

**“IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE REDES NEURONALES
ARTIFICIALES (RNA) PARA LA CREACIÓN DEL MAPA DE
SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA PARA LA PLANCHA 136-
IV-A, ESCALA 1:25.000”**

**IVÁN DAVID CONTRERAS NOVOA
MARÍA EUGENIA HERNÁNDEZ CARRILLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2018

**“IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE REDES NEURONALES
ARTIFICIALES (RNA) PARA LA CREACIÓN DEL MAPA DE
SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA PARA LA PLANCHA 136-
IV-A, ESCALA 1:25.000”**

**IVÁN DAVID CONTRERAS NOVOA
MARÍA EUGENIA HERNÁNDEZ CARRILLO**

**TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR EL TÍTULO DE
GEÓLOGO**

**Director:
DIEGO GERARDO IBÁÑEZ ALMEIDA
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Codirectora:
ANA MILENA CARDOZO ORTIZ
Especialista en Auditoría y estudio de impacto ambiental**

**Codirector:
CARLOS ALBERTO RÍOS REYES
Doctor en Ciencias Aplicadas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico principalmente a mi Dios por darme la vida y salud a quien agradezco por protegerme durante todo mi camino, por darme fuerzas para superar obstáculos, dificultades a lo largo de mi vida y no desmayar, también por permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis padres por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, comprensión, sus valores, por ser mis pilares más importantes, por la motivación constate que me ha permitido ser una persona de bien, por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar, pero más que nada, por su amor.

A mi hermana por su cariño, ternura y por estar siempre presente acompañándome para poderme realizar.

A todos aquellos compañeros con que pude compartir y llevar unas buenas relaciones. Aquellos que me extendieron la mano y me regalaron lo mejor de sí.

Finalmente, a todos los maestros, aquellos que marcaron cada etapa de mi camino universitario y aportaron en mi formación académica y personal, en especial a mi director de tesis Diego Gerardo Ibañez A. por su gran apoyo, motivación y orientación para la elaboración y culminación de esta tesis, de igual manera a la institución UIS por brindarme la oportunidad de darme requisitos, proveer de herramientas, conocimientos y bases para concluir y obtener mi título profesional soñado en sus instalaciones.

“La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar”.

IVAN DAVID CONTRERAS NOVOA

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico especialmente a mi Dios, por su amor y su bondad infinita con la tierra y con nosotros los seres humanos sintiendo gran satisfacción de transmitir mi conocimiento, practica y amor a mi profesión por lo tanto, me permite crecer como persona ante todos mis logros que son el resultado de mi trabajo y esfuerzo a levantarme cada vez que caigo porque aprendo de mis errores y me doy cuenta que así me perfecciona como ser humano y evoluciono no solo a nivel cognitivo sino además a nivel del ser espiritual.

A mi abuelo José Antonio Guarguati quien gracias a él me enseñó a ser lo que soy hoy en día, a mi madre por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles y me ha brindado la educación para crecer como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

Al hogar Geriátrico Papa Francisco en especial por haberme permitido hacer parte de su equipo de trabajo y la coordinadora Jackeline Sanchez, que me apoyaron y me permitieron entrar en sus vidas durante casi 6 años y a todo el personal de la residencia geriátrica por su calidad humana, su paciencia, amabilidad, sensibilidad, cariño.

A mis maestros por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis; Diego Gerardo Ibañez Almeida por su apoyo ofrecido en este trabajo; a la profesora Ana milena Cardozo Ortiz por apoyarnos en su momento.

A mis amigos Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional; Finalmente a los maestros, aquellos que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario, y que me ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de la tesis.

MARIA EUGENIA HERNANDEZ C.

AGRADECIMIENTOS

A Dios ante todo que siempre ha velado por nuestro bienestar y sabiduría, por mantener todo muy bien en nuestra vida y alrededor de ella.

A Nuestros familiares y seres queridos que son la esencia de mi ser.

A nuestro estimado director de tesis Diego Gerardo Ibañez Almeida quien es una magnifica persona, la cual nos brindó su orientación, ayuda y dedicación para desarrollar y culminar este proyecto con éxito. Como también al profesor Joaquín Andrés Valencia Ortiz quien en un principio nos atrajo a esta rama de la geología y maravilloso tema.

A nuestros codirectores Ana Milena Cardozo Ortiz y Carlos Alberto Ríos Reyes quienes aportaron significativamente y dispusieron de toda su colaboración para llevar a cabo este propósito, y también a la Convocatoria Nacional N° XVI del Fondo Corrigan ACGGP – ARES quien selecciono esta tesis y ayudo a impulsar la investigación de manera eficaz gracias a la inyección económica para distintas fases del proyecto.

A todos nuestros compañeros de la escuela que me dejaron una experiencia valiosa en la vida en el transcurso del pregrado. Y en especial a todos aquellos con los que pasamos momentos valiosos de lucha, de risa y de locuras, con los que compartí las más grandes anécdotas como estudiante Universitario.

Nos quedamos cortos nombrando a todas las personas que hicieron parte de este gran recuerdo, pero a todos los queremos.

¡Muchas Gracias!

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	29
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	31
2. JUSTIFICACIÓN	34
3. OBJETIVOS.....	35
3.1 OBJETIVO GENERAL	35
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	35
4. METODOLOGÍA	36
5. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL AREA DE ESTUDIO	40
6. MARCO TEÓRICO	41
6.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....	41
6.2 ESTRATIGRAFÍA	43
6.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	45
6.4 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES (UGS)	46
6.5 CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA	49
6.6 CARTOGRAFÍA DE UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES (UGS)	53
6.7 MOVIMIENTOS EN MASA	67
6.7.1 Susceptibilidad a Movimientos en Masa	67
6.7.2 Tipos de movimientos en masa	67
6.7.2.1 Deslizamientos.....	69
6.8 REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)	70
6.8.1 Fase de entrenamiento de la RNA.....	73

6.8.2 Modelo de Perceptron multicapa por medio del algoritmo Back Propagation.....	74
6.8.3 Validación del Modelo de Susceptibilidad de Movimientos en Masa	75
7. RESULTADOS.....	77
7.1 SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DE LA PLANCHA 136 – IV – A	77
7.1.1 Geoformas de origen denudativo.....	81
7.1.1.1 Ladera ondulada moderada (Dlom)	81
7.1.1.2 Ladera ondulada abrupta (Dloa).	82
7.1.1.3 Ladera ondulada (Dlo)	83
7.1.1.4 Talus (Dt)	84
7.1.2 Geoformas de origen fluvial	85
7.1.2.1 Cauce aluvial (Fca).	86
7.1.2.2 Llanura de inundación (Fpi)	86
7.1.2.3 Terraza de acumulación (Fta).....	87
7.1.2.4 Cono de deyección (Fcdy)	88
7.1.3 Geoformas de origen estructural – denudacional	89
7.1.3.1 Ladera contrapendiente (Slcp).....	90
7.1.3.2 Escarpe de contrapendiente (Secp).....	91
7.1.3.3 Ladera escalonada (Sles)	92
7.1.3.4 <i>Escarpe de línea de falla (Sife)</i>	93
7.1.3.5 Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc)	95
7.2 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES DE LA PLANCHA 136– IV A...	95
7.2.1 Formaciones que conforman las unidades geológicas superficiales	98

7.2.1.1 Formación Tibú – Mercedes	98
7.2.1.2 Formación Aguardiente.....	102
7.2.1.3 Formación Capacho.....	107
7.2.1.4 Formación La Luna	111
7.2.1.5 Formación Colón Mito – Juan	112
7.2.1.6 Formación Barco.....	114
7.2.1.7 Formación Los Cuervos.....	116
7.2.1.8 Cuaternarios	118
8. MORFODINÁMICA	128
8.1 MOVIMIENTOS EN MASA REGISTRADOS EN LA PLANCHA 136 – IV – A129	
9. MODELADO DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL Y RESULTADO	141
9.1 CREACIÓN DEL SET DE DATOS.....	141
9.2 PROGRAMACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES	161
9.3 VALIDACIÓN DE LA RED NEURONAL FINAL	167
10. SUSCEPTIBILIDAD RELATIVA A LOS MOVIMIENTOS EN MASA.....	173
10.1 SUSCEPTIBILIDAD MUY ALTA.....	175
10.2 SUSCEPTIBILIDAD ALTA	178
10.3 SUSCEPTIBILIDAD MODERADA	180
10.4 SUSCEPTIBILIDAD BAJA	182
10.5 SUSCEPTIBILIDAD MUY BAJA	183
11. CONCLUSIONES	186
12. RECOMENDACIONES.....	188
BIBLIOGRAFIA.....	189

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de rocas y suelos.	48
Tabla 2. Comparación de Perfiles de Meteorización de un macizo rocoso según distintos autores citados en SGC, (2017).....	57
Tabla 3. Resistencia del macizo rocoso.....	58
Tabla 4. Descripción del tamaño del bloque en función del número de discontinuidades.	59
Tabla 5. Esta tabla fue construida para esquematizar las diferentes calidades del macizo rocoso en concordancia con sus índices de fracturamiento en base a la ecuación RQD de la fuente	60
Tabla 6. Esta tabla fue construida para esquematizar los rangos RQD en la clasificación de la calidad del macizo rocoso.....	61
Tabla 7. Rangos de clasificación de macizo según el geological strenght index for jointed rocks.....	65
Tabla 8. Correlación de los parámetros de calificación de las discontinuidades comúnmente utilizados para clasificar la calidad de los macizos rocosos	66
Tabla 9. Tabla modificada que relaciona el tipo de macizo rocoso con sus parámetros relacionados con la clasificación de UGS y su calidad	66
Tabla 10. Ambientes morfogenéticos y subunidades geomorfológicas identificados en la Plancha 136 – IV – A.....	78
Tabla 11. Unidades geológicas superficiales.	96

Tabla 12. Movimientos en masa registrados en el área de estudio.	130
Tabla 13. Valores de calificación normalizados para cada variable a tener en cuenta en cálculo de la Susceptibilidad total	151
Tabla 14. Clasificación de susceptibilidad y valores generados por software Matlab R2017a.....	172
Tabla 15. Susceptibilidad por Movimientos en masa	175
Tabla 16. Clasificación de susceptibilidad junto con su totalidad de pixeles correspondiente a cada categoría.....	185

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Flujograma metodológico utilizado para el análisis de susceptibilidad por MM a través de Redes Neuronales Artificiales	39
Figura 2. Localización del área de estudio correspondiente a la plancha 136-IV-A.....	40
Figura 3. Localización geológica del área de trabajo (plancha 136-IV-A).....	42
Figura 4. Resumida descripción litoestratigráficas del área de estudio	44
Figura 5. Esquema de jerarquización geomorfológica.	50
Figura 6. Factor Geological Strenght Index for jointed rocks (GSI) para la clasificación de macizos rocosos homogéneos	63
Figura 7. Índice de Resistencia Geológica Para Rocas Desclasadas (GSI) para macizos rocosos no-homogéneos tipo flysch.	64
Figura 8. Principales tipos de movimientos en masa	68
Figura 9. Estructura jerárquica de una RNA y modelo de una neurona estándar. .	72
Figura 10. Mapa de subunidades geomorfológica.	80
Figura 11. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Ladera disectada abrupta (Dldm), Ladera erosiva abrupta (Dlea), Ladera ondulada abrupta (Dloa), Ladera ondulada muy abrupta (Dloma), Escarpe de erosión menor (Deeme), Superficie de erosión o aplanamiento (Dsa), Cono de deyección (Fcdy), observadas en las veredas Limón Dulce y Peña Lisa, del Municipio de Covarachía.....	82

Figura 12. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Ladera ondulada (Dlo), Terraza sobreelevada (Dts), Escarpe de terraza sobreelevada (Dtse) y Lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco), observadas en la vereda La Mesa, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas:
E: 1.153.174.....83

Figura 13. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Ladera ondulada (Dlo) y Plancha estructural (Sp), observadas en la vereda La Palma, del Municipio de Macaravita. A. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.166.000, Y: 1.213.361, en dirección S60°W. B. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.163.245, Y: 1.210.754, en dirección N15°W84

Figura 14. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Talus (Dt) y Escarpe de contrapendiente (Secp), observadas en la vereda Platanal, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas E: 1.153.801, N: 1.216.694, en dirección N50°W85

Figura 15. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Cauce Aluvial (Fca), Llanura de inundación (Fpi), Terraza de acumulación (Fta) y Escarpe de terraza de acumulación (Ftae), asociadas al río Chicamocha, observadas al occidente del casco urbano del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.152.815, N: 1.212.776, en dirección N30°E.....88

Figura 16. Panorámica de la subunidad geomorfológica Cono de deyección (Fcdy), observada al margen izquierdo del río Chicamocha, a un margen de la vía Capitanejo – Tipacoque, en la vereda Peña Lisa, del Municipio de Capitanejo.

Fotografía tomada desde las coordenadas E: 1.156.206, N: 1.211.730, en dirección S50°W.	89
Figura 17. Panorámica de la subunidad geomorfológica Ladera contrapendiente (Slcp). A. Observada en la vereda La Mesa, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.151.792, N: 1.214.062, en dirección N. B. Observada en la vereda Quebrada de Vera, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.150.490, N: 1.219.815, en dirección S42°E	91
Figura 18. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Escarpe de contrapendiente (Secp) y Ladera ondulada (Dlo), observadas en el sector Los Colorados, vereda La Chorrera, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas: N: 1.212.209, en dirección N15°W	92
Figura 19. Panorámica de la subunidad geomorfológica Ladera escalonada (Sles), observada en el sector La Palestina, vereda Montecillo, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.152.860, N: 1.215.626, en dirección S5°W	93
Figura 20. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Escarpe de línea de falla (Slfe), Ladera ondulada abrupta (Dloa) y Talus (Dt), observadas en la vereda San Pedro, del Municipio de San Miguel. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.159.044, N: 1.212.051, en dirección N17°E	94
Figura 21. Mapa unidades geológicas superficiales.	97
Figura 22. Afloramiento de Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Tibú – Mercedes (Rmblftm), caracterizada en el camino real de la finca El Garbanzal,	

vereda El Tablón, del Municipio de San Miguel. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.157.822, N: 1.1220.178, en dirección S15°E	99
Figura 23. Afloramiento de Roca blanda de lodolitas de la Formación Tibú – Mercedes (Rblftm), observada en la vía que conduce de la parte alta de la vereda Hoya Grande del Municipio de Capitanejo, al casco urbano del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas E: 1.155.985, N: 1.212.209, en dirección N50°E	100
Figura 24. Roca intermedia de lodolitas y areniscas de la Formación Tibú – Mercedes (Rilaftm), localizada en la vía que comunica la vereda Buena Vista con el casco urbano del Municipio de Macaravita. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.161.717, N: 1.209.847, en dirección S75°E	102
Figura 25. Roca blanda de lodolitas y areniscas de la Formación Aguardiente (Rblafa), caracterizada en la vía que comunica la vereda Buenavista del Municipio de Macaravita, con el casco urbano del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas E: 1.159.173, N: 1.210.786, en dirección N40°W. ..	104
Figura 26. Afloramiento de Roca intermedia de la Formación Aguardiente (RiKia), observada sobre la vía San Miguel – Capitanejo, en el sector Las Lomas, vereda La Mesa, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.152.818, N: 1.217.231, en dirección N50°E	106
Figura 27. Afloramiento de Roca intermedia de la Formación Aguardiente (RiKia), observada en el cauce de la quebrada San Pedro, vereda La Chorrera, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.156.894, N: 1.213.519, en dirección N22°E	107

Figura 28. Roca muy blanda de la Formación Capacho (RmbKsc), observada sobre la vía Capitanejo – Covarachía, vereda Limón Dulce, del Municipio de Covarachía. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.152.753, N: 1.212.797, en dirección N75°W	109
Figura 29. Afloramiento de Roca blanda de lodolitas y calizas de la Formación Capacho (Rblcfc), descrita en la vía San Miguel – Capitanejo, vereda Zaragoza, del Municipio de San Miguel. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.157.438, N: 1.219.142, en dirección S15°W	110
Figura 30. Roca muy blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación La Luna (Rmbilaf), localizada sobre la vía que conduce de la vereda Hoya Grande hacia el casco urbano del Municipio de Capitanejo, en la vereda La Loma del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.155.502, N: 1.212.421, en dirección S15°E	112
Figura 31. Roca blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación Colón Mito – Juan (Rbilafcm), observada sobre la vía San Miguel – Capitanejo, al lado de una mina artesanal de carbón. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.153.814, N: 1.216.166, en dirección N80°E	114
Figura 32. Afloramiento de Roca blanda de la Formación Barco (RbTpb), observada al margen derecho del río Tunebo, sobre la vía que comunica la vereda Agua Sucia, del Municipio de Enciso, con la vereda Quebrada de Vera del Municipio de Capitanejo, a 400 m de la vía principal Capitanejo – Málaga. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.150.498, N: 1.219.946, en dirección N50°E	116

Figura 33. Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Los Cuervos (Rmbflfc), caracterizada sobre la vía San Miguel – Capitanejo, en el sector Las Lomas, vereda La Mesa, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.152.596, N: 1.217.633, en dirección N55°E	118
Figura 34. Afloramiento de Suelo residual granular de la Formación Aguardiente (Srgfa), observado en la vía que comunica la vereda Buena Vista con Macaravita, a 200 m de la escuela Buenavista. Fotografía tomada en las coordenadas E: 1.160.973, N: 1.211.291, en dirección S65°E	120
Figura 35. Suelo transportado aluvial (Stal), observado sobre un pequeño puente, que cruza el río Chicamocha, en la vereda Montecillo del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.150.072, N: 1.216.719, en dirección S25°W.....	122
Figura 36. Suelo transportado de llanura aluvial (Stllal), asociado al río Chicamocha, observado al occidente del casco urbano del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.152.815, N: 1.212.776, en dirección N30°E	124
Figura 37. Afloramiento de Suelo transportado de terraza aluvial (Sttal), observado sobre la vía principal Capitanejo – Málaga, en la vereda Agua Sucia, del Municipio de Enciso, Departamento de Santander. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.150.087, N: 1.219.912, en dirección S65°E	125
Figura 38. Suelo transportado coluvial (Stcol), observado sobre la vía San Miguel – Capitanejo, a 400 m de la finca Pita, vereda Platanal, del Municipio de Capitanejo.	

Fotografía tomada en las coordenadas E: 1.153.058 N: 1.217.455, en dirección S43°E.....	126
Figura 39. Suelo transportado coluvial (Stcol) observado al lado de la escuela rural La Chorrera, en la entrada al sendero que conduce a la cascada La Chorrera. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1157139 N: 1213360 en dirección S30°W.....	127
Figura 40. Identificación y localización preliminar de sitios que han presentado movimientos en masa registrados en la base de datos SIMMA.....	128
Figura 41. Movimientos en masa registrados en la plancha 136 – IV – A.	129
Figura 42. Densidad en porcentaje de movimientos en masa registrados en campo por municipio, en el área de la Plancha 136 – IV – A.	132
Figura 43. A. Deslizamiento rotacional de estilo compuesto, observado en la vía San Miguel – Macaravita, en la vereda La Palma, del Municipio de Macaravita. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.162.848, N: 1.210.447.....	133
Figura 44. A. Movimiento en masa de tipo caída de detritos, registrado sobre la vía Capitanejo – Tipacoque, al margen izquierdo del río Chicamocha, afectando 100 m de la vía. Foto tomada en las coordenadas: E: 1.153.840, N: 1.210.614	134
Figura 45. Caída de detritos observada en la vía San Miguel – Macaravita, a 200	135
Figura 46. Caída de Roca, observada en la vía Capitanejo – San Miguel, aproximadamente a 400 m de la finca Pita, vereda Platanal del Municipio de Capitanejo, registrado en las coordenadas: E: 1.153.057, N: 1.217.455. Fotografía panorámica tomada en dirección N40°	136

Figura 47. Deslizamiento traslacional planar, observado en la vía que conduce del casco urbano del Municipio de Macaravita a la vereda El Juncal, del Municipio de Macaravita. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.164.415, N: 1.210.188, en dirección N15°E	137
Figura 48. Deslizamiento traslacional en cuña, observado al margen derecho de la quebrada La mesa, vereda La Mesa, del Municipio de Capitanejo. En las coordenadas: E: 1.151.750, N: 1.217.346. Fotografía tomada desde la vía Vereda La Mesa – Casco Urbano de Capitanejo, en dirección S40°W	137
Figura 49. Reptación de suelos, observada al margen izquierdo la vía San Miguel – Macaravita, aproximadamente 50 m en línea recta de la escuela rural San Ignacio, vereda San Ignacio, del Municipio de San Miguel. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.157.629, N: 1.215.156, en dirección S74°E	138
Figura 50. Flujo de detritos, observado al margen derecho de la quebrada San Pedro, registrado en las coordenadas: E: 1.156.553, N: 1.213.862. Fotografía tomada desde de la vía que conduce desde la escuela La Chorrera hacia el casco urbano del Municipio de Capitanejo, en dirección N7°E	138
Figura 51. Densidad en porcentajes de tipos de movimientos en masa registrados en campo en el área estudio (Plancha 136 – IV – A).....	139
Figura 52. Deslizamiento rotacional de estilo compuesto, observado a 15 m al norte de la escuela Los Molinos, vereda Los Molinos del Municipio de Capitanejo. Registrado en las coordenadas: E: 1.157.980, N: 1.210.086.....	140
Figura 53. A) Mapa de calificación de susceptibilidad por Acuenca.	142
Figura 54. B) Mapa de calificación de susceptibilidad por curvatura.	143

Figura 55. C) Mapa de calificación de susceptibilidad por pendiente.	144
Figura 56. D) Mapa de calificación de susceptibilidad por rugosidad.	145
Figura 57. Mapa de calificación de susceptibilidad por morfodinámica obtenido a partir del procesamiento de DEM ALOS PALSAR.	146
Figura 58. El mapa de densidad de fracturamiento obtenido a partir del shapefile de fallas geológicas presentes en el área de estudio	147
Figura 59. A) Mapa de cobertura de la tierra	149
Figura 60. B) Mapa de suelos (Edafológico)	150
Figura 61. Tabla con la calificación de los atributos de cada una de las variables, tenidas en cuenta para el análisis de redes neuronales artificiales, obtenida con la herramienta Sample de ArcGIS, en donde se muestran los valores para los primeros 63 píxeles	156
Figura 62. Valores normalizados para las 10 variables a tener en cuenta en la generación del mapa de susceptibilidad total de la Plancha, de los primeros 63 píxeles.....	158
Figura 63. Mapa de zonas estables e inestables de la plancha 136 –IV-A.....	160
Figura 64. Matrices de entrenamiento, simulación y targets, importadas en software Matlab R2017a.	162
Figura 65. Captura de pantalla que muestra la forma de crear la RNA en la herramienta nntool de software MATLAB R2017A.	164
Figura 66. Pestaña “Training Parameters”, en la que se estableció el número de épocas o iteraciones “epochs” y el objetivo de la suma de errores cuadrados “goal.	165

Figura 67. Posteriormente se ejecutó el proceso de entrenamiento de la red neuronal, con el objetivo de que software Matlab R2017a sistematizara los parámetros que definen si una zona es estable o inestable	166
Figura 68. Gráficos de validación generados por software Matlab R2017a.....	168
Figura 69. Captura de pantalla del software Matlab R2017a, que muestra la pestaña 'simulate'.....	170
Figura 70. Tabla muestra los valores se integraron con sus respectivas coordenadas y se importaron en ArcGIS.....	171
Figura 71. Mapa de susceptibilidad total por movimientos en masa para la Plancha 136 – IV- A.....	174

LISTA DE ANEXOS

Los anexos están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS”

ANEXO A: Formato modificado para catálogo de MM

ANEXO B: Formato modificado para inventario de MM

ANEXO C: Formato o tabla de recolección de datos para cartografía

Geomorfológica

ANEXO D: Plancha 136 (Málaga)

ANEXO E: Glosario geomorfológico del SGC - Version 6.0

GLOSARIO

***Implementación**: Es la ejecución u/o puesta en marcha de una idea programada, ya sea, de una aplicación informática, un plan, modelo científico, diseño específico, estándar, algoritmo o política.

***Modelo**: Aquello que se toma como referencia para tratar de producir algo igual.

***Susceptibilidad**: Está referida a la mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra sobre un determinado espacio geográfico.

***Movimiento en masa**: Son procesos esencialmente gravitatorios, por los cuales una parte de la masa del terreno se desplaza a una cota inferior de la original sin que medie ostensiblemente medio de transporte alguno, siendo tan solo necesario que las fuerzas estabilizadoras sean superadas por las desestabilizadoras.

***Sistema de información geográfica (SIG)**: Es un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real que están vinculados a una referencia espacial, facilitando la incorporación de aspectos sociales-culturales, económicos y ambientales que conducen a la toma de decisiones de una manera más eficaz.

***Redes neuronales artificiales**: Es un modelo computacional basado en un gran conjunto de unidades neuronales simples (neuronas artificiales) de forma aproximadamente análoga al comportamiento observado en los axones de las neuronas en los cerebros biológicos. La información de entrada atraviesa la red neuronal (donde se somete a diversas operaciones) produciendo unos valores de salida. Cada neurona está conectada con otras a través de unos enlaces. En estos enlaces el valor de salida de la neurona anterior es multiplicado por un valor de

peso. Estos pesos en los enlaces pueden incrementar o inhibir el estado de activación de las neuronas adyacentes. Del mismo modo, a la salida de la neurona, puede existir una función limitadora o umbral, que modifica el valor resultado o impone un límite que se debe sobrepasar antes de propagarse a otra neurona. Esta función se conoce como función de activación. Estos sistemas aprenden y se forman a sí mismos, en lugar de ser programados de forma explícita; y sobresalen en áreas donde la detección de soluciones o características es difícil de expresar con la programación convencional. Para realizar este aprendizaje automático, normalmente, se intenta minimizar una función de pérdida que evalúa la red en su totalidad. Los valores de los pesos de las neuronas se van actualizando buscando reducir el valor de la función de pérdida. Este proceso se realiza mediante la propagación hacia atrás. El objetivo de la red neuronal es resolver los problemas de la misma manera que el cerebro humano.

RESUMEN

TITULO: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES PARA LA CREACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA PARA LA PLANCHA 136-IV-A, ESCALA 1:25.000*

AUTOR: IVAN DAVID CONTRERAS NOVOA, MARIA EUGENIA HERNANDEZ CARRILLO**

PALABRAS CLAVES: Plancha 136-IV-A, Susceptibilidad por Movimientos en Masa, Sistemas de Información Geográfica, Redes Neuronales Artificiales.

