4.3 MARCO LEGAL

Los ensayos realizados para la caracterización del suelo se basaron en la normatividad Invías 2013, ASTM y USBR. A continuación se muestran las normas utilizadas para ello:

- INV E – 126-13 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos: determinar el límite plástico e índice de plasticidad de la muestra, lo cual permite caracterizar y clasificar la fracción fina del suelo.
- INV E – 127-13 Determinación de los factores de concentración de los suelos: permite establecer constantes como límite de contracción, relación de contracción, cambio volumétrico, contracción lineal.
- INV E – 136-13 Determinación de las masas unitarias máximas y mínimas para el cálculo de la densidad relativa: este ensayo encuentra los valores de densidad seca mínima y máxima, es decir el grado de compactación del suelo que permite el drenaje libre o que no son cohesivos expresado en la determinación de dichas masas.
- INV E – 154-13 Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada: determina la resistencia la corte de la muestra de un suelo consolidado y drenado empleando el método de corte directo.

- INV E – 125-13 Determinación del límite líquido de los suelos: encontrar el límite líquido y utilizarlo con el límite plástico, índice de plasticidad y humedad para establecer correlaciones del suelo y así poder determinar su comportamiento por ejemplo la permeabilidad, la compresión, la compactibilidad etc.
- INV E – 122-13 Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestra de suelos, rocas y mezclas de suelo- agregado: Esta norma permite determinar el contenido de agua que posee el suelo para identificar su comportamiento.
- INV E – 123-13 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos: Permite conocer la distribución de los tamaños de las partículas del suelo cuantitativamente por medio de tamices e hidrómetro.
- INV E – 128 – 13 Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y llenante mineral, empleando un picnómetro con agua: Esta norma permite determinar la gravedad específica de los suelos que pasan el tamiz 4.75 mm, las cuales hacen relación a las partículas minerales que aparecen naturalmente y que prácticamente no son solubles en agua
- Ensayo del Doble Hidrómetro (ASTM D 4221-90, USBR 5405-89): Este método proporciona una indicación de las características de dispersión natural de los suelos arcillosos.
- Ensayo de Crumb (USBR 5400-89): Proporciona una indicación cualitativa de la dispersión natural de los suelos arcillosos.

4.3 MARCO CONCEPTUAL

Depositación: al disminuir la velocidad del viento o al encontrarse las partículas con una barrera estas caen o se sedimentan por acción de las fuerzas de gravedad. (Díaz, pág. 60).

Desprendimiento: Según (Gray y Sotir,1996) "el movimiento del suelo producido por el aumento de la velocidad del viento, esta se encuentra en 20 km/h. El movimiento del suelo por acción del viento es un resultado de la turbulencia de la velocidad. La velocidad requerida al iniciar el movimiento aumenta, al aumentar el tamaño de las partículas. Para la mayoría de los suelos esta velocidad es de aproximadamente 20 km/h a una altura de 30 centímetros por encima de la superficie". Citado por (Díaz, 2001, pág. 60).

Energía Hidráulica: "La energía hidráulica se puede explicar cómo el gasto de energía potencial a lo largo de un tramo de río. Se ha comprobado que esta energía hidráulica está íntimamente relacionada con la capacidad erosiva.es aquella que mide la capacidad de erosión a la corriente, además, es el gasto de energía potencial que se genera a lo largo de un tramo de río". (Díaz, pág. 46).

Erosión: "Es la susceptibilidad o facilidad con que un suelo es desprendido y transportado por los fenómenos erosivos". (Díaz, pág. 48).

Escorrentía: "Transporte de suelos desprendidos por la lluvia y arrastre de materiales sueltos". (Díaz, pág. 79)

Fuerza de cohesión: "La cohesión es la fuerza de atracción que mantiene unidas a las moléculas de una misma sustancia". (Terán, 2014).

Fuerza de fricción: “La fuerza de rozamiento es paralela a la dirección del movimiento en la superficie de apoyo, es opuesta al deslizamiento relativo y su valor depende de la carga (fuerza Normal) que presiona las superficies en contacto”. (Martinez, 2011).

Fuerza gravitacional: “La Tierra atrae hacia sí cualquier objeto que se deje caer, incluso cuando no haya contacto directo entre el objeto y la Tierra. La fuerza de atracción gravitacional que la Tierra ejerce sobre un cuerpo se llama peso del cuerpo”. (SEARS, 2009, pág. 108).

Fuerza neta: “A menudo necesitaremos obtener la suma vectorial (resultante) de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo. Llamaremos a esto la fuerza neta que actúa sobre el cuerpo” (SEARS, pág. 110).

Fuerza tractiva: “es la fuerza tangencial por unidad de área que se aplica sobre la superficie del canal. Cada material tiene una fuerza tractiva máxima a la cual se produce erosión”. (Díaz, pág. 53)

Sedimentos: Los sedimentos pueden clasificarse en dos grandes categorías, sedimentos cohesivos y sedimentos no cohesivos. Los sedimentos no cohesivos comprenden los cantos y bloques, gravas y arenas y los cohesivos son esencialmente mezclas de limos y arcillas. Existen diferencias substanciales entre los dos grupos de sedimentos y su interacción con el flujo. En los sedimentos no cohesivos la principal fuerza de resistencia a la erosión es el peso sumergido de los sedimentos, mientras en los sedimentos cohesivos las fuerzas netas de atracción entre partículas y las fuerzas electroquímicas controlan la resistencia a la erosión.

Estas mismas fuerzas controlan el comportamiento hidrodinámico de las suspensiones de sedimentos finos. La erosión y transporte de los sedimentos no cohesivos es más sencilla y confiable de analizar, que la de los sedimentos cohesivos, debido a que los sedimentos cohesivos se comportan de una forma más complicada de analizar. (Díaz, pág. 95)

Suelo: Para Jaramillo et al (1994) citado por (J D. F., 2002, pág. vi) “el suelo es aquella delgada capa, de pocos centímetros hasta algunos metros de espesor, de material terroso, no consolidado, que se forma en la interfase atmósfera – biosfera – litosfera. En ella interactúan elementos de la atmósfera e hidrosfera (aire, agua, temperatura, viento, etc.), de la litosfera (rocas, sedimentos) y de la biosfera y se realizan intercambios de materiales y energía entre lo inerte y lo vivo, produciéndose una enorme complejidad”.

Suelo cohesivo: partículas mu y pequeñas, predominan los efectos electroquímicos superficiales. Las partículas tienden a juntarse (interacción agua partícula). Suelos plásticos (Arcillas). (Velasco).

Suelo granular: Las partículas de suelo no tienden a juntarse ni a adherirse, sus partículas son relativamente grandes como las gravas, arenas y limos (Velasco).

Transporte: proceso mediante el cual las partículas son trasladadas con una velocidad requerida, este transporte se realiza con una altura no mayor a un metro de la superficie.

4.4 DESCRIPCION VISUAL

El tramo de estudio ubicado en el sector de Fortalecillas – Huila, es una zona que posee bastante vegetación a lo largo de los terrenos colindantes con el rio Magdalena; en estos se encuentran zonas boscosas, cultivos de arroz, un playón y ciertas zonas de inundación como se observa en las siguientes imágenes:

Figura.4.3 Playón generado por el desplazamiento del rio hacia el centro poblado de Fortalecillas.

Fuente: Autores

Figura 4.4. Zona colindante con la margen derecha de la ribera del rio Magdalena con vegetación predominante.

Fuente: Autores

Figura 4.5. Habitante de Fortalecillas indicando el nivel máximo del rio Magdalena en la zona donde se presenta mayor susceptibilidad a la erosión.

Fuente: Autores

Figura 4.6 Tramo del rio donde se evidencia un desprendimiento del suelo a causa del impacto del rio Magdalena.

Fuente: Autores

Figura 4.7. Recuperación de muestra en la zona utilizada para cultivos de arroz.

Fuente: Autores

5 METODOLOGÍA

Para este proyecto se trabaja una línea de investigación de análisis de riesgos e impacto para cumplir los objetivos planteados; el desarrollo del proyecto se realizó con base al tipo de investigación experimental en cuatro fases que sé que se describen a continuación:

5.1 Primera fase: Recopilación de información.

Consiste en obtener información del tramo de estudio por medio de mapas topográficos, mapa geológico, mapas geomorfológicos, mapa de cobertura vegetal, datos ambientales y recolección de información; parte de esta se obtuvo en el sistema de inventarios de efectos de desastre (desiventar), con el fin de obtener los eventos ocurridos en sectores cercanos a fortalecillas en un

transcurso de tiempo, con el fin de determinar cómo dichos eventos afectan cada uno de los factores utilizados para determinar la erosión hídrica laminar.

5.2 Segunda fase: Digitalización y generación del modelo matemático.

Esta fase comprende la digitalización de la información obtenida en la fase I, posteriormente se realiza un modelo matemático de susceptibilidad mediante los parámetros o factores de la ecuación universal de perdida de suelo (mapa de cobertura V, mapa S, mapa K, mapa R y mapa ES). Para realizar cada uno de estos mapas se utilizan herramientas SIG (ArcMap 10.4.1) empleando el sistema de coordenadas geográficas GCS_MAGNA (Magna Colombia Este), las cuales permiten realizar un análisis de datos ubicados en el espacio y así poder realizar el modelo matemático ($S = C1 * v + C2 * R + C3 * ES + C4 * LS + C5 * K$).

5.3 Tercera fase: Realización de la campaña exploratoria.

Se realiza la campaña exploratoria con base a la información recopilada, con esto se determinan los puntos donde se realizara cada uno de los apiques y así obtener las muestras de cada zona, estas zonas se encuentran identificadas mediante geoformas que generan una estimación de lo que se encuentra en campo. Para la recuperación de las muestras es necesaria la colaboración de personal capacitado y experimentado en la realización de estos procesos con el fin de conservar las propiedades de cada una de las muestras y obtener resultados más acertados.

5.4 Cuarta fase: Realización de los modelos

En esta fase se realiza un análisis de los parámetros de la ecuación universal de perdida de suelo para el tipo de erosión laminar hídrica, para esto se utiliza un mapa de cobertura vegetal, un mapa S (factor topográfico), mapa K (factor que muestra la erosionabilidad del suelo teniendo en cuenta su permeabilidad), un mapa R (factor que muestra la capacidad de la lluvia para erosionar

el suelo) y un mapa ES (factor de escorrentía). Estos mapas son los digitalizados en la fase II, además, un mapa de acuerdo a los resultados obtenidos en laboratorio de porcentaje de dispersión y fuerza tractiva resistente de acuerdo a las zonas escogidas donde se realiza la campaña exploratoria para determinar la erosión fluvial; con el fin de obtener una multiplicación de mapas que permitan cualificar y cuantificar la susceptibilidad a la erosión del suelo en las riberas del río Magdalena en el sector de Fortalecillas para estos tipos de erosión.

6 RESULTADOS

6.1 Recuperación de muestras

La recuperación de las muestras se hizo siguiendo la norma Invías 103 – 13, la cual con base a los ensayos que se van a realizar determina las condiciones de recuperación de las muestras.

Figura 6.1 Recuperación de muestra apique 1

Fuente: Autores

Figura 6.2 Recuperación muestra apique 5

Fuente: Autores

6.2 Caracterización del suelo

Se realizaron nueve apiques de donde se tomaron siete muestras alteradas y dos muestras inalteradas en el sector de Fortalecillas – Huila, a continuación se muestra la localización de cada uno de estos:

Tabla 6 **Coordenadas de los apiques**

APIQUE	COORDENADA
Apique 1	N: 3° 01'48.2" W: 75° 15' 17.3"
Apique 2	N: 3° 01'55.1" W: 75° 15' 14.0"
	N: 3° 01'55.1" W: 75° 15' 14.0"
Apique 3	N: 3° 02' 1.3" W: 75° 15' 14.9"
Apique 4	N: 3° 01' 50.8" W: 75° 15' 21.1"
Apique 5	N: 3° 01' 59.1" W: 75° 15' 20.4"
Apique 6	N: 3° 2' 11.8" W: 75° 15' 44.5"
Apique 7	N: 3° 2' 10.8" W: 75° 15' 54.3"
Apique 8	N: 3° 2' 23.3" W: 75° 16' 3.1"
Apique 9	N: 3° 2' 17.4" W: 75° 15' 56.9"

Fuente: Autores

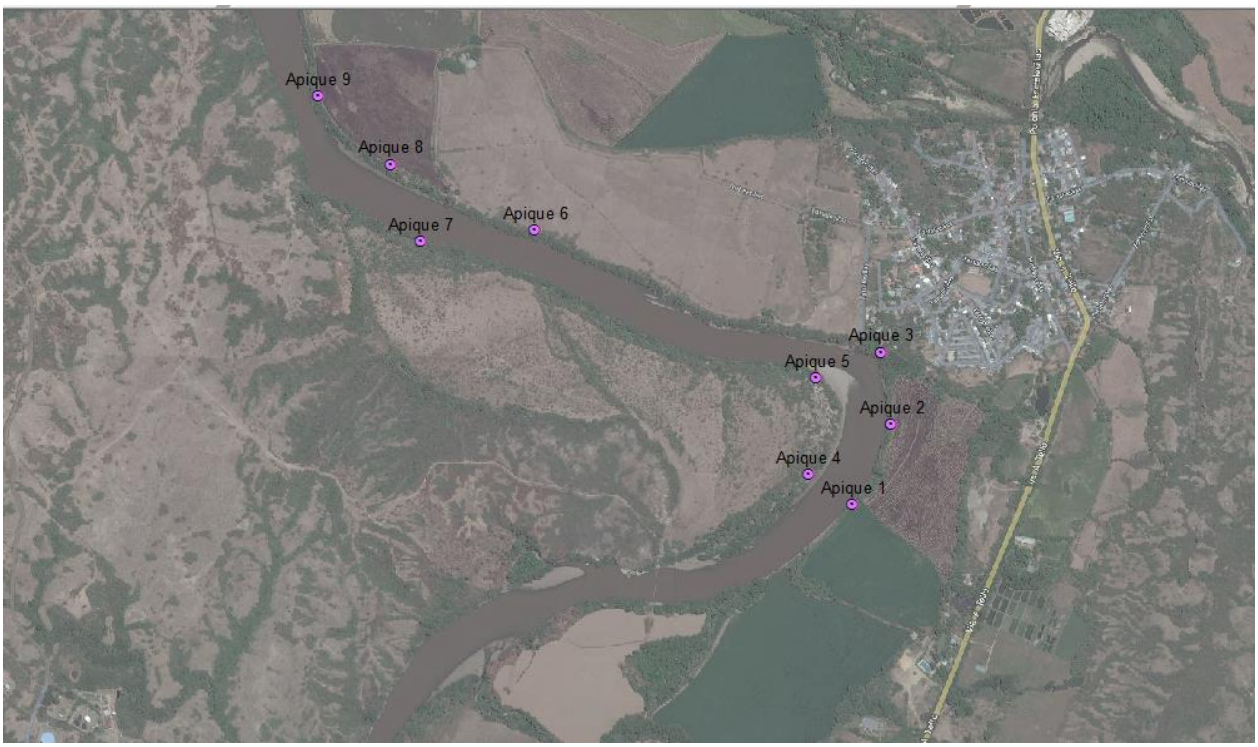


Figura 6.3 Ubicación apiques

Fuente: Imagen tomada del satélite de Nokia (Nokia Hybrid)

Para cada uno de los apiques se realizó una caracterización en campo, la cual describe lo encontrado, posteriormente a cada una de las muestras se le realizó una serie de ensayos los cuales permitieron verificar la caracterizacion del tipo de suelo, mejorar la descricpción y clasificar el tipo de suelo por los métodos AASHTO y S.U.C.S de acuerdo a los resultados obtenidos.

En el apique 1 se encontró una arcilla limosa, de color gris con vetas de oxidación y humedad alta. La clasificacion dada por el método AASHTO fue un suelo A 7 – 6 (0), que hace referencia a los suelos arcillosos y por el método S.U.C.S fue un suelo que pertenece al grupo CL (arcilla baja compresibilidad). El espesor de la capa de donde se obtuvo la muestra fue de 0.4 metros.

En el apique 2 se encontraron dos materiales el primero fue una arcilla, de color marron claro y humedad alta; el segundo fue una arena fina con particulas limosas y arcillosas de color marron claro con vetas grises y humedad alta. La clasificacion dada por el método AASHTO fue un suelo A 7 – 6 (13) y A 2 - 4 (0); por el método S.U.C.S fue un suelo CH (arcilla de compresibilidad alta) y SM – SC (arena limo arcillosa) respectivamente. El espesor de la capa de donde se obtuvo la muestra 1 fue de 1 m y el espesor de la capa de la segunda muestra fue de 0.3 metros.

En el apique 3 se encontraron dos materiales el primero fue una arcilla arenosa con presencia de raices y humedad alta; el segundo fue una arcilla limosa de color marrón claro con partículas de limo y humedad alta. La clasificación dada por el método AASHTO fue un suelo A – 6 (1) y A – 4 (8) respectivamente y por el método S.U.C.S fue un suelo que pertenece al grupo CL (arcilla de baja compresibilidad) para los dos muestras. El espesor de la capa de donde se obtuvo la muestra numero 1 fue de 0.25m y el espesor de la capa de la segunda muestra fue de 1.10 metros.

En el apique 4 se encontró una arena de color gris con partículas limosas y humedad alta. La clasificaión dada por el método AASHTO fue un suelo A 2 - 4 (0) y por el método S.UC.S fue un suelo SP – SM (arena limosa pobremente gradada). Se encontro nivel freatico a 1.30 metros; el espesor de la capa de donde se obtuvo la muestra fue de 1.70 metros.

En el apique 5 se encontró una arena de color marrón claro con vetas naranjas y grises, con humedad alta. La clasificación dada a este suelo por el metódo AASHTO fue un suelo A – 1b (0) y por el método S.U.C.S. fue un suelo SP (arena pobremente gradada); se encontro nivel freático a 1 metros. El espesor de la capa de donde se obtuvo la muestra fue de 1.60 metros.

En el apique 6 se encontró una arcilla con presencia de limos de color naranja oscuro y humedad. La clasificación dada a este suelo por el metódo AASHTO fue un suelo A – 6 (1) y por el método S.U.C.S. fue un suelo CL (arcilla de baja compresibilidad). El espesor de la capa de donde se obtuvo la muestra fue de 0.6 metros. no obstante despues de 1 m hasta 1.50 metros se encontró conglomerado de bolos de 10” promedio unidos por material limosoy arenoso de color naranja oscuro.

En el apique 7 se encontró una arena arcillosa con presencia de limos, color gris, con humedad alta. La clasificación dada a este suelo por el metódo AASHTO fue un suelo A 2 - 4 (0) y por el método S.U.C.S. fue un suelo SM – SC (arena limo arcillosa). El espesor de la capa de donde se obtuvo la muestra fue de 1.50 metros.

En el apique 8 se encontró una arena arcillosa con presencia de limos, color gris, con vetas color marrón claro y humedad alta. La clasificación dada a este suelo por el metódo AASHTO fue un suelo A 2 (0) y por el método S.U.C.S. fue un suelo SM – SC (arena limo arcillosa). El espesor de la capa de donde se obtuvo la muestra fue de 1.40 metros.

En el apique 9 se encontró una arena arcillosa con presencia de limos, de color marrón claro, con humedad alta. La clasificación dada a este suelo por el metódo AASHTO fue un suelo A – 4 (0) y por el método S.U.C.S. fue un suelo SM – SC (arena limo arcillosa). El espesor de la capa de donde se obtuvo la muestra fue de 1.40 metros.

Los ensayos realizados se hicieron de acuerdo a las descripciones obtenidas en campo para cada una de las muestras.

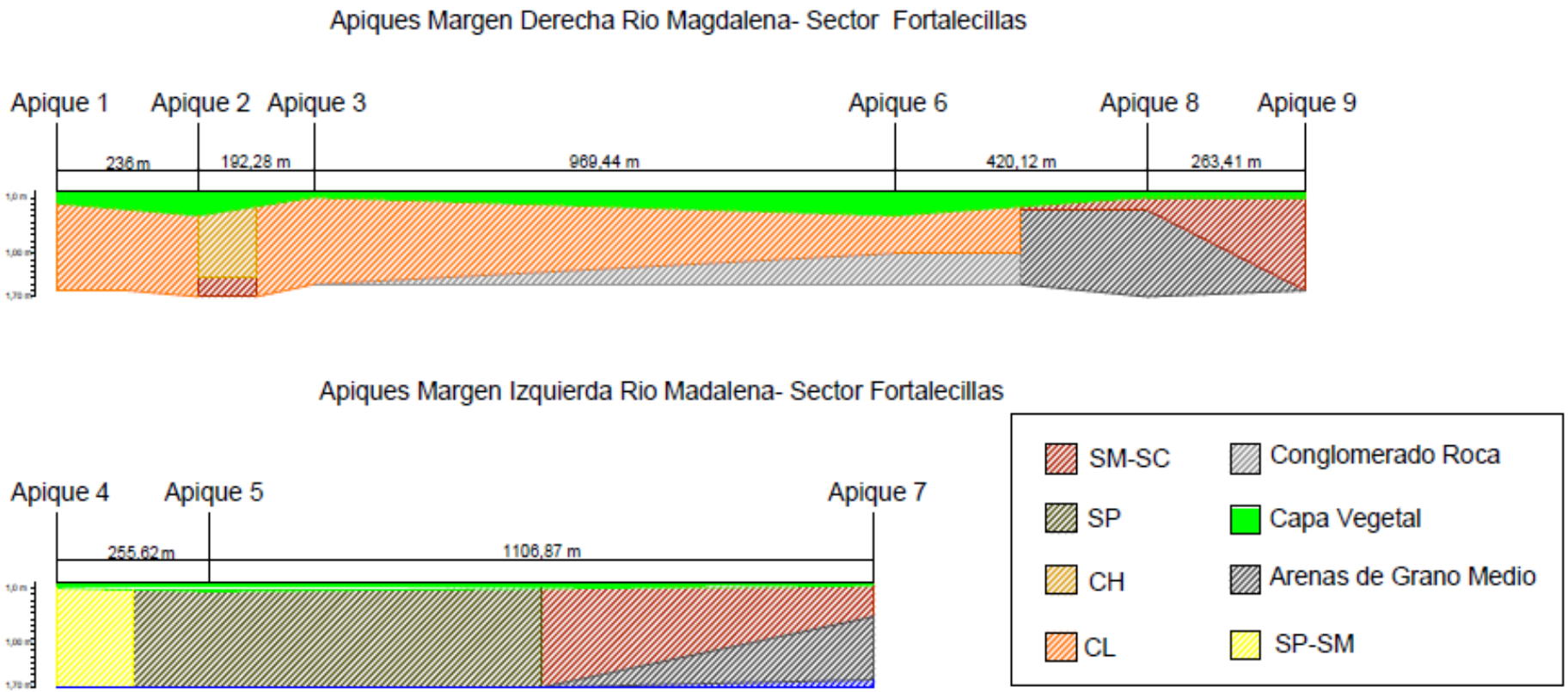


Figura 6.4

Perfiles del suelo encontrado en el margen derecha e izquierdo del tramo del Rio Magdalena ubicado en el sector de Fortalecillas – Huila; donde se realizó la toma de muestras por medio de apiques de donde se puede evidenciar que el tipo de suelo predominante en la zona corresponde a una Arcilla de Baja Compresibilidad (CL) y un nivel freático (NF) poco profundo.

Fuente: Autores

6.3 Ensayos

Tabla 7 Resumen resultados de ensayos de laboratorio

		ENSAYOS										
Apique	profundidad (m)	Huemedad Natural	LL	LP	IP	PASA 200	Gravedad Especifica	Densidad Parafinada $g/_{cm^3}$	Masas Unitarias $g/_{cm^3}$	Corte Directo	Ensayo de Crumb	% Dispersión
Apique 1	1.4	9.68%	15.87%	10.33%	5.54%	45.10%	2.75	1.54	-	cohesion: 22.42 kpa ϕ: 31.3°	Grado 3: Reacción Moderada	22.2 No Dispersivo
Apique 2 M1	1	36.69%	51.33%	24.52%	26.81%	94.55%	2.632	1.818	-	cohesion: 23.91 kpa ϕ:15.9 °	-	26.4 No Dispersivo
Apique 2 M2	0.3	28.75%	NL	NP	-	22.41%	2.722	1.807	-	cohesion: 0.9356 kpa ϕ: 32.9°	-	23.6 No Dispersivo
Apique 3 M1	0.25	9.27%	21.57%	10.08%	11.49%	50.99%	2.712	1.222	-	cohesion: 33.77 kpa ϕ: 35.3°	-	23. 5 No Dispersivo
Apique 3 M2	1.1	28.08%	21.83%	9.89%	11.94%	96.79%	2.676	1.734	-	cohesion: 40.197 kpa ϕ: 25.9°	Grado 2: Reacción Ligera	53.3 Dispersión Intermedia
Apique 4	1.7	13.13%	NL	NP	-	10.70%	2.75	-	1.116	cohesion: 43.86 kpa ϕ: 15.9°	-	35.1 Dispersión Intermedia
Apique 5	1.6	17.31%	NL	NP	-	4.00%	2.676	-	1.288	cohesion: 2.12 kpa ϕ: 34.4°	-	7.4 No Dispersivo
Apique 6	0.6	7.70%	19.90%	8.10%	11.80%	52.30%	2.726	-	1.145	cohesion: 32.94 kpa ϕ: 35°	Grado 3: Reacción Moderada	16. 4 No Dispersivo
Apique 7	1.5	26.92%	NL	NP	-	30.40%	2.736	1.832	-	cohesion: 21.42 kpa ϕ: 34.6°		36.4 Dispersión Intermedia
Apique 8	1.4	12.14%	NL	NP	-	25.60%	2.676	-	1.231	cohesion: 33.39 kpa ϕ: 28.4°		44.8 Dispersión Intermedia
Apique 9	1.4	9.68%	15.87%	10.33%	5.54%	45.10%	2.75	1.54	-	cohesion: 22.42 kpa ϕ: 31.3°	Grado 3: Reacción Moderada	22.2 No Dispersivo

Fuente: Autores

Figura 6.5 Ensayo doble hidrómetro ASTM D 4221-90, USBR 5405-89

Fuente: Autores

Figura 6.6 Ensayo gravedad específica INVE – 128 – 13

Fuente: Autores

Figura 6.7 Ensayo de Crumb (USBR 5400-89):

Fuente: Autores

Figura 6.8 Ensayo de corte directo INV E – 154-13

Fuente: Autores

6.3 Erosión fluvial

6.3.1 Cálculo de fuerza tractiva actuante

Para determinar la erosión fluvial los factores que intervienen son fuerzas actuantes, fuerzas resistentes, porcentaje de dispersión determinado por el ensayo de doble hidrometría y un grado de dispersión obtenido por el ensayo de Crumb se debe tener en cuenta que este último es un ensayo cualitativo. Para el cálculo de la fuerza tractiva resistente se empleó la ecuación para agua con alta concentración de sedimentos debido a que en la zona de estudio se depositan gran cantidad de sedimentos debido a actividades como la apertura de compuertas de la represa de Betania, y a factores naturales como lo pueden ser las precipitaciones. A continuación se muestra el cálculo de dichos factores.

- Calculo fuerza actuante

Para el cálculo de la fuerza actuante se utilizaron batimetrías cercanas al área de estudio mediante los resultados de calibración obtenidos en el documento “Análisis de la estabilidad de las islas ubicadas en el Rio Magdalena frente a la ciudad de Neiva” (Nacional, 2006), los datos para calcular los periodos de retorno en rangos de 2 años, 10 años y 25 años fueron tomados del anexo 8 del documento citado anteriormente; para esto se utiliza la sección 2 del tramo de la modelación hidráulica del Rio Magdalena en el sector de Neiva ya que posee características muy similares a las que se analizan en el tramo de Fortalecillas, de acuerdo a esto se plantea una aproximación en cuanto a las características obtenidas en el perfil de calibración de la sección 2. Donde se encuentran valores como la velocidad en la sección, área mojada y el número de Froude para cada uno de los periodos de retorno y respecto a estos valores se pudo calcular el radio hidráulico, base de la sección y profundidad como se muestra a continuación:

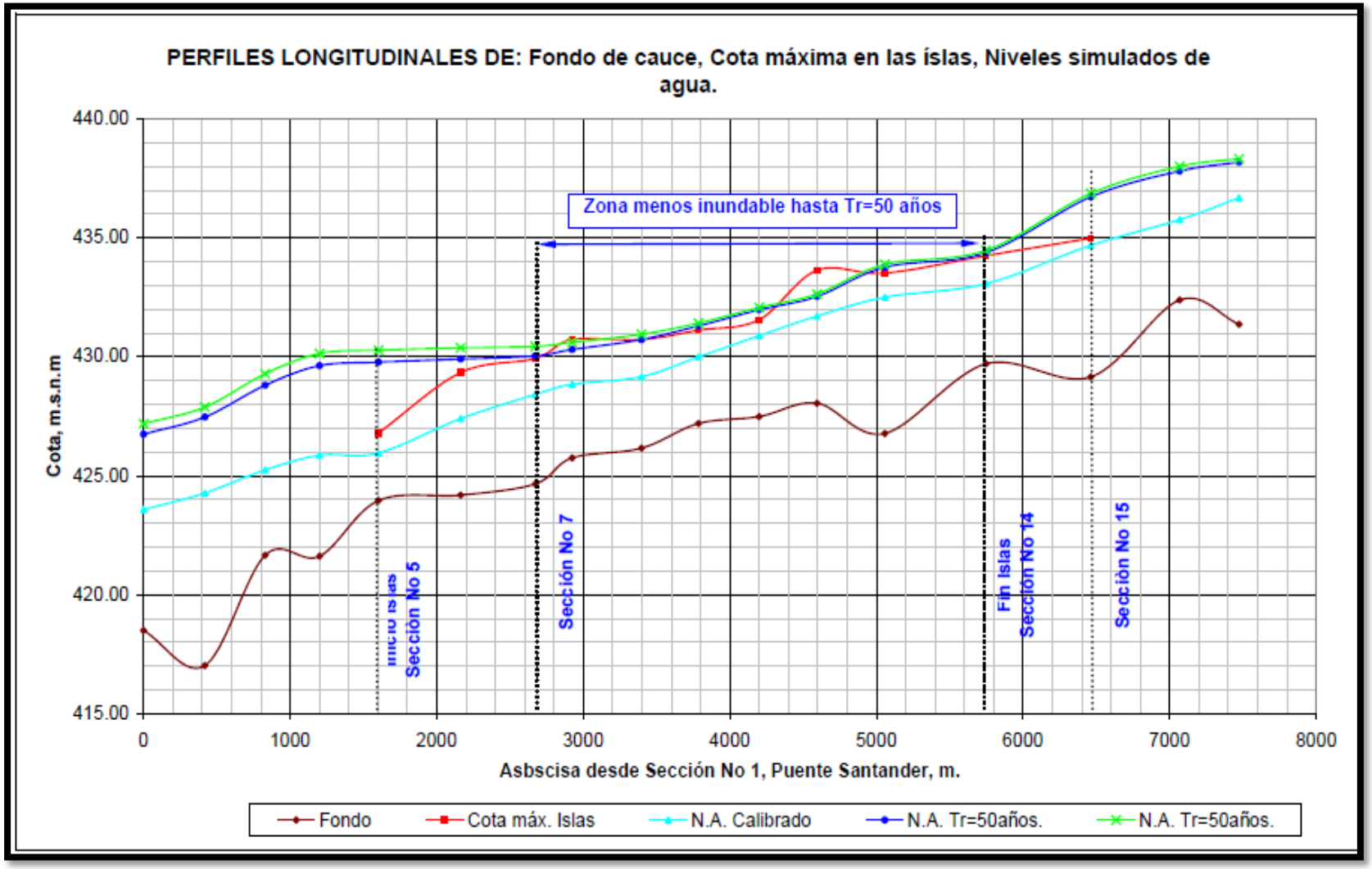


Figura 6.9 Niveles de agua para diferentes períodos de retorno y cota.

Fuente: Análisis de la estabilidad de las islas ubicadas en el río Magdalena frente a la ciudad de Neiva, Universidad Nacional de Colombia, 2006, pág. 79.

Figura 6.10 Localización en planta de las 17 secciones transversales utilizadas en la modelación hidráulica.

Fuente: Análisis de la estabilidad de las islas ubicadas en el río Magdalena frente a la ciudad de Neiva informe final, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá, 2006.

Tabla 8 Valores de calibración año 2006

Calibración	
s	0.001745
γ agua (Kg/m^3)	1000
g (m/s^2)	9.81
F	0.62
V (m/s)	3.61
A (m^2)	317.5
D (m)	3.456
B (m)	91.872
P (m)	98.784
Rh (m)	3.214
τ_0(kg/m^2)	5.608

Fuente: Análisis de la estabilidad de las islas ubicadas en el río Magdalena frente a la ciudad de Neiva, Universidad Nacional de Colombia, 2006

Donde:

S: Pendiente de la sección en porcentaje

g: Gravedad

F: Número de Froude

V: Velocidad

A: Área del canal

D: Profundidad hidráulica

B: Base del canal

P: Perímetro del canal

Rh: Radio hidráulico

τ_0: Fuerza tractiva actuante

Mediante las siguientes ecuaciones se obtienen cada uno de los valores.

$$Profundida\ hidráulica = \frac{v^2}{F^2 * g}$$

$$Base\ del\ canal = \frac{A}{D}$$

$$Perimetro\ del\ canal = B + (2 * D)$$

$$Radio\ hidráulico = \frac{A}{P}$$

$$\tau_0 = \gamma * S * Rh$$

A continuación se muestran los datos para los periodos de retorno de dos años, diez años y veinticinco años.

Tabla 9 Valores para un periodo de retorno de dos años

.Tiempo de retorno 2 años	
s	0.00174
γ agua	1000
g (m/s^2)	9.81
F	0.63
V (m/s)	4.15
A (m^2)	401.58
D(m)	4.423
B (m)	90.787
P (m)	99.634
Rh (m)	4.031
τ_0 (kg/m^2)	7.033

Fuente: Autores

Tabla 10 Valores para un periodo de retorno de diez años

Tiempo de retorno 10 años	
s	0.00174
γ agua	1000
g (m/s^2)	9.81
F	0.66
V (m/s)	4.92
A (m^2)	515.24
D (m)	5.665
B (m)	90.957
P (m)	102.286
Rh (m)	5.037
τ_0 (kg/m^2)	8.790

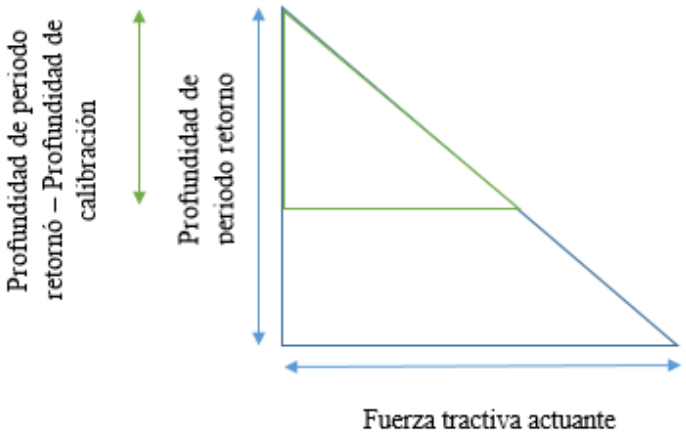
Fuente: Autores

Tabla 11 Valores para un periodo de rtorno de veinticinco años

Tiempo de retorno 25 años	
s	0.00174
γ agua	1000
g (m/s^2)	9.81
F	0.67
V (m/s)	5.22
A (m^2)	569.06
D (m)	6.188
B (m)	91.968
P (m)	104.343
Rh (m)	5.454
τ_0 (kg/m^2)	9.517

Fuente: Autores

Finalmente se calcula la fuerza tractiva actuante utilizando una relación de triángulos para cada periodo de retorno teniendo en cuenta la profundidad que el tramo llega alcanzar.