DESCRIPCIÓN

En el área de la 'Plancha 136-IV-A', ubicada entre los municipios de Capitanejo, San Miguel, Macaravita (Departamento de Santander) y Covarachía (Departamento de Boyacá), afloran rocas sedimentarias del Cretácico y del Paleógeno, de las formaciones Tibú-Mercedes, Aguardiente, Capacho, La Luna, Colón-Mito Juan, Barco y Los Cuervos, las cuales presentan niveles con baja resistencia a la erosión y meteorización. Las subunidades geomorfológicas evidencian el fuerte control estructural, generado principalmente por las fallas Chicamocha, Servitá y sus fallas satélites, desarrollando una topografía abrupta. Por lo tanto el área de estudio presenta un moderado a alto grado de inestabilidad del terreno, lo que la hace una región propensa a los movimientos en masa (MM).

La generación, análisis e integración de 10 diferentes variables, asociadas a la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa, en el sistema de información geográfica ArcGIS 10.1, Esri (2012) y el software MATLAB, MathWorks R2017a, permitió generar el mapa de zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa de la Plancha 136-IV-A, mediante la implementación del método de Redes Neuronales Artificiales (RNA). Esta metodología novedosa es la más indicada para este proyecto específico debido a su eficacia en el análisis e integración de variables asociadas a la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa con gran fiabilidad.

La susceptibilidad baja prevalece en la zona de estudio, seguida de susceptibilidad muy baja y moderada, La categoría de susceptibilidad menos predominante fue muy alta.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Diego Gerardo Ibañez Almeida, Geólogo.

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR THE CREATION OF THE MAP OF SUSCEPTIBILITY BY MOVEMENTS IN MASS FOR THE 136-IV-A SHEET. SCALE 1: 25,000*

AUTHORS: IVAN DAVID CONTRERAS NOVOA, MARIA EUGENIA HERNANDEZ CARRILLO**

KEYWORDS: 136-IV-A Sheet, Susceptibility to Mass Movements, Geographic Information System, Artificial Neural Networks.

DESCRIPTION:

In the '136-IV-A Sheet' área, located among the municipalities of Capitanejo, San Miguel, Macaravita (Department of Santander) and Covarachía (Department of Boyacá), outcrop sedimentary rocks from the Cretaceous and Paleogene period, belonging to Tibú-Mercedes, Aguardiente, Capacho, La Luna, Colón-Mito Juan, Barco and Los Cuervos formations, which present levels with low resistance to erosion and weathering. The geomorphological subunits give evidence of the strong structural control, mainly generated by the Chicamocha, Servita faults and faults associated to them, developing an abrupt topography. Therefore the study area show a moderate to high grade of terrain instability, what makes it a region prone to mass movements (MM).

The generation, analysis and integration of 10 different variables, associated with the occurrence of mass removal phenomena, in the geographic information system ArcGIS 10.1, Esri (2012) and the software MATLAB, MathWorks R2017a, allowed to generate the zoning map of susceptibility by landslides of the 136-IV-A Sheet, through the implementation of the artificial neural networks method (ANN). This innovative methodology is the most indicated for this specific project, due to its effectiveness in the analysis and integration of variables associated to the zoning of the susceptibility by mass movements with great reliability.

Low susceptibility prevails in the study area, followed by very low and moderate susceptibility. The least prevalent susceptibility category was very high.

* Bachelor Thesis.

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. Geology School. Director: Diego Gerardo Ibañez. Geologist.

INTRODUCCIÓN

Colombia está constituida por una amplia diversidad geológica, geomorfológica, hidrológica y climática, la cual se expresa en un conjunto de fenómenos que representan una potencial amenaza para el desarrollo social y económico del país. De acuerdo con el SGC (2015)¹ la distribución del nivel de exposición del territorio y de la población a fenómenos como inundaciones, sismos y movimientos en masa, se establece así: el 86% de la población está expuesta a una amenaza sísmica alta y media, el 28% a un alto potencial de inundación y el 31% a una amenaza alta y media por movimientos en masa.

Mediante el establecimiento de la Ley 1523 de 2012 se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres cuyo objetivo es el conocimiento, la reducción del riesgo y el manejo de desastres. Para conocer y mitigar los desastres que se puedan generar por movimientos en masa es indispensable evaluar la susceptibilidad del área en el cual pueden generarse. Esta información permite definir la amenaza y el riesgo de ocurrencia. Acceder a la información del grado de susceptibilidad de movimientos en masa es posible mediante el uso de metodologías que difieren unas de las otras en los insumos, escala de trabajo, y los métodos de análisis, SGC (2015)² e IDEAM (2012)³.

Las RNA al emplear la inteligencia artificial cuenta con un amplio número de aplicaciones que dirigen la identificación, valoración y clasificación de información tal como la identificación de patrones y generación de pronósticos mediante el

¹ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

² *Ibíd.*, p.115.

³ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM), Metodología para la Zonificación de Susceptibilidad General del Terreno a los Movimientos En Masa. 2012, p28.

aprendizaje previo en el que se emula la capacidad del cerebro humano de escoger decisiones. Las RNA son aplicadas en este trabajo de investigación, por su limitada subjetividad y su imparcialidad la convierten en una herramienta imprescindible para realizar la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa teniendo en cuenta eventos registrados anteriormente en un área de trabajo.

Se presenta la susceptibilidad por movimientos en masa en un mapa a escala 1:25.000, del área que corresponde a la Plancha 136-IV-A, en el cual identifica el grado de susceptibilidad y la distribución de la misma.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los movimientos en masa son procesos naturales donde un cuerpo de tierra, suelo, roca, escombros o en general, cualquier material natural o artificial se mueve ladera abajo influenciado principalmente por la fuerza de la gravedad. De acuerdo a Cardozo (2013)⁴ estos procesos suelen generar daños hacia la población civil, infraestructura vial, interconexiones eléctricas y distintas actividades económicas del hombre, así como hacia ecosistemas naturales, dependiendo del área donde se desarrolle el movimiento en masa; para el área de estudio existen distintos tipos de movimientos, tales como: caídas, volcamientos, deslizamientos de roca y suelo, propagación lateral, flujo, reptación, entre otros, que afectan directamente a las comunidades circundantes como se menciona en el EOT de la Alcaldía de Capitanejo (2003)⁵.

Estos movimientos son producto de la interacción entre factores intrínsecos del terreno que caracterizan las unidades geológicas (litología, textura, estructura) que pueden predisponer a una situación de inestabilidad, como también, factores extrínsecos como las precipitaciones, los sismos, los cortes y excavaciones que pueden operar como un factor desencadenante. Para el estudio de estos fenómenos naturales se evalúa inicialmente el grado de susceptibilidad, teniendo en cuenta el análisis de condiciones geológicas, geomorfológicas y ambientales que actúan directamente sobre el terreno y que afectan la estabilidad de las laderas (relieve, litología, condiciones de fracturamiento, red de drenaje, uso del suelo, cobertura de tierras, entre otros). En este sentido Suárez (2009)⁶ argumenta

⁴ CARDOZO, Paola. Zonación de susceptibilidad Por procesos de remoción en masa en la Cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina). Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Córdoba. 2013. P.127.

⁵ ALCALDÍA DE CAPITANEJO. Estudio de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de Capitanejo. Alcaldía municipal de Capitanejo. 2003, Tomo II. p154

⁶ SUAREZ, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.2009, Capítulo 11-13. P.528-587.

que la susceptibilidad es una propiedad espacial teniendo como base las condiciones locales del terreno e indica que tan favorables o desfavorables son las propiedades de éste para que puedan ocurrir movimientos en masa.

Existen diversos métodos que permiten elaborar mapas de susceptibilidad, estos métodos convencionales de acuerdo con Suárez (2009)⁷ y Cardozo (2013)⁸ se dividen en tres tipos: Métodos heurísticos, los cuales se basan en la clasificación de la susceptibilidad de acuerdo al análisis de un experto, tienen una aproximación subjetiva y empírica en la evaluación de la susceptibilidad. Métodos determinísticos, que emplean modelos hidrológicos y geotécnicos para otorgar factores de seguridad a distintos terrenos; este método tiene mayor objetividad pero su escala de trabajo es muy reducida. Finalmente los métodos estadísticos tienen como principio la búsqueda de relaciones entre los factores condicionantes de inestabilidad y la distribución de los movimientos en masa antiguos y recientes de un paisaje, a partir de la combinación estadística de estos elementos se determina la susceptibilidad. Según Carrara et al., (1992)⁹ junto a Ermini et al., (2005)¹⁰ este método añade precisión y confiabilidad, aunque presenta limitaciones prácticas debido a la gran cantidad de datos necesarios para soportar el modelo, por lo que no todos los datos reales se ajustan a los supuestos estadísticos.

Un método relacionado con los métodos estadísticos, pero que soluciona parcialmente sus limitaciones prácticas y teóricas es el de Redes Neuronales Artificiales, el cual según Yegnanarayana (2005)¹¹ simula los procesos neuronales del cerebro humano y consiste en una serie de nodos interconectados, cada uno

⁷ *Ibíd.* p.528-546

⁸ CARDOZO. *Op.Cit.*, p.74

⁹ CARRARA, Alberto. CARDINALI, Mauro. GUZZETTI, Fausto. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk, *ITC Journal*. 1992. 2, p.172–183.

¹⁰ ERMINI, Leonardo. CATANI, Filippo, y CASAGLI, Nicola. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology magazine*. 2005, 16 (66), p.327–343.

¹¹ YEGNANARAYANA, Bayya, *Artificial Neural Networks*, Prentice Hall Of India Limited, New Delhi, 2005. p.479.

como una unidad de procesamiento que recibe la información de los otros nodos y mediante un proceso de análisis de esta información calcula un valor de respuesta. Este proceso se repite modificando los pesos de los datos de entrada, y la subsecuente validación del modelo. Este método iterativo es similar a un proceso de aprendizaje y entrena al sistema para disminuir el error en las predicciones. En el caso de la evaluación de la susceptibilidad, las redes neuronales toman como valor de entrada los atributos del terreno y otorgan como dato de salida la pertenencia de un punto del espacio a una categoría de susceptibilidad, de baja a alta, dependiendo si el terreno es poco o bastante susceptible a desarrollar movimientos en masa. Según Ermini et al., (2005)¹² y Lee et al., (2004)¹³ el empleo de este método genera predicciones más acertadas con menor cantidad de datos. Por este motivo, este método será probado en este trabajo de investigación, de tal forma que nos permita identificar zonas en la Plancha 136-IV-A que presenten una alta tasa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000, a partir del análisis de las variables de geología, geomorfología y unidades geológicas superficiales.

¹² ERMINI. Op. Cit., p.327-344.

¹³ LEE, Saro. RYU, Joo.et al. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. Engineering Geology. 2004, 13 (71), p.289–302.

2. JUSTIFICACIÓN

El relieve colombiano, su geología y su clima tropical generan las condiciones propicias para la ocurrencia de movimientos en masa, por ello se seleccionó un área que cubre la Plancha 136-IV-A, para evaluar la susceptibilidad de estos procesos la cual se encuentra localizada en la Cordillera Oriental, en el departamento de Santander, la cual es caracterizada por un amplio control estructural y procesos erosivos de grado alto. Carece de estudios detallados en los que se determinen las zonas con mayor susceptibilidad a desarrollar estos movimientos lo cual perjudicaría directamente a las comunidades cercanas al área en sus momentos de ocurrencia, siendo así este estudio facilitaría la identificación de zonas de expansión urbana, industrial, infraestructura vial al determinar el grado y la distribución de susceptibilidad en el área de estudio.

Teniendo en cuenta las variables de geología, geomorfología y unidades geológicas superficiales, se pretende generar los respectivos mapas geológico, mapa de movimientos en masa (morfodinámica), mapa de unidades geomorfológicas (morfogénesis), mapa de pendientes (morfometría) y mapa de unidades geológicas superficiales, los cuales se van a integrar, para elaborar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000, en la Plancha 136-IV-A usando el método matemático de Redes Neuronales Artificiales.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa de la Plancha 136-IV-A a escala 1:25.000, a partir de los atributos de geología y geomorfología mediante la aplicación del modelo matemático de Redes Neuronales Artificiales.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Refinar las unidades geológicas a escala 1:25.000, a partir de fotointerpretación, modelo digital del terreno (DEM) y control de campo.
- Elaborar el mapa de subunidades geomorfológicas a escala 1:25.000 del área de estudio.
- Realizar el mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) a escala 1:25.000 del área de estudio
- Caracterizar y clasificar los diferentes procesos morfodinámicos que se presenten en la zona, a partir de reportes del SIMMA, fotointerpretación y control de campo, necesarios para la zonificación de la susceptibilidad a movimiento en masa.
- Generar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, utilizando las variables causales evaluadas para este estudio (geología, geomorfología, procesos) e integrándolos en un modelo matemático de Redes Neuronales Artificiales a escala 1:25.000.

4. METODOLOGÍA

La metodología empleada para el logro de los objetivos antes mencionados abarcó seis fases, durante las cuales se determinaron las fuentes de información, los datos necesarios para generar los insumos del modelamiento, y el análisis de los datos obtenidos en campo, mediante el Sistema de Información Geográfica ARGIS 10.1, Esri (2012)¹⁴. Para la elaboración del modelo de susceptibilidad y la etapa de diseño, entrenamiento y simulación de la red neuronal, se utilizó el Software MATLAB, MathWorks R2017a¹⁵. El flujo de trabajo se aprecia en la **Figura 1**.

Fase I: Recopilación de información bibliográfica. Durante esta fase se realizó una recopilación bibliográfica de artículos académicos relacionados con el objetivo de la investigación, estudios previos, y mapas del área de estudio, (Plancha 136-IV-A), estudios biofísicos y ambientales de la región, utilizando el material disponible en la Universidad Industrial de Santander (Biblioteca, Bases de datos, Mapoteca), en el SICAT del Servicio Geológico Colombiano (SGC), Esquemas de Ordenamiento territorial (EOT), planes de ordenamiento territorial (POT), información suministrada por las alcaldías, corporaciones ambientales e información secundaria.

Fase II: Generación de mapas preliminares. Durante esta fase se procedió a la Interpretación de fotografías aéreas del área de estudio, mapa de pendientes, modelo de sombras, imágenes satelitales Landsat, e imágenes satelitales de Google Earth, con el objetivo de elaborar el mapa preliminar de unidades geomorfológicas, mapa geológico y mapa UGS, de la plancha 136-IV-A, todos

¹⁴ ESRI, ArcGis Version (10.1) [Software]. En: ESRI: Disponible en: <http://www.esri.com/software/arcgis>. 2012.

¹⁵ MATHWORKS. MATLAB (Version R2017a) [Software]. En: MathWorks. Disponible en: <https://www.mathworks.com/company/newsroom/mathworks-R2017a>. 2017.

generados a escala 1:25.000, los cuales se utilizaron durante el trabajo de campo. De igual manera estos mapas se utilizaron como insumos para la identificación de movimientos en masa presentes en el área se estudió.

Fase III: Recolección de datos en campo. Durante esta fase se llevaron a cabo varias estaciones, con el objetivo de reconocer los movimientos en masa, presentes en el área, para lo cual se hizo una descripción detallada de los movimientos en masa, diligenciando el formato para el inventario de movimientos en masa, consignado en SGC (2015)¹⁶. De igual manera se realizó una identificación de unidades geomorfológicas, haciendo uso del formato de recolección de datos de morfometría para Cartografía Geomorfológica, igualmente consignado en SGC (2015)¹⁷ simultáneamente, se llevó a cabo un reconocimiento de las unidades geológicas superficiales, todo lo cual se sustentó con fotografías panorámicas y datos estructurales, lo cual permitió confirmar las unidades geomorfológicas identificadas previamente. Esta fase de campo tuvo una duración de 20 días.

Fase IV: Elaboración de los mapas e insumos finales a utilizar en el análisis de redes neuronales. Durante esta fase se generaron los mapas finales de Morfogenética (GMF ó subunidades geomorfológicas), unidades geológicas superficiales (UGS), y morfodinámica (movimientos en masa) de la plancha 136-IV-A a escala 1:25.000, utilizando el sistema de información geográfica ARGIS 10.1, Esri (2012)¹⁸ a partir de la integración de los datos obtenidos en campo, simultáneamente se elaboraron los mapas de Acuenca, Curvatura, Densidad de fracturamiento, Pendiente y Rugosidad a partir del procesamiento del DEM. Los mapas Suelos y Coberturas de la tierra fueron suministrados por el convenio entre

¹⁶ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015. p.182.

¹⁷ *Ibíd.* p.145.

¹⁸ ESRI, ArcGis Version (10.1) [Software]. Disponible en ESRI: <http://www.esri.com/software/arcgis>. 2012.

el SGC con el grupo de amenazas de la UIS, de donde se hizo un recorte o máscara (mask) del área de estudio, todos estos insumos fueron utilizados en la elaboración del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, utilizando el software MATLAB, MathWorks R2017a¹⁹ licencia proporcionada por la Universidad Industrial de Santander.

Fase V: (Análisis de resultados). Durante esta fase se llevó a cabo el análisis de los insumos generados a escala 1:25.000, los cuales se calificaron de manera cuantitativa a través del sistema de información geográfica ArcGIS 10.1, Esri (2012)²⁰, luego se creó un set de datos para el modelado de la red neuronal artificial, después se programó de la red neuronal artificial usando el software MATLAB, MathWorks R2017a²¹, seguidamente se determinó la mejor red neuronal, luego se realizó la validación de la red neuronal artificial. Finalmente se obtuvo el mapa de zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa de la Plancha 136-IV-A, a escala 1:25.000.

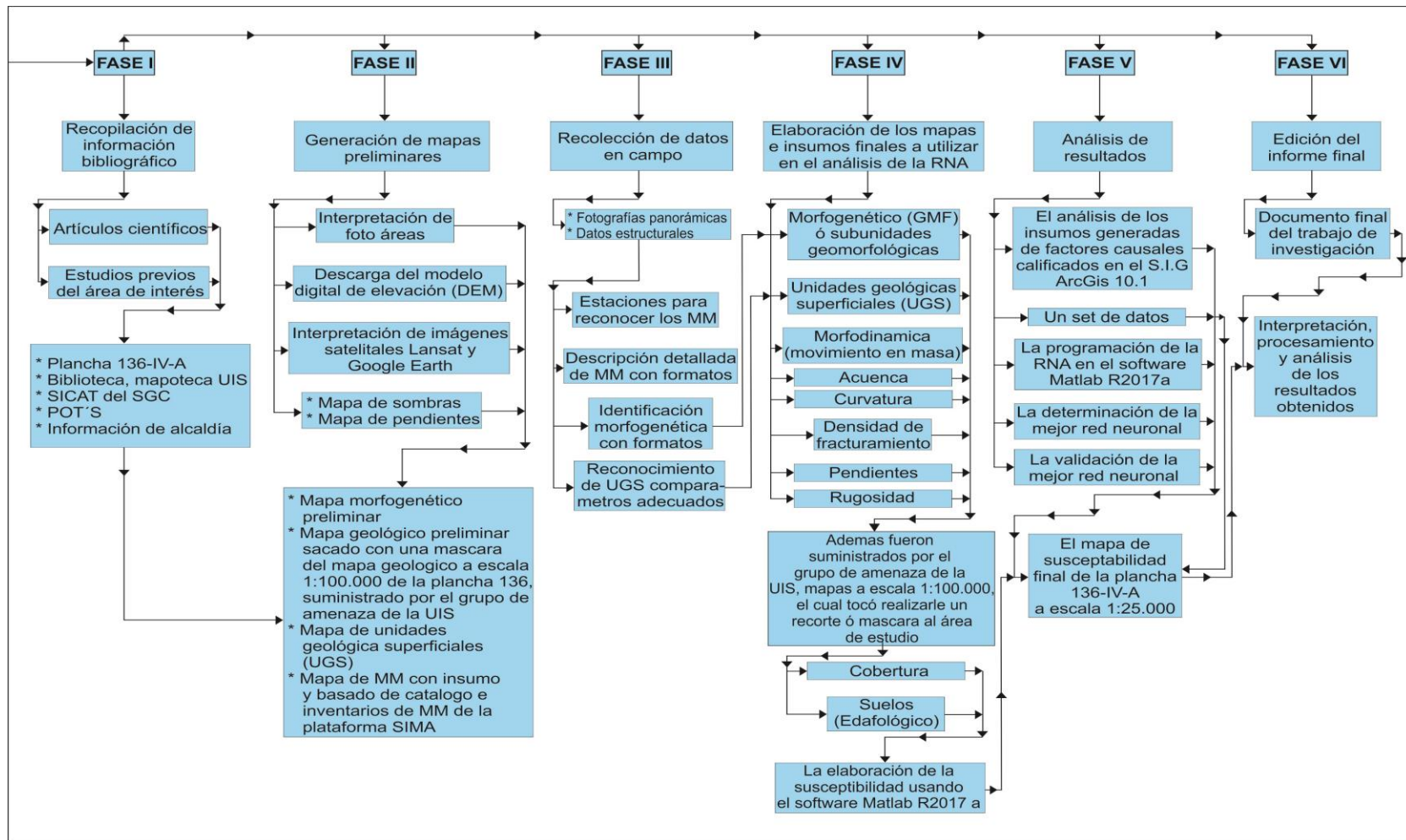
Fase VI: Edición del Informe Final. Durante esta fase se elaboró el documento final del trabajo de investigación, a partir de la interpretación; procesamiento y análisis de los resultados obtenidos, además del desarrollo de un mapa que evidencie los factores determinantes de mayor susceptibilidad por movimientos en masa.

¹⁹ MATHWORKS. MATLAB (Version R2017a) [Software]. Disponible en MathWorks: <https://www.mathworks.com/company/newsroom/mathworks-R2017a>. 2017

²⁰ ESRI, ArcGis Version (10.1) [Software]. Disponible en ESRI: <http://www.esri.com/software/arcgis>. 2012

²¹ MATHWORKS. MATLAB (Version R2017a). Op. Cit.

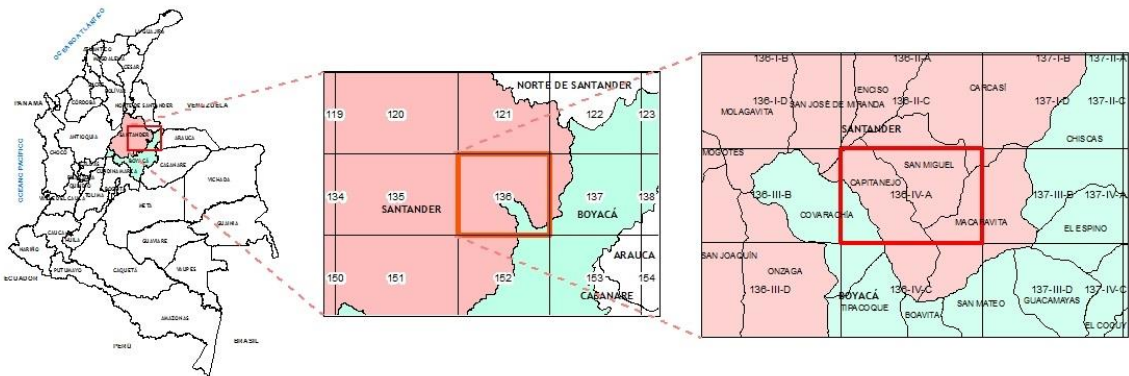
Figura 1. Flujograma metodológico utilizado para el análisis de susceptibilidad por MM a través de Redes Neuronales Artificiales



5. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL AREA DE ESTUDIO

Geográficamente el área de estudio pertenece a la Plancha 136-IV-A del IGAC, como se muestra en la **Figura 2**, comprende los municipios de Macaravita, Capitanejo y San Miguel, en el departamento de Santander; municipio de Covarachía, en el departamento de Boyacá, en el extremo Sureste del Macizo de Santander, Cordillera Oriental.

Figura 2. Localización del área de estudio correspondiente a la plancha 136-IV-A.



La zona comprende desde las coordenadas planas Y (o Norte) 1'210.000 hasta 1'220.000, y X (o Este) desde 1'150.000 hasta 1'167.000. Adoptadas del sistema de proyección Datum Magna Sirgas, origen en la zona Bogotá.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 GEOLOGÍA REGIONAL

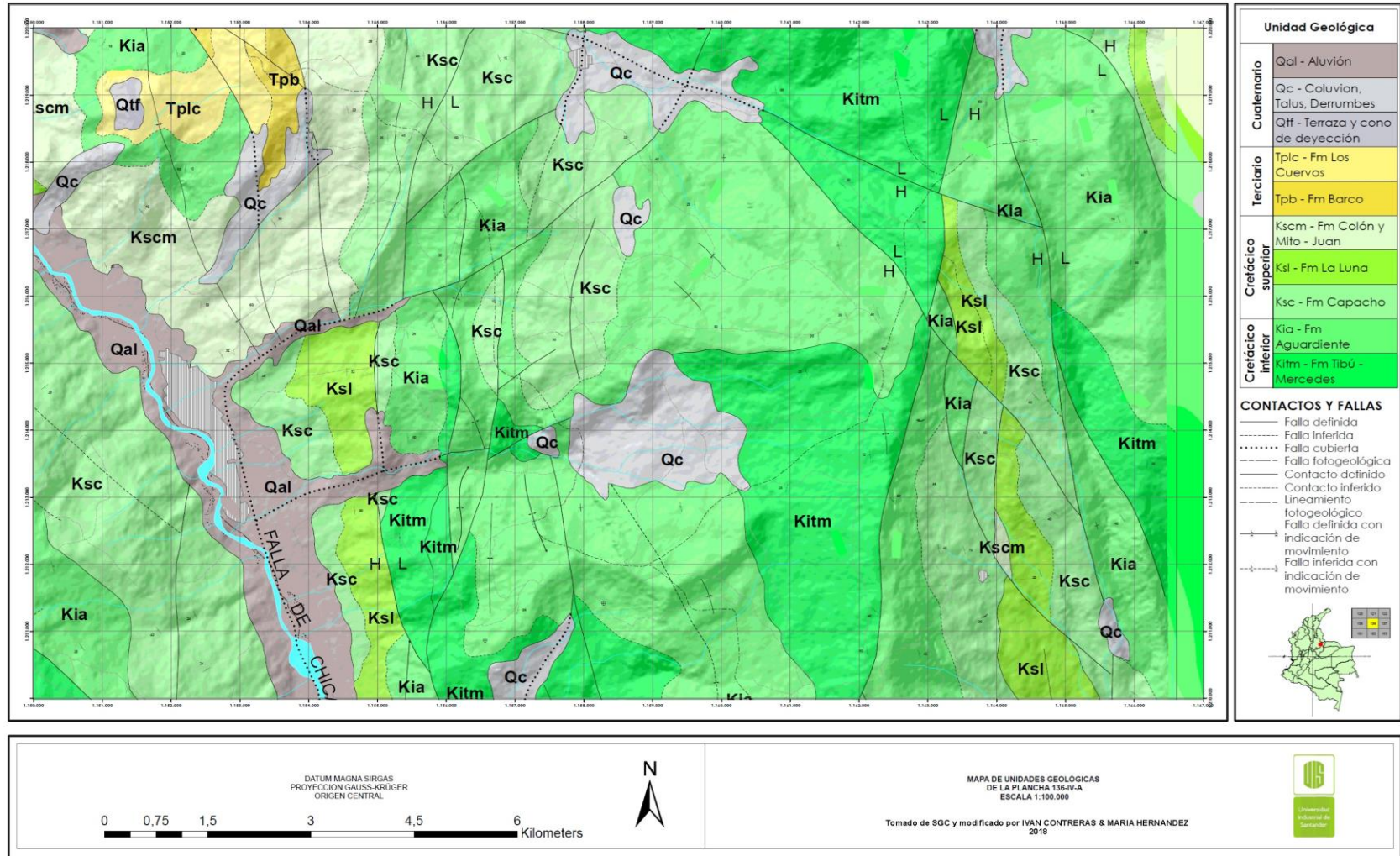
La zona de interés se encuentra en un territorio geológicamente complejo y tectónicamente dinámico que representa una zona de influencia entre los límites de las placas tectónicas del Caribe y la suramericana, conocida como bloque Andes del Norte o bloque Norandino Royero y Clavijo (2001)²²; Kellog (1984)²³. Se caracteriza por presentar tres estilos estructurales: Uno de fallamiento en bloques en la región oriental, otro de fallamiento inverso y plegamiento en la región central, y un tercer estilo representado por el Graben del Magdalena en la región occidental; son regiones bien delimitadas por importantes rasgos tectónicos como los sistemas de fallas de Bucaramanga-Santa Marta y de La Salina.