Fuerza tractiva actuante para un periodo de retorno de dos años

$$\tau_0 = \frac{7.033 * (4.423 - 3.456)}{4.423}$$

$$\tau_0 = 1.537$$

Tabla 12 Fuerza tractiva actuante para diferentes periodos de retorno

Periodo retorno (años)	**Fuerza tractiva actuante τ_0 (Kg/m^2)**
2	1.537
10	3.427
25	4.201

Fuente: Autores

- Cálculo de la fuerza tractiva resistente

El estudio Factores que controlan la producción de sedimentos en una importante cuenca sudamericana: el río Magdalena, Colombia demuestra que:

El río Magdalena aporta aproximadamente el 9% de la carga sedimentaria total descargada desde el este de Sudamérica y parece tener el mayor rendimiento de sedimentos (560 t kmK^{-2} yrK^{-1}) de los grandes ríos a lo largo del Caribe y Costas

atlánticas. Es casi tres veces mayor que el rendimiento del Amazonas, 190 t kmK^{-2} yrK^{-1}, Orinoco, 150 t kmK^{-2} yrK^{-1}, Negro (Argentina), 140 t kmK^{-2} yrK^{-1} (Milliman y Syvitski, 1992) y es mucho mayor que el rendimiento de el Parana', 30 t kmK^{-2} yrK^{-1} (Milliman y Syvitski, 1992, Goniadzki, 1999), Uruguay, 45 t kmK^{-2} yrK^{-1} y Sao Francisco, 10 t kmK^{-2} yrK^{-1} (Milliman y Syvitski, 1992). (Restrepo, Björn , Hermelin, & Restrepo, 2006).

De acuerdo a lo anterior se determina que el rio magdalena tiene una carga alta de sedimentos respecto a otros ríos. De acuerdo con García (1996) parael cálculo de esta fuerza se empleó la siguiente ecuación:

Apique 1

$$\tau_c = 3.7878 + 0.5776D_{50} + 0.0999{D_{50}}^2$$

$$\tau_c = 3.7878 + (0.5776 * 0.02) + (0.999 * 0.02^2)$$

$$\tau_c = 3.798\ \frac{N}{m^2} = 0.387\ \frac{kg}{m^2}$$

Tabla 13 resultados fuerza tractiva resistente

Apique	**Fuerza resistente (N/m^2)**	**Fuerza resistente (Kg/m^2)**
1	3.798	0.387
2 – M1	3.795	0.387
2 – M2	3.859	0.393
3 – M1	3.970	0.405

3 – M2	3.817	0.389
4	3.895	0.397
5	4.048	0.413
6	3.920	0.4
7	3.871	0.395
8	3.889	0.396
9	3.841	0.391

Fuente: Autores

Por último se calcula un factor de seguridad para cada periodo de retorno como se muestra a continuación, lo cual, permite determinar la susceptibilidad a la erosión fluvial que tendrá la zona a futuro.

$$FS = \frac{\tau_c}{\tau_0}$$

Para un $\tau_0 = 1.537\ kg/m^2$ en un periodo de retorno de dos años

Tabla 14 Factor de seguridad para un periodo de retorno de dos años

Tiempo de retorno 2 años	
Tc (kg/m^2)	**FS**
0.387	0.252
0.387	0.251
0.393	0.256
0.405	0.263
0.389	0.253
0.397	0.258
0.413	0.268
0.400	0.260
0.395	0.257
0.396	0.258
0.391	0.255

Fuente. Autores

Para un $\tau_0 = 3.427\ kg/m^2$ en un periodo de retorno de diez años

Tabla 15 Factor de seguridad para un periodo de retorno de diez años

Tiempo de retorno 10 años	
Tc (kg/m²)	**FS**
0.387	0.113
0.387	0.113
0.393	0.115
0.405	0.118
0.389	0.114
0.397	0.116
0.413	0.120
0.400	0.117
0.395	0.115
0.396	0.116
0.391	0.114

Fuente: Autores

Para un $\tau_0 = 4.201\ kg/m^2$ en un periodo de retorno de veinticinco años

Tabla 16 Factor de seguridad para un periodo de retorno de veinticinco años

Tiempo de retorno 25 años	
Tc (kg/m²)	**FS**
0.387	0.092
0.387	0.092
0.393	0.094
0.405	0.096
0.389	0.093
0.397	0.095
0.413	0.098
0.400	0.095
0.395	0.094
0.396	0.094
0.391	0.093

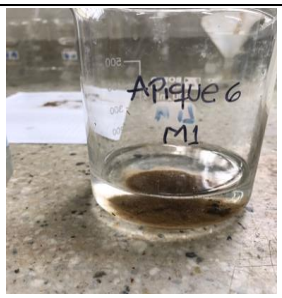
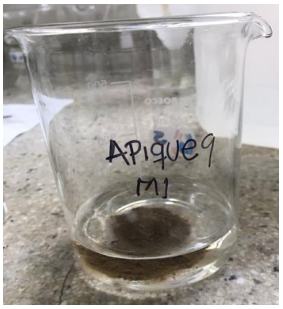
Fuente: Autores

El ensayo de Crumb al ser un ensayo cualitativo, que consiste en la observación de la dispersión de las partículas finas, por lo tanto según el registro de perforación se obtienen 4 muestras con porcentajes de finos importantes para realizar este ensayo con base a la norma (USBR 5400-89).

A	Grado 1:	Ninguna reacción
B	Grado 2:	Reacción ligera
C	Grado 3:	Reacción moderada
D	Grado 4:	Reacción fuerte

Los resultados obtenidos para estas muestras fueron

Tabla 17 **Resultados ensayos Crumb**

Apique	Tipo de suelo	Grado de dispersión	Descripción	Imagen
1	CL	2	reacción ligera	
3	CL	2	reacción ligera	
6	CL	3	reacción moderada	
9	SM - SC	3	reacción moderada	

Fuente: Autores

El porcentaje de dispersión obtenido por el ensayo de doble hidrometría se muestra en la siguiente tabla y fue calculado con la siguiente ecuación:

$$Porentaje\ de\ dispersión = \frac{5\ \mu m\ cuanto\ porcentaje\ de\ fino\ con\ agua}{5\ \mu m\ cuanto\ porcentaje\ de\ fino\ con\ hexametafosfato} * 100$$

Por otro lado, se muestra la probabilidad de erosión con base a la tabla propuesta en el libro control de erosión en zonas tropicales de Jaime Suarez.

Tabla 18 Erosión de acuerdo al ensayo de dispersión

Porcentaje de dispersión	Probabilidad de erosión
0 – 20 %	Erosión baja
20 a 25 %	Erosión mediana
25 a 50 %	Erosión alta
Más de 50 %	Erosión muy alta

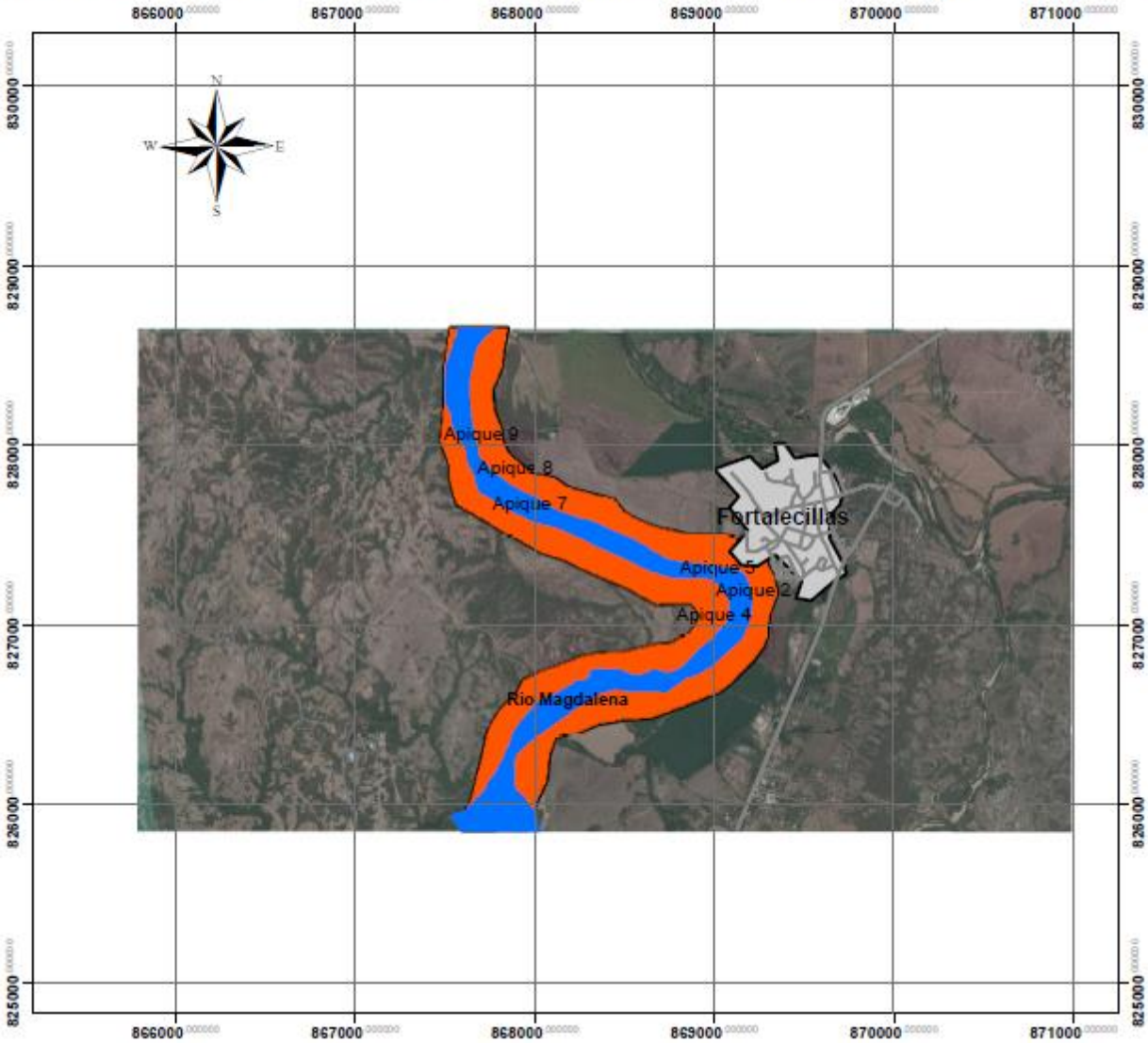
Fuente: Control de zonas tropicales, Suarez Jaime, (pág.54)

Tabla 19 Resultados porcentaje de dispersión, y probabilidad de erosión

Apique	**% dispersión**	**Descripción**	**Probabilidad de erosión**
1	23.1	No dispersivo	Erosión mediana
2 M1	26.4	No dispersivo	Erosión alta
2 M2	23.6	No dispersivo	Erosión mediana
3 M1	23.5	No dispersivo	Erosión mediana
3 M2	53.3	Dispersión intermedia	Erosión muy alta
4	35.1	Dispersión intermedia	Erosión alta
5	7.4	No dispersivo	Erosión baja
6	16.4	No dispersivo	Erosión baja
7	36.4	Dispersión intermedia	Erosión alta
8	44.8	Dispersión intermedia	Erosión alta
9	22.2	No dispersivo	Erosión mediana

Fuente: Autores

MAPA DE EROSIÓN EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FUERZA TRACTIVA TR=2 AÑOS