La Plancha 136-IV-A a escala 1:25.000, está constituida por rocas sedimentarias cretáceas, terciarias y depósitos cuaternarios **Figura 3**.

²² ROYERO, Juan y CLAVIJO, Jairo. Memoria explicativa del mapa geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1:300.000. INGEOMINAS. Bucaramanga, Colombia. 2001.

²³ KELLOGG, N., Cenozoic Tectonic History of the Sierra del Perijá, Venezuela – Colombia, and Adjacent Basins. Geological Society of America, Memoir 162. Boulder, Colorado, USA. 1984, 239 – 261p.

Figura 3. Esquema de la Geología Regional de la Plancha 136-IV-A.



6.2 ESTRATIGRAFÍA

De acuerdo a Vargas et al., (1981) el área que cubre la Plancha 136-IV-A está compuesta por secuencias de sedimentitas, las cuales, en parte, pueden provocar alguna desintegración de los cuerpos rocosos, provocando de este modo remoción en masa. A continuación, en la Figura 4 se hace una descripción de las unidades litoestratigráficas presentes en el área de estudio.

Figura 4. Resumida descripción litoestratigráficas del área de estudio.

Eonotema / Eón Eratema / Era Sistema / Período Serie / Época			UNIDAD LITOESTRATIGRAFICA	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA	
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario	ALUVIONES / COLUVIONES / TERRAZAS	Holoceno	La Unidad Qtf corresponde a Depósitos de terraza y se encuentra compuesta por depósitos no consolidados aluviales en abanicos y terrazas, es considerada de edad Pleistoceno. La Unidad Qc (Depósitos Coluviales), consiste en depósitos aluviales conteniendo fragmentos angulares de roca e incluyen depósitos de talud, derrubios y material de avalancha y la Unidad Qal está conformada por depósitos no consolidados de aluvión, coluvión, derrubios, glaciares, fluvio-glaciares, que son considerados del Holoceno. Royero y Clavijo, (2011).
		Pleistoceno			
	Paleógeno	Paleoceno	FM. CUERVOS	Hacia la parte inferior lodolitas grises, intercalaciones de areniscas, con algunas capas explotables de carbón. A la parte media areniscas cuarzosas, con intercalaciones de lodolitas carbonosas y capas de carbón entre 0,10 y 2,50 m de espesor. En la parte superior presenta lodolitas grises, carbonosas, con intercalaciones de areniscas grises, carbonosas. Descrito por Notestein et al., (1944).	
			FM. BARCO	Esta unidad se compone de areniscas de cuarzo grises, comúnmente con cuarzo, bastante brillante, de grano fino a medio, con estratificación cruzada, localmente arcillosas, alternadas con lodolitas gris oscuras, ligeramente micáceas, carbonosas, con nódulos ferruginosos. Descrito por Notestein et al., (1944).	
	Mesozoico	Cretácico	FM. MITO-JUAN	Lodolitas grises, levemente calcáreas, con nódulos ferruginosos y calizas grises. Presenta capas de lodolitas con intercalaciones de limolitas y capas delgadas de carbón hacia la parte alta. Descrito por Notestein al., (1944).	
			FM. LA LUNA	Calizas gris oscuras, arcillosas, lutitas grises a negras, calcáreas, en capas delgadas, lutitas gris oscuras con delgadas intercalaciones de calizas arcillosas, concreciones de calizas con fósiles, que alcanzan más de dos metros de diámetro y capas delgadas de chert negro y también capas fosfáticas hacia la parte superior. Descrito por Julivert et al., (1968).	
			FM. CAPACHO	Lodolitas negras hacia la parte inferior de la unidad, con intercalaciones de areniscas y calizas grises; Hacia la parte media areniscas grises, calizas gris oscuras, con intercalaciones de lodolitas negras; en la parte superior lodolitas grises con intercalaciones de calizas grises. Descrito por Siever, (1988), redefinida por Sutton (1946), Rod y Maync (1954), Royero y Clavijo, (2001).	
			FM. AGUARDIENTE	Areniscas de cuarzo, grises a gris claras, de grano fino, medio y grueso, glauconíticas, con estratificación cruzada e intercalaciones delgadas de lodolitas grises a negras, carbonosas y micáceas. Descrito por Richards, (1968).	
			FM TIBU-MERCEDES	Alternancia de calizas, lodolitas y areniscas, gris oscuras, fosilíferas, micáceas. Hacia la parte inferior areniscas levemente calcáreas, micáceas e interpuestas por lodolitas grises, con nódulos ferruginosos. Descrito por Notestein et al., (1944).	
			Superior	Inferior	

6.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La zona de estudio que comprende la plancha 136-IV-A, a escala 1:25000 se ubica la Provincia de García Rovira, en la parte oriental del departamento de Santander. Se encuentra ubicada al este del borde oriental del Macizo de Santander. En el borde oriental según Rueda y Tavera (2016)²⁴ aflora el basamento del macizo debido a la erosión de la secuencia mesozoica.

De acuerdo al el EOT de la Alcaldía de Capitanejo (2003)²⁵ esta área presenta un comportamiento estructural dominado por esfuerzos compresivos, en donde el fallamiento inverso, el plegamiento complejo y los anticlinales asimétricos delimitados por sinclinales en ambos flancos, son los rasgos más sobresalientes. Los principales rasgos estructurales que delimitan la plancha 136-IV-A corresponden a la Falla Servitá, la cual se extiende por una longitud aproximada de 65 km. Esta es una falla inversa con dirección predominante norte-sur, con plano de falla inclinado hacia el W. Pone en contacto rocas jurásicas de la Formación Girón al occidente con rocas cretácicas y terciarias al oriente. Según Royero y Clavijo (2001)²⁶ el Sinclinal de Capitanejo, localizado al NW del municipio de Capitanejo, con eje del pliegue en dirección NW – SE, se encuentra desplazado en su parte Norte por un sistema de fallas, asociadas a la Falla Tunebo y hacia el sector central por la Falla Balahula. Litología Terciaria hacia el Norte y Cretácea hacia el Sur y el Sinclinal De Las Juntas, donde el trazo del eje se encuentra localizado al Sur del municipio de Capitanejo con dirección N – S y se encuentra controlado por la falla Suparí en el Norte de la estructura y la falla

²⁴ RUEDA, Adrian y TAVERA, Carlos. Zonificación de la susceptibilidad relativa por movimientos en masa empleando el método matemático de lógica difusa en un área de 150 Km² pertenecientes a la plancha 136-I-B escala 1:25.000. (Trabajo de grado). 2016, p120.

²⁵ ALCALDÍA DE CAPITANEJO. Estudio de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de Capitanejo. Alcaldía municipal de Capitanejo. 2003, Tomo II. p154.

²⁶ ROYERO, Juan y CLAVIJO, Jairo. Memoria explicativa Del mapa Geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1:300.000. INGEOMINAS. Bucaramanga, Colombia. 2001.

Rodeo en el flanco Este, conformado por litología Cretácea esto de acuerdo a Alcaldía Capitanejo (2003)²⁷.

El control estructural de las fallas mencionadas anteriormente se evidencia a través del fracturamiento y diaclasamiento de los macizos rocosos, también influye en la generación de los componentes geomorfológicos que fueron identificados a través de este estudio, relacionados a procesos denudacionales normales, típicos de zonas tropicales caracterizadas por la erosión, depositación y movimientos en masa, originados por influencia esta actividad tectónica sobre las rocas y suelos del área de estudio. Las rocas con matriz de baja resistencia, tienden a ser afectadas por erosión en surcos y cárcavas, lo que conlleva a una caída de material ladera abajo, estos desplazamientos se ven favorecidos por procesos gravitatorios o por su saturación en épocas de lluvia, aumentando así la susceptibilidad por movimientos en masa. Así mismo tanto las sedimentitas como los depósitos del área de estudio presentan un alto grado de fracturamiento debido al sistema de fallas que la atraviesa, este aspecto también disminuye la dureza del material que la conforma favoreciendo la detonación de movimientos en masa en sectores específicos especialmente donde afloran materiales de naturaleza no cohesiva o con un alto grado de meteorización y erosión debido a las condiciones ambientales e hidrometeorológicas en la cual se encuentran expuestas, lo cual genera un grado alto de susceptibilidad de amenaza por movimientos.

6.4 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES (UGS)

Estos materiales corresponden a un conjunto de rocas y suelos cuyas propiedades son diferentes a las iniciales (roca madre), y que se conservan hasta algunos metros de profundidad. Las UGS se utilizan para determinar cuáles son las

²⁷ ALCALDÍA DE CAPITANEJO. Estudio de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de Capitanejo. Alcaldía municipal de Capitanejo. 2003. Op.Cit., p. 154.

condiciones mecánicas de los materiales, dependiendo de cuál vaya a ser su uso o como pueden cambiar sus condiciones dependiendo de las alteraciones de las condiciones físico-mecánicas. Estas formaciones superficiales incluyen rocas con diferentes grados de meteorización, suelos y depósitos inconsolidados según su origen (SGC, 2015)²⁸.

La clasificación de las rocas y suelos como se muestra en la **Tabla 1** se basa en una serie de propiedades físicas identificadas en campo y que permiten delimitar cada uno de los tipos, dentro de las más importantes están: Meteorización, resistencia, deformabilidad, durabilidad, y permeabilidad, entre otros. Para la descripción y caracterización de las unidades geológicas superficiales, se tienen en cuenta cinco parámetros fundamentales: Litología (composición y textura), dureza o resistencia, condición de las discontinuidades, grado de meteorización y rasgos estructurales. Estas características se obtienen mediante la descripción de perfiles de afloramientos rocosos, exploración del subsuelo, muestreo de suelos y rocas, ensayos in situ, como análisis de laboratorio de acuerdo a la escala de trabajo.

²⁸ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

Tabla 1. Clasificación de rocas y suelos.

ORIGEN DE LA UGS	TIPO DE UGS
DERIVADAS DE ROCA IN SITU	1) Roca inalterada.
	2) Saprolito
	3) Suelos residuales
DEPÓSITOS ALUVIALES	1) Aluviones recientes o de lecho de río
	2) Llanuras aluviales
	3) Abanicos o conos aluviales
	4) Terrazas aluviales
	5) Depósitos torrenciales
	6) Depósitos fluviotorrenciales
DEPÓSITOS LACUSTRES Y PALUDALES	1) Depósitos lacustres
DEPÓSITOS DE LADERA, DE VERTIENTE O COLUVIALES	1) Coluviones
	2) Talus
	3) Flujos (de lodo, tierra y de escombros)
	4) Derrubios de pendiente
DEPÓSITOS COSTEROS	1) Deltas, barras, playas, etc.
DEPÓSITOS VOLCÁNICOS	1) Tefras
	2) surges
	3) Flujos piroclásticos
	4) Ignimbritas
	5) Flujos de lodos volcánicos
	6) Lahares
	7) Cenizas
	8) Coladas de lava
DEPÓSITOS EÓLICOS	1) Dunas
	2) Loess
	3) Cenizas volcánicas
DEPÓSITOS GLACIARES	1) Morrenas y Tillitas
	2) Fluvioglaciares
DEPÓSITOS ANTRÓPICOS	1) Rellenos sanitarios o de basuras
	2) Rellenos de excavaciones
	3) Escombreras o botaderos

Fuente: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para estudios de amenazas, vulnerabilidad y riesgos por movimientos en masa del SGC, 2015. 37p.

6.5 CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA

El análisis geomorfológico se hizo partiendo desde observaciones regionales hasta llegar a observaciones locales Carvajal (2008)²⁹ es decir, mediante jerarquización geomorfológica. Para la información capturada a escala 1:25.000 se definen subunidades geomorfológicas, como se observa en la **Figura 5**³⁰.

La clasificación de las unidades geomorfológicas se realizó con la metodología del sistema ITC de Holanda modificada por Carvajal (2008)³¹ y aplicada por el Servicio Geológico Colombiano, en sus proyectos de evaluación de amenazas geológicas. Para tal efecto, se han tenido en cuenta parámetros básicos, como la morfogénesis, morfometría, morfología y morfodinámica. En el análisis geomorfológico de la Plancha 136 – IV – A, se adoptó la jerarquización geomorfológica propuesta por Carvajal (2008)³², que relaciona todas las escalas de trabajo, con los diferentes niveles de detalle de estudio. Las categorías definidas de escala mayor a menor se muestran en la **Figura 5**.

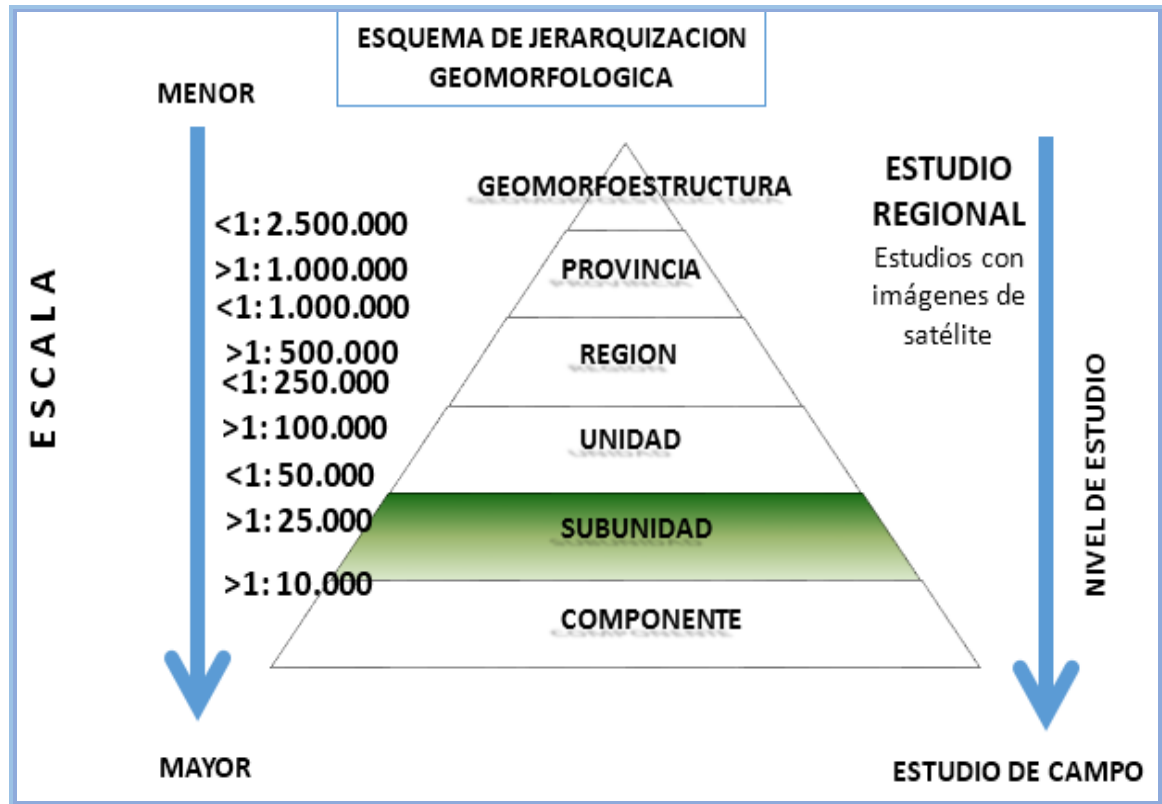
²⁹ CARVAJAL, Henry. Primeras aproximaciones a la estandarización de la geomorfología en Colombia. Documento INGEOMINAS. Bogotá D.C. 2008. p.30.

³⁰ *Ibíd.*, p. 24.

³¹ *Ibíd.*, p. 22.

³² *Ibíd.*, p. 20-30.

Figura 5. Esquema de jerarquización geomorfológica.



Fuente: CARVAJAL, H. Primeras aproximaciones a la estandarización de la geomorfología en Colombia. Documento INGEOMINAS, Bogotá. 2008. p. 30.

Se fundamenta el análisis básicamente en la génesis geológica de las geoformas individuales genéticamente homogéneas y ambiente morfodinámico dominante, formadas en un ambiente geomorfológico particular. En el área de estudio se observan los siguientes ambientes geomorfológicos:

- Ambiente morfogenético: Agrupa condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las cuales se formaron las geoformas. Se determina con base en la expresión e interpretación de los procesos geomorfológicos registrados en el terreno, que dieron lugar a la formación, evolución y modificación de las

geoformas. Los ambientes morfogenéticos presentes en la Plancha 136-IV-A son:

- Ambiente morfoestructural: corresponde a las geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra, especialmente las asociadas a plegamientos y fallamientos. Incluye el ambiente neotectónico (Geoformas originadas por la actividad tectónica activa y que se ha prolongado durante el Cuaternario).
- Ambiente denudacional: determinado por la actividad de procesos de meteorización, y predominantemente de procesos erosivos hídricos y de fenómenos de transposición o de remoción en masa actuantes sobre geoformas pre-existentes.
- Ambiente fluvial: corresponde a las geoformas generadas por los procesos relacionados con la actividad fluvial.

Los parámetros principales evaluados en la estandarización de los elementos componentes del terreno Carvajal (2008)³³ se describen a continuación, ya que son necesarios para la recolección de datos para cartografía geomorfológica y se encuentran definidos en Leiva et al., (2012)³⁴:

- Contraste de relieve o relieve relativo: [índice de relieve] Hace referencia a la diferencia de altitud de la geoforma entre la parte más alta y más baja de ésta, independiente de la altura absoluta o el nivel del mar. Es un atributo que indica la energía potencial de un sistema de drenaje y los materiales constitutivos de la geoforma.

³³ Ibíd. 20

³⁴ LEIVA, Omar Yesid, et, al. Metodológica Sistemática para La Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados a La Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:100.000. Ministerio de Minas y Energía; Servicio Geológico Colombiano, 2012. p. 88.

- Inclinación de la ladera: Es el ángulo que forma una ladera o terreno respecto a un plano horizontal. La inclinación de la ladera está relacionada con el tipo de material que conforma la unidad morfológica y con la susceptibilidad de dicha unidad a la formación de movimientos en masa.
- Longitud de la ladera: Es un indicador de la homogeneidad del material constitutivo de las geoformas; puede determinar una mayor superficie para el desarrollo de los procesos morfodinámicos.
- Forma de la ladera: Refleja la homogeneidad en la resistencia de los materiales, y la presencia o control de estructuras geológicas. También condiciona los tipos de movimientos en masa que pueden desarrollarse en una ladera. Es común relacionar movimientos rotacionales a pendientes cóncavas y convexas y movimientos planares a pendientes rectas controladas estructuralmente o movimientos complejos a pendientes irregulares.
- Patrón de drenaje: Es la distribución de todos los canales de drenajes superficiales en un área que esté ocupada o no por aguas permanentes. El patrón de drenaje está controlado por la inclinación del terreno, tipo y estructura geológica de la roca subyacente, densidad de vegetación y las condiciones climáticas.
- Morfogénesis: Implica la definición del origen de las formas del terreno, es decir, las causas y procesos que dieron la forma al paisaje. El origen del paisaje depende de los procesos endogenéticos y la modificación de los agentes exogenéticos (agua, viento, hielo), que actúan sobre la superficie terrestre en diferentes proporciones e intensidades, y durante intervalos de tiempos geológicos, modelando el terreno.

- **Morfoestructura y Litología:** Indica el modelaje del relieve, según composición, disposición y dinámica interna de la tierra. La morfoestructura incide en el modelaje del paisaje según: Condición pasiva que analiza las formas resultantes de los procesos o deformaciones tectónicas (activas o inactivas) expresadas en el relieve de la superficie terrestre, con dimensiones y configuraciones variables; y la condición activa que corresponde a los procesos morfogenéticos endógenos asociados tanto a la deformación y al fracturamiento tectónica.
- **Morfodinámica:** La morfodinámica es la parte de la geomorfología que trata de los procesos geodinámicos externos (principalmente denudativos), tanto antiguos como recientes que han modelado y continúan modelando el relieve y son los responsables del estado actual de las geoformas o Unidades de terreno.

6.6 CARTOGRAFÍA DE UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES (UGS)

Los mapas con información geológica constituyen un insumo básico para cualquier análisis y zonificación de amenaza por movimientos en masa. Dependiendo de la escala de trabajo, la información geológica disponible es interpretada en términos de sus características ingenieriles y complementada con trabajos de fotointerpretación, levantamientos de campo e incluso ensayos de laboratorio, con el fin de obtener información sobre la composición, disposición y comportamiento esperado de los materiales geológicos.

A escala nacional es suficiente con adaptar a una clasificación ingenieril las leyendas geológicas de mapas existentes (escala < 1:100.000) y usar las divisiones del territorio definidas a nivel de formaciones geológicas. Sin embargo, a escalas más detalladas (> 1:25.000) es necesaria la elaboración de mapas de

geología para ingeniería que contengan información sobre la litología de los materiales presentes (rocas o suelos), su origen, disposición estructural, características físicas y mecánicas, características hidrológicas e hidrogeológicas, entre otros. Naturalmente, la base para la elaboración de estos mapas son los mapas geológicos de carácter oficial. Al igual que con la geomorfología, las unidades geológicas de superficie son uno de los factores condicionantes más importantes en la inestabilidad de las laderas, por lo que es necesario obtener y mapear datos relacionados con sus características. Para la escala de trabajo y metodología propuesta en este documento, se requiere de la elaboración de un Mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS), cuyos datos serán utilizados directamente como un factor condicionante en el análisis y zonificación de amenaza por movimientos en masa. Cada UGS se considera como el resultado de una serie de procesos tanto exógenos como endógenos que modelan la superficie terrestre y le confieren al terreno una serie de propiedades que la hacen más o menos susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa. La geología superficial se refiere al material expuesto en la superficie del terreno, el cual puede corresponder a suelos o rocas, clasificados así desde el punto de vista ingenieril.

De acuerdo con Carvajal et al., (2004)³⁵ las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) corresponden a un conjunto (homogéneo) de materiales geológicos que afloran en la superficie, que provienen del mismo origen y conservan en general las mismas características físicas y de comportamiento geomecánico, hasta algunas decenas de metros por debajo de la superficie del terreno). En estos mapas se clasifican los materiales superficiales en suelos y rocas; las UGS incluyen los diferentes tipos de rocas clasificadas según su origen y composición mineralógica, grado de meteorización o alteración, dureza o resistencia e índice de resistencia geológica (GSI), así como, los suelos diferenciados de acuerdo con su origen, composición mineralógica, clasificación genética, características y

³⁵ CARVAJAL, Henry, et al. Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geomorfológica para la Zonificación Geomecánica. Servicio Geológico Colombia. 2004. V 1, p.92

propiedades del suelo, estructura o empaquetamiento, selección, gradación, color, tamaño, forma y composición de las partículas, grado de meteorización, consistencia, resistencia, condición de humedad, densidad relativa, compacidad, propiedades de la masa del suelo, estructuras relictas o discontinuidades en la masa de suelo y propiedades ingenieriles.

Se diferenciaron los siguientes tipos de macizos rocosos de acuerdo a la naturaleza de material, grado de meteorización, estado de las discontinuidades y parámetros ingenieriles de clasificación de macizos: roca intermedia, blanda y muy blanda. También se diferenciaron algunas categorías de suelo de acuerdo con su origen, entre los que están: residuales, transportados y antrópicos.

*Factores considerados para caracterizar las unidades de roca: La clasificación de rocas y suelos se realiza a partir de propiedades geomecánicas de los materiales en su estado actual, el cual involucra factores como el origen, la diagénesis, la historia tectónica, el metamorfismo y los procesos de meteorización. Las unidades geológicas superficiales son vistas en campo gracias a los parámetros fundamentales de litología (composición y textura), dureza o resistencia, condición de las discontinuidades, grado de meteorización y rasgos estructurales; permitiendo su caracterización.

*Litología: Se incluye en la definición de este parámetro las características de textura y estructura; como la distribución del tamaño de las partículas, su correlación con el peso unitario y la porosidad. Así como el contenido de humedad, humedad de saturación, consistencia, diaclasamiento, alteración y grado de meteorización. Así mismo, composición mineralógica y el índice de plasticidad.

*Grado de meteorización: La formación de suelos residuales se debe principalmente al grado de descomposición física y química in situ de los

materiales y generación del saprolito, a su vez afecta algunas propiedades geomecánicas como la densidad, esfuerzo a la compresión inconfina, esfuerzo a la tensión inconfina, porosidad, permeabilidad, deformabilidad y consistencia.

Para definir el grado de meteorización de las rocas se utilizaron los perfiles generalizados por diferentes autores citados en SGC (2017)³⁶ **Tabla 2.**

³⁶ SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Guía metodológica para para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. 2017. p.288.

Tabla 2. Comparación de Perfiles de Meteorización de un macizo rocoso según distintos autores citados en SGC, (2017).