Elaborado:
Andrea C. Céspedes Alfonso
Juan S. Valbuena Saenz

LEYENDA

- Vias
- Fortalecillas
- Rio Magdalena

RANGO

- Erosión Muy Alta

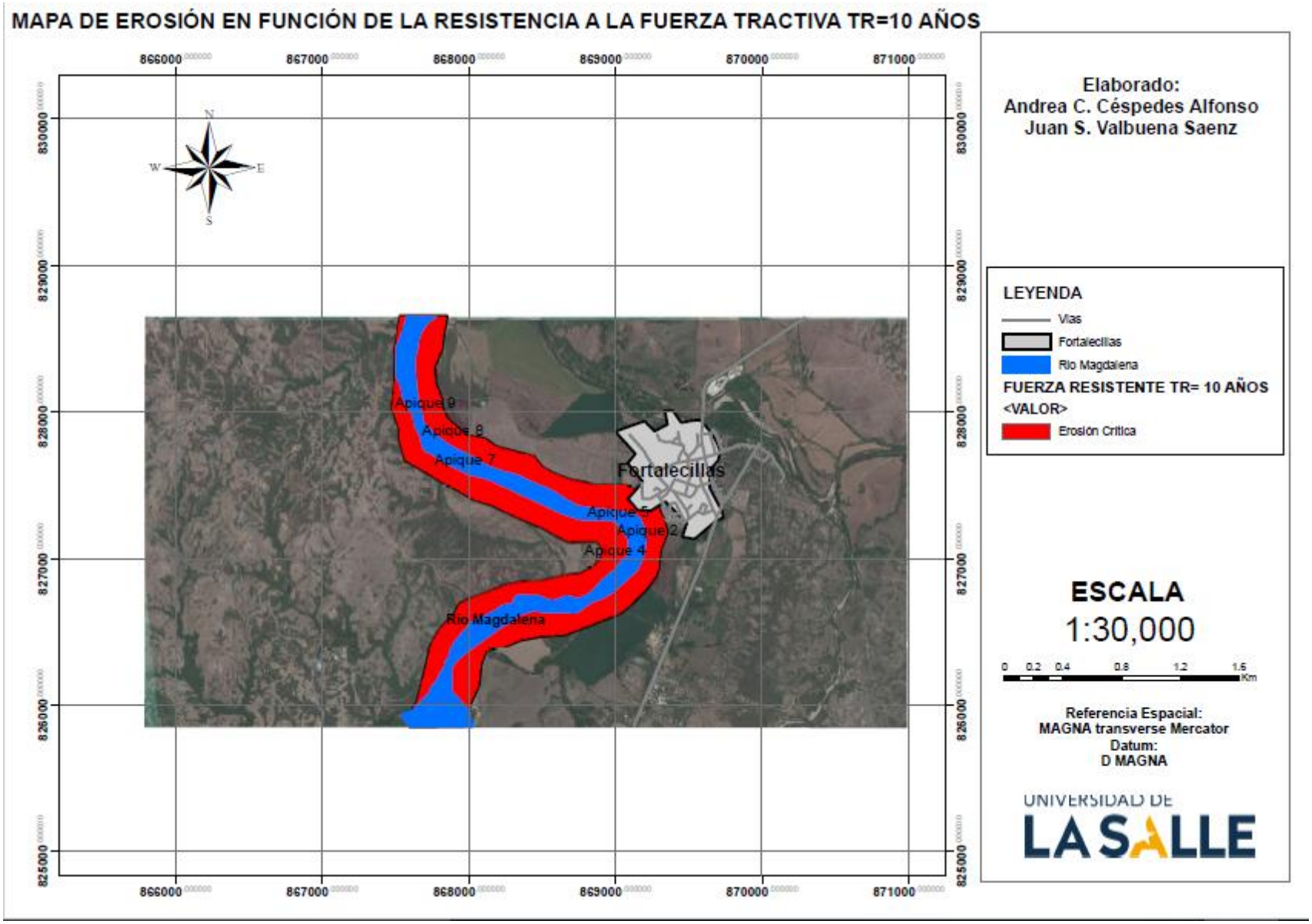
ESCALA

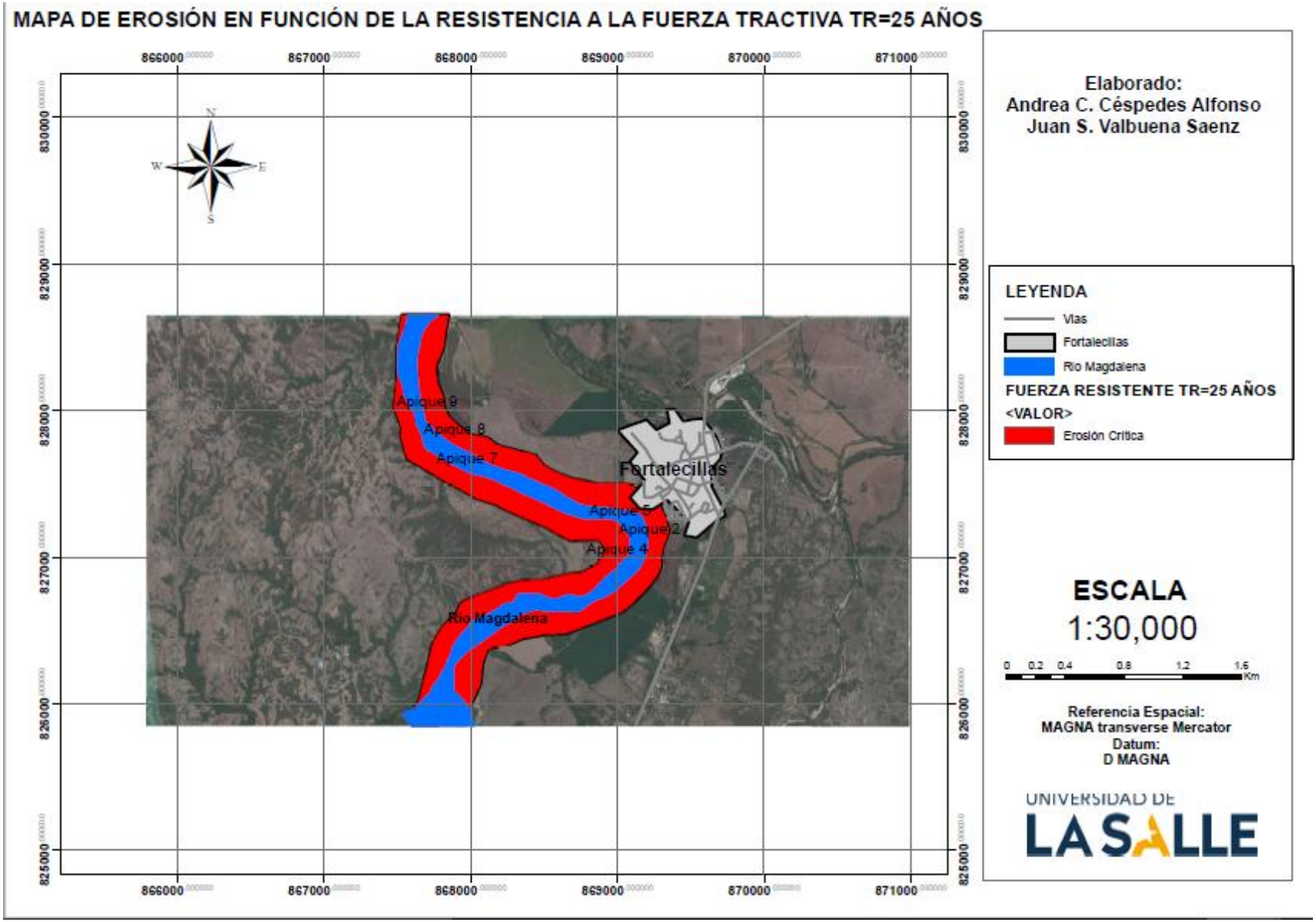
1:30,000

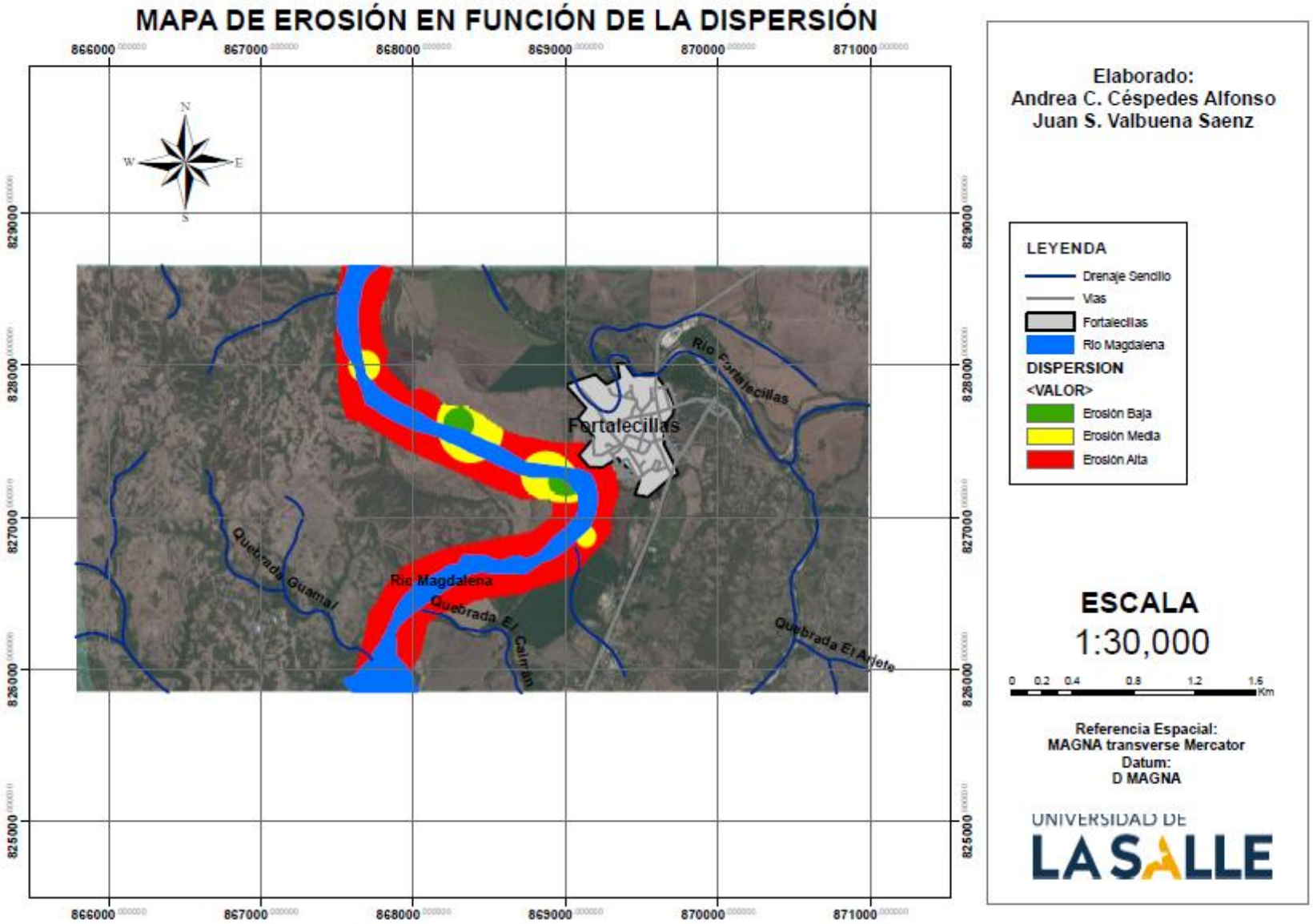
0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6 Km

Referencia Espacial:
MAGNA transverse Mercator
Datum:
D MAGNA

UNIVERSIDAD DE LA SALLE


MAPA DE EROSIÓN EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FUERZA TRACTIVA TR=10 AÑOS
866000
867000
868000
869000
870000
871000
830000
829000
828000
827000
826000
825000
N
W
E
S
Apique 9
Apique 8
Apique 7
Fortalecillas
Apique 5
Apique 2
Apique 4
Rio Magdalena
Elaborado:
Andrea C. Céspedes Alfonso
Juan S. Valbuena Saenz
LEYENDA
Vias
Fortalecillas
Rio Magdalena
FUERZA RESISTENTE TR= 10 AÑOS
<VALOR>
Erosión Critica
ESCALA
1:30,000
0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6
Km
Referencia Espacial:
MAGNA transverse Mercator
Datum:
D MAGNA
UNIVERSIDAD DE
LA SALLE


MAPA DE EROSIÓN EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FUERZA TRACTIVA TR=25 AÑOS
866000
867000
868000
869000
870000
871000
830000
829000
828000
827000
826000
825000
N
S
E
W
Apique 9
Apique 8
Apique 7
Fortalecillas
Apique 5
Apique 2
Apique 4
Rio Magdalena
Elaborado:
Andrea C. Céspedes Alfonso
Juan S. Valbuena Saenz
LEYENDA
Vias
Fortalecillas
Rio Magdalena
FUERZA RESISTENTE TR=25 AÑOS
<VALOR>
Erosión Critica
ESCALA
1:30,000
0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6
Km
Referencia Espacial:
MAGNA transverse Mercator
Datum:
D MAGNA
UNIVERSIDAD DE
LA SALLE


MAPA DE EROSIÓN EN FUNCIÓN DE LA DISPERSIÓN
866000
867000
868000
869000
870000
871000
829000
828000
827000
826000
825000
N
S
E
W
Fortalecillas
Río Fortalecillas
Río Magdalena
Quebrada Guamal
Quebrada El Calvario
Quebrada El Arlete
Elaborado:
Andrea C. Céspedes Alfonso
Juan S. Valbuena Saenz
LEYENDA
Drenaje Sencillo
Vías
Fortalecillas
Río Magdalena
DISPERSION
<VALOR>
Erosión Baja
Erosión Media
Erosión Alta
ESCALA
1:30,000
0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6 Km
Referencia Espacial:
MAGNA transverse Mercator
Datum:
D MAGNA
UNIVERSIDAD DE
LA SALLE

6.4 EROSIÓN LAMINAR HÍDRICA

Para el cálculo de la erosión laminar hídrica se tuvieron en cuenta los factores de escorrentía (ES), lluvia (R), cobertura vegetal (V), pendiente (S) y geología (K), en este último factor se tuvo en cuenta la permeabilidad del suelo, la cual fue calculada.

Los resultados obtenidos de los eventos ocurridos en sectores cercanos a Fortalecillas como Aipe, Villavieja, Tello, Iquira, Palermo, Campo Alegre, Pitalito, Garzón en un transcurso de tiempo del sistema de inventarios de efectos de desastre (desiventar), los cuales afectan cada uno de los factores utilizados para determinar este tipo de erosión.

Tabla 20 Cálculo del % de los tipos de eventos

Cantidad de eventos	**Tipo de eventos**	**%**
31	Avenida Torrencial	4.58
202	Inundación	29.84
124	Deslizamiento	18.32
9	Sequía	1.33
19	Lluvias	2.81
11	Creciente	1.63
3	Tempestad	0.44
3	Biológico	0.44
269	Incendio forestal	39.72
6	Sismo	0.89
677		

Fuente: Autores

Figura 6.11 Tipo de eventos

Fuente: Autores

De acuerdo a los resultados anteriores, la presencia de variables en los eventos es:

Tabla 21 Presencia de variables en los tipos de eventos

Escorrentía (ES)	203
Geológico (K)	187
Cobertura (V)	454
Precipitación (R)	243
Pendiente (S)	134

Fuente: Autores

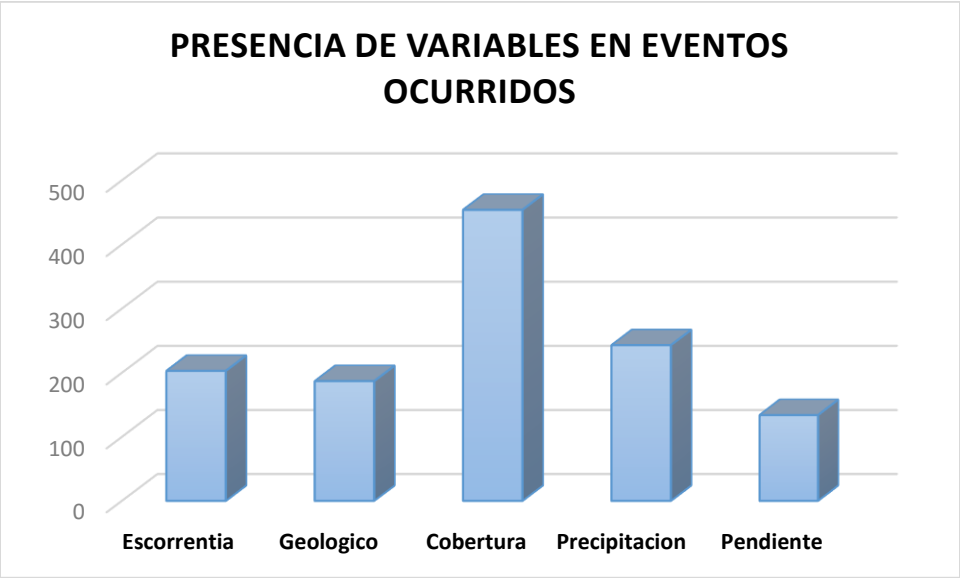


Figura 6.12 Presencia de variables en eventos

Fuente: Autores

A continuación se determinaron las constantes de la ecuación universal de perdida de suelo para el sector de Fortalecillas – Huila.

$$S_e = C_1 * V + C_2 * L_m + C_3 * ES + C_4 * S + C_5 * K$$

Para el cálculo de la constante inicial se toman los valores de la columna presencia de variables en eventos ocurridos y se realiza una sumatoria, posterior a esto cada valor de esta columna se divide en el total obtenido.

$$Constante\ inicial = \frac{187}{1221}$$

$$Constante\ inicial = 0.153$$

Tabla 22 Cálculo de la constante inicial para cada factor

Factor	**Parámetro**	**Presencia de variables en eventos ocurridos**	**Constante inicial**
K	10	187	0.153
Es	100	203	0.166
R	16	243	0.199
S	10	134	0.110
V	10	454	0.372
	Total	**1221**	

Fuente: Autores

Luego se multiplica el valor de la constante inicial por un factor F o de ajuste, el cual adopta un valor inicial que en este caso fue 0.42.

$$Constante\ modificada = Constante\ inicial * F$$

$$Constante\ modificada = 0.153 * 0{,}42$$

$$Constante\ modificada = 0.064$$

En seguida el resultado obtenido se multiplica por el parámetro de cada factor.

$$Cm * p = 0.064 * 10$$

$$Cm * p = 0.64$$

Donde:

Cm: Constante modificada

p: Parámetro

A continuación se realiza la sumatoria de los datos obtenidos en la columna Cm*P

Tabla 23 Valores de la constante modificada

Factor	Parámetro	Constante modificada	Cm*P
K	10	0.06432432	0.643
Es	100	0.06982801	6.982
R	16	0.08358722	1.337
S	10	0.04609337	0.461
V	10	0.15616708	1.562
			Σ 10.985

Fuente: Autores

Finalmente empleando la herramienta de análisis de hipótesis (buscar objetivo) de Excel Microsoft, se busca que la celda de la sumatoria de la columna Cm*P alcance el valor de 10 modificando el factor F o de ajuste y así obtener las constantes del sector de Fortalecillas. El valor del factor de ajuste fue de 0.3823 y las constantes obtenidas para el sector en estudio fueron:

Tabla 24 Constantes obtenidas para el sector de Fortalecillas

Factor	Constantes
K	0.058
Es	0.063
R	0.076
S	0.041
V	0.142

Fuente: Autores

$$S_e = 0.142 * V + 0.076 * R + 0.063 * ES + 0.041 * S + 0.058 * K$$

6.4.1 Factor V

La imagen del área de Fortalecillas – Huila fue tomada del satélite de Nokia (Nokia Hybrid). Esta imagen fue utilizada para determinar las coberturas vegetales, con base a la información digitalizada obtenida del Ideam (cobertura de tierra 2010 – 2012; escala 1:25000).

Cada una de las clases de cobertura vegetal encontradas se clasificó por la tabla valor V que para cada tipo de cobertura tomada de la *evaluación de la susceptibilidad a la erosión* (Ceballos Darney y Toro Luis).

Tabla 25 valor V **para cada tipo de cobertura**

Cobertura (CLC nivel 3)	**Factor v**
Ríos (50 metros)	10
Afloramientos rocosos	10
Arbustos y matorrales	4
Bosque fragmentado	2
Bosque de galería y/o ripario	2
Bosque natural denso	2
Bosque plantado	2
Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	4
Mosaico de pastos y cultivos	4
Mosaico de pastos y espacios naturales	4
Obras hidráulicas	2
Otros cultivos anuales o transitorios	6
Pastos arbolados	4
Pastos enmalezados o enrastrojados	4
Pastos limpios	8
Pastos naturales y sabanas herbáceas	4
Playas, arenales y dunas	10
Tejido urbano continuo	1
Tejido urbano discontinuo	1
Tierras desnudas o degradadas	10
Zonas de extracción minera	10
Zonas portuarias	8

Fuente: Tomado de evaluación de la susceptibilidad a la erosión (Ceballos Darney y Toro Luis)

Para modelar este factor se utilizó el shapefile de cobertura vegetal 2010 – 2012 encontrado en el catálogo de mapas del SIAC, luego se utilizó la herramienta recortar para delimitar el área de estudio. En seguida se clasificaron los tipos de cobertura encontrados en el área de estudio mediante la tabla 16. Por último se convierte el mapa a raster mediante la herramienta polígono a raster.

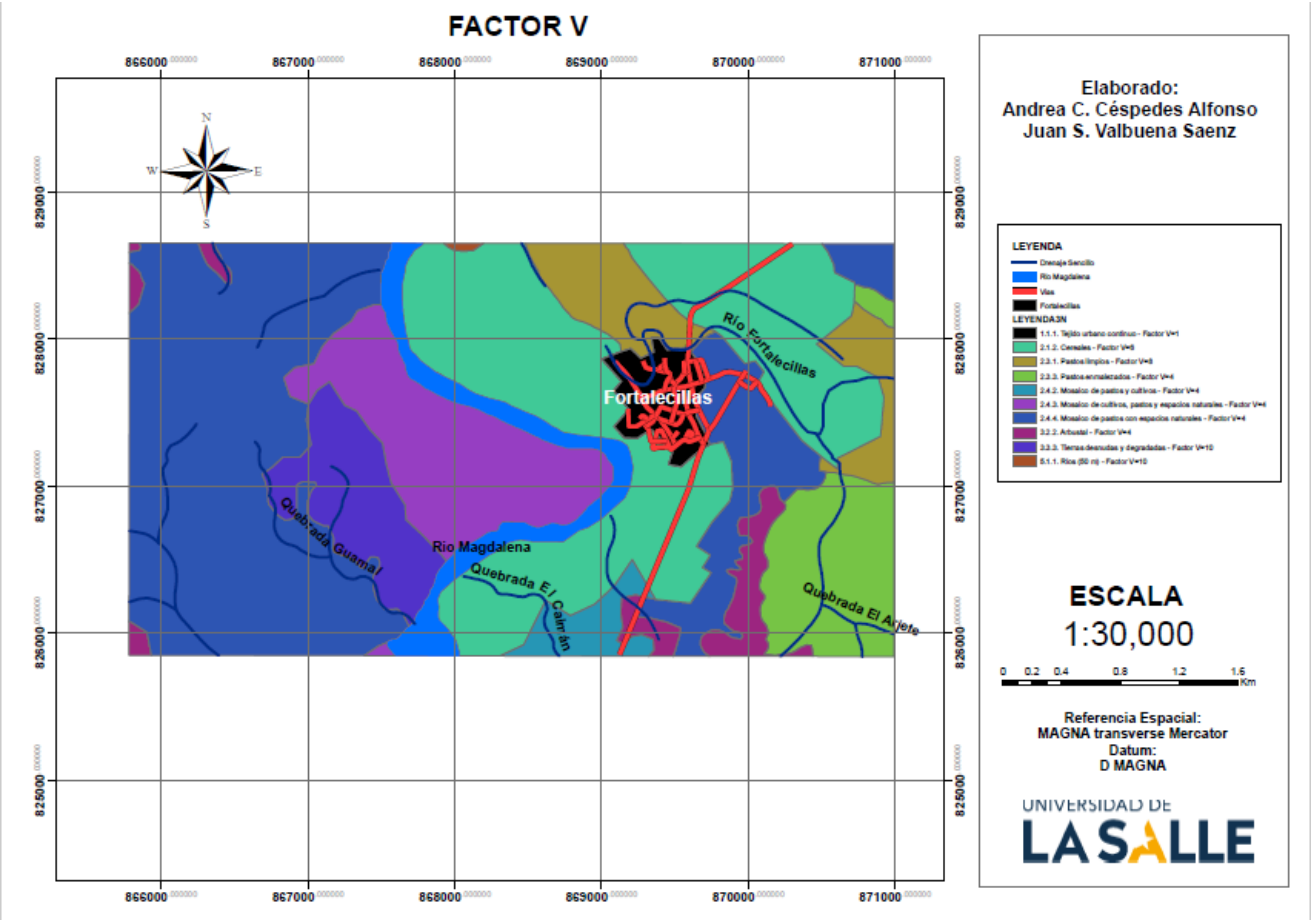


Figura 6.13 Factor v

Fuente: Autores,

6.4.2 Factor R

Para determinar este factor, se tuvieron en cuenta los valores de precipitación mensual de las estaciones más cercanas del tramo en estudio; dichos valores se solicitaron al Ideam (instituto de hidrología, meteorología, y estudios ambientales). A estos valores se les aplico un método alternativo, el cual ha sido empleado en Chile.