DEERE Y PATTON (1971) (TODAS LAS ROCAS) ZONA		DEARMAN (1974-1991) (TODAS LAS ROCAS)			FORERO ET AL, (1999) (TODAS LAS ROCAS)	DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CAMPO
		ZONA	GRADO	UNIDAD		
I-SUELO RESIDUAL	IA. HORIZONTE A (Capa vegetal)	SUELO RESIDUAL (Sr)	VI	SUELO	SUELO RESIDUAL TROPICAL (SUELO IN SITU) >50% Suelo	<ul style="list-style-type: none"> Las capas superiores, ricas en materia orgánica, contienen humus y restos de raíces de plantas; generalmente de color gris oscuro. Todo el material rocoso es convertido a suelo. La macro fábrica y la estructura original es destruida. Característicamente arcillo-limoso. Suelo sin estructuras heredadas.
	IB. HORIZONTE B					
	IC. HORIZONTE C (SAPROFITO) (Roca descompuesta)	ROCA COMPLETAMENTE METEORIZADA (Rpm)	V	SAPROLITO FINO	SAPROLITO	
II-ROCA METEORIZADA	IA TRANSICIÓN DESDE SAPROLITO HASTA ROCA METEORIZADA	ROCA ALTAMENTE METEORIZADA (Ram)	IV	SAPROLITO GRUESO		MACIZO ROCOSO METEORIZADO >50% Roca
	IIB ROCA PARCIALMENTE METEORIZADA	ROCA MODERADAMENTE METEORIZADA (Rmm)	III	ROCA Y SUELO - MATERIAL INTERMEDIO	<ul style="list-style-type: none"> La roca se presenta altamente decolorada con notable meteorización, en la cual menos del 50% del material rocoso está descompuesto o desintegrado a suelo. Material rocoso rompible y excavable con ayuda del martillo y otras herramientas. Las discontinuidades pueden estar oxidadas y abiertas, con o sin relleno. Bloques de roca sin entramamiento. 	
III-ROCA NO METEORIZADA	III ROCA FRESCA	ROCA DÉBILMENTE METEORIZADA (Rdm)	II	ROCA	MACIZO ROCOSO NO METEORIZADO	<ul style="list-style-type: none"> Macizo rocoso débilmente decolorado. La roca puede estar decolorada en las superficies de las discontinuidades, las cuales pueden estar abiertas y oxidadas; la roca es dura resistente, excavable con ayuda de otras herramientas. Bloques de roca sin entramamiento.
		ROCA NO METEORIZADA (FRESCA) (Rf)	I			<ul style="list-style-type: none"> Roca fresca sin signos visibles de meteorización. Las discontinuidades mayores pueden presentar ocasionalmente decoloración y oxidación. +C1:19

Fuente: SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía metodológica para para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. 2017. 288 p.

*Resistencia: Según el ISRM (1981)³⁷ visto en SGC (2017)³⁸ la resistencia de la matriz rocosa puede ser estimada en el afloramiento mediante índices decampo o a partir de correlaciones con datos proporcionados por sencillos ensayos de campo, como el ensayo de carga puntual (PLT: Point Load Test) o el martillo Schmidt. Los índices de campo permiten una estimación del rango de resistencia de la roca. Los criterios para su identificación aparecen descritos en la **Tabla 3** y deben ser aplicados sobre la roca una vez removida la capa de alteración superficial.

Tabla 3. Resistencia del macizo rocoso.

CLASE	DESCRIPCIÓN	IDENTIFICACIÓN EN CAMPO	APROXIMACIÓN AL RANGO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)
S1	Suelo muy blando	El puño penetra fácilmente varios cm	< 0,0025
S2	Suelo blando	El dedo penetra fácilmente varios cm	0,0025 – 0,05
S3	Suelo firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo	0,05 – 0,10
S4	Suelo rígido	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo	0,10 – 0,25
S5	Suelo muy rígido	Con cierta presión puede marcarse con la uña	0,25 – 0,50
S6	Suelo duro	Se marca con dificultad al presionar con la uña	> 0,50
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña	0,25 – 1
R1	Roca muy blanda	Al golpear con la punta del martillo la roca se desmenuza. Con navaja se talla fácilmente	1 – 5
R2	Roca blanda	Al golpear con la punta del martillo se producen ligeras marcas. Con navaja se talla con dificultad	5 – 25
R3	Roca moderadamente dura	Con un golpe fuerte del martillo puede fracturarse. Con la navaja no puede tallarse	25 – 50
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe del martillo para fracturarla	50 – 100
R5	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes del martillo para fracturarla	100 – 250
R6	Roca extremadamente dura	Al golpear con el martillo sólo saltan esquirlas	> 250

Fuente: SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía metodológica para para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. 2017. p. 156.

³⁷ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales. 2015. p.182.

³⁸ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía metodológica para para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. 2017. p.288.

*Grado de fracturamiento o discontinuidades: Se definen como planos o fracturas de origen mecánico o sedimentario que independizan o separan bloques de roca. En la **Tabla 4** se muestra la condición y espaciamiento de las discontinuidades. En la **Tabla 4** la clasificación del índice de fracturamiento (J_v), es tomada en cuenta en el estudio de las discontinuidades.

*Índice de fracturamiento (J_v): Mide la intensidad de fracturamiento de un macizo rocoso y se define como la sumatoria del número de discontinuidades por familia, encontrados por metro cúbico, en un afloramiento. En forma práctica, para calcular este valor, se suman las discontinuidades de la misma familia, encontradas en un tramo o longitud que puede variar entre 5 y 10 m, medido en forma perpendicular a la dirección de cada familia; el valor obtenido permite estimar el tamaño de los bloques **Tabla 4**.

Fórmula 1. Índice de fracturamiento

$$J_v = \sum (\text{Numero de discontinuidades por familia/longitud (m)})$$

Fuente: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (2013). Zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de caqueza. 611p.

Tabla 4. Descripción del tamaño del bloque en función del número de discontinuidades.

Clase	Descripción	J_v (discontinuidades / m ³)
I	Bloques muy grandes	< 1
II	Bloques grandes	1 – 3
III	Bloques medianos	3 – 10
IV	Bloques pequeños	10 – 30
V	Bloques muy pequeños	> 30
VI	Macizo brechificado	> 60

Fuente: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de caqueza. 2013. 611p.

Teniendo en cuenta las correlaciones de campo, se determinaron rangos de calidad del macizo rocoso de acuerdo con el Índice de Fracturamiento – Jv, y según la **Tabla 5**.

Tabla 5. Esta tabla fue construida para esquematizar las diferentes calidades del macizo rocoso en concordancia con sus índices de fracturamiento en base a la ecuación RQD de la fuente.

Tipo de Roca	Calidad	Jv	Jv
Roca Muy Dura	Muy buena	Jv	<1 Fr/m ³
Roca Dura	Buena	Jv	1 – 3 Fr/m ³
Roca Intermedia	Regular	Jv	4 – 30 Fr/m ³
Roca Blanda	Mala	Jv	31 – 60 Fr/m ³
Roca Muy Blanda	Muy mala	Jv	> 61 Fr/m ³

Fuente: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de caqueza. 2013. 611p.

*Densidad de fracturamiento o índice (R.Q.D.): El parámetro RQD (Rock Quality Designation) permite estimar el grado de fracturamiento del macizo rocoso por unidad de volumen (Formula 1) a partir de testigos de perforación. En la práctica el RQD se calcula mediante la relación entre la sumatoria de las longitudes de los fragmentos de un testigo de perforación, mayor de 10 cm y la longitud total del testigo obtenido, no excediendo 1,5 m de longitud; el valor obtenido, se ubica dentro de los rangos de porcentaje de RQD que permite determinar la calidad del macizo (**Tabla 6**).

Fórmula 2. Cálculo del grado de fracturamiento del macizo rocoso (RQD) (Rock Quality Designation)

$$\text{RQD} = (\sum \text{longitudes de trozos} > 10 \text{ cm} / \text{longitud total}) \times 100 (\%).$$

Fuente: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, (2013). Zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de caqueza. 611p.

Tabla 6. Esta tabla fue construida para esquematizar los rangos RQD en la clasificación de la calidad del macizo rocoso.




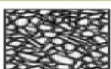

Caridad del macizo	Valor RQD (%)
Muy buena	91 – 100
Buena	76 – 90
Media	51 – 75
Mala	26 – 50
Muy mala	<25

Fuente: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de caqueza. 2013. 611p.

*Índice de Resistencia Geológica (GSI): La caracterización del macizo rocoso con el GSI es simple y está basada en la impresión visual de la estructura rocosa, en términos de bloques y de la condición superficial de las discontinuidades indicadas por la rugosidad y alteración de las diaclasas. El GSI proporciona un sistema para estimar la disminución de la resistencia que presenta un macizo rocoso con diferentes condiciones geológicas. Esta clasificación se basa en la observación detallada del macizo rocoso y, por consiguiente, es esencialmente cualitativa. En la **Figura 6** se presenta el factor GSI para clasificar macizos rocosos homogéneos y en la **Figura 7** para macizos rocosos heterogéneos con intercalaciones tipo Flysch, en las que se ingresa desde 2 puntos diferentes, uno horizontal: referente al tamaño y entranamiento de bloques, composición y

estructura; el ingreso vertical es referente a las condiciones de las discontinuidades, se converge posteriormente en el valor del GSI dispuesto en las líneas diagonales. La determinación del GSI permite calificar el macizo rocoso entre 0 y 100, dependiendo de la variación del entranamiento y la calidad de la roca en la superficie. En la **Tabla 7** se presentan los rangos de clasificación del macizo rocoso según el GSI.

Figura 6. Índice de Resistencia Geológica Para Rocas Desclasadas (GSI) para la clasificación de macizos rocosos homogéneos.

ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA PARA ROCAS DIACLASADAS (Hoek y Marinos, 2000) A partir de la litología, la estructura y las condiciones superficiales de las discontinuidades, se debe estimar el valor promedio de GSI. No intentar ser tan preciso. Considerar un rango de 33 a 37 es más realista que indicar un GSI=35. Nótese que la tabla no aplica para fracturas controladas estructuralmente. Donde existen planos estructurales débiles con una orientación desfavorable con respecto a la superficie de la excavación, estos controlarán el comportamiento de todo el macizo rocoso. La resistencia al corte de superficies en rocas que están propensas a deteriorarse como resultados de cambios de humedad, se reducirá si hay agua presente. Cuando se trabaja con rocas en las categorías regular a muy pobre, puede hacerse un movimiento hacia la derecha para condiciones húmedas. La presión del agua es considerada mediante análisis de esfuerzos efectivos.		CONDICIONES DE SUPERFICIE DE LAS DISCONTINUIDADES				
ESTRUCTURA		DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE				
		Muy buena: Superficies muy rugosas inalteradas.	Buena: Superficies rugosas ligeramente alteradas con manchas de oxidación.	Regular: Superficies suaves, alteradas a moderadamente alteradas.	Pobre: Superficies rugosas pulidas, altamente alteradas, con rellenos compactos o fragmentos angulares.	Muy pobre: Superficies pulidas, altamente alteradas con rellenos arcillosos blandos.
	Masiva o intacta: Muestras de roca intacta o masiva <i>in situ</i> , con pocas discontinuidades espaciadas ampliamente.	90			N/A	N/A
	Blocosa: Macizo rocoso sin alterar, bien entabado que consiste en bloques cúbicos formados por tres familias de discontinuidades intersecadas.	80	70			
	Muy blocosa: Macizo parcialmente alterado, entabado, con bloques de varias caras angulares formados por cuatro o más familias de discontinuidades.		60	50		
	Blocosa / Alterada: Plegado, con bloques angulares formados por muchas intersecciones de familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación o esquistosidad.			40		
	Desintegrada: Macizo rocoso muy fracturado, pobremente entabado, con mezclas de fragmentos de roca angulares y redondeados.				30	
	Laminada / Cizallada: Ausencia de bloques debido a espacios cerrados de tenue esquistosidad o planos de cizalla.					20
		N/A	N/A			10

Fuente: SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía metodológica para para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. 2017. 288 p.

Tabla 7. Rangos de clasificación de macizo según el geological strenght index for jointed rocks.

CALIDAD DE MACIZO	CLASE O TIPO DE MACIZO	RANGO GSI
Muy mala	VIII - IX	0 - 20
Mala	VI - VII	20 - 40
Regular	IV - V	40 - 60
Buena	II - III	60 - 80
Muy buena	I	80 - 100

Fuente: SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía metodológica para para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. 2017. 288 p.

Clasificación del macizo rocoso – RMR (Rock Mass Rating): El índice RMR representa un sistema de clasificación de macizos rocosos que correlaciona la calidad de roca con parámetros de diseño y sostenimiento de túneles como lo representa la **Tabla 8**. Se basa en la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso, densidad de fracturamiento (RQD), espaciamiento entre discontinuidades, condición de las discontinuidades, condiciones hidrogeológicas y orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

En este sistema se califica cada factor mencionado de acuerdo con la **Tabla 9** asignándole un valor y al final se realiza una sumatoria, obteniéndose un número que corresponde a la calidad del macizo rocoso (SGC 2013)³⁹.

³⁹ SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de caqueza – CUNDINAMARCA. 2013. p.611.

Tabla 8. Correlación de los parámetros de calificación de las discontinuidades comúnmente utilizados para clasificar la calidad de los macizos rocosos.

RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA (Mpa)	RQD (CALIDAD)	ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES (mm-m)	CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES	AGUA SUBTERRANEA (Lit/Min)	CLASES RMR
1-25 (0-2)	<25 Muy Mala (3)	<60 mm (5)	Relleno blando > 5mm (0)	Flujo (0)	ROCA MUY POBRE <20
25-50 (4)	25-50 Mala (8)	60-200 mm (8)	Superficies pulidas, gouge <5mm (10)	Goteo (4)	ROCA POBRE (21-40)
50-100 (7)	50-75 Media (13)	200-600 mm (10)	Superficie Lig rugosa altamente meteorizada, separacion <1 mm (20)	Mojado (7)	REGULAR (41-60)
100-250 (12)	75-90 Buena (17)	0.6 m-2 m (15)	Superficie Lig rugosa Lig meteorizada, separacion <1 mm (25)	Húmedo (10)	BUENA (61-80)
>250 (15)	90-100 Muy Buena (20)	>2 m (20)	Superficie Muy rugosa, no continua, cerradas, No meteorizada (30)	Seco (15)	MUY BUENA (81-100)

Fuente: SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO (2017). Guía metodológica para para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. 2017. 288 p.

Tabla 9. Tabla modificada que relaciona el tipo de macizo rocoso con sus parámetros relacionados con la clasificación de UGS y su calidad.

TIPO DE MACIZO	NUMERO DE FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES	DESCRIPCION DEL TAMAÑO DE BLOQUE	GSI (%)	Jv N° Discont/m³	RQD	RMR	CLASIFICACIÓN UGS – INGEOMINAS
VIII – IX	<i>Cuatro o más familias de discontinuidades o Brechificado</i>	BLOQUES MUY PEQUEÑOS	0 – 15	>60	<25	<20	ROCA MUY BLANDA
VI – VII	<i>Tres familias de discontinuidades más otras ocasionales</i>	BLOQUES PEQUEÑOS	15 – 30	30 – 60	25 – 50	21 – 40	ROCA BLANDA
IV – V	<i>Dos familias de discontinuidades más otras ocasionales</i>	BLOQUES MEDIANOS	30 – 60	3 – 30	50 – 75	41 – 60	ROCA INTERMEDIA
II – III	<i>una familia de discontinuidades más otras ocasionales</i>	BLOQUES GRANDES	60 – 80	1 – 3	75 – 90	60 – 81	ROCA DURA
I	<i>Masivo, discontinuidades ocasionales</i>	BLOQUES MUY GRANDES	80 – 100	<1	90 – 100	81 – 100	ROCA MUY DURA

Fuente: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de Caqueza. 2013. 611p.

6.7 MOVIMIENTOS EN MASA

Para Cruden y Varnes (1996)⁴⁰ el término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad, algunos movimientos en masa, como la reptación de suelos, son lentos, a veces imperceptibles y difusos, en tanto que otros, como algunos deslizamientos pueden desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites claros, determinados por superficies de rotura.

6.7.1 Susceptibilidad a Movimientos en Masa. La ocurrencia de movimientos de masa está regida por la interacción de diversos factores propios de las laderas y de su entorno, como son las condiciones geomorfológicas, litológicas, estructurales y climatológicas.





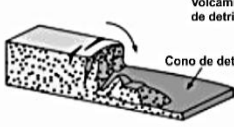


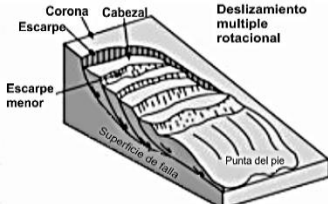
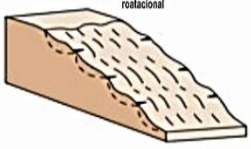




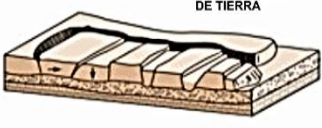
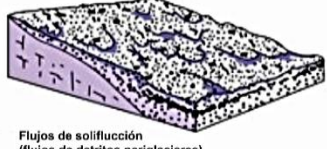
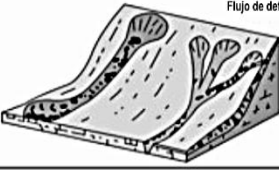
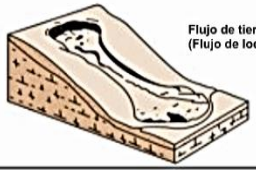


Ante cualquier evento natural la zonificación de la susceptibilidad es una herramienta útil en los procesos de planificación. El uso de las zonificaciones de diferentes aspectos de la superficie terrestre se ha extendido en diferentes campos de investigación, situación que se ha dado en gran medida por el desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG).

6.7.2 Tipos de movimientos en masa. Los principales tipos de movimientos en masa según la clasificación realizada por Cruden y Varnes (1978)⁴¹, se puede observar en la Figura 8.

⁴⁰ CRUDEN, D., VARNES, D. Landslide Types and Processes, Special Report. Transportation Research Board, National Academy of Sciences. 1996, p.40-247.

⁴¹ *Ibíd.*, p.49-227.

Figura 8. Principales tipos de movimientos en masa.

Material		Roca	Detritos	Tierra
Movimiento tipo				
Caidas		 <p>Caida de roca</p>	 <p>Caida de detritos</p>	 <p>Caida de tierra</p>
	volcamiento	 <p>Roca volcada</p>	 <p>Volcamiento de detritos</p>	 <p>Volcamiento de tierra</p>
Deslizamientos	Rotacionales	 <p>Deslizamiento rotacional simple (depression)</p>	 <p>Deslizamiento múltiple rotacional</p>	 <p>Sucesivos deslizamientos rotacional</p>
	Translacional Planar	 <p>Deslizamiento rocoso</p>	 <p>Deslizamiento de detritos</p>	 <p>Deslizamiento de tierra</p>
Extension	 <p>Pendiente o inclinación arqueada</p> <p>PROPAGACION DE TIERRA</p>			
Flujo	 <p>Flujos de soliflucción (flujos de detritos periglaciares)</p>	 <p>Flujo de detritos</p>		 <p>Flujo de tierra (Flujo de lodo)</p>
Complejo	 <p>P.ej. Depression, caída de colada de tierra o deslizamiento complejo</p>		 <p>p.ej. compuesto, no circular parte rotacional/parte translacional clasificado como deslizamiento de colada de barro al pie o punta del flujo</p>	

Special Report, I transportation Research Board, National Academy of Sciences, 247. 1996. 40p.

6.7.2.1 Deslizamientos. El movimiento en el cual gira el estudio, y consiste en el desplazamiento de material rocoso deformado por cizalla a lo largo de una o varias superficies que son visibles o pueden ser fácilmente inferidas, o dentro de una zona parcialmente estrecha.

Varnes (1978)⁴² clasifica los deslizamientos como rotacionales o traslacionales definiéndolos de acuerdo a la superficie de falla por donde se desplazan los cuerpos rocosos. Para Alcántara (2000)⁴³ los deslizamientos rotacionales son aquellos en donde los bloques ubicados en la parte superior se inclinan hacia atrás, el escarpe principal regularmente es vertical, la masa desplazada se acumula ladera abajo y su deformación interna es de muy bajo grado. Las superficies de ruptura son curvas, cóncavas, o en forma de cuchara. Con base en las etapas del movimiento, los deslizamientos rotacionales los clasifica en simples, múltiples y sucesivos. Según Alcántara (2000)⁴⁴ los deslizamientos traslacionales, son menos profundos que los rotacionales e involucran un movimiento paralelo a la superficie, el cual está en gran medida controlado por superficies de debilidad de los materiales formadores. Las superficies de ruptura son semiplanas u onduladas. Se subdivide en deslizamientos de roca en bloque (block slide), deslizamientos de derrubio en bloque (block slide) y deslizamientos traslacionales de suelos (Slab slide)". Alcántara (2000)⁴⁵ menciona también un tercer tipo de deslizamiento, definido por superficies de ruptura planas, llamados deslizamientos planos. Para Alcántara (2000)⁴⁶, estos deslizamientos se clasifican en simples términos a partir también del material involucrado, por lo cual los

⁴² VARNES, David. Slope movement Types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control, Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C.1978. p. 11-33

⁴³ ALCÁNTARA, Irasema., Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Investigaciones Geográficas, Boletín del instituto de Geografía (19). 2000. p.8-12.

⁴⁴ *Ibíd.*, p. 8-12.

⁴⁵ *Ibíd.*, p. 8-10.

⁴⁶ ALCÁNTARA, Irasema., Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Investigaciones Geográficas, Boletín del instituto de Geografía (19). 2000. p.8-12.

principales tipos son los deslizamientos de rocas (rock slide), deslizamientos de derrubios (debris slide) y las coladas de barro (mudslides).

6.8 REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)

El modelo de susceptibilidad a movimientos en masa empleado en este estudio es basado principalmente en el concepto general de estabilidad de pendientes por medio de un abordaje principalmente matemático-computacional y considera diferentes factores, algunos de los cuales pueden causar debilidad mecánica en la masa rocosa o de suelo y producir fallas, mientras que otros fortalecen por así decirlo la pendiente y por ende protegen el terreno contra el movimiento.

El modelo empleado para el área de estudio fue el de redes neuronales, específicamente el prototipo de perceptron multicapa aplicando el método back propagation y es empleado para analizar elementos específicos presentes en el área de estudio que contribuyeron a deslizamientos en el pasado. El resultado de este estudio, el cual es el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa puede ser usado en la predicción de áreas que en un futuro puedan ser afectadas por movimientos en masa.

Primeramente, es útil explicar algunas de las generalidades de las redes neuronales artificiales y como se aplican estos modelos de una manera resumida y concisa, para después introducir al lector en el método usado. Es necesario comenzar diciendo que estas redes pretenden simular las características físicas o estructurales de una neurona biológica las cuales esencialmente reciben información por medio de pesos sinápticos, por eso deben prepararse para alcanzar las capacidades de adquirir el conocimiento y a partir del mismo identificar y clasificar la información, tomar decisiones y así dar soluciones a problemas complejos.

En analogía, de allí su nombre, estas se encuentran interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples (usualmente adaptativos) y con organización jerárquica, las cuales intentan interactuar con los objetos del mundo real del mismo modo que lo hace el sistema nervioso biológico. Según Terrazas et al., (2002)⁴⁷ las redes son principalmente usadas en cuatro formas: modelos de sistemas nerviosos biológicos, inteligencia artificial, adaptador en tiempo real de procesos simples o implemento de control en hardware para aplicaciones, tales como: robótica, análisis de datos y reconocimiento de patrones.

El potencial de cálculo de una RNA se deriva de su distribución en paralelo y su habilidad para aprender y por consiguiente generalizar. La generalización de acuerdo a Haykin (1999)⁴⁸ se refiere a la capacidad que posee la red de producir salidas razonables para entradas no encontradas durante el aprendizaje. Una red correctamente entrenada según Martín del Brío y Sanz (2007)⁴⁹ no sólo aprenderá los ejemplos concretos presentados, sino que también responderá de forma correcta ante patrones nunca vistos con anterioridad. De manera general, según Tien et al., (2012)⁵⁰ siendo así el propósito de una RNA es construir un modelo para problemas tales como reconocimiento de patrones y clasificación.

Este concepto es similar al cerebro en dos aspectos: El primero de acuerdo a Haykin (1999)⁵¹ el conocimiento es adquirido por la red desde su ambiente a través de un proceso de aprendizaje y el segundo son las fuerzas de conexión interneurona, conocidas como pesos sinápticos, son usadas para almacenar el

⁴⁷ TERRAZAS DMÍNGUEZ, S., et al., Aplicación de redes neuronales artificiales y técnicas SIG para la predicción de coberturas forestales. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 1998, p31-37.

⁴⁸ HAYKIN, Simon. Neural networks: a comprehensive foundation. 2 ed. Prentice-Hall. New Jersey, 1999. p.42.

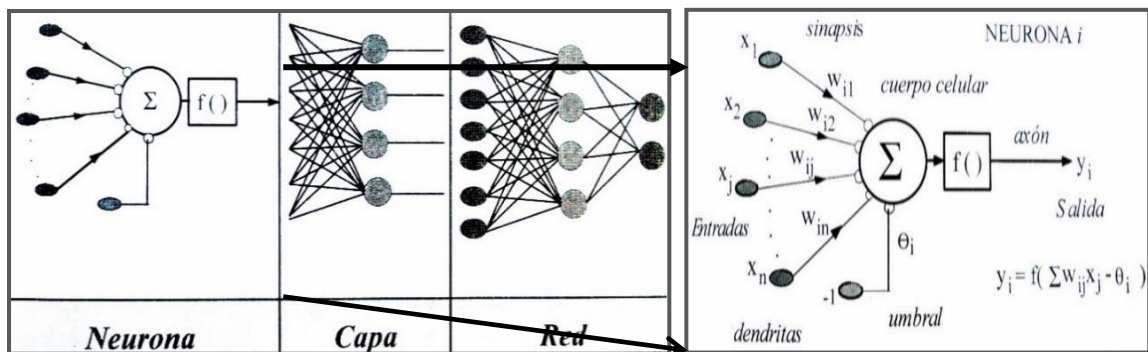
⁴⁹ MARTÍN DEL BRÍO, Bonifacio. y SANZ, Alfredo. Redes Neuronales y Sistemas Borrosos. 3 ed. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. México D.F., 2007. 440 p.

⁵⁰ TIEN, D., PRADHAN, B., et al. Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh province of Vietnam: A comparison of the Levenberg-Marquardt and Bayesian regularized neural networks. Geomorphology. 2012, 17 (171-172), p.12–29.

⁵¹ HAYKIN, Simon. Neural networks: a comprehensive foundation. 2 ed. Prentice-Hall. New Jersey, 1999. p.42.

conocimiento adquirido. La **Figura 9** muestra el modelo de una neurona, el cual forma la base para el diseño de RNA. Los elementos básicos del modelo neuronal son: Conjunto de entradas X_j corresponde a los datos que representan el modelo de entrenamiento de la red neuronal en el caso de ser las entradas iniciales en el proceso de aprendizaje.

Figura 9. Estructura jerárquica de una RNA y modelo de una neurona estándar.



Fuente: Martín del Brío, B. y Sanz, A. Redes Neuronales y Sistemas Borrosos. 3 ed. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. México D.F. 2007. 440 p.

El Peso Sináptico define la intensidad de interacción entre cada neurona presináptica y el pos sináptica siendo la sinapsis equivalente a la unión entre las mismas. De acuerdo a Martín del Brío y Sanz (2007)⁵² dada una entrada positiva, procedente de un sensor o simplemente la salida de otra neurona, se habla de sinapsis excitadoras (de peso positivo) e inhibitoras, de peso negativo La señal de entrada X_j es multiplicada por el peso sináptico W_{ij} como resultado de la interacción entre el dato de entrada proveniente del medio como se aprecia en la **Figura 9**.

Una de las particularidades fundamentales de las redes neuronales es que se trata de sistemas entrenables, aptos para realizar un determinado tipo de

⁵² MARTÍN DEL BRÍO, Bonifacio. y SANZ, Alfredo. Redes Neuronales y Sistemas Borrosos. 3 ed. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. México D.F., 2007. P.440.

procesamiento aprendiéndolo a partir de un conjunto de patrones. El aprendizaje básicamente es el proceso en el que se ajustan los pesos sinápticos con el fin de determinar el conjunto de los mismos que permita a la red realizar correctamente el procesamiento deseado. Iniciando el entrenamiento la red se adapta progresivamente al conjunto de aprendizaje, acomodándose al problema y mejorando la generalización. Sin embargo, en un momento dado el sistema se ajusta demasiado a las particularidades de los patrones utilizados en el entrenamiento, aprendiendo incluso el ruido, por lo que crece el error que comete ante patrones diferentes a los empleados en el aprendizaje (error de generalización).

La susceptibilidad por movimientos en masa se divide de forma general, por lo que se debe conservar un error de aprendizaje o entrenamiento, que no sea tan pequeño, con el objetivo evitar el sobre aprendizaje de la red, pasando según Martín del Brío y Sanz (2007)⁵³ de la generalización a la memorización. Por último, es preciso señalar que el método de las redes neuronales artificiales comprende tres fases: entrenamiento, simulación y validación.

6.8.1 Fase de entrenamiento de la RNA. Corresponde al tratamiento de la información para determinar la susceptibilidad por movimientos en masa, se tienen en cuenta los atributos geológicos, geomorfológicos y morfodinámicos. Cada criterio estará conformado por un conjunto de atributos que lo describirá desde diferentes conceptos y unidades de medidas relacionados entre sí, y como resultado se da el proceso de aprendizaje previo de la red.

Para la creación de las bases de datos de entrenamiento y simulación se genera un raster o matriz numérica por cada atributo. Como resultado cada matriz generada por atributo presentará tres diferentes campos en su respectiva tabla de

⁵³ Ibid. p. 440.

atributos, bajo lo cual posteriormente se determinará la característica de cada pixel por capa rasterizada:

El primer campo es el de identificación (Identificador (ID)) y aquí se encuentran las etiquetas de identificaciones aleatorias asignadas por ArcMap a cada una de las categorías que presenta un raster. El segundo campo es el de conteo (COUNT) en el cual se encuentra el valor del número de pixeles que presentan una misma característica o rango de valores que definen una categoría del atributo rasterizado. El tercer campo lleva por nombre el atributo bajo el cual se hizo la rasterización y en él se colocan las categorías con las características que puede presentar cada atributo.

A esta fase corresponden la definición y preparación de los datos, para la fase de procesamiento es necesario establecer previamente los conjuntos de datos a partir de los insumos y de los registros de movimientos en masa de la región. Para el caso del conjunto de entrenamiento, con el que la red neuronal lleva a cabo su fase de aprendizaje, se toman en cuenta las áreas afectadas por movimientos en masa y las áreas consideradas estables en estos términos. A partir de estas áreas se toman cierto número de datos para conformar el conjunto de validación, que se utiliza para evaluar la capacidad predictiva del mapa resultante. Después de la fase de entrenamiento se realiza la simulación de la red neuronal, para lo cual es necesario constituir una base de datos que compila todos los atributos que se desarrollan por cada pixel.

6.8.2 Modelo de Perceptron multicapa por medio del algoritmo Back Propagation. En redes neuronales aplicadas, el algoritmo Back Propagation es popular debido a su flexibilidad y adaptabilidad, en modelar un amplio rango de problemas, por esta razón y por la escala de trabajo, este algoritmo fue aplicado. Esencialmente este algoritmo es un eficiente método para el entrenamiento de perceptrones multicapa, por ende, hace parte de este modelo. No es la finalidad

de esta parte dar una completa explicación del algoritmo; o para una completa explicación puede ser consultado Haykin (1999)⁵⁴ y Yegnarayana, (2005)⁵⁵, entre otros. Sin embargo, es importante aclarar cómo opera este algoritmo, el cual principalmente busca la superficie o punto de error, definido como una función de los pesos, usando la técnica de gradiente descendente para localizar el punto con mínimo error.

De acuerdo con Gomez y Kavzoglu (2004)⁵⁶ cada interacción en el algoritmo Back Propagation tiene dos movimientos básicos: siguiendo una orientación hacia adelante o hacia atrás. El ciclo de propagación hacia adelante comienza con la presentación de un conjunto de patrones de entrada a la red, que para el caso de este estudio son los distintos insumos., y la propagación hacia atrás, se refiere a la corrección de errores, la cual comienza en la capa de salida y el error es alimentado hacia atrás a través de las capas intermedias hacia la capa de entrada con el fin de ajustar los pesos y así reducir el error. Esta interacción es mantenida hasta que el error es reducido a un nivel aceptable en términos de un predeterminado número de veces o un valor límite previamente especificado.

6.8.3 Validación del Modelo de Susceptibilidad de Movimientos en Masa. En este proceso se realiza la normalización de las variables y creación de las matrices de simulación y entrenamiento. De forma general esta etapa representa el tratamiento previo de las variables de entrenamiento y simulación para adecuarlas a su procesamiento por la red neuronal artificial.

Así mismo esta preparación se hace necesaria ya que los criterios que definen la susceptibilidad de un terreno presentan diferentes unidades de medida, por tanto,

⁵⁴ HAYKIN, Simon. Neural networks: a comprehensive foundation. 2 ed. Prentice-Hall. New Jersey, 1999. 842 p.

⁵⁵ YEGNANARAYANA, Bayya. Artificial Neural Networks, Prentice Hall Of India Limited, New Delhi, 2005. 479 p

⁵⁶ GÓMEZ, H., KAVZOGLU, T. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. Engineering Geology. 2015, 16 (78), p.11–27.

con la normalización de los atributos se busca estandarizar sus correspondientes valores cualitativos o cuantitativos. Para las fases de entrenamiento y simulación se requieren básicamente dos matrices de datos, respectivamente y los datos de entrenamiento, serán conformados por registros de movimientos en masa. Estas fases de entrenamiento y simulación son importantes debido a que son el preámbulo a la implementación de la red. Esta validación es requerida para la mejora del modelo creado a partir de la red neuronal, y es usada en este estudio principalmente con el fin de evaluar el problema de overfitting o sobreajuste, el cual consiste en determinar el punto de llegada del proceso de entrenamiento.

7. RESULTADOS

7.1 SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DE LA PLANCHA 136 – IV – A

De acuerdo con los lineamientos para cartografía geomorfológica del SGC para la elaboración de mapas geomorfológicos (Leiva et al., (2013)⁵⁷; SGC, (2013)⁵⁸), a escala 1:25.000, deben obtenerse Mapas de Subunidades Geomorfológicas (SGMF), haciendo énfasis en los procesos morfodinámicos y en la incidencia que tiene cada geoforma cartografiada, en la generación de movimientos en masa. Cada subunidad es básicamente uniforme en topografía, litología, suelo, vegetación y procesos morfodinámicos. En la **Tabla 10** se resumen los ambientes morfogenéticos y subunidades geomorfológicas identificadas en la Plancha 136-IV-A, como también el mapa geomorfológico en la **Figura 10**.

⁵⁷ LEIVA, Omar Yesid, et al. Metodológica Sistemática Para La Generación De Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados a La Zonificación De Amenaza Por Movimientos En Masa Escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano, 2012. p88

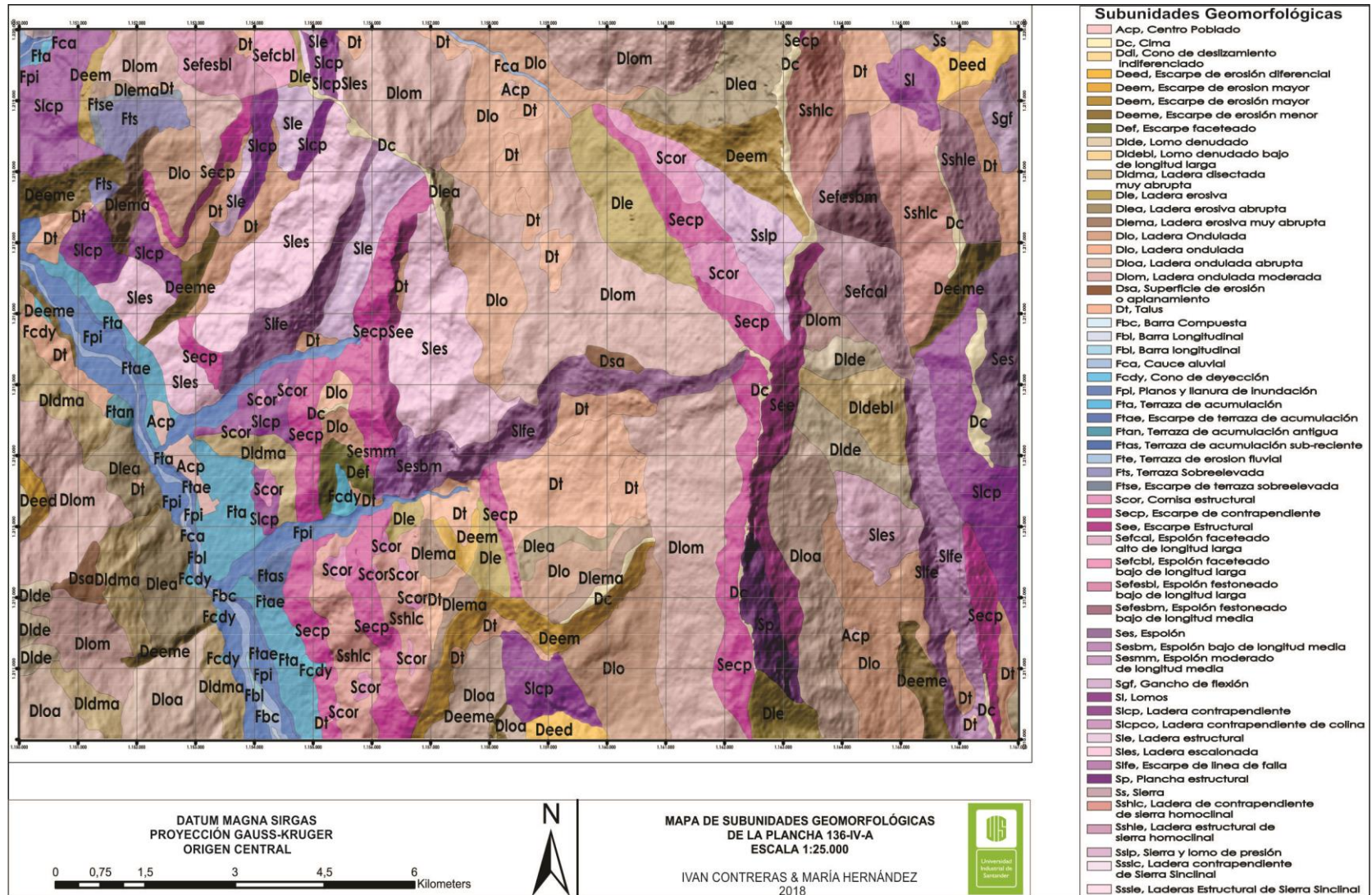
⁵⁸ SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Versión No. 2. Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental. Bogotá. 2013, 158 p.

Tabla 10. Ambientes morfogenéticos y subunidades geomorfológicas identificados en la Plancha 136 – IV – A.

Ambiente	SGMF	Subunidad Geomorfológica	Área (m ²)	Área (%)
Antrópico	Acp	Centro Poblado	585.829,62	0,34
	Dc	Cima	1.957.014,96	1,15
Denudacional	Ddi	Cono de deslizamiento indiferenciado	30.270,14	0,02
	Deed	Escarpe de erosión diferencial	1.544.382,41	0,91
	Deem	Escarpe de erosión mayor	2.169.562,42	1,28
	Deeme	Escarpe de erosión menor	3.200.042,81	1,88
	Def	Escarpe faceteado	535.424,88	0,31
	Dlde	Lomo denudado	2.329.523,23	1,37
	Dldebl	Lomo denudado bajo de longitud larga	1.448.712,44	0,85
	Dldma	Ladera disectada muy abrupta	4.295.048,33	2,53
	Dle	Ladera erosiva	4.041.307,43	2,38
	Dlea	Ladera erosiva abrupta	5.390.503,41	3,17
	Dlema	Ladera erosiva muy abrupta	2.035.440,29	1,20
	Dlo	Ladera ondulada	13.959.413,78	8,21
	Dloa	Ladera ondulada abrupta	7.382.810,18	4,34
	Dlom	Ladera ondulada moderada	24.749.200,94	14,56
	Dsa	Superficie de erosión o aplanamiento	583.970,52	0,34
	Dt	Talus	11.844.992,28	6,97
	Fluvial	Fbc	Barra Compuesta	54.918,86
Fbl		Barra longitudinal	63.951,51	0,04
Fca		Cauce aluvial	917.991,18	0,54
Fcdy		Cono de deyección	388.177,86	0,23
Fpi		Planos y llanura de inundación	4.283.931,73	2,52
Fta		Terraza de acumulación	3.571.114,19	2,10
Ftae		Escarpe de terraza de acumulación	479.704,17	0,28
Ftan		Terraza de acumulación antigua	154.762,21	0,09
Ftas		Terraza de acumulación sub-reciente	298.881,07	0,18
Fte		Terraza de erosión fluvial	18.951,37	0,01
Fts		Terraza Sobreelevada	960.411,39	0,56
Ftse		Escarpe de terraza sobreelevada	243.867,43	0,14
Scor	Cornisa estructural	2.036.423,45	1,20	

Ambiente	SGMF	Subunidad Geomorfológica	Área (m ²)	Área (%)
Estructural	Secp	Escarpe de contrapendiente	11.513.616,00	6,77
	See	Escarpe Estructural	2.775.846,92	1,63
	Sefcal	Espolón faceteado alto de longitud larga	2.020.987,91	1,19
	Sefcbl	Espolón faceteado bajo de longitud larga	475.388,66	0,28
	Sefesbl	Espolón festoneado bajo de longitud larga	1.177.990,86	0,69
	Sefesbm	Espolón festoneado bajo de longitud media	1.564.276,31	0,92
	Ses	Espolón	1.738.705,51	1,02
	Sesbm	Espolón bajo de longitud media	461.724,63	0,27
	Sesmm	Espolón moderado de longitud media	360.692,93	0,21
	Sgf	Gancho de flexión	619.431,64	0,36
	Sl	Lomos	791.107,66	0,47
	Slcp	Ladera contrapendiente	9.960.649,44	5,86
	Slcpco	Ladera contrapendiente de colina	13.231,84	0,01
	Sle	Ladera estructural	2.586.972,05	1,52
	Sles	Ladera escalonada	10.761.983,63	6,33
	Slfe	Escarpe de línea de falla	7.238.910,20	4,26
	Sp	Plancha estructural	1.130.985,23	0,67
	Ss	Sierra	459.545,61	0,27
	Sshlc	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	7.783.138,08	4,58
	Sshle	Ladera estructural de sierra homoclinal	1.267.722,72	0,75
Sslp	Sierra y lomo de presión	1.690.888,38	0,99	
Ssslc	Ladera contrapendiente de Sierra Sinclinal	34.919,98	0,02	
Sssle	Laderas Estructural de Sierra Sinclinal	13.693,60	0,01	
Total:			170.000.000	100

Figura 10. Mapa de subunidades geomorfológicas.



7.1.1 Geoformas de origen denudativo. Geoformas relacionadas con procesos de erosión, meteorización, incisión, depositación y desgaste, que generan modelamiento del paisaje; se incluyen procesos morfodinámicos activos como los movimientos en masa. Las subunidades geomorfológicas de origen denudativo cubren un área de 87.497.620,44 m², que corresponde al 51,47% del área de la plancha 136–IV–A, siendo el ambiente morfogenético el más predominante. En total se identificaron 17 subunidades geomorfológicas de origen denudativo, Tabla 10.

Las subunidades geomorfológicas de origen denudativo más representativas de la Plancha 136 – IV – A son: Ladera ondulada moderada (Dlom), Ladera ondulada abrupta (Dloa), Ladera ondulada (Dlo) y Talus (Dt); las cuales se describen a continuación.

7.1.1.1 Ladera ondulada moderada (Dlom). Superficie en declive, se caracteriza por presentar una pendiente muy abrupta, ondulada, la altura de esta geoforma es superior a 300 m sobre su nivel base local y su longitud varía entre 1000 – 1500 m, con patrón de drenaje subdendrítico a subparelo, suaves procesos erosivos y eventualmente movimientos en masa tipo reptación.

Esta subunidad geomorfológica se reconoce en las veredas Limón Dulce, Siotes, Peña Lisa, del Municipio de Covarachía, Departamento de Boyacá; veredas Gorguta, los Molinos, Buenavista, del Municipio de Capitanejo; vereda Buenavista, del Municipio de Macaravita; veredas San Pedro, San Ignacio, Zaragoza, Cenacuta, Tablón, Lajas, del Municipio de San Miguel, Departamento de Santander. El porcentaje en área de esta geoforma es de 14,56% del total de la Plancha 136 – IV – A, siendo la Subunidad geomorfológica de origen denudativo, que cubre mayor área (ver **Figura 11**).

7.1.1.2 Ladera ondulada abrupta (Dloa). Superficie en declive, se caracteriza por tener una pendiente abrupta, ondulada, la altura de esta geoforma varía entre 200 – 400 m sobre su nivel base local y su longitud varía entre 1000 – 1500 m, con patrón de drenaje subdendrítico a subparelo, suaves procesos erosivos y movimientos en masa tipo reptación y caída de detritos en menor medida.

Esta subunidad geomorfológica se identifica en las veredas Limón Dulce y Peña Lisa, del Municipio de Covarachía, Santander; Buena Vista, del Municipio de Macaravita, Santander, San Pedro, San Ignacio, Santa Helena del Municipio de San Miguel, Santander. El porcentaje en área de esta geoforma es de 4,34% del total de la Plancha 136 – IV – A.

Figura 11. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Ladera disectada abrupta (Dldm), Ladera erosiva abrupta (Dlea), Ladera ondulada abrupta (Dloa), Ladera ondulada muy abrupta (Dloma), Escarpe de erosión menor (Deeme), Superficie de erosión o aplanamiento (Dsa), Cono de deyección (Fcdy), observadas en las veredas Limón Dulce y Peña Lisa, del Municipio de Covarachía. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.156.206, N: 1.211.730, en dirección N65°W.



7.1.1.3 Ladera ondulada (Dlo). Superficie en declive, se caracteriza por tener una pendiente suavemente inclinada a muy inclinada, ondulada, la altura de esta geoforma varía entre 50 y 200 m sobre su nivel base local y su longitud es mayor a 500 m, con patrón de drenaje subdendrítico a subparelo, suaves procesos erosivos y eventualmente movimientos en masa tipo reptación y deslizamiento de tipo rotacional y traslacional, principalmente en los bordes de la quebrada La Miel en jurisdicción del Municipio de San Miguel.

Esta subunidad geomorfológica se localiza en las veredas La Chorrera, Sebaruta, La Mesa, del Municipio de Capitanejo; La Palma, El Juncal, del Municipio de Macaravita; veredas San Pedro, Santa Helena, Llano Grande, Tablón, Lajas del Municipio de San Miguel, Departamento de Santander. El porcentaje en área de esta geoforma es de 8,21% del total de la Plancha 136 – IV – A. En las cuales esta geoforma se puede observar en la **Figura 12** y **Figura 13**.

Figura 12. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Ladera ondulada (Dlo), Terraza sobreelevada (Fts), Escarpe de terraza sobreelevada (Ftse) y Talus (Dt), observadas en la vereda La Mesa, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.153.174, N: 1.219.712, en dirección S70°W.



Figura 13. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Ladera ondulada (Dlo) y Plancha estructural (Sp), observadas en la vereda La Palma, del Municipio de Macaravita. A. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.166.000, Y: 1.213.361, en dirección S60°W. B. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.163.245, Y: 1.210.754, en dirección N15°W

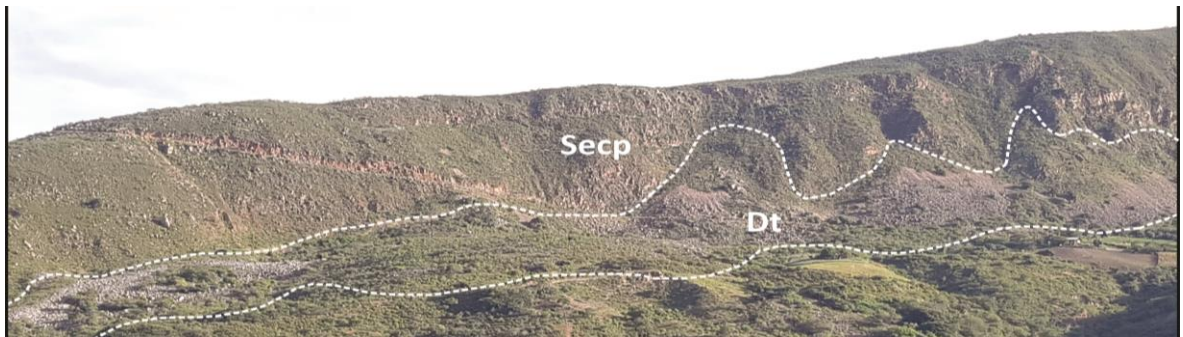


7.1.1.4 Talus (Dt). Estructura lobular compuesta por material transportado hidrogravitacionalmente en la base de los escarpes y laderas abruptas a muy abruptas; la altura de esta geoforma es menor a 50 m, con laderas convexas y pendientes que varían de suavemente inclinadas a inclinadas. Generalmente presentan un patrón de drenaje subparalelo, presenta erosión laminar de intensidad moderada, y eventualmente movimientos en masa tipo reptación. Su origen está relacionado con caídas de cantos y bloques, que se desprenden de las partes altas.

Esta subunidad geomorfológica se localiza en las veredas Siotes, Limón Dulce, del Municipio de Covarachía, Departamento de Boyacá; veredas Los Molinos, El Datal, Sabavita, Hoya Grande, Gorguta, La Chorrera, Platanal, La Mesa, del Municipio de Capitanejo, Departamento de Santander; Huertas, El Palmar; veredas San Pedro, Santa Helena, Zaragoza, Cenacuta, del Municipio de San

Miguel, Departamento de Santander, Ropejo Alto del Municipio de Carcasi, Departamento de Santander. El porcentaje en área de esta geoforma es de 6.97% del total de la Plancha 136 – IV – A. Esta geoforma se puede observar en la **Figura 14.**

Figura 14. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Talus (Dt) y Escarpe de contrapendiente (Secp), observadas en la vereda Platanal, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas E: 1.153.801, N: 1.216.694, en dirección N50°W



7.1.2 Geoformas de origen fluvial. Geoformas derivadas de la actividad agradacional y degradacional de las corrientes de agua. Incluyen cauces actuales y niveles de terrazas dejadas por sedimentación de cauces, incisión, eventos fluvio – torrenciales y terrazas sobre elevadas con su respectivo escarpe erosivo.

Las subunidades geomorfológicas de origen fluvial cubren un área de 11.436.662,96 m², que corresponde al 7,93% del área de la Plancha 136-IV-A. En total se identificaron 12 subunidades geomorfológicas de origen fluvial y lagunar, ver **Tabla 10.**

Las subunidades geomorfológicas de origen fluvial más representativas de la Plancha 136 – IV – A son: Cauce Aluvial (Fca), Llanura de inundación (Fpi),

Terraza de acumulación (Fta), Cono de deyección (Fcdy); las cuales se describen a continuación.

7.1.2.1 Cauce aluvial (Fca). Canal de forma irregular, excavado por erosión de las corrientes de aguas perennes o estacionales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales. Dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias. Estos cauces cuando recorren grandes distancias pueden formar rápidos, como producto del cambio súbito de la dirección del flujo. Los cauces rectos, generalmente están relacionados al control estructural de fallas o diaclasas (ver **Figura 15**).

Esta subunidad geomorfológica corresponde con los cauces de los ríos Chicamocha y Tunebo, en jurisdicción de los municipios de Capitanejo y Covarachía; quebrada La Miel del Municipio de San Miguel, Departamento de Santander.

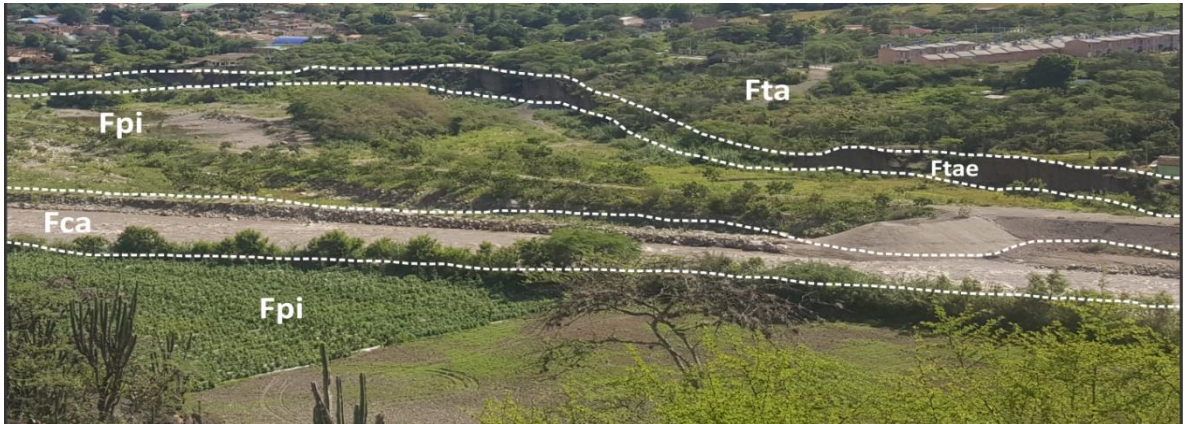
7.1.2.2 Llanura de inundación (Fpi). Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable, con pendientes planas a suavemente inclinadas, presenta socavación lateral severa y eventualmente movimientos en masa tipo flujo por avenida torrencial. Se localiza bordeando los cauces fluviales, próximos a los ríos Chicamocha y Tunebo, y las quebradas La Pola y San Pedro. Su depósito está constituido por sedimentos finos, de tamaño arena y arcilla, originados durante eventos de inundación fluvial, y por gravas, cantos rodados y bloques depositados durante eventos torrenciales (ver **Figura 15**).