Este método se basa en el Índice de Fournier (IF), o el Índice Modificado de Fournier (IMF) que emplea datos de precipitación total mensual, este último fue elaborado por Arnoldus en 1997 y se define mediante la ecuación:

$$IMF = \sum_{1}^{12} \frac{Pi^2}{P}$$

Pi : Precipitación mensual del mes "i", tomado del mes de enero a diciembre del año correspondiente (mm).

P: Total de precipitación anual (mm).

Se debe tener en cuenta que el uso del IMF y la relación con el factor de erosividad R es variable de acuerdo al área de estudio; para ello se establecieron 4 ecuaciones las cuales son las más utilizadas. Cabe señalar que este método se empleó ya que para la zona en estudio hay una cantidad considerable de datos faltantes para emplear otro método. Dichas ecuaciones son:

- $R = 2{,}56 * IMF^{1.065}$ (Ecuación genérica del Instituto de Conservación de Recursos Naturales de España, ICONA).

- $R = a + b * IMF$ Valenzuela y Morales al realizar ajustes a la regresión encontraron que “a” es cero y “b” equivale a 1.6881.

- $R = 0.07397 * IMF^{1,847}$ Renard y Freimund (1994).

- $R = 0.264 * IMF^{1,50}$ Arnoldus (1997). (Escobar, 2008)

Para determinar el factor R se aplicaron las cuatro ecuaciones y se descartaron el valor más alto y más bajo, y se realizó un promedio con los dos valores restantes.

Las estaciones utilizadas para el tramo de estudio fueron Hato Milagro (21110040), Potrerito (21120040), Potrerito (21125030), Iquira (21085020), Juncal (21095010), Potosí (21105040), Villa Vieja (21115080), Palermo (211225020), San Francisco (21125040), Apto Benito Salas (21115020).

A continuación se muestra la precipitación mensual en mm de las estaciones, el cálculo del IMF y el R respectivamente.

Tabla 26 precipitación mensual media de las estaciones utilizadas

Precipitación Mensual (mm)											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
72.3	91.1	131.1	136.3	100.2	37.5	27.2	18.8	41.3	164.3	195.9	139.7
143.7	176.1	230.1	175.8	113	60.2	46.3	31.4	83.1	233.5	334.6	214.4
7	8	10	9	6	4	3	3	4	10	13	10
173.6	179.1	202.5	201	161.9	66	52.8	42.9	84.2	192.9	273.9	226.7
129.9	115.8	154.6	129.6	98.6	36.8	26.1	19.4	57.7	184.9	221.7	164.5
118.5	110.2	155.3	123.7	95.4	48.3	37.2	20	45.3	148.1	189.2	139.6
70	83.7	114.3	142.1	99.2	37.3	27.4	21.6	59.9	176.1	182.5	118.5
132.4	146	182.2	163.6	93.9	50.3	30.4	18.7	62.6	166.5	212	166.2
92.9	167.2	151.9	153.5	76.9	79.3	26.1	16.5	41.3	160.5	219.4	141.2
43.8	42	50.4	50.3	39.7	18.7	14.4	12	27.4	57.1	59.8	48.9

Fuente: Valores suministrados por el Ideam

Tabla 27 resultados de IMF, R y valor del parámetro intensidad

IMF	R	Parámetro
128.427836	417.504238	6
203.228542	749.892197	10
8.6091954	10.6005615	1
188.172829	679.271572	9
146.941759	495.268688	7
128.448538	417.589384	6
123.220519	396.219251	6
151.344862	514.225575	7
144.65773	485.503715	7
45.2276642	114.3173029	2

Fuente: Autores

El parámetro de clasificación de lluvia de 1 a 10 se determina utilizando los valores obtenidos de R calculados por el IMF; el parámetro de 10 fue asignado al valor máximo de R y el parámetro de 1 al más bajo, para determinar los otros valores del parámetro se realiza una interpolación entre el punto máximo y mínimo empleando Excel Microsoft. Como se muestra en la ilustración 6.12.

Tabla 28 valores para determinar la regresion lineal

Parámetros R	Valores asignados
10.6005615	1
749.892	10

Fuente: Autores

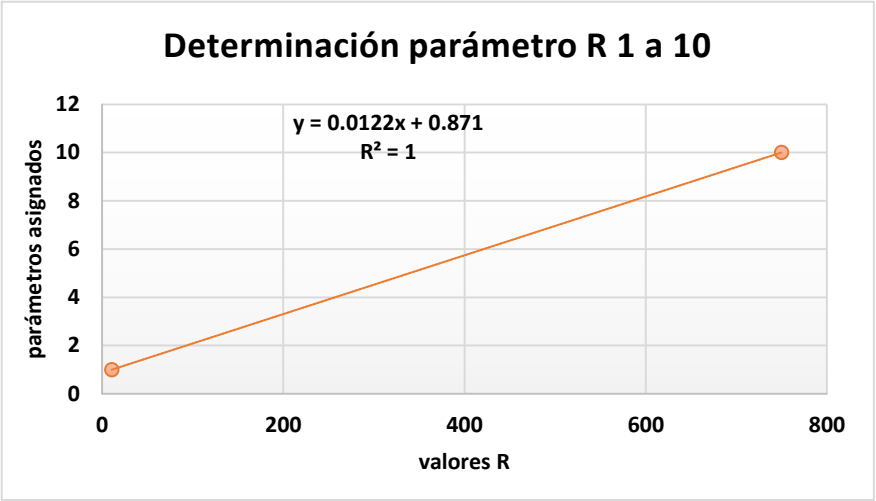


Figura 6.14 Interpolación entre punto máximo y mínimo
Fuente: Autores

Posteriormente se digitalizaron las estaciones en ArcMap 10.4.1 haciendo uso de la herramienta shapefile, con el fin de obtener su ubicación espacialmente; se debe tener en cuenta que las estaciones deben tener en su tabla de atributos los valores de R y el valor del parámetro; para determinar el valor de parámetro de cada uno de los R como se mostró anteriormente se hizo un raster calculator con el factor R y la ecuación obtenida de la regresión lineal con el fin de poder realizar su respectiva clasificación. Luego se utilizó la herramienta IDW (herramienta Spatial Analyst), la cual es un promedio de distancia ponderada; esta herramienta establece que el promedio no puede ser mayor que la entrada máxima o inferior que la entrada mínima, por este motivo no puede crear crestas o valles si de estos aún no se tienen muestras. Esta herramienta permite obtener una raster con los valores de R ya clasificados, permitiendo observar los subconjuntos que se encuentran alrededor del área en estudio y así analizar qué zona se ve afectada por las precipitaciones y determinar qué riesgo de erosión puede llegar a tener.

Por otro lado luego de la obtención del Raster R se utiliza la herramienta de curvas de nivel debido a que esta conecta la ubicación de igual valor de un dataset de ráster que representan fenómenos continuos como precipitación, elevación, temperatura; para este caso se denominan isoyetas ya que el factor que se está midiendo es precipitación. Esta distribución de líneas de curva de nivel muestra cómo cambian los valores a lo largo de una superficie.

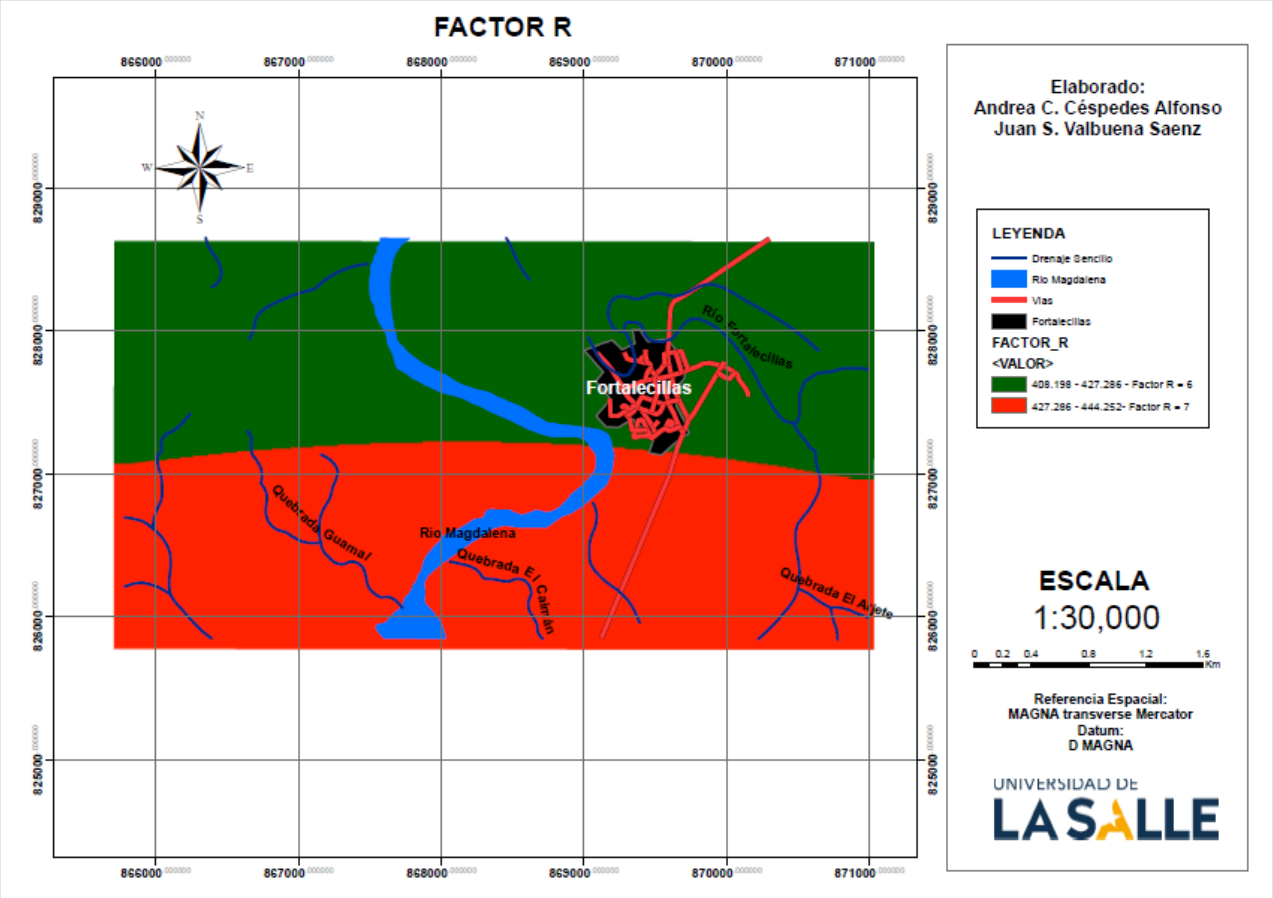
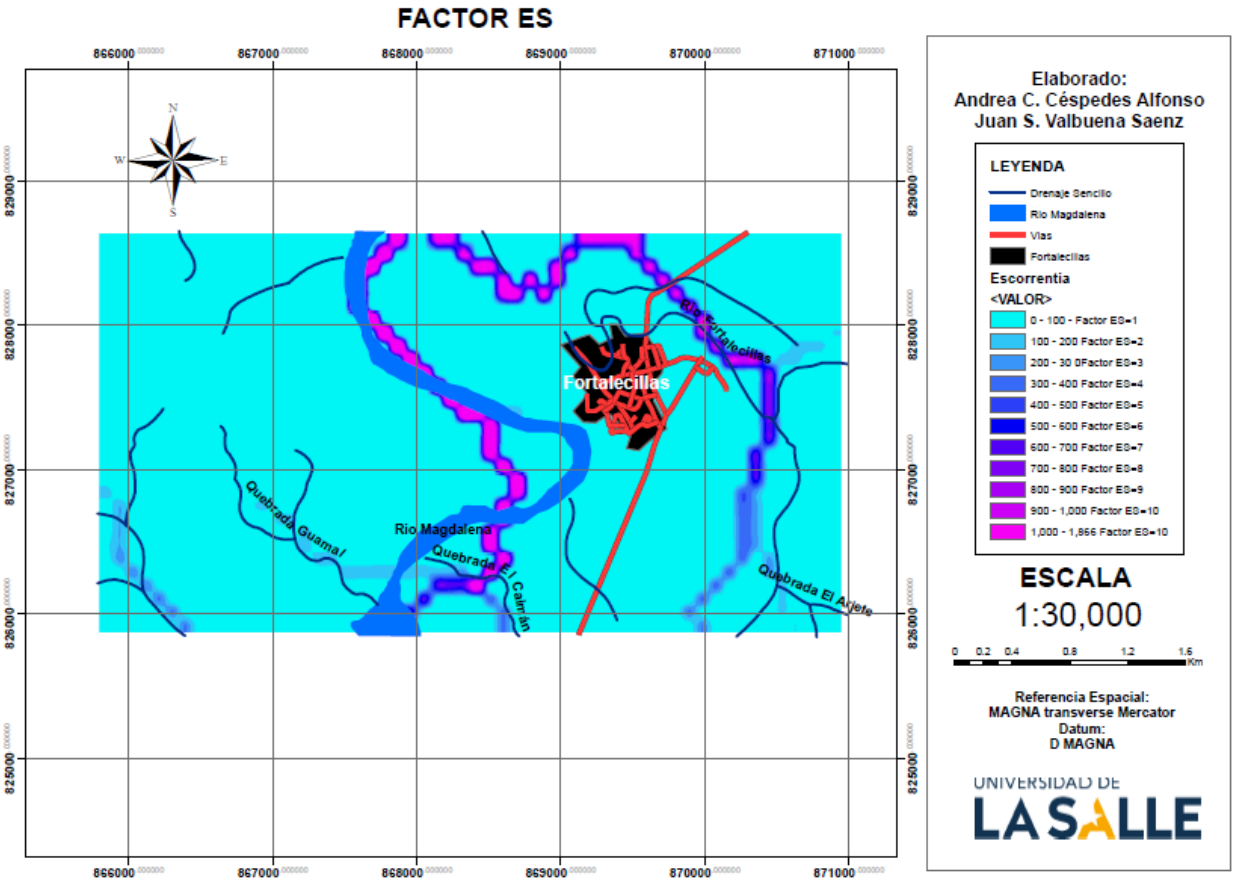


Figura 6.15 Factor R

Fuente: Autores

6.4.1 Factor ES

Para este factor se emplea el modelo de elevación digital con una definición por pixel de 90*90 a nivel nacional; se utiliza la herramienta de recorte para determinar el área de estudio. Posterior a esto se utiliza la herramienta reclasificar a la cual se le da como raster de entrada el área de estudio obtenida del corte del DEM. En seguida se clasifica la escorrentía con valores de 100 a 1000 y así poder determinar el área acumulada de escorrentía para cada una de las celdas. Por último, la herramienta reclasificar asigna los valores de los parámetros de 1 a 10 y genera el



raster reclasificado del factor de escorrentía.

Figura 6.16 Factor ES

Fuente: Autores

6.4.1 Factor S

Para realizar el mapa de pendientes se utilizó el modelo de elevación digital, ya que es la representación de los valores de altura respecto al nivel medio del mar. Esta representación es visual y matemática. Posteriormente se georreferenció el sistema de elevación digital en el sistema de coordenadas Magna Colombia Este, luego se emplea la herramienta Fill o de relleno encontrada en Hidrology, ya que esta herramienta permite rellenar los sumideros en un raster de superficie para quitar imperfecciones en los datos.

Al obtener el DEM corregido se emplea la herramienta Slope Surface o pendiente de superficie con el fin de crear entidades poligonales que representan rangos de valores de pendiente para superficies trianguladas.

Finalmente mediante la herramienta reclasificar se clasifican las pendientes de acuerdo a la tabla 20; y así se obtiene el raster del parámetro S.