Esta subunidad geomorfológica se observa en las veredas Siotes, Tapias, Limón Dulce, Peña Lisa, del Municipio de Covarachía, Departamento de Boyacá; Montecillo, Sabavita, El Datal, La Loma, Sebaruta, La Chorrera y la Quebrada de

Vera, del Municipio de Capitanejo. El porcentaje en área de esta geoforma es de 2,52% del total de la Plancha 136 – IV – A.

7.1.2.3 Terraza de acumulación (Fta). Superficie elongada, plana a suavemente ondulada, con tipo de relieve de montículo, tiene laderas irregulares, con pendientes que van de suavemente inclinadas a inclinadas, presenta patrón de drenaje subdendrítico, erosión en surcos de intensidad moderada y eventualmente movimientos en masa tipo caída. Esta geoforma es modelada sobre sedimentos aluviales y limitada por escarpes de diferente altura a lo largo del cauce del río Chicamocha. Su origen es relacionado a procesos de erosión y acumulación aluvial, dentro de antiguas llanuras de inundación. Su formación incluye fases de acumulación, incisión y erosión vertical. Su depósito está constituido por bloques, cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillas, con disminución del tamaño a medida que se aleja del cauce del río Chicamocha (**Figura 15**). Esta subunidad geomorfológica se identifica en las veredas Montecillo, El Datal, La Loma, Casa Blanca, Quebrada de Vera, del Municipio de Capitanejo, ocupando un porcentaje en área de 2,10% del total de la Plancha 136 – IV – A.

Figura 15. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Cauce Aluvial (Fca), Llanura de inundación (Fpi), Terraza de acumulación (Fta) y Escarpe de terraza de acumulación (Ftae), asociadas al río Chicamocha, observadas al occidente del casco urbano del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.152.815, N: 1.212.776, en dirección N30°E.



7.1.2.4 Cono de deyección (Fcdy). Superficie en forma de cono, con pendientes inclinadas y decenas de metros de extensión. Se localiza en el punto donde los canales o quebradas provenientes de la zona de mayor relieve, llegan a las zonas planas a suavemente inclinadas, de inundación del río Chicamocha. Su depósito está constituido por arena, arcillas y grava, con espesores de materiales más gruesos hacia el ápice y más finos en la zona distal.

Esta subunidad geomorfológica se localiza en las veredas Tapias, Limón Dulce, Peña Lisa, del Municipio de Covarachía, Departamento de Boyacá; veredas La Loma y El Datal, del Municipio de Capitanejo, Departamento de Santander. El porcentaje en área de esta geofoma es de 0,23% del total de la Plancha 136 – IV – A. Esta geofoma se puede observar en la **Figura 16**.

Figura 16. Panorámica de la subunidad geomorfológica Cono de deyección (Fcdy), observada al margen izquierdo del río Chicamocha, a un margen de la vía Capitanejo – Tipacoque, en la vereda Peña Lisa, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas E: 1.156.206, N: 1.211.730, en dirección S50°W.



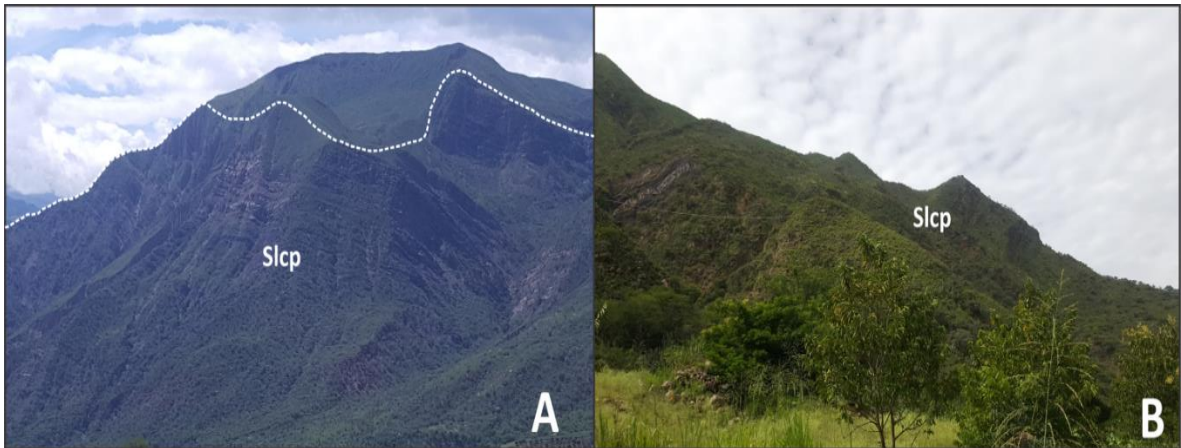
7.1.3 Geoformas de origen estructural – denudacional. Comprende las geoformas originadas por procesos geodinámicos internos de plegamiento y fallamiento, que actúan en conjunto con procesos denudacionales, tanto antiguos como recientes, creando expresiones geomorfológicas muy abruptas y escarpadas. Las subunidades geomorfológicas de origen estructural – denudacional, abarcan 68.478.833,26 m², cubriendo el 39,08% de la superficie total de la plancha 136–IV–A. En total se identificaron 24 subunidades geomorfológicas de origen estructural – denudacional, (ver **Tabla 10**).

Las subunidades geomorfológicas de origen estructural – denudacional más representativas de la Plancha 136 – IV – A son: Ladera contrapendiente (Slcp), Escarpe de contrapendiente (Secp), Ladera escalonada (Sles), Escarpe de línea de falla (Slfe) y Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc); las cuales se describen a continuación.

7.1.3.1 Ladera contrapendiente (Slcp). Superficie inclinada con estratos dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno, su morfología consiste en un declive natural de forma escalonada a irregular, longitud media a larga, con pendientes que varían de inclinadas a muy escarpadas, con patrón de drenaje subdendrítico a subparalelo. En estas geoformas predominan los movimientos en masa tipo caída de rocas y reptación, así como erosión laminar moderada (ver **Figura 17**).

Esta subunidad geomorfológica se identificó en las veredas Carrizal, Quebrada de Vera, La Playa, La Mesa, Montecillo, Platanal, Sabavita, El Datal y Gorguta, del Municipio de Capitanejo; vereda Cenacuta, del Municipio de San Miguel; y también en la vereda Ilarguta, del Municipio de Macaravita. El porcentaje en área de esta geoforma es de 5,86% del total de la Plancha 136 – IV – A.

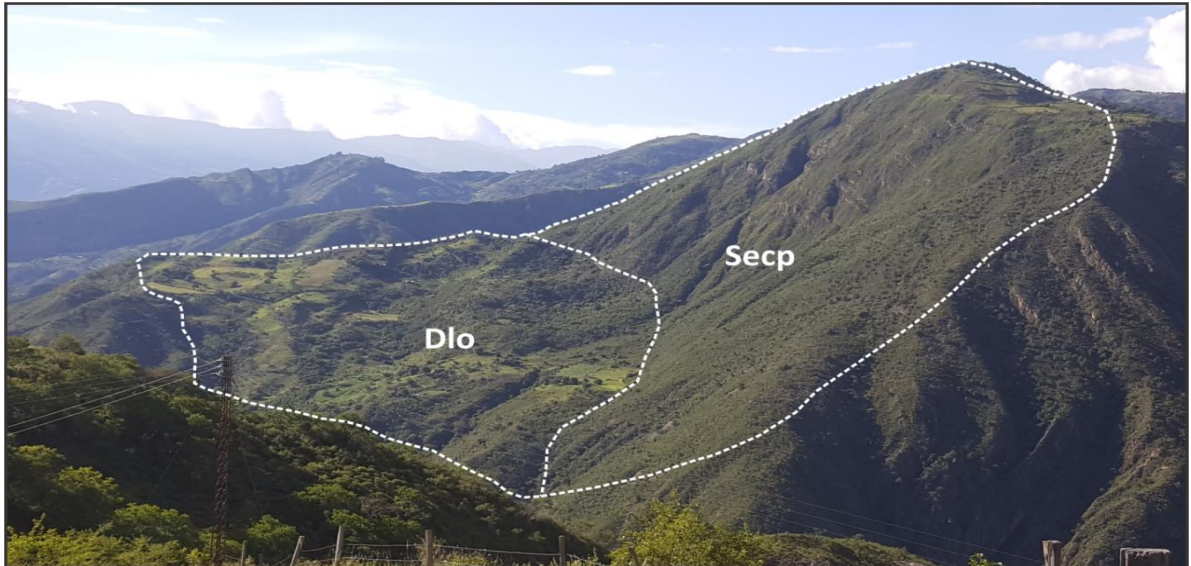
Figura 17. Panorámica de la subunidad geomorfológica Ladera contrapendiente (Slcp). A. Observada en la vereda La Mesa, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.151.792, N: 1.214.062, en dirección N. B. Observada en la vereda Quebrada de Vera, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.150.490, N: 1.219.815, en dirección S42°E.



7.1.3.2 Escarpe de contrapendiente (Secp). Superficie en declive, con estratos dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno, caracterizada por una pendiente muy escarpada (vertical a subvertical), la altura de esta geoforma es inferior a 300 m sobre su nivel base local y su longitud varía entre 250 y 350 m, con patrón de drenaje paralelo a subparelo, presenta erosión laminar de intensidad moderada y eventualmente movimientos en masa de tipo caída de rocas, flujo y deslizamiento traslacional (**Figura 18**).

Esta subunidad geomorfológica se observó en las veredas Platanal, El Datal, La Mesa, La Loma, Los Molinos, La Chorrera, Sebaruta y Sabavita, en jurisdicción del Municipio de Capitanejo; veredas Lajas y San Ignacio, del Municipio de San Miguel, y en la vereda Ilarguta del Municipio de Macaravita. El porcentaje en área de esta geoforma es de 6,77% del total de la Plancha 136 – IV – A.

Figura 18. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Escarpe de contrapendiente (Secp) y Ladera ondulada (Dlo), observadas en el sector Los Colorados, vereda La Chorrera, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas: N: 1.212.209, en dirección N15°W.



7.1.3.3 Ladera escalonada (Sles). Superficie en descenso de pendiente escarpada, dispuesta en escalones, definida por estratos o diaclasas suavemente inclinadas en favor o en contra de la pendiente del terreno. La altura de esta geoforma es inferior a 300 m sobre su nivel base local y su longitud varía entre 500 y 1000 m; desarrolla un patrón de drenaje de tipo subdendrítico a subparalelo. En estas geoforma predominan los movimientos en masa tipo reptación, caída de rocas y deslizamiento rotacional; también presenta erosión laminar y surcos de intensidad moderada (ver **Figura 19**).

Esta subunidad geomorfológica se reconoció en la parte central de la Plancha 136 – IV – A, en las veredas Montecillo, Platanal y Sebaruta, del Municipio de Capitanejo, y también en la vereda San Ignacio del Municipio de San Miguel. El porcentaje en área de esta geoforma es de 6,33% del total de la Plancha 136 – IV – A.

Figura 19. Panorámica de la subunidad geomorfológica Ladera escalonada (Sles), observada en el sector La Palestina, vereda Montecillo, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.152.860, N: 1.215.626, en dirección S5°W.

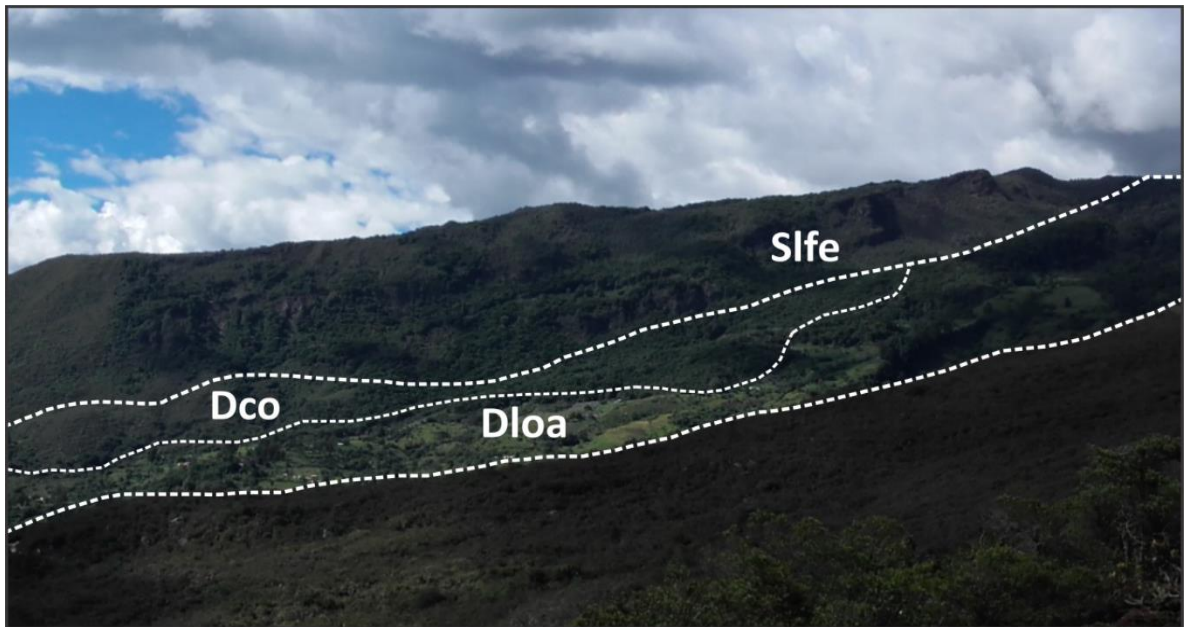


7.1.3.4 Escarpe de línea de falla (Sife). Plano vertical a subvertical, con inclinación de la pendiente muy abrupta a muy escarpada, de forma rectilínea a concava. La altura de esta geoforma es inferior a 300 m sobre su nivel base local y su longitud varía entre 100 y 400 m, con patrón de drenaje de tipo subparalelo. Su origen se relaciona con superficies desarrolladas por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas, por procesos de fallamiento y posterior erosión acentuada. En esta geoforma predominan movimientos en masa tipo

caída de rocas, deslizamiento, reptación y flujo de detritos, también se encuentra erosión laminar moderada (ver **Figura 20**).

Esta subunidad geomorfológica se identificó en las veredas Sabavita y La Chorrera, del Municipio de Capitanejo; vereda San Pedro del Municipio de San Miguel; y en las veredas Ilarguta y Huertas, del Municipio de Macaravita. El porcentaje en área de esta geofoma es de 4,26% del total de la Plancha 136 – IV – A.

Figura 20. Panorámica de las subunidades geomorfológicas Escarpe de línea de falla (Slfe), Ladera ondulada abrupta (Dloa) y Talus (Dt), observadas en la vereda San Pedro, del Municipio de San Miguel. Fotografía tomada desde las coordenadas: E: 1.159.044, N: 1.212.051, en dirección N17°E.



7.1.3.5 Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc). Superficie inclinada de morfología irregular, definida por estratos dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno, se caracteriza por pendientes abruptas a escarpadas. La altura de esta geoforma es inferior a 200 m sobre su nivel base local y su longitud varía entre 500 y 1000 m. Asociada a una estructura homoclinal y formada por la acción de procesos erosivos, meteorización y tectonismo, que cortan y moldean la estructura original. Desarrolla un patrón drenaje es paralelo a subparalelo. Presenta erosión en surcos y movimientos en masa de tipo reptación y caídas de roca. Esta subunidad geomorfológica se observó en las veredas La Loma y Hoya Grande del Municipio de Capitanejo y también, en la vereda Ilarguta del Municipio de Macaravita. El porcentaje en área de esta geoforma es de 4,58% del total de la Plancha 136 – IV – A.

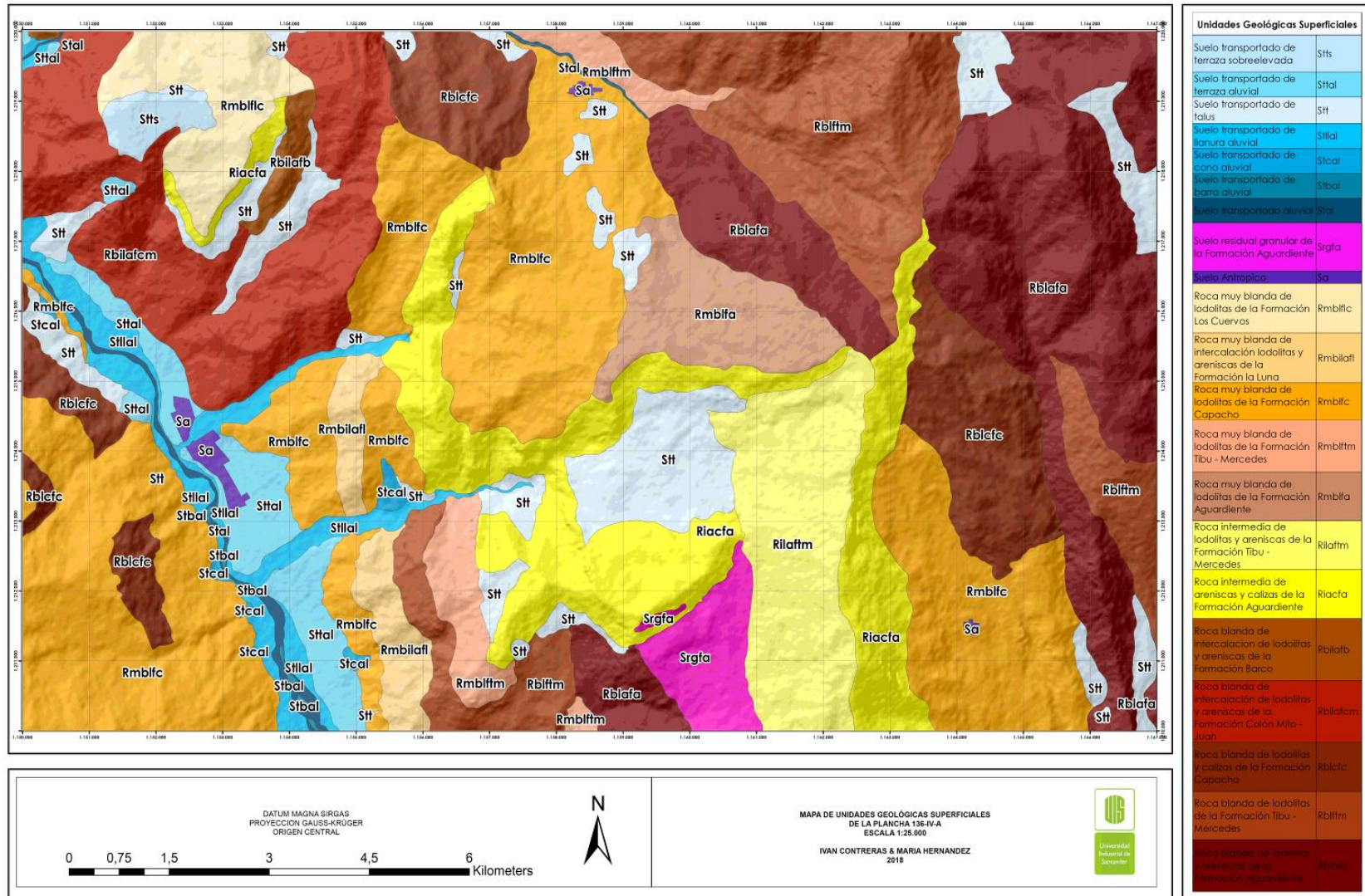
7.2 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES DE LA PLANCHA 136– IV A

A partir de la caracterización de la matriz rocosa y del estado de las discontinuidades se obtiene la calidad del macizo, lo que permitió la clasificación y caracterización de las diferentes unidades de roca que se relacionan en la **Tabla 11** y se ilustran en el mapa de unidades geológicas superficiales de la Plancha 136–IV–A. Ver **Figura 21**.

Tabla 11. Unidades geológicas superficiales.

Formación	UGS	Unidad Geológica Superficial	Área (m ²)	Área (%)
Tibú – Mercedes	Rmbiftm	Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Tibu - Mercedes	3.261.875,74	1,92
	Rblftm	Roca blanda de lodolitas de la Formación Tibu - Mercedes	16.146.937,56	9,50
	Rilaftm	Roca intermedia de lodolitas y areniscas de la Formación Tibu - Mercedes	8.319.645,76	4,89
Aguardiente	Rmbifa	Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Aguardiente	4.634.437,49	2,73
	Rblafa	Roca blanda de lodolitas y areniscas de la Formación Aguardiente	23.737.639,81	13,96
	Riacfa	Roca intermedia de areniscas y calizas de la Formación Aguardiente	16.149.567,13	9,50
Capacho	Rmbifc	Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Capacho	38.209.713,03	22,48
	Rblcfc	Roca blanda de lodolitas y calizas de la Formación Capacho	11.306.994,22	6,65
La Luna	RmbilafI	Roca muy blanda de intercalación lodolitas y areniscas de la Formación La Luna	2.903.626,60	1,71
Colón Mito – Juan	Rbilafcm	Roca blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación Colón Mito - Juan	13.789.849,03	8,11
Barco	Rbilafb	Roca blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación Barco	881.038,75	0,52
Los Cuervos	Rmbiflc	Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Los Cuervos	4.050.360,36	2,38
Cuaternario	Srgfa	Suelo residual granular de la Formación Aguardiente	2.739.800,32	1,61
	Stal	Suelo transportado aluvial	917.991,18	0,54
	Stbal	Suelo transportado de barra aluvial	118.870,38	0,07
	Stcal	Suelo transportado de cono aluvial	388.177,86	0,23
	Stllal	Suelo transportado de llanura aluvial	4.283.048,37	2,52
	Sttal	Suelo transportado de terraza aluvial	4.664.942,56	2,74
	Stt	Suelo transportado de talus	11.844.265,74	6,97
	Sa	Suelo Antrópico	585.829,62	0,34
Stts	Suelo transportado de terraza sobreelevada	1.064.334,39	0,63	
Total			170.000.000,00	100

Figura 21. Mapa unidades geológicas superficiales.



7.2.1 Formaciones que conforman las unidades geológicas superficiales:

7.2.1.1 Formación Tibú – Mercedes. Dentro de esta unidad geológica se identificaron y cartografiaron 3 unidades geológicas superficiales (UGS) (ver **Tabla 11**), las cuales se describen a continuación.

- **Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Tibú – Mercedes (Rmblftm).** Litológicamente está compuesta por lodolitas fisiles, de color pardo a negro, moderadamente oxidadas, con laminación plano – paralela continua a ondulosa, cubierta por una capa de suelo residual de 20 a 30 cm de espesor (ver **Figura 22**). La unidad se encuentra altamente meteorizada, correspondiendo al horizonte IV del perfil de meteorización de Dearman (1974, 1991)⁵⁹ el índice de resistencia geológico es pobre (GSI: 15 – 20); la permeabilidad cualitativa es baja; de acuerdo con la tabla de índice de campo para la compresión simple tomada del ISRM (1981)⁶⁰ es de clase R1 es decir con valores que oscilan entre 1 – 5 MPa aproximadamente; presenta un índice de fracturamiento (Jv) de 50 – 60 Fr/m³ y la calificación de la calidad de macizo rocoso (RMR) de Bieniawski (1979)⁶¹ es muy pobre, con valores de 29.

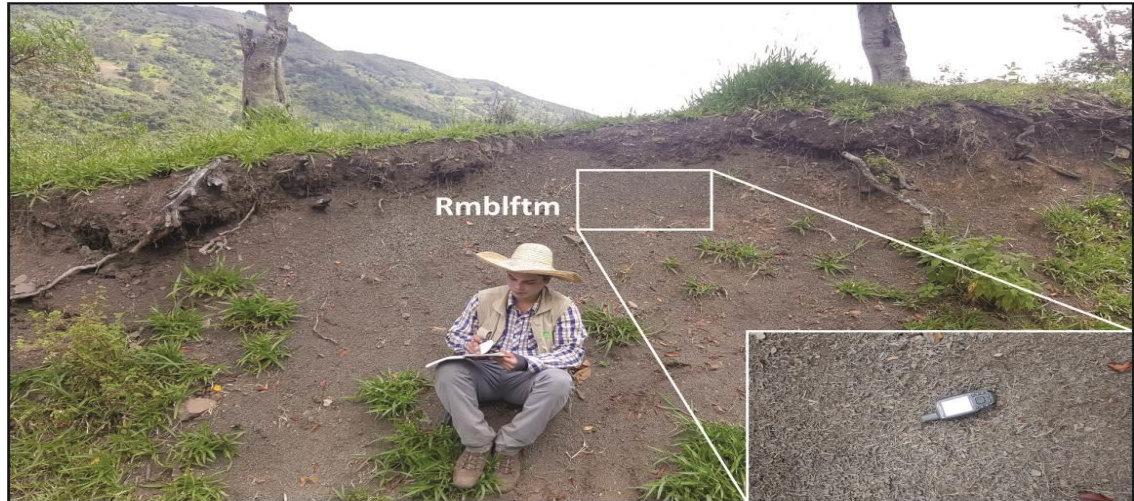
Son rocas poco resistentes a la erosión y meteorización, por lo general están asociados a esta unidad movimientos en masa tipo deslizamiento rotacional y reptación, sobre todo hacia el sector norte de la Plancha 136 – IV – A debido a que está siendo fuertemente erosionada por la acción de la quebrada La Miel. Esta unidad geológica superficial se identifica en las veredas Hoya Grande, La Chorrera y Gorguta del Municipio de Capitanejo; y en las veredas Tablón, Lajas y Arenal, del Municipio de San Miguel. Ver **Figura 22**.

⁵⁹ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

⁶⁰ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza Por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. P288.

⁶¹SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Op. cit., p.135.

Figura 22. Afloramiento de Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Tibú – Mercedes (Rmbifm), caracterizada en el camino real de la finca El Garbanzal, vereda El Tablón, del Municipio de San Miguel. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.157.822, N: 1.1220.178, en dirección S15°E



- Roca blanda de lodolitas de la Formación Tibú – Mercedes (Rbifm).** Esta unidad geológica superficial está compuesta por lodolitas, laminadas, de color gris oscuro a negro, fisiles, levemente oxidadas. Intercaladas con algunos niveles de areniscas de grano fino a medio, color ocre claro, bien cementadas, que contiene cuarzo y mica moscovita, las cuales se presentan en niveles menores a 0,5 m de espesor (ver **Figura 23**). La unidad se encuentra altamente meteorizada, correspondiendo al horizonte IV del perfil de meteorización de Dearman (1974, 1991)⁶², el índice de resistencia geológico es regular (GSI: 35 – 40); la permeabilidad cualitativa es baja; de acuerdo con la tabla de índice de campo para la compresión simple tomada del ISRM (1981)⁶³ varía entre clase R1 y R2, según el sector, es decir con valores que oscilan entre 1 – 5 MPa y entre 5 – 25 MPa aproximadamente; presenta un índice de

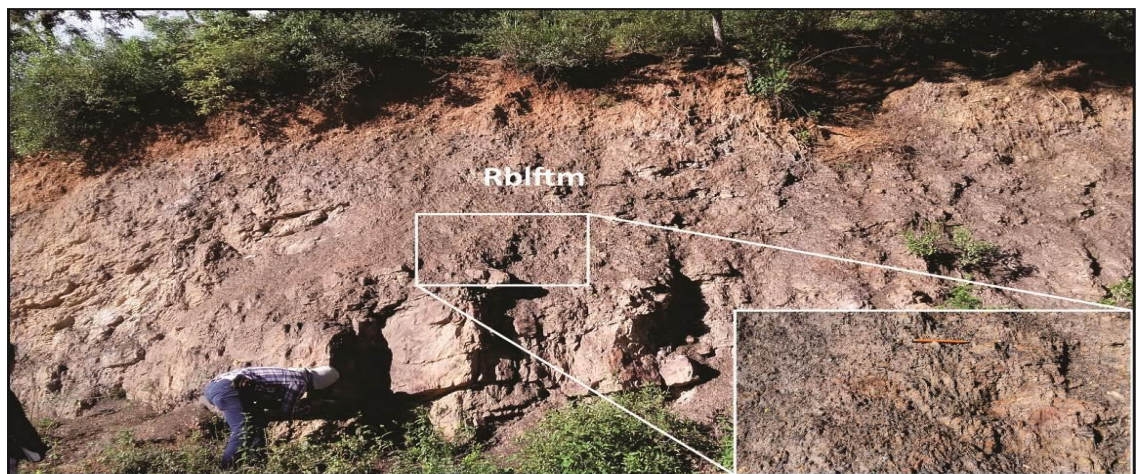
⁶² SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182

⁶³ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza Por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. P288.

fracturamiento (Jv) de 30 – 40 Fr/m³ y la clasificación de la calidad de macizo rocoso (RMR) de Bieniawski (1979)⁶⁴ es pobre, con valores que oscilan entre 35 – 40. Forma un suelo residual con espesor entre 50 cm y 1 m.

Son rocas de baja resistencia a la erosión y meteorización. Esta unidad geológica superficial presenta movimientos en masa de tipo flujo, caída de rocas, reptación y complejos. Es de resaltar que sobre esta unidad se presenta el movimiento en masa más grande registrado en la Plancha 136 – IV – A. Esta unidad geológica superficial se observó en las veredas La Loma, Los Molinos y Gorguta, del Municipio de Capitanejo; veredas Ilarguta y Huertas del Municipio de Macaravita; y también en las veredas Lajas y Tablón del Municipio de San Miguel.

Figura 23. Afloramiento de Roca blanda de lodolitas de la Formación Tibú – Mercedes (Rblftm), observada en la vía que conduce de la parte alta de la vereda Hoya Grande del Municipio de Capitanejo, al casco urbano del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas E: 1.155.985, N: 1.212.209, en dirección N50°E



⁶⁴ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo Por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015. p.131.

- **Roca intermedia de lodolitas y areniscas de la Formación Tibú – Mercedes (Rilafm).** Litológicamente son lodolitas silíceas masivas, color ocre a gris, dispuestas en capas muy gruesas; también contienen algunos niveles de areniscas de grano fino, de color ocre claro, contienen algunos niveles de chert gris oscuro con estratificación ondulada, con espesores de 50 cm (ver **Figura 24**).

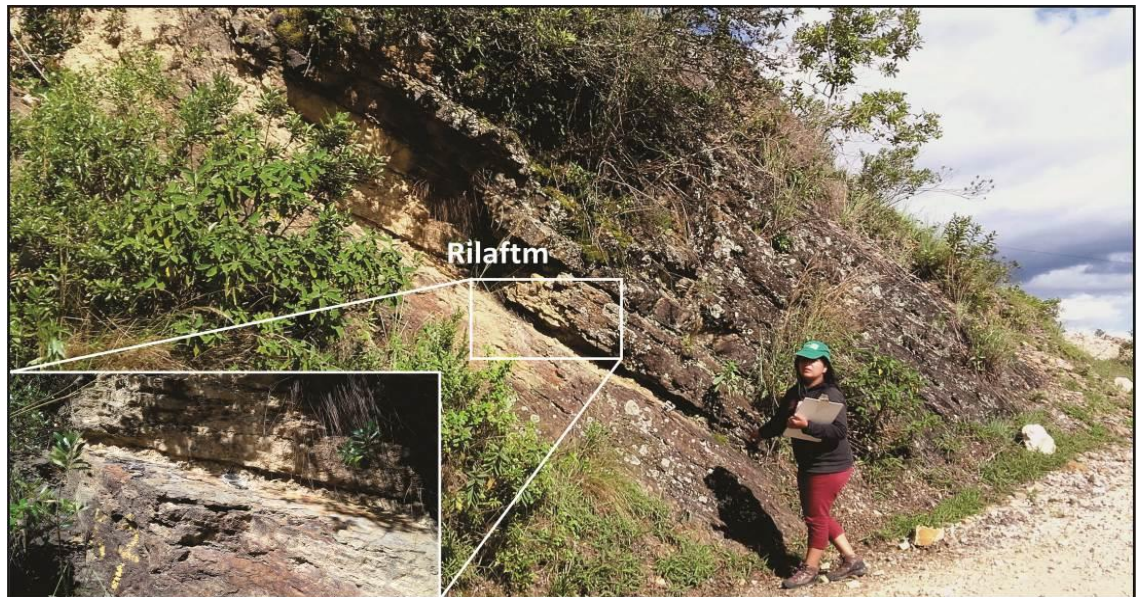
Se encuentra débilmente descompuesta, correspondiendo al horizonte II del perfil de meteorización de Dearman (1974, 1991)⁶⁵, el índice de resistencia geológico es regular a bueno (GSI: 60 – 70); la permeabilidad cualitativa es baja; de acuerdo con la tabla de índice de campo para la compresión simple tomada del ISRM (1981)⁶⁶ es mayormente de clase R5 es decir con valores que oscilan entre 100 – 250 MPa; presenta un índice de fracturamiento (Jv) de 3 – 10 Fr/m³ y la clasificación de la calidad de macizo rocoso (RMR) de Bieniawski (1979)⁶⁷ es regular, con valores que oscilan entre 41 – 60. Son rocas moderadamente resistentes a la erosión y meteorización, en general están asociados a esta unidad, movimientos en masa tipo deslizamiento traslacional planar, volcamiento y caída de rocas. Esta unidad geológica superficial se observó en la vereda Buena Vista, del Municipio de Macaravita y en la vereda San Pedro, del Municipio de San Miguel.

⁶⁵ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

⁶⁶ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza Por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. P288.

⁶⁷ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Op. cit., p.131

Figura 24. Roca intermedia de lodolitas y areniscas de la Formación Tibú – Mercedes (Rilaftm), localizada en la vía que comunica la vereda Buena Vista con el casco urbano del Municipio de Macaravita. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.161.717, N: 1.209.847, en dirección S75°E



7.2.1.2 Formación Aguardiente. Dentro de esta unidad geológica se identificaron y cartografiaron 3 unidades geológicas superficiales (UGS) ver TABLA 11, las cuales se describen a continuación.

- **Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Aguardiente (Rmb1fa).** Litológicamente está compuesta por lodolitas laminadas, muy fisiles, de color gris oscuro a negro, levemente oxidadas, con estratificación plano – paralela a ondulosa. La unidad se encuentra altamente meteorizada, correspondiendo al horizonte IV del perfil de meteorización de Dearman (1974, 1991)⁶⁸; el índice de resistencia geológico es pobre (GSI: 15 – 20); la permeabilidad cualitativa

⁶⁸ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

es baja; de acuerdo con la tabla de índice de campo para la compresión simple tomada del ISRM (1981)⁶⁹, es de clase R1 es decir con valores que oscilan entre 1 – 5 MPa aproximadamente; presenta un índice de fracturamiento (Jv) de 50 – 60 Fr/m³ y la calificación de la calidad de macizo rocoso (RMR) de Bieniawski (1979)⁷⁰ es muy pobre, con valores <30. Son rocas poco resistentes a la erosión y meteorización, por lo general están asociados a esta unidad movimientos en masa tipo reptación y solifluxión. Esta unidad geológica superficial se localiza en la parte central de la Plancha 136 – IV – A, en las veredas San Ignacio y Santa Helena del Municipio de San Miguel, Departamento de Santander.

- **Roca blanda de lodolitas y areniscas de la Formación Aguardiente (Rblafa).** Litológicamente está compuesta por lodolitas laminadas de color gris oscuro a negro, levemente oxidadas. Intercaladas con areniscas de grano medio, color ocre claro, bien cementadas, que contiene cuarzo y mica moscovita. Se presentan en niveles menores a 1,5 m de espesor (ver Figura 25). La unidad se encuentra altamente meteorizada, correspondiendo al horizonte IV del perfil de meteorización de Dearman (1974, 1991)⁷¹; el índice de resistencia geológico es regular (GSI: 35 – 40); la permeabilidad cualitativa es baja; de acuerdo con la tabla de índice de campo para la compresión simple tomada del ISRM (1981)⁷² es de clase R2 es decir con valores que oscilan entre 5 – 25 MPa aproximadamente; presenta un índice de fracturamiento (Jv) de 30 – 40 Fr/m³ y la clasificación de la calidad de macizo rocoso (RMR) de

⁶⁹ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza Por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. P288.

⁷⁰ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Op. cit., p.131.

⁷¹ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

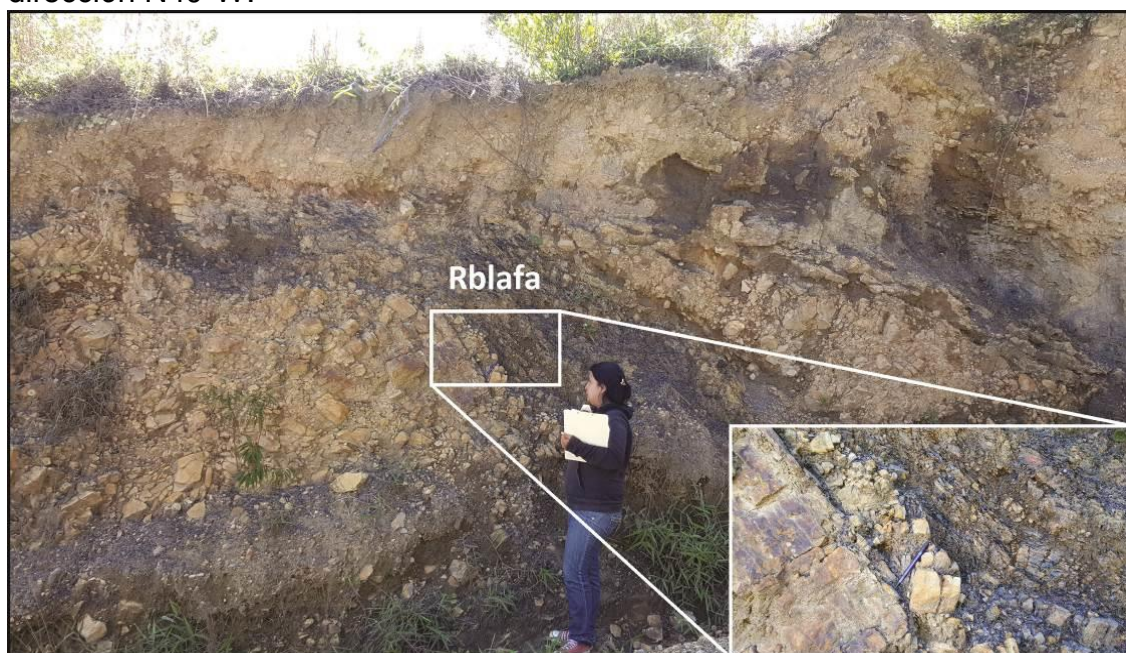
⁷² SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza Por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. P288.

Bieniawski (1979)⁷³ es pobre, con valores que oscilan entre 35 – 40. Forma suelo residual con espesor de 1 m.

Son rocas de baja resistencia a la erosión y meteorización, los movimientos en masa asociados a estas rocas son de tipo reptación, deslizamiento traslacional y caída de rocas.

Esta unidad se localiza en la vereda Gorguta del Municipio de Capitanejo; vereda Huertas, Ilarguta y Pajarito, del Municipio de Macaravita, y en la vereda Lajas del Municipio de San Miguel.

Figura 25. Roca blanda de lodolitas y areniscas de la Formación Aguardiente (Rblafa), caracterizada en la vía que comunica la vereda Buenavista del Municipio de Macaravita, con el casco urbano del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas E: 1.159.173, N: 1.210.786, en dirección N40°W.



⁷³ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Op. cit., p.131.

- **Roca intermedia de areniscas y calizas de la Formación Aguardiente (Riacfa).** Litológicamente son areniscas masivas de grano medio a grueso, color ocre a gris, dispuestas en capas muy gruesas y compactas; contienen algunos niveles de lodolitas grises oscuras a negras, con espesores de 50 cm (ver **Figura 26**). Particularmente en la zona central de la Plancha 136 – IV – A esta predominantemente compuesto por calizas fosilíferas, con alto contenido de bivalvos, masivas de color gris a pardo (ver **Figura 27**), intercalada con algunos niveles de lodolitas fisiles que se presentan con espesores de 10 a 30 cm.

Se encuentra débilmente descompuesta, correspondiendo al horizonte II del perfil de meteorización de Dearman (1974, 1991)⁷⁴; el índice de resistencia geológico es regular a bueno (GSI: 60 – 70); la permeabilidad cualitativa es baja; de acuerdo con la tabla de índice de campo para la compresión simple tomada del ISRM (1981)⁷⁵ es mayormente de clase R5 es decir con valores que oscilan entre 100 – 250 MPa; presenta un índice de fracturamiento (Jv) de 3 – 10 Fr/m³ y la clasificación de la calidad de macizo rocoso (RMR) de Bieniawski (1979)⁷⁶ es regular, con valores que oscilan entre 41 – 60.

Son rocas moderadamente resistentes a la erosión y meteorización, por lo general están asociados a esta unidad, movimientos en masa tipo volcamiento y caída de rocas. Esta unidad se observó en las veredas La Mesa, Platanal, Sabavita, Sebaruta, La Chorrera, Hoya Grande y Gorguta, del Municipio de Capitanejo; veredas San Ignacio y San Pedro, del Municipio de San Miguel, y también en las veredas La Palma y Pajarito del Municipio de Macaravita.

⁷⁴ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

⁷⁵ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza Por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. P288.

⁷⁶ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Op. cit., p.131.

Figura 26. Afloramiento de Roca intermedia de areniscas y calizas de la Formación Aguardiente (Riacfa), observada sobre la vía San Miguel – Capitanejo, en el sector Las Lomas, vereda La Mesa, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.152.818, N: 1.217.231, en dirección N50°E.

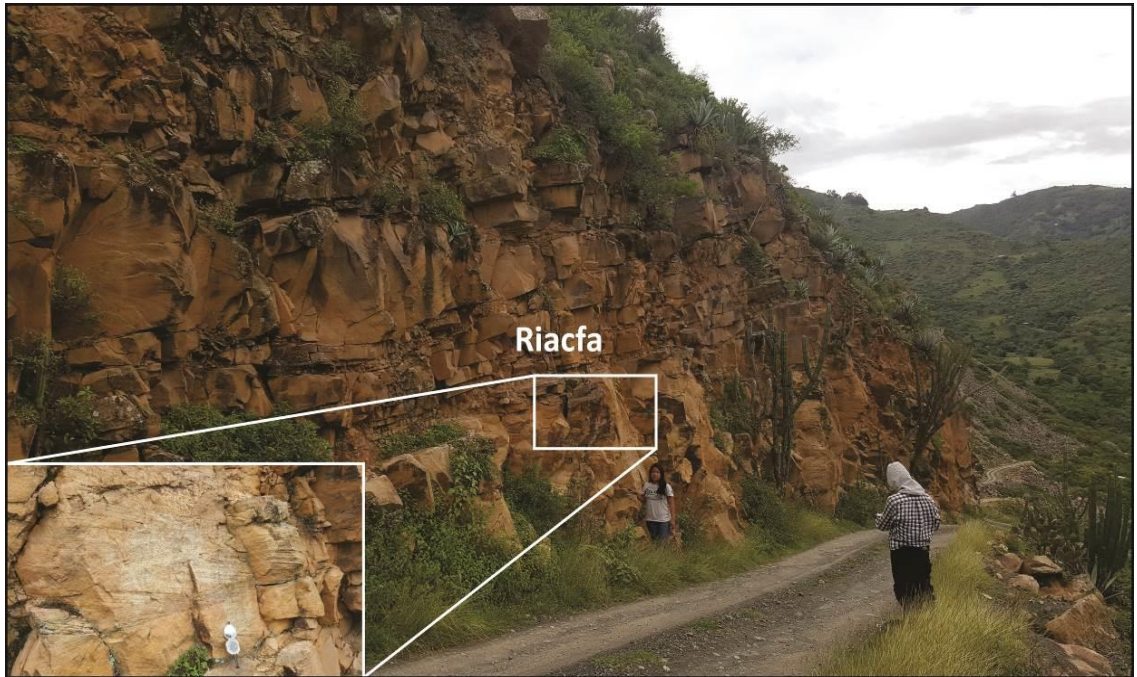


Figura 27. Afloramiento de Roca intermedia de areniscas y calizas de la Formación Aguardiente (Riacfa), observada en el cauce de la quebrada San Pedro, vereda La Chorrera, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.156.894, N: 1.213.519, en dirección N22°E.



7.2.1.3 Formación Capacho. Dentro de esta unidad geológica se identificaron y cartografiaron 2 unidades geológicas superficiales (UGS) ver **Tabla 11**, las cuales se describen a continuación.

- **Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Capacho (Rmblfc).** Litológicamente está compuesta por lodolitas laminadas, muy fisiles, de color gris oscuro a negro, moderadamente oxidadas, con estratificación plano – paralela continua, de ligero a moderado contenido de cristales de yeso, cubierta por una capa de suelo residual de 30 a 50 cm de espesor.

Esporádicamente se observan presencia de algunos niveles de areniscas de grano medio, de color ocre, con estratificación plano paralela a ondulosa, en espesores de 1 – 1,5 m, así como algunos niveles esporádicos de chert, con laminación plano paralela, moderadamente diaclasada, con espesores desde 30 cm hasta 1 m, también se presentan algunos niveles de calizas fosilíferas, con conchas de bivalvos. Esta unidad geológica superficial desarrolla un suelo residual de 50 a 70 cm de espesor en promedio (ver **Figura 28**).

La unidad se encuentra altamente meteorizada, correspondiendo al horizonte IV del perfil de meteorización de Dearman (1974, 1991)⁷⁷; el índice de resistencia geológico es pobre (GSI: 15 – 25); la permeabilidad cualitativa es baja a moderada; de acuerdo con la tabla de índice de campo para la compresión simple tomada del ISRM (1981)⁷⁸ es de clase R1 predominantemente, es decir con valores que oscilan entre 1 – 5 MPa ; presenta un índice de fracturamiento (Jv) de 50 – 60 Fr/m³ y la calificación de la calidad de macizo rocoso (RMR) de Bieniawski (1979)⁷⁹ es muy pobre, con valores <30. Son rocas poco resistentes a la erosión y meteorización, por lo general están asociados a esta unidad movimientos en masa tipo flujos, caída de detritos, solifluxión y reptación, también desarrollan erosión en cárcavas muy pronunciadas y profundas de intensidad alta.

Esta unidad geológica superficial se identificó en las veredas Siotes, Limón Dulce y Peña Lisa del Municipio de Covarachía; veredas Sabavita, El Datal, La Chorrera, La Loma, Los Molinos, Sabavita, Sebaruta, del Municipio de Capitanejo; también en las veredas El Juncal y La Palma, del Municipio de

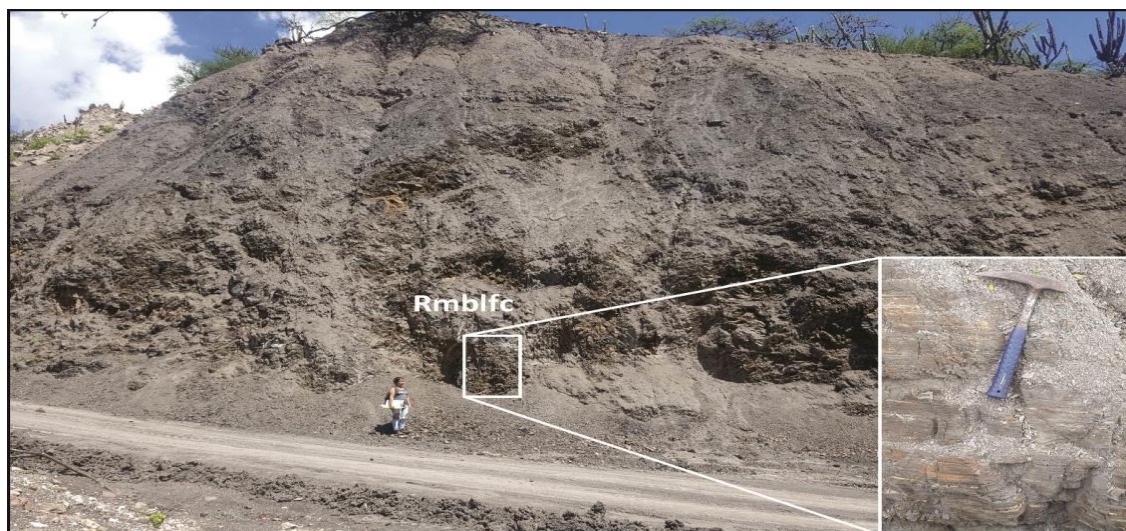
⁷⁷ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

⁷⁸ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza Por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. P288

⁷⁹ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Op. cit., p.131.

Macaravita; y también en las veredas San Ignacio, Llano Grande y Santa Helena, del Municipio de San Miguel.

Figura 28. Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Capacho (Rmbafc), observada sobre la vía Capitanejo – Covarachía, vereda Limón Dulce, del Municipio de Covarachía. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.152.753, N: 1.212.797, en dirección N75°W.



- **Roca blanda de lodolitas y calizas de la Formación Capacho (Rblcfc).** Litológicamente está compuesta por lodolitas laminadas de color gris oscuro a negro, muy fisiles, moderadamente oxidadas. Intercaladas con calizas masivas de color gris, fosilíferas con contenido de bivalvos, estas calizas se presentan en niveles entre 10 – 15 m de espesor, también intercaladas con areniscas de grano medio, color ocre claro, bien cementadas, que contiene cuarzo y mica moscovita. Se presentan en niveles entre 3 – 5 m de espesor (ver Figura 29). La unidad se encuentra altamente meteorizada, correspondiendo al horizonte

IV del perfil de meteorización de Dearman (1974, 1991)⁸⁰; el índice de resistencia geológico es pobre (GSI: 20 – 30); la permeabilidad cualitativa es baja; de acuerdo con la tabla de índice de campo para la compresión simple tomada del ISRM (1981)⁸¹, es de clase R2 es decir con valores que oscilan entre 5 – 25 MPa aproximadamente; presenta un índice de fracturamiento (Jv) de 40 – 50 Fr/m³ y la clasificación de la calidad de macizo rocoso (RMR) de Bieniawski (1979)⁸² es pobre, con valores que oscilan entre 35 – 40. Forma un suelo residual con espesor entre 20 – 40 cm.

Son rocas de baja resistencia a la erosión y meteorización, los principales movimientos en masa asociados a esta litología son de tipo reptación, solifluxión y Flujo. Esta unidad geológica superficial se observó en las veredas Siotes y Limon Dulce del Municipio de Covarachía; veredas La Palma, Pajarito, del Municipio de Macaravita; y también en las veredas Zaragoza y Cenacuta del Municipio de San Miguel.

Figura 29. Afloramiento de Roca blanda de lodolitas y calizas de la Formación Capacho (Rblcfc), descrita en la vía San Miguel – Capitanejo, vereda Zaragoza, del Municipio de San Miguel. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.157.438, N: 1.219.142, en dirección S15°W.



⁸⁰ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

⁸¹ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza Por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. P288

⁸² SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Op. cit., p.131.

7.2.1.4 Formación La Luna. Dentro de esta unidad geológica se identificó y cartografió una unidad geológica superficial (UGS) ver **Tabla 11**, la cual se describe a continuación.

- **Roca muy blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación La Luna (RmbilafI).** Litológicamente está compuesta por lodolitas laminadas, muy fisiles, de color pardo a negro, levemente oxidadas, con laminación ondulosa, con contenido de concreciones calcáreas de 30 cm de diámetro, intercalada con areniscas de grano grueso, de granos subangulares, cubierta por una capa de suelo residual de 30 a 40 cm de espesor (Figura 30). La unidad se encuentra moderadamente meteorizada, correspondiendo al horizonte III del perfil de meteorización de Dearman (1974, 1991)⁸³; el índice de resistencia geológico es pobre (GSI: 15 – 20); la permeabilidad cualitativa es baja; de acuerdo con la tabla de índice de campo para la compresión simple tomada del ISRM (1981)⁸⁴ es de clase R1 es decir con valores que oscilan entre 1 – 5 MPa aproximadamente; presenta un índice de fracturamiento (Jv) de >60 Fr/m³ y la calificación de la calidad de macizo rocoso (RMR) de Bieniawski (1979)⁸⁵ pobre, con un valor de 39.

Son rocas poco resistentes a la erosión y meteorización, por lo general están asociados a esta unidad movimientos en masa tipo reptación, flujos y caídas de detritos.