Tabla 29 Valor asignado para cada pendiente

Pendiente (%)	**S**
<2%	1
2 - 6	2
6 - 13	4
13 -20	6
20 - 55	8
>55	10

Fuente: Evaluación de la susceptibilidad a la erosión por el cambio de cobertura debido a la minería en el municipio de Anorí – Antioquia

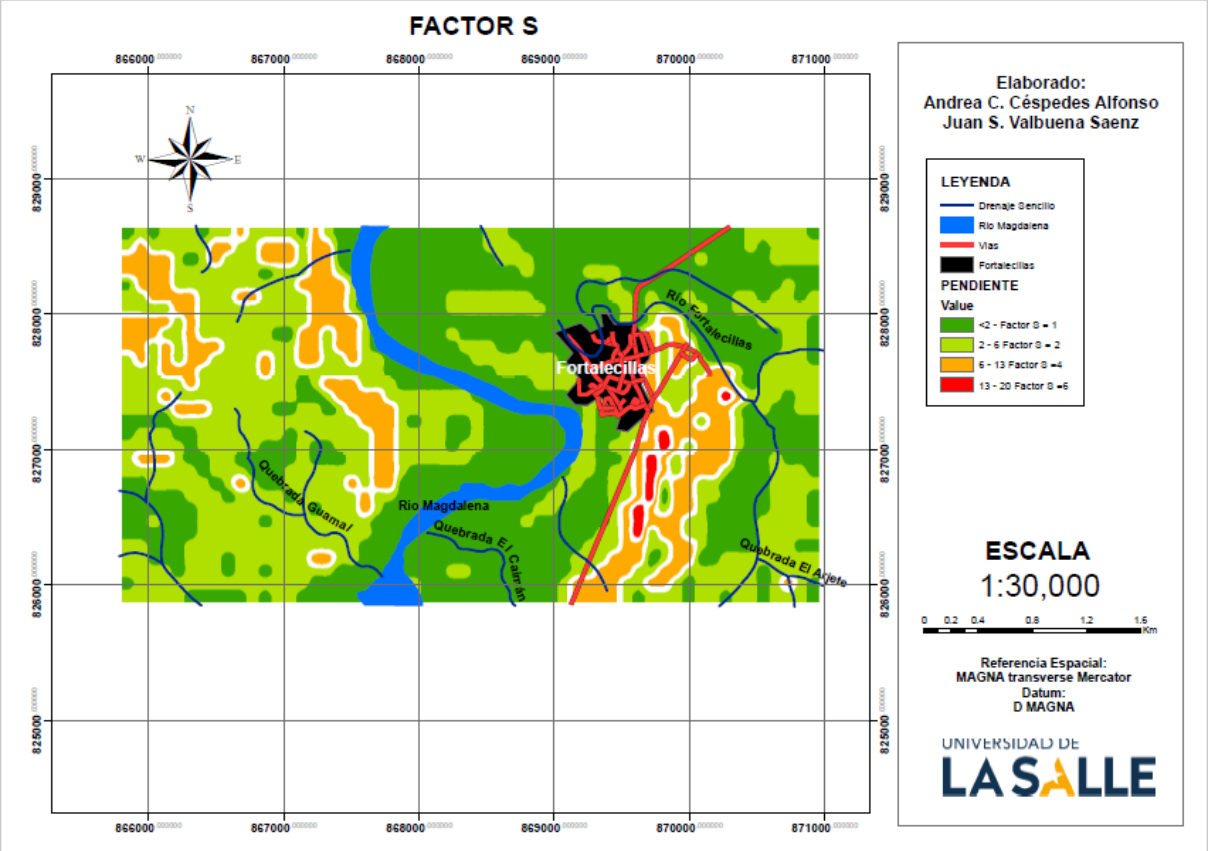


Figura 6.17 Factor S

Fuente: Autores

6.4.2 Factor K

Para este factor se digitaliza la plancha 323 versión 2010 escala 1: 100.000 correspondiente al sector de Neiva, la cual fue proporcionada por el instituto colombiano de geología y minería (ingeominas) con su respectiva memoria. Después se usó la herramienta de recorte para tener solo el área de interés, se clasificó con ayuda de la plancha las formaciones geológicas del área de interés y se clasificaron como lo muestra la tabla 24. Para asignar los parámetros de resistencia a la erosión se tomó el documento de *Vargas Cuervo, German. (2012). Geología, Geomorfología y*

Dinámica Fluvial Aplicada a Hidráulica de Ríos. En seguida se clasifica la resistencia a la erosión con un parámetro de 1 a 10, el cual es dado por un experto en geología.

Por último, se hace uso de la herramienta reclasificar para asignar los valores del parámetro de 1 a 10 y así poder obtener el raster del factor K.

Tabla 30 Información geológica de la estratigrafía del área de estudio

			Resistencia a la erosión				
Clase de material litológico	**Tipo de material**	**Geomorfología**	**Simbolo**	**Descripción**	**Leyenda**	**Descripción**	**Parametro de clasificación**
Depósitos aluviales Subrecientes	Arenas y limos con niveles de conglomerados moderadamente compatados.	Vegas de divagacion subrecientes, islas fluviales subrecientes y terrazas bajas.	RB	Resistencia baja	**Qt**	Terrazas recientes: El espesor promedio es de 3 metros conformados por gravas y arenas sueltas tobáceas y cantos redondeados de rocas igneas, metamorficas y sedimentarias. En la parte superior de estos niveles, se presentan sedimentos finogranulares, arcillas y limos hata de 1 metro de epesor, que representan depositos de inundacion.	8
Depósitos aluviales de canal activo	Arenas, limos y gravas	Barras de arena, Islas fluviales recientes, playas, lechos activos, vegas de divagación recientes.	RMB	Resistencia muy baja	**QaL**	Depositos aluviales: Ubicados en las llanuras de inundación de los rios principales, conformados por gravas, arenas y limos redondeados y no presentan compactación.	10
Rocas cristalinas	Rocas igneas (granitos, riolitas, granodioritas, grabos, basaltos, etc.) y rocas metamórficas (neises, esquistos, filitas, cuarcitas, etc.)	Colinas, cerros y cadenas montañosas denudacionales y estructurales	RMA	Resistencia muy alta	**NgQf**	Sedimentos de Fortalecillas: La secuencia se caracteriza por presentar depositos de arenas y gravas con alto contenido de pumita, de tamaño de grano y arena gruesa a conglomerática medio y redondeado; niveles de ceniza y niveles laháricos o flujos de ecombros.	1
Rocas sedimentarias	Rocas sedimentarias químicas detríticas con cemento (cherts, cuarzoarenitas, calizas, etc.)	Colinas, cerros residuales y/o en cadenas montañosas denudacionales y estructurales.			**NgQGi**	Formación Gigante: En la parte inferior predominan areniscas tobáceas, que alcanzan 60 metros de espesor; encima siguen capas tobáceas de grano fino y cenizas volcanicas de 80 metros de espesor, en la parte superior afloran tobas y areniscas tobáceas con morfologia tabular, casi siempre subhorizontales de 120 metros de espesor.	2

Fuente: Memoria explicativa plancha 323 sectores de Neiva, ingeominas

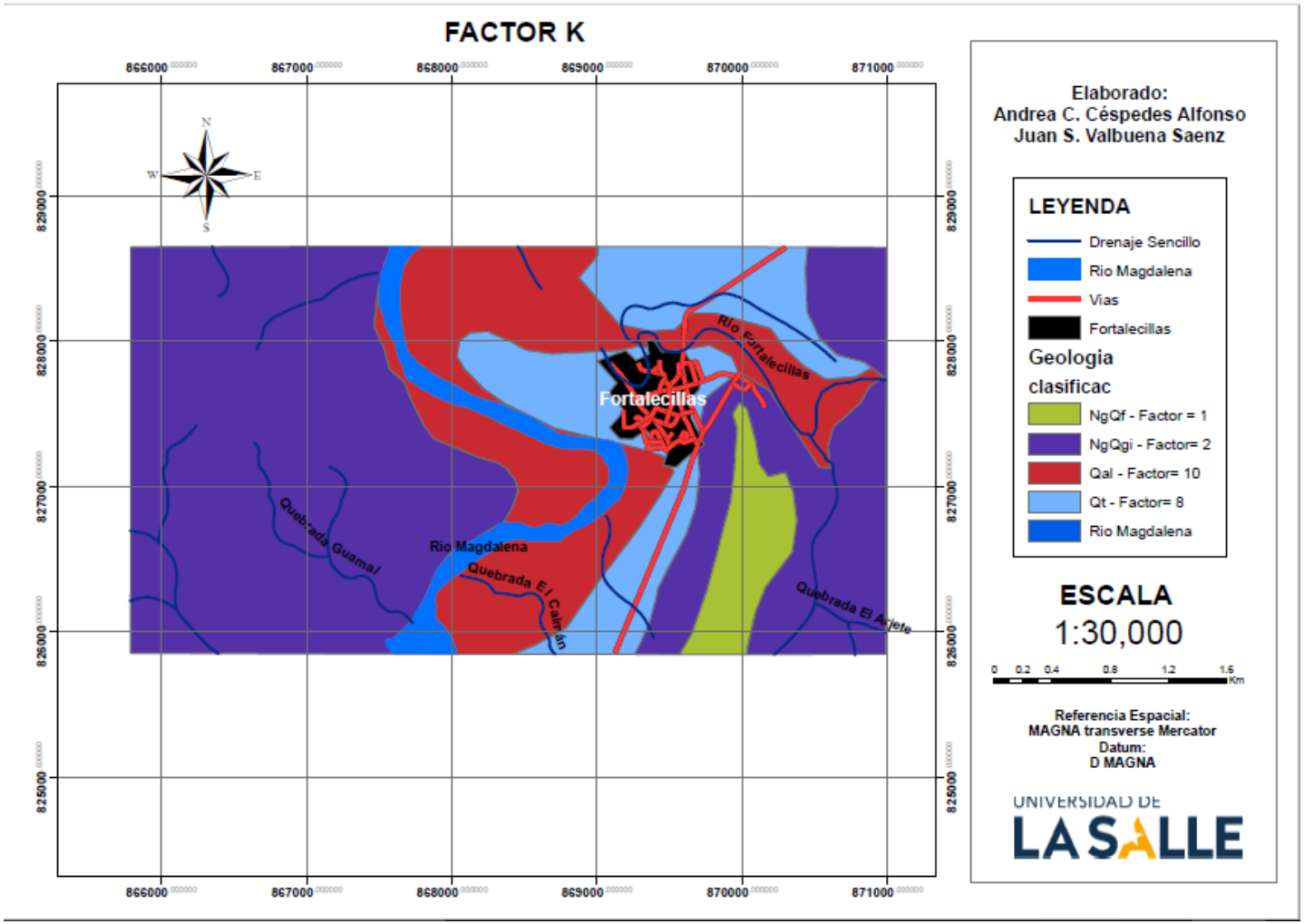
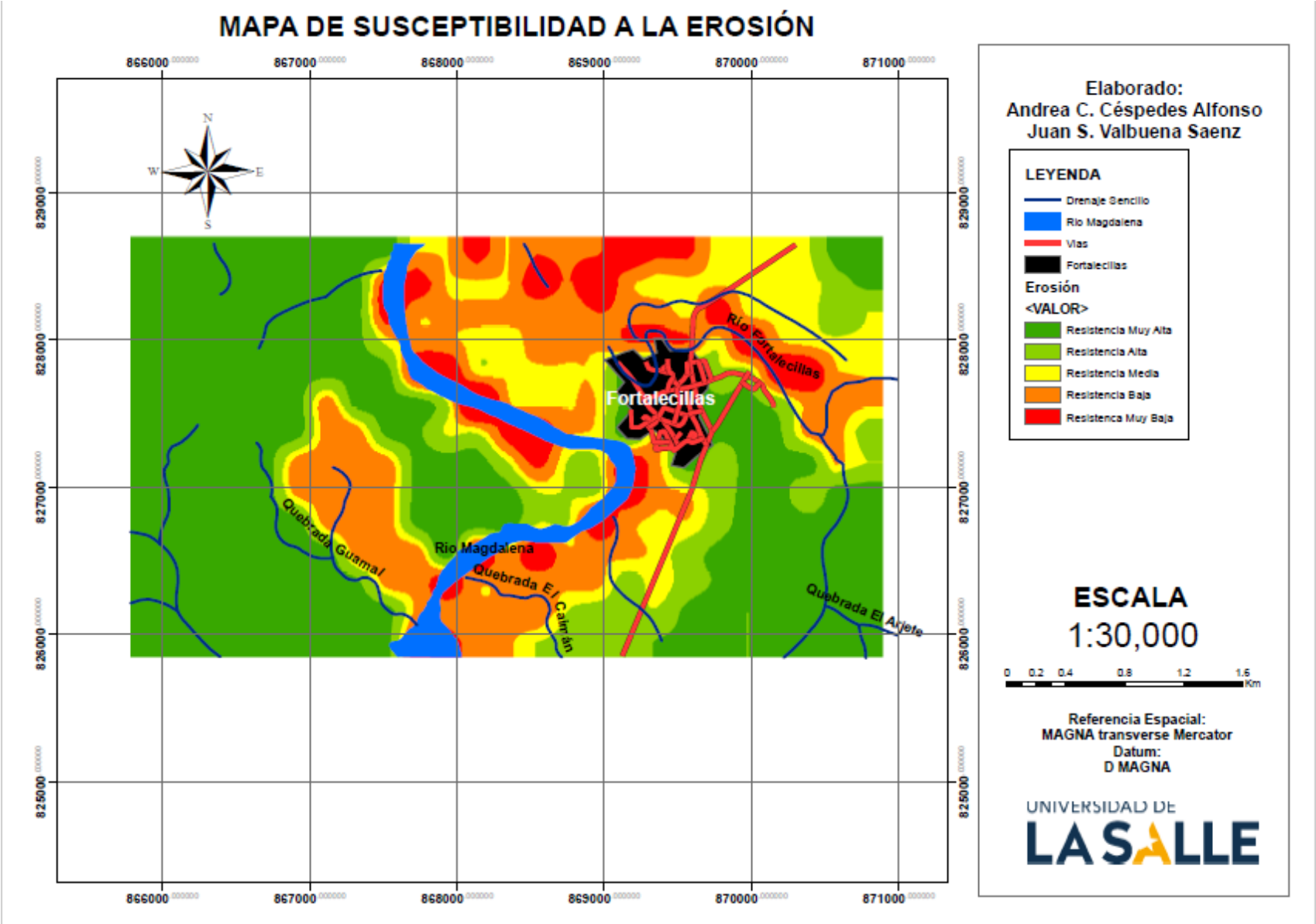


Figura 6.18 Factor K

Fuente: Autores

6.4.3 Mapa de susceptibilidad a la erosión laminar hídrica



7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con base en los ensayos de laboratorio se obtuvo que la humedad relativa de los suelos está en un rango que varía entre 7,70% y 36,69% siendo menor para los materiales granulares (arenas) y mayor para los materiales que presentaban material fino debido a que pueden retener mayor cantidad de agua por su estructura. Por otro lado los resultados obtenidos de gravedad específica promedio fue de 2,71 valor típico para este tipo de materiales encontrados en la zona de estudio. Los ensayos de límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y tamiz pasa 200 permitieron realizar la clasificación por el método S.U.S.C y el método AASHTO de los tipos de suelos encontrados en el sector de Fortalecillas; los tipos de suelos más encontrados fueron CL (arcillas de baja compresibilidad), los cuales tienen contenido de limos, arenas limo arcillosas y arena limosas pobremente gradada. De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo de doble hidrómetro, el cual permite determinar el porcentaje de dispersión encontrando que los suelos predominantes de este sector son suelos no dispersivos. Además al utilizar la tabla de probabilidad de erosión se pudo observar que los suelos encontrados en el tramo de estudio tienen variedad ya que unos son suelos con erosión baja, otros erosión media, erosión alta y erosión muy alta, Estos resultados se corroboraron con el registro fotográfico obtenido en campo y con el mapa obtenido de porcentaje de dispersión donde se puede observar que en el área de estudio el factor predominante es la erosión alta.

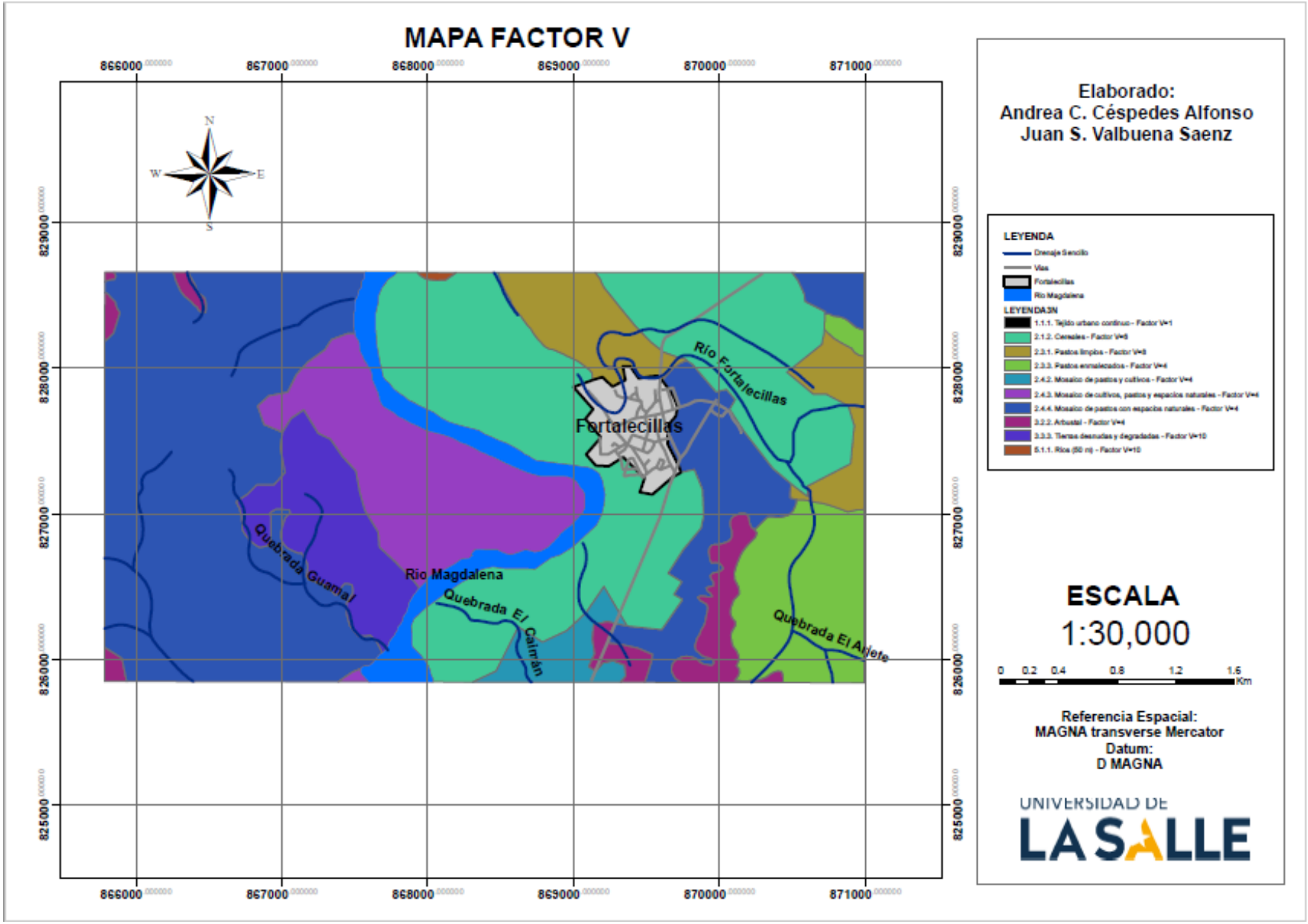
El ensayo de Crumb, es un ensayo cualitativo muestra que estos tienen un grado de dispersión baja a moderada, lo cual reitera lo descrito en la caracterización y con los resultados obtenidos en porcentaje de dispersión.

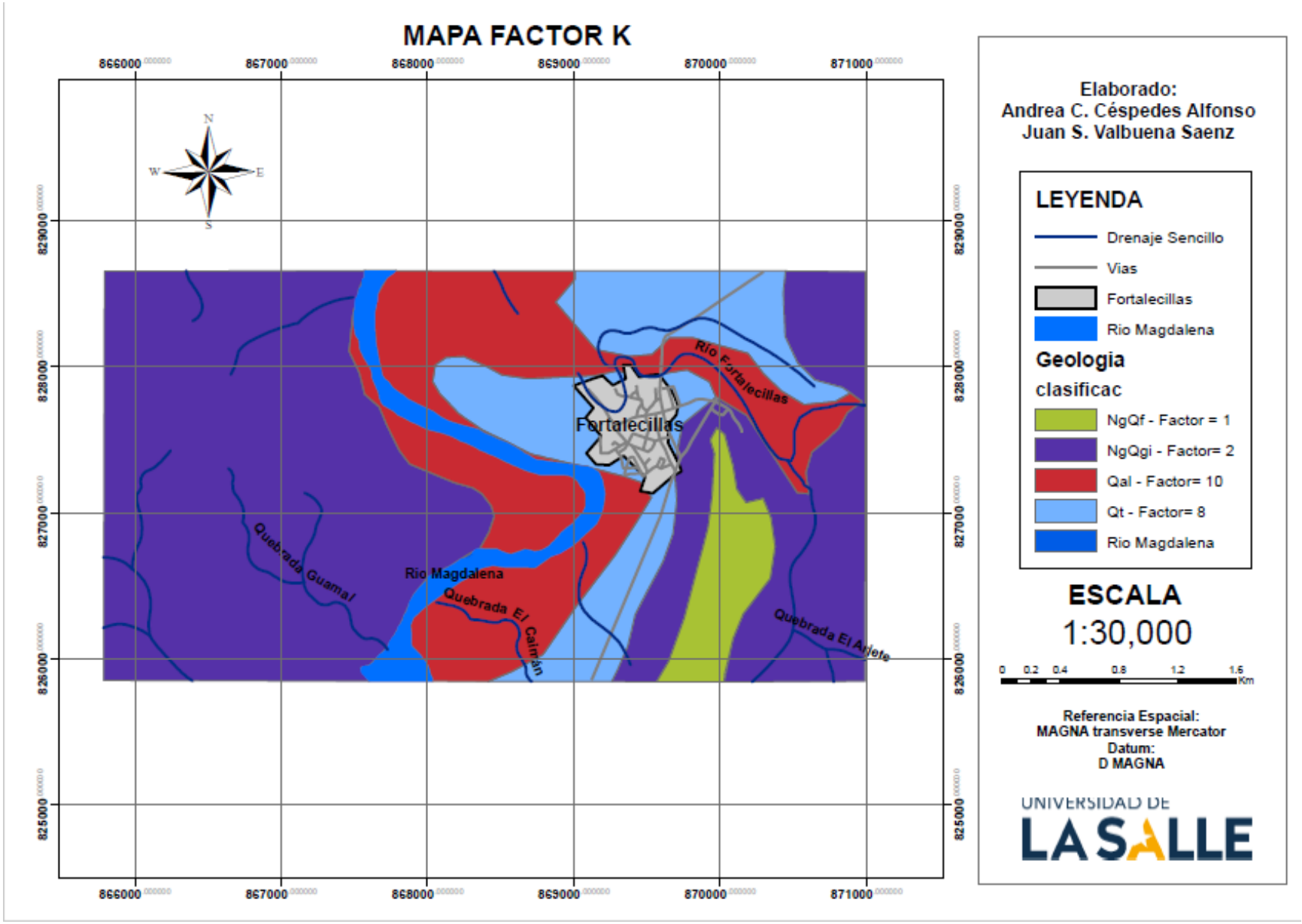
Respecto a los resultados obtenidos de las fuerzas tractivas actuantes y la fuerza tractivas resistentes se puede decir que las partículas tienen una resistencia muy baja, baja y media. Para el periodo de 2 años los valores del factor de seguridad se encuentran en un rango crítico y corroboran que la zona es propensa a una falla generada por la erosión. En cuanto a los valores obtenidos del factor de seguridad para 10 años y 25 años se evidencia que toda la zona será afectada debido al aumento en los niveles del agua.

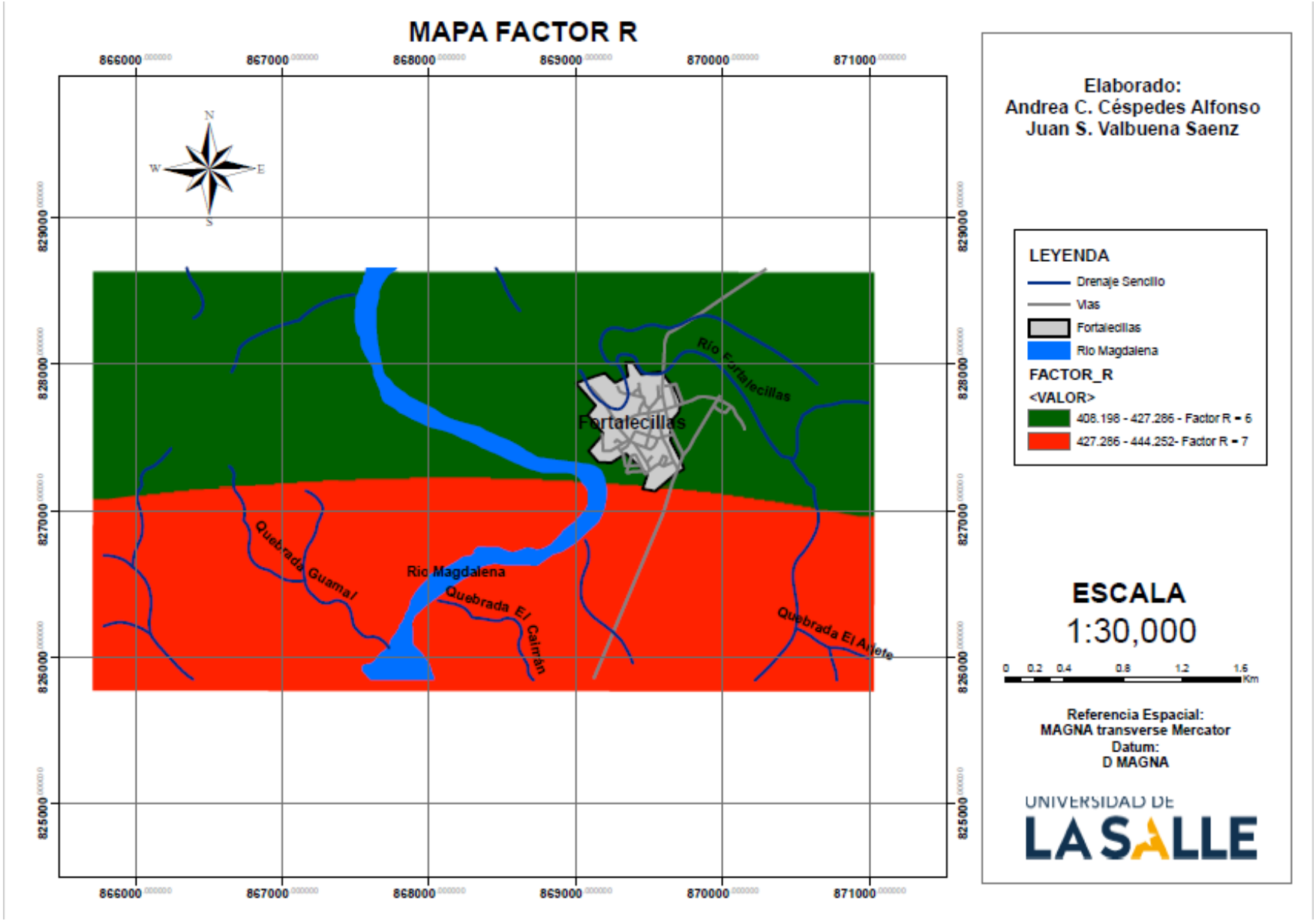
En el mapa del factor V se evidencia que hay diversos usos del suelo en este sector, las zonas colindantes con el río Magdalena son utilizadas para cultivos y pastoreo de ganado, esto implica que el suelo pierda, gane o cambie algunas propiedades que van directamente relacionadas con el valor de la resistencia a la erosión laminar hídrica. Sin embargo los valores del factor V son bajos, teniendo en cuenta que los tipos de suelos con valor de 10 son propensos a tener una erosión alta.

En el mapa del factor K se evidencia que a lo largo del cauce del río Magdalena se presentan valores de geología altos debido a la presencia de depósitos de materiales arenosos y limo arenosos no consolidados, los cuales se traducen en erosión alta. Por este motivo se asignan valores altos a los depósitos aluviales, conformados por gravas, arenas y limos redondeados que no presentan compactación. Debido a esto el arrastre de la partícula es más fácil respecto a los suelos que si presentan compactación

En el mapa del factor R los valores obtenidos para este factor muestran que en la zona alta la precipitación es mayor y permite plantear una hipótesis que consiste en que la energía con la que el río fluye en temporadas de lluvia es alta respecto a las temporadas secas. Los entre 6 – 7 no son valores que pueden ser de alto riesgo a la erosión en las temporadas de lluvias.


MAPA FACTOR V
866000
867000
868000
869000
870000
871000
829000
828000
827000
826000
825000
N
S
E
W
Río Fortalecillas
Fortalecillas
Quebrada Guamal
Rio Magdalena
Quebrada El Cairrán
Quebrada El Ajiete
Elaborado:
Andrea C. Céspedes Alfonso
Juan S. Valbuena Saenz
LEYENDA
Drenaje Sencillo
Vías
Fortalecillas
Rio Magdalena
LEYENDA3N
1.1.1. Tejido urbano continuo - Factor V=1
2.1.2. Cereales - Factor V=5
2.3.1. Pastos limpios - Factor V=8
2.3.3. Pastos enmalezados - Factor V=4
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos - Factor V=4
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales - Factor V=4
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales - Factor V=4
3.2.2. Arbustal - Factor V=4
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas - Factor V=10
5.1.1. Ríos (50 m) - Factor V=10
ESCALA
1:30,000
0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6
Km
Referencia Espacial:
MAGNA transverse Mercator
Datum:
D MAGNA
UNIVERSIDAD DE
LA SALLE

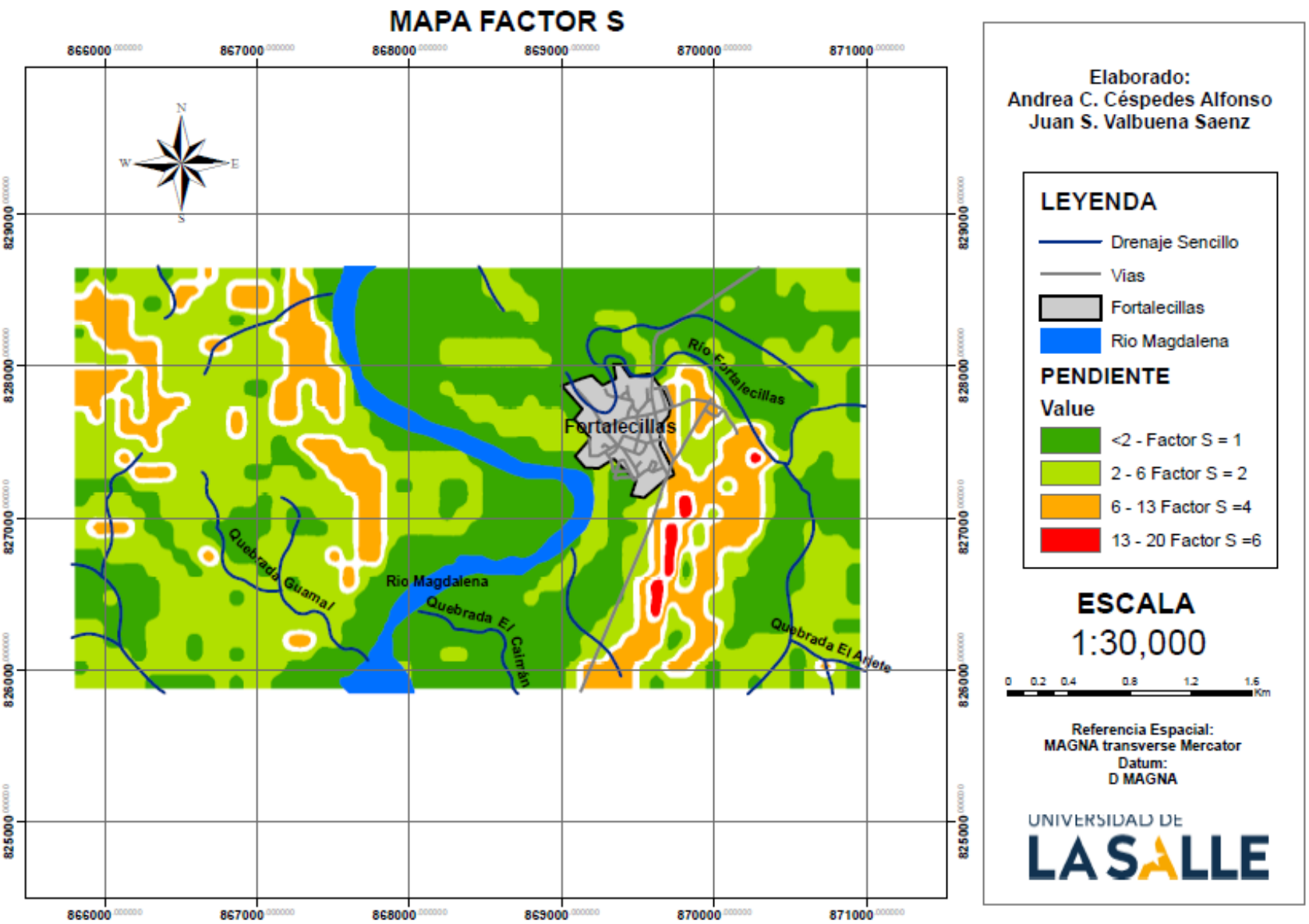

MAPA FACTOR K
866000
867000
868000
869000
870000
871000
829000
828000
827000
826000
825000
N
S
E
W
Fortalecillas
Rio Fortalecillas
Rio Magdalena
Quebrada Guamal
Quebrada El Calvrán
Quebrada El Arbeto
Elaborado:
Andrea C. Céspedes Alfonso
Juan S. Valbuena Saenz
LEYENDA
Drenaje Sencillo
Vias
Fortalecillas
Rio Magdalena
Geologia
clasificac
NgQf - Factor = 1
NgQgi - Factor= 2
Qal - Factor= 10
Qt - Factor= 8
Rio Magdalena
ESCALA
1:30,000
0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6
Km
Referencia Espacial:
MAGNA transverse Mercator
Datum:
D MAGNA
UNIVERSIDAD DE
LA SALLE