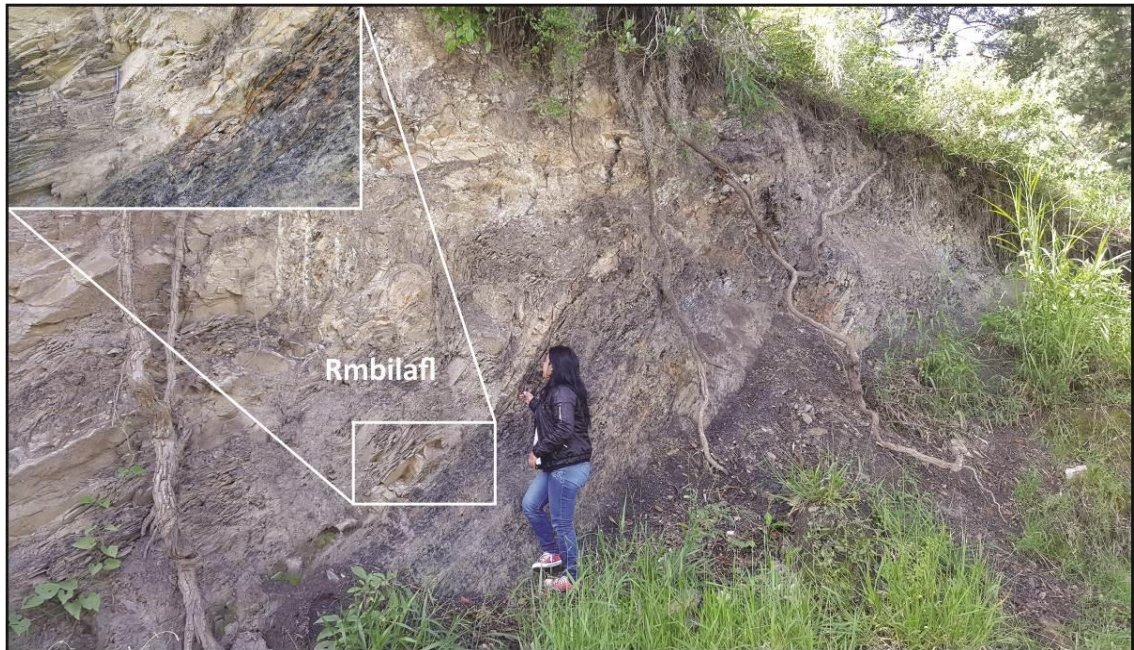
Esta unidad geológica superficial se encontró en las veredas El Datal, Sabavita, La Loma y Los Molinos, del Municipio de Capitanejo.

⁸³ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

⁸⁴ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza Por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. P288

⁸⁵ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Op. cit., p.131.

Figura 30. Roca muy blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación La Luna (Rmbilaf1), localizada sobre la vía que conduce de la vereda Hoya Grande hacia el casco urbano del Municipio de Capitanejo, en la vereda La Loma del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.155.502, N: 1.212.421, en dirección S15°E.



7.2.1.5 Formación Colón Mito – Juan. Dentro de esta unidad geológica se identificó y cartografió 1 unidad geológica superficial (UGS) ver **Tabla 11**, la cual se describe a continuación.

- **Roca blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación Colón Mito – Juan (Rbilafcm).** Litológicamente está compuesta por lodolitas laminadas de color gris oscuro a negro, muy fisiles, moderadamente oxidadas. Intercaladas con areniscas de grano fino a medio, color ocre rojizo, bien cementadas, que contiene cuarzo y mica moscovita, que se presenta en niveles entre 5 – 10 m de espesor, también hay presencia de mantos de

carbón (ver Figura 31). La unidad se encuentra altamente meteorizada, correspondiendo al horizonte IV del perfil de meteorización de Dearman (1974, 1991)⁸⁶; el índice de resistencia geológico es pobre (GSI: 25 – 35); la permeabilidad cualitativa es baja; de acuerdo con la tabla de índice de campo para la compresión simple tomada del ISRM (1981)⁸⁷.

Es de clase R1 es decir con valores que oscilan entre 1 – 5 MPa aproximadamente; presenta un índice de fracturamiento (J_v) de 40 – 50 Fr/m³ y la clasificación de la calidad de macizo rocoso (RMR) de Bieniawski (1979)⁸⁸ es regular, con valores que oscilan entre 40 – 50. Forma un suelo residual con espesor entre 20 – 30 cm. Son rocas de baja resistencia a la erosión y meteorización, los principales movimientos en masa asociados a esta litología son de tipo reptación flujo y caída de detritos.

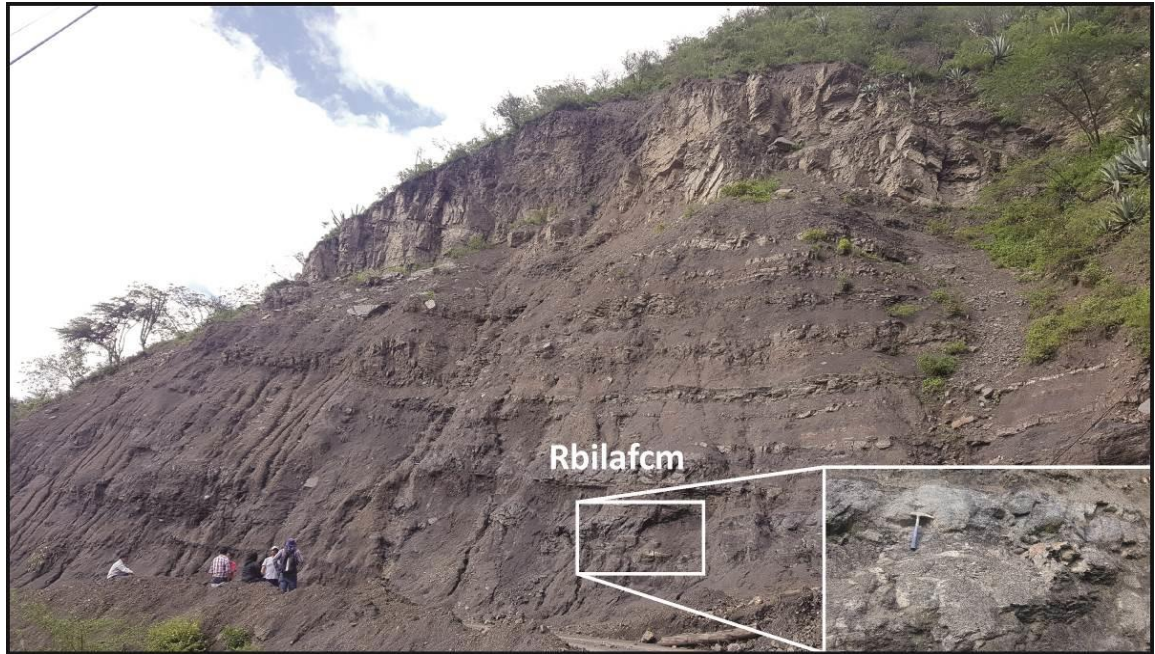
Esta unidad geológica superficial se identificó en las veredas Carrizal, Quebrada de Vera, La Playa, La Mesa, Montecillo y Platanal, del Municipio de Capitanejo; y también en la vereda Cenacuta del Municipio de San Miguel.

⁸⁶ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

⁸⁷ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza Por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. P288

⁸⁸ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Op. cit., p.131.

Figura 31. Roca blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación Colón Mito – Juan (Rbilafcm), observada sobre la vía San Miguel – Capitanejo, al lado de una mina artesanal de carbón. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.153.814, N: 1.216.166, en dirección N80°E



7.2.1.6 Formación Barco. Dentro de esta unidad geológica se identificó y cartografió 1 unidad geológica superficial (UGS) ver **Tabla 11**, la cual se describe a continuación.

- **Roca blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación Barco (Rbilab).** Litológicamente está compuesta por lodolitas laminadas de color pardo a negro, muy fisiles, levemente oxidadas, se presenta en espesores de 20 a 30 cm. Intercaladas con areniscas de grano fino a medio, color ocre, bien cementadas, que contiene cuarzo y mica moscovita, que se presenta en niveles entre 10 – 30 cm de espesor (ver Figura 32). La unidad se encuentra débilmente meteorizada, correspondiendo al horizonte II del perfil de

meteorización de Dearman (1974, 1991)⁸⁹; el índice de resistencia geológico es regular (GSI: 35 – 45); la permeabilidad cualitativa es moderada; de acuerdo con la tabla de índice de campo para la compresión simple tomada del ISRM (1981)⁹⁰ es de clase R2 es decir con valores que oscilan entre 5 – 25 MPa aproximadamente; presenta un índice de fracturamiento (Jv) de 40 – 50 Fr/m³ y la clasificación de la calidad de macizo rocoso (RMR) de Bieniawski (1979)⁹¹ es regular, con valores que oscilan entre 40 – 50. Forma un suelo residual con espesor entre 30 – 40 cm.

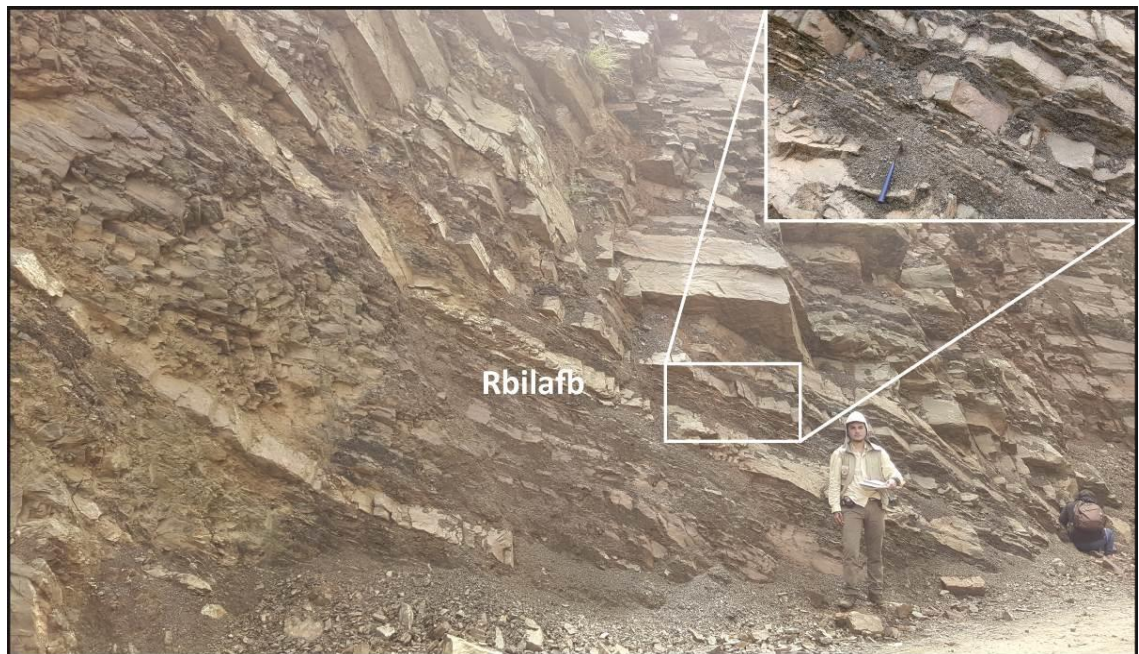
Son rocas de moderada resistencia a la erosión y meteorización, los principales movimientos en masa asociados a esta litología son de tipo reptación y caída de rocas. Esta unidad geológica superficial se observó en la vereda Agua Sucia, del Municipio de Enciso, y también en la vereda Platanal del Municipio de Capitanejo.

⁸⁹ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

⁹⁰ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza Por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. P288

⁹¹ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Op. cit., p.131.

Figura 32. Afloramiento de Roca blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación Barco (Rbilafb), observada al margen derecho del río Tunebo, sobre la vía que comunica la vereda Agua Sucia, del Municipio de Enciso, con la vereda Quebrada de Vera del Municipio de Capitanejo, a 400 m de la vía principal Capitanejo – Málaga. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.150.498, N: 1.219.946, en dirección N50°E.



7.2.1.7 Formación Los Cuervos. Dentro de esta unidad geológica se identificó y cartografió 1 unidad geológica superficial (UGS) ver **Tabla 11**, la cual se describe a continuación.

- **Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Los Cuervos (Rmbflc).** Litológicamente está compuesta por lodolitas, de color gris rojizo a ocre rojizo, moderadamente oxidadas, con estratificación plano – paralela continua a ondulosa, esta unidad geológica superficial desarrolla un suelo residual de 10 cm de espesor en promedio (ver **Figura 33**). La unidad se encuentra altamente meteorizada, correspondiendo al horizonte IV del perfil de meteorización de Dearman (1974, 1991)⁹²; el índice de resistencia geológico es pobre (GSI: 20 – 30); la permeabilidad cualitativa es baja; de acuerdo con la tabla de índice de campo para la compresión simple tomada del ISRM (1981)⁹³, es de clase R1 predominantemente, es decir con valores que oscilan entre 1 – 5 MPa, presenta un índice de fracturamiento (Jv) de 40 – 50 Fr/m³ y la calificación de la calidad de macizo rocoso (RMR) de Bieniawski (1979)⁹⁴ es pobre, con valores <40.

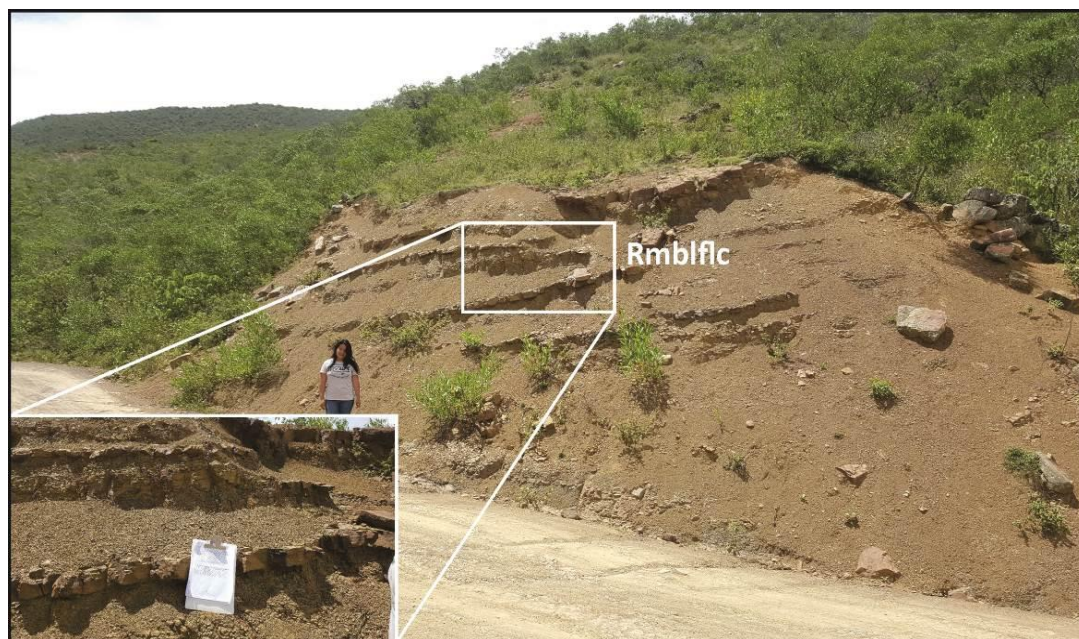
Son rocas de baja resistencia a la erosión y meteorización, los principales movimientos en masa asociados a esta litología son de tipo reptación. Esta unidad geológica superficial se localiza en la parte NW de la Plancha 136 –IV– A, en la Vereda La Mesa del Municipio de Capitanejo.

⁹² SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.p182.

⁹³ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza Por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. P288

⁹⁴ SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Op. cit., p.131.

Figura 33. Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Los Cuervos (Rmbflc), caracterizada sobre la vía San Miguel – Capitanejo, en el sector Las Lomas, vereda La Mesa, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.152.596, N: 1.217.633, en dirección N55°E.



7.2.1.8 Cuaternarios:

- **Suelo residual granular de la Formación Aguardiente (Srgfa).** Esta unidad geológica superficial se encuentra ubicada al sur – este de la zona de estudio. En las veredas San Pedro, en jurisdicción del Municipio de San Miguel, y la vereda Buena Vista, jurisdicción del Municipio de Macaravita.

Suelo granular ligeramente cohesivo, altamente meteorizado física y químicamente, cuya fábrica y estructura de la litología original es mínima. Sin embargo, se alcanza a distinguir algunos fragmentos sueltos de arenisca muy meteorizada, también, planos de discontinuidad que pueden corresponder con

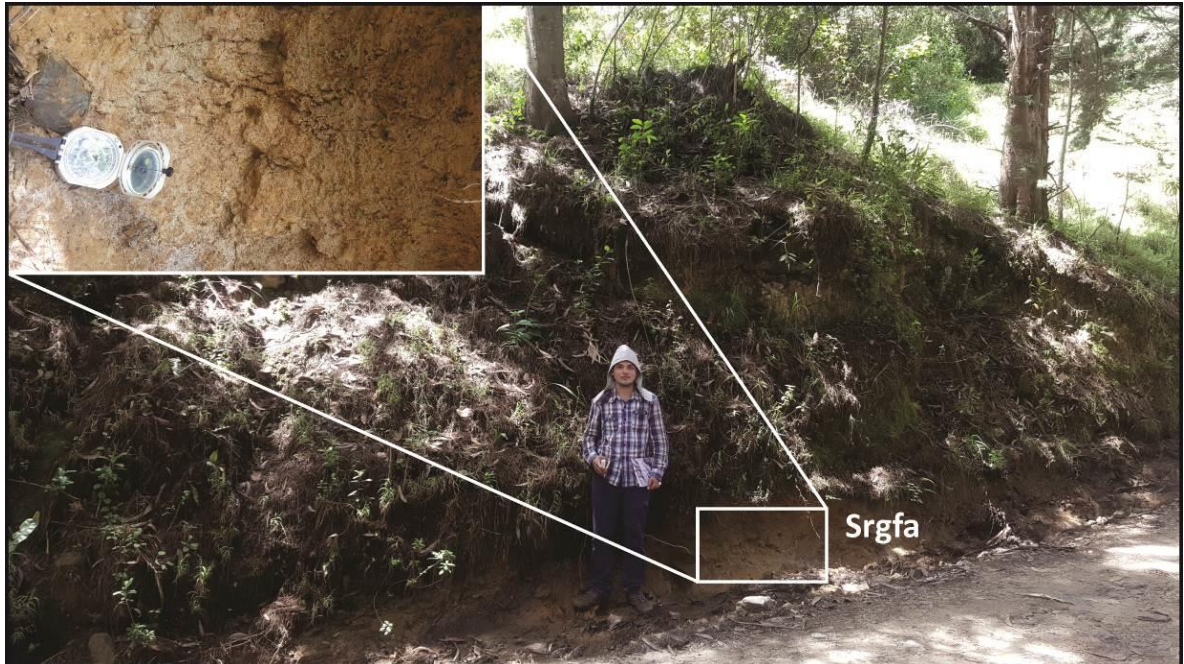
diaclasas de la roca original. Presenta espesores 2 – 2,6 m en los afloramientos observados.

El suelo es arenoso a areno – limoso, color ocre anaranjado a ocre grisáceo, la resistencia a la compresión simple es blanda a firme, suelto, húmedo a ligeramente húmedo (ver **Figura 34**).

Sobre esta unidad geológica superficial se registran movimientos en masa de tipo deslizamiento rotacional y reptación, se caracteriza por su morfología ligeramente inclinada, asociado a cimas o laderas onduladas.

Esta unidad geológica superficial se observó en la vereda Buenavista del Municipio de Macaravita, y en la vereda San Pedro del Municipio de San Miguel.

Figura 34. Afloramiento de Suelo residual granular de la Formación Aguardiente (Srgfa), observado en la vía que comunica la vereda Buena Vista con Macaravita, a 200 m de la escuela Buenavista. Fotografía tomada en las coordenadas E: 1.160.973, N: 1.211.291, en dirección S65°E.



- **Suelo transportado aluvial (Stal).** Están conformados por depósitos recientes, los cuales han sido transportados y acumulados a lo largo de las quebradas; son depósitos heterogéneos y varían desde arenas, gravas y cantos pasando en algunos sectores a bloques de composición variada, incluyen areniscas, calizas, y lodolitas (ver **Figura 35**).

En general, los depósitos están pobremente sorteados, compuestos principalmente por arenas finas, medias a gruesas, cantos y bloques, con textura limosa, arenosa y gravosa, matriz areno – limosa. La humedad natural o condición de humedad según Varnes (1978)⁹⁵ es seco, de compacidad media y permeabilidad baja a moderada.

⁹⁵ VARNES, David. Slope movement Types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control, Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C.1978. p. 11-33.

Esta unidad de suelo se identificó sobre los ríos y quebradas principales; encontrándose principalmente al occidente de la Plancha 136 – IV – A, asociada a los cauces de los ríos Chicamocha y Tunebo, y también al norte de la Plancha 136 – IV – A, asociada a la quebrada La Miel.

Figura 35. Suelo transportado aluvial (Stal), observado sobre un pequeño puente, que cruza el río Chicamocha, en la vereda Montecillo del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.150.072, N: 1.216.719, en dirección S25°W.



- **Suelo transportado de cono aluvial (Stcal).** Esta unidad de suelo se identificó sobre los puntos donde los canales o quebradas provenientes de las zonas de mayor relieve, sufren un cambio abrupto de pendiente y se extienden sobre las zonas planas a suavemente inclinadas, asociadas a zonas de inundación del río Chicamocha, principalmente al SW de la Plancha 136 – IV – A. Su depósito está constituido por arena, arcillas y grava, con espesores de materiales más gruesos hacia el ápice y más finos en la zona distal.

Esta unidad geológica superficial se observó en las veredas Peña Lisa, Tapias y Limón Dulce, del Municipio de Covarachía; y también en la vereda La Loma del Municipio de Capitanejo.

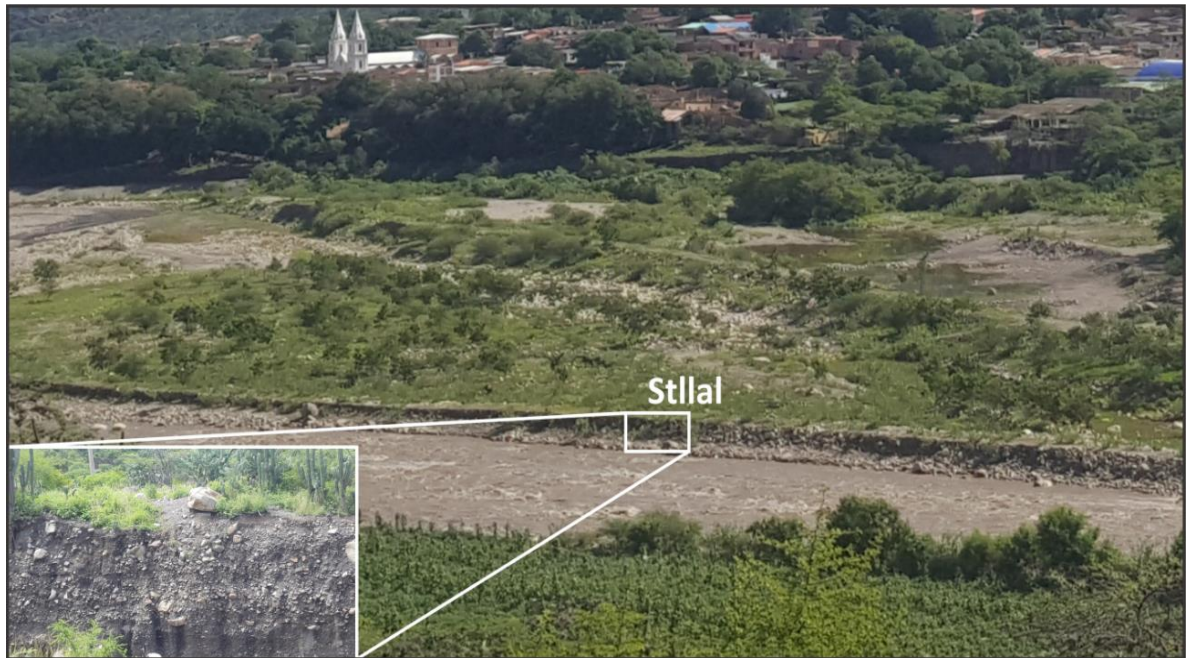
- **Suelo transportado de llanura aluvial (Stllal).** Son depósitos heterogéneos en su granulometría que comprende tamaños desde arcilla a limos, arenas y cantos, sobre estos depósitos se encuentran zonas de cultivos y se desarrolla una densa vegetación de pastos limpios y pastos enmalezados. En general los depósitos presentan cantos, embebidos en una matriz de suelo arenosa y limosa; estos depósitos de arena, se han acumulado formando zonas planas extensas, que hicieron parte de antiguos cursos de los ríos Chicamocha y Tunebo, y de las quebradas San Pedro y La Pola (ver **Figura 36**).

Presentan una humedad natural o condición de humedad según Varnes (1978)⁹⁶ seca a húmeda, de compacidad media y de permeabilidad media a alta. El espesor varía entre 5 – 50 m.

Esta unidad geológica superficial se encuentra al occidente de la Plancha 136 – IV – A. en las veredas La Chorrera, El Datal, La Loma, Quebrada De Vera y Montecillo, del Municipio de Capitanejo; y también en las veredas Tapias, Siotes, Limón Dulce y Peña Lisa del Municipio de Covarachía.

⁹⁶ *Ibíd.*, p. 11-33.

Figura 36. Suelo transportado de llanura aluvial (Stllal), asociado al río Chicamocha, observado al occidente del casco urbano del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.152.815, N: 1.212.776, en dirección N30°E.



- **Suelo transportado de terraza aluvial (Sttal).** Se presenta en su parte superior un suelo residual limoso, que alcanza los 80 cm de espesor, cubriendo un depósito de arenas de grano fino, con niveles de gravas, embebidos en arenas gruesas y con clastos de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas. Los espesores varían entre 10 – 40 m (ver **Figura 37**).

El depósito, presenta una textura arenosa, con granos subredondeados a redondeados y esfericidad baja, la humedad natural o condición de humedad según Varnes (1978)⁹⁷ es seco y la permeabilidad alta, de compacidad media a baja.

⁹⁷ *Ibíd.*, p. 11-33.

Esta unidad se localiza al occidente de la Plancha 136 – IV – A, en las veredas Quebrada de Vera, Montecillo, El Datal, La Loma, Casa Blanca y La Mesa, del Municipio de Capitanejo, asociada a los ríos Chicamocha y Tunebo.

Figura 37. Afloramiento de Suelo transportado de terraza aluvial (Sttal), observado sobre la vía principal Capitanejo – Málaga, en la vereda Agua Sucia, del Municipio de Enciso, Departamento de Santander. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.150.087, N: 1.219.912, en dirección S65°E



- **Suelo transportado de talus (Stt).** Este depósito, se encuentra ampliamente distribuido en varios sectores de la Plancha 136 – IV – A.

El suelo está conformado por depósitos asociados al desprendimiento de rocas, que caen desde las geoformas de pendientes abruptas a escarpadas. Los depósitos están mal a moderadamente sorteados, compuestos principalmente por cantos y bloques de areniscas y calizas, con tamaños hasta de 80 cm, embebidos en una matriz areno – limosa (ver **Figura 38**).

El depósito se caracteriza por su textura de cantos y bloques subangulares a angulares y esfericidad baja, la humedad natural o condición de humedad según Varnes (1978)⁹⁸ es seco y permeable, su compacidad es media. Esta unidad también es conocida como Canchal. Esta unidad geológica superficial se identificó en las veredas Carrizal, Quebrada De Vera, La Playa, La Mesa, Montecillo, Platanal, del Municipio de Capitanejo; y vereda