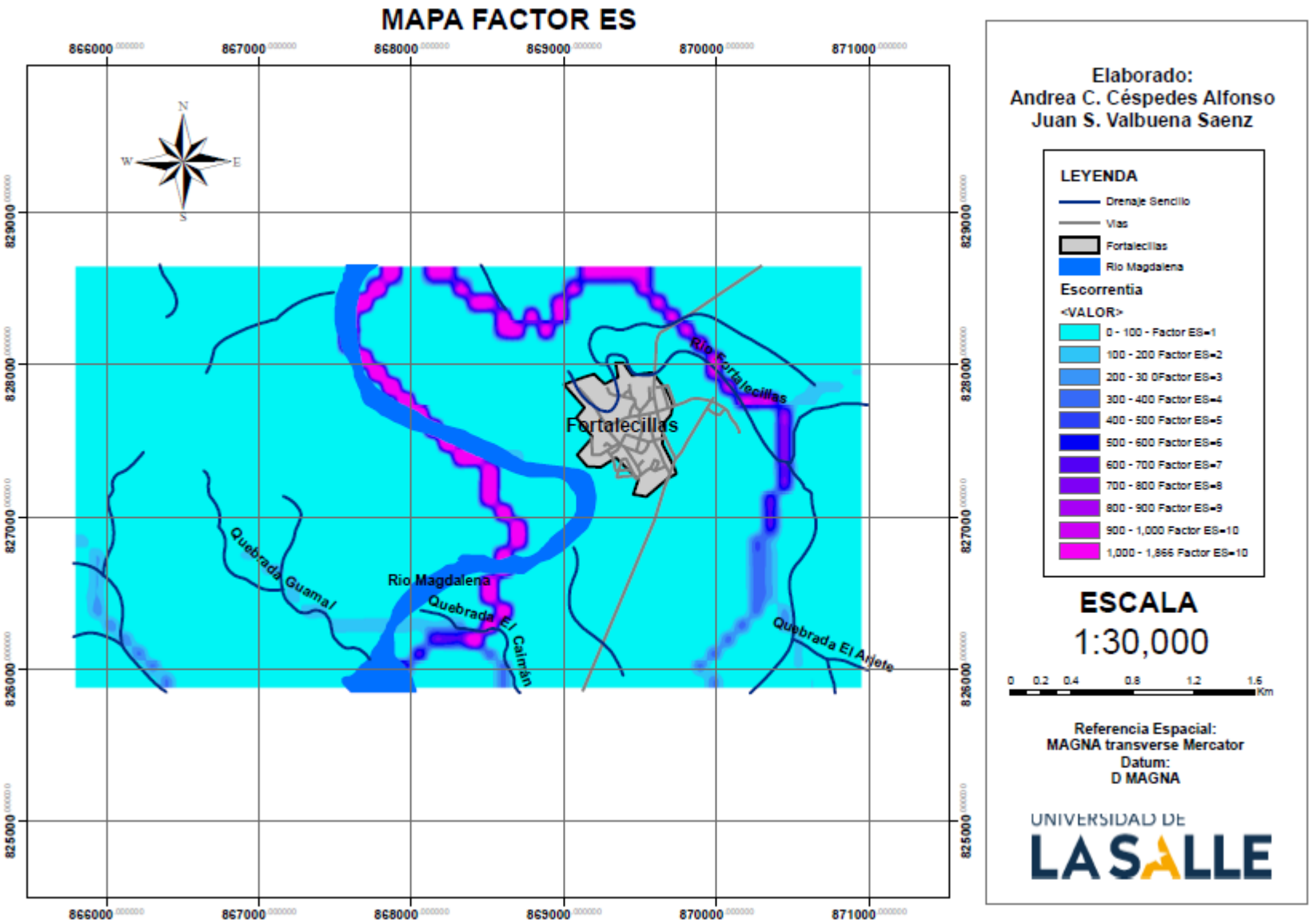

MAPA FACTOR R
866000
867000
868000
869000
870000
871000
829000
828000
827000
826000
825000
N
S
E
W
Fortalecillas
Río Fortalecillas
Río Magdalena
Quebrada Guamal
Quebrada El Cairrán
Quebrada El Ailete
Elaborado:
Andrea C. Céspedes Alfonso
Juan S. Valbuena Saenz
LEYENDA
Drenaje Sencillo
Vías
Fortalecillas
Río Magdalena
FACTOR_R
<VALOR>
408.198 - 427.286 - Factor R = 6
427.286 - 444.252- Factor R = 7
ESCALA
1:30,000
0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6
Km
Referencia Espacial:
MAGNA transverse Mercator
Datum:
D MAGNA
UNIVERSIDAD DE
LA SALLE

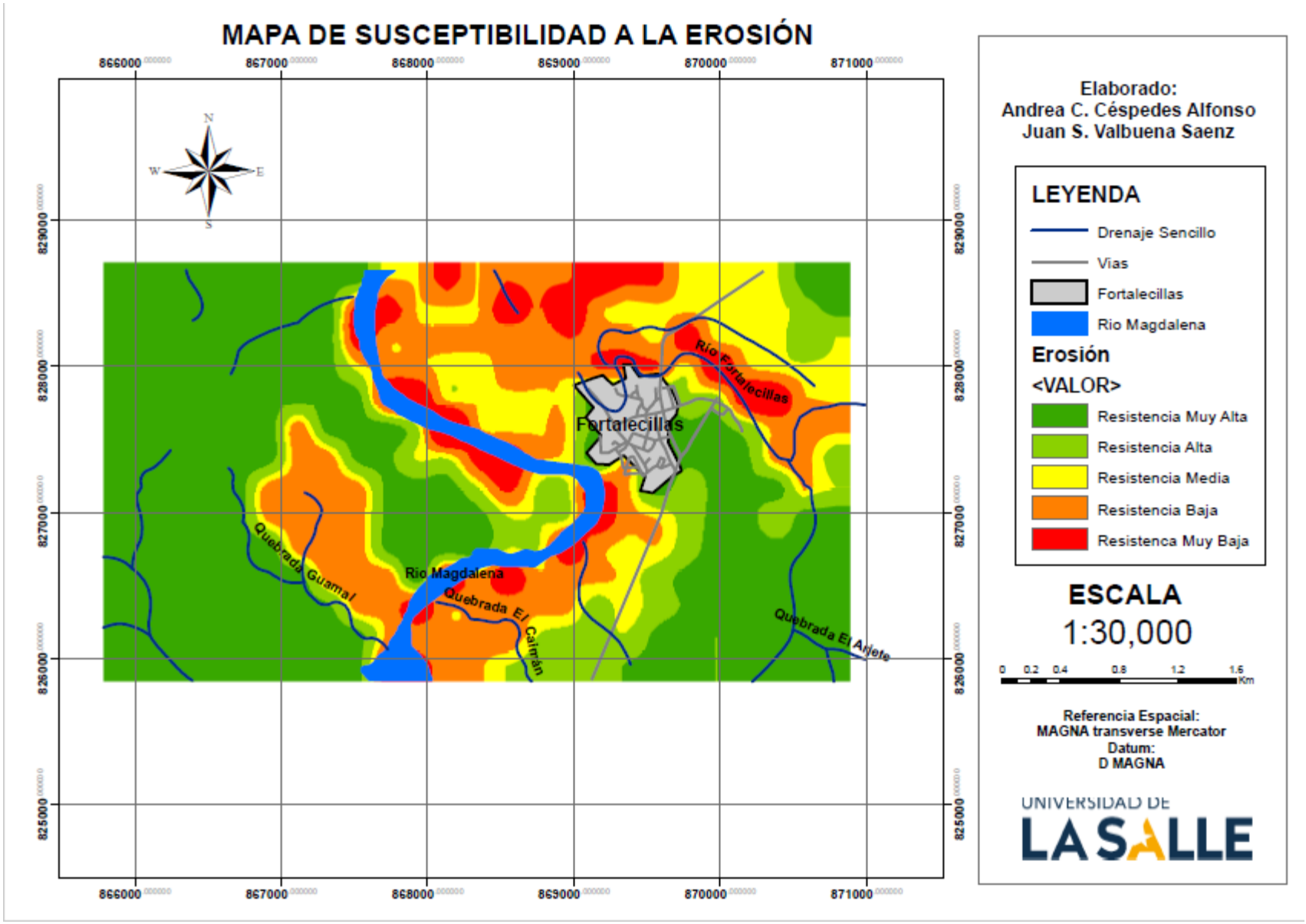
En el mapa de factor S se evidencia que la zona de estudio es plana, por lo tanto, las pendientes no son representativas, esto se observa en que el valor del parámetro de medición más alto es 6 lo cual indica que en estos sectores la erosión es media de acuerdo a este factor.

En el mapa ES se puede ver que el mayor valor de escorrentía se acumula en la ribera del río Magdalena donde alcanza un valor de 10, lo cual quiere decir que esta zona es la más propensa a presentar erosión alta.

En el mapa de susceptibilidad a la erosión se observa que la ribera del río magdalena tiene resistencia media a muy baja lo que quiere decir que es un sector que presenta erosión alta, así mismo, los sectores cercanos al centro poblado de Fortalecillas. Por consiguiente el pueblo se encuentra en alto riesgo de inundación.


MAPA FACTOR S
866000
867000
868000
869000
870000
871000
829000
828000
827000
826000
825000
N
S
E
W
Fortalecillas
Río Fortalecillas
Rio Magdalena
Quebrada Guamal
Quebrada El Caimán
Quebrada El Atleto
Elaborado:
Andrea C. Céspedes Alfonso
Juan S. Valbuena Saenz
LEYENDA
Drenaje Sencillo
Vias
Fortalecillas
Rio Magdalena
PENDIENTE
Value
<2 - Factor S = 1
2 - 6 Factor S = 2
6 - 13 Factor S =4
13 - 20 Factor S =6
ESCALA
1:30,000
0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6
Km
Referencia Espacial:
MAGNA transverse Mercator
Datum:
D MAGNA
UNIVERSIDAD DE
LASALLE


MAPA FACTOR ES
866000
867000
868000
869000
870000
871000
829000
828000
827000
826000
825000
N
S
E
W
Fortalecillas
Rio Fortalecillas
Rio Magdalena
Quebrada Guamal
Quebrada El Caimán
Quebrada El Arlete
Elaborado:
Andrea C. Céspedes Alfonso
Juan S. Valbuena Saenz
LEYENDA
Drenaje Sencillo
Vias
Fortalecillas
Rio Magdalena
Escorrentia
<VALOR>
0 - 100 - Factor ES=1
100 - 200 Factor ES=2
200 - 30 0Factor ES=3
300 - 400 Factor ES=4
400 - 500 Factor ES=5
500 - 600 Factor ES=6
600 - 700 Factor ES=7
700 - 800 Factor ES=8
800 - 900 Factor ES=9
900 - 1,000 Factor ES=10
1,000 - 1,866 Factor ES=10
ESCALA
1:30,000
0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6
Km
Referencia Espacial:
MAGNA transverse Mercator
Datum:
D MAGNA
UNIVERSIDAD DE
LASALLE


MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN
866000
867000
868000
869000
870000
871000
829000
828000
827000
826000
825000
N
S
W
E
Fortalecillas
Río Fortalecillas
Río Magdalena
Quebrada Guamal
Quebrada El Caimán
Quebrada El Anjete
Elaborado:
Andrea C. Céspedes Alfonso
Juan S. Valbuena Saenz
LEYENDA
Drenaje Sencillo
Vias
Fortalecillas
Rio Magdalena
Erosión
<VALOR>
Resistencia Muy Alta
Resistencia Alta
Resistencia Media
Resistencia Baja
Resistenca Muy Baja
ESCALA
1:30,000
0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6
Km
Referencia Espacial:
MAGNA transverse Mercator
Datum:
D MAGNA
UNIVERSIDAD DE
LA SALLE

8. CONCLUSIONES

Los ensayos de laboratorio permitieron caracterizar las muestras de suelos con el fin de clasificarlas por el método S.U.C.S y AASHTO. Los suelos más encontrados de acuerdo a la clasificación obtenida fueron arcillas de baja compresibilidad (CL) Y arena limo arcillosas (SM – SC), así mismo el ensayo de crumb muestra que los grados de dispersión de las muestras están en grado 2 y grado 3, los cuales corresponden a reacción ligera y reacción moderada respectivamente. Por otro lado los valores más frecuentes de porcentaje de dispersión obtenidos del ensayo de doble hidrometría corresponden a suelos no dispersivos.

El mapa de fuerza tractiva resistente muestra que el sector del río cercano al centro poblado tiene unas resistencia alta, lo que quiere decir que hay un desgaste de las partículas que se encuentran allí pero hay una resistencia alta a la fuerza de corte ejercida por el agua. La fuerza tractiva resistente de magnitudes altas son suelos cohesivos debido a que son materiales que desarrollaron una cohesión que ayuda a resistir la fuerza actuante del agua.

La variación de la fuerza tractiva a lo largo del río Magdalena en el área de estudio es significativa, clasificada en un rango desde una fuerza muy baja a una fuerza muy alta la cual se calculó por el criterio de Dunn y Schoklitsch para suelos cohesivos y suelos no cohesivos de granulometría uniforme respectivamente.

Finalmente en el mapa de susceptibilidad a la erosión laminar hídrica se evidencia que en las riberas del río Magdalena es donde se presenta mayor erosión, la probabilidad de erosión es alta en la zona de estudio debido a que la presencia de coberturas vegetales es deficiente, la acumulación de escorrentía es alta y las características de los suelos no cementados es predominante , lo cual coincide con las observaciones hechas en campo y con los resultados

obtenidos en cada uno de los factores empleados para la obtención de este mapa por ejemplo el factor K se observa que las riberas del rio tiene un material litológico aluvial (Qal), el cual tiene un valor de 10 siendo el más alto a la susceptibilidad a la erosión. Así mismo se observa que el centro poblado esta en alto riesgo ya que el rio ha erosionado gran parte de la orilla en el costado suroccidental acercándose cada vez más a la zona urbana poniendo en peligro a sus habitantes ya que el rio puede hacer su canal de derivación por esta zona.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios más detallados, los cuales incluyan modelos digitales del río, modelos físicos del sector en estudio y las características geomorfológicas del fondo del cauce mediante batimetrías, ya que como se observan en el mapa de susceptibilidad a la erosión laminar hídrica el rio se encuentra muy cerca de la zona urbana de Fortalecillas, lo cual en un futuro pude repercutir debido a que se pueden presentar crecientes y así afectar gravemente al centro poblado. Por consiguiente se debe utilizar el estudio para determinar el diseño de la estructura de contención que mejor pueda funcionar, con el fin de prevenir catástrofes las cuales no son predecibles pero si se pueden mitigar.

10. BIBLIOGRAFÍA

Libros

Díaz, J. S. (2001). *CONTROL DE EROSION EN ZONAS TROPICALES.* Bucaramanga-Colombia: Division Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander .

Wendor Chereque. (S.F). Mecánica de fluidos 2. Lima - Perú

Artículos y Revistas

JARAMILLO, D. F.; L. N. PARRA y L. H. GONZÁLEZ. 1994. El recurso suelo en Colombia: Distribución y evaluación. Universidad Nacional de Colombia.. Medellín. 88 p.

Martinez, H. O. (2011). *Predicción, Experimentación y Simulación en la Enseñanza de la Fuerza de Rozamiento.* Bogota, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Aldemar Higgins, juan camilo restrepo, juan carlos ortiz, jorge pierini, luis otero. (28 de Julio de 2015). Suspended sediment transport in the Magdalena River (Colombia, South America): Hydrologic regime, rating parameters and effective discharge variability. International Journal of Sediment Research, 31, 25-35. 24 de septiembre de 2016, De science direct Base de datos.

José Luis Hernández Tovar, Jorge Andrés Gómez Granados. (2012). Estudio y Caracterización de Suelos Dispersivos - Implementación del Ensayo para identificación y Clasificación de Suelos Dispersivos por el Método de Pinhole. Bucaramanga Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Julio Alberto Triviño Torres. Una alternativa de recuperación del río Magdalena en el sector de Barrancabermeja - La Gloria. Septiembre de 2016, de universidad militar nueva granada

Sitio web: file:///C:/Users/10/Downloads/Dialnet-ConozcamosYEntendamosLaNaturalezaParaDisfrutarDeEl-5314003.pdf

Laura Yazmin Martínez Leal, Julián Andrés Ramírez Rodríguez. (2000). estudio del comportamiento de la socavación en la vecindad de los espolones en el río Magdalena en el sector puerto carmelitas - puerto casabe. Septiembre de 2016, de universidad industrial de Santander Sitio web: http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1798/2/112666.pdf

Roberto Vargas Cuervo. Amenazas geológicas del departamento del Huila. Septiembre de 2016, de Surcolombiana Sitio web: http://ingenieria.usco.edu.co/museo/images/Amenazas.pdf

Roberto Vargas Cuervo. Geomorfología y amenazas geológicas del municipio de Neiva. Septiembre de 2016, de Surcolombiana.

José Antonio Luna Vera. Inicio de movimiento y diseño de canales estables. En principios de hidráulica fluvial (3.4).

Luis Jairo Toro, Darney Ceballos. (Diciembre de 2012). Evaluación a la susceptibilidad a la erosión por el cambio de cobertura debido a la minería, en el municipio de Anorí Antioquia, Colombia. Gestión y ambiente, volumen 15, 53 - 58.

Pavco. (2001). Geosistemas pavco, bolsacretos. 14 de agosto de 2017, de imgeocosta Sitio web: https://www.imgeocosta.com/espec/Bolsacretos.pdf

Universidad Nacional de Colombia. (2006). Análisis de la Estabilidad de las Islas Ubicadas en el río Magdalena Frente a la Ciudad de Neiva. Gobernación del Huila, 141.

Darney de J, C. E. (2012). Evaluacion de la Suceptibilidad a la Erosion por el cambio de cobertura debido a la mineria, en el municipio de Anori, Antioquia, Colombia. *Gestion y Ambiente*, 51-64.

Terán, L. V. (2014). CARACTERISITCAS DE LOS LIQUIDOS. *VIDA CIENTIFICA, BOLETIN CIENTIFICO DE LA ESCUELA PREPARATORIA NUMERO 4*.

J, D. F. (2002). *INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO*. Medellin: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE CIENCIAS.

Velasco, L. G. (s.f.). *Universidad del Cauca*. Obtenido de ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/.cuentasbajadas29092009/lucruz/docs/Curso%20Mec%E1nica%20de%20Suelos%20I/Mecanica%20de%20Suelos%20I%20ESLAGE%20(17_18).pdf

(NTC 5167, 2004)

Carlos Enrique Escobar Potes, G. D. (01 de septiembre de 2017). *capitulo 3 procesos de degradación* . Obtenido de geotencia para el tropico andino : http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/33/erosionymovimientosenmasa.pdf.

Michelena, R. O. (01 de septiembre de 2017). *Erosión hídrica*. Obtenido de http://agrolluvia.com/wp-content/uploads/2011/06/EROSION-HIDRICA.pdf

Escobar, G. A. (20 de agosto de 2008). Apuntes docentes uso y conservacion de suelos . *Uso de la ecuación universal de erdidas de suelo (USLE) en el capo forestal* . Chile .

Sara Ibañez, H. R. (03 de septiembre de 2017). *Metodos para la determinación del coeficiente de escorrentia* . Obtenido de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10781/Coeficiente%20de%20escorrent%C3%ADa.pdf

Vargas Cuervo, German. (2012). Geología, Geomorfología y Dinámica Fluvial Aplicada a Hidráulica de Ríos. .

Restrepo, J. D., Björn , K., Hermelin, M., & Restrepo, J. C. (2006). Factors controlling sediment yield in major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia. Journal of Hydrology, 213-232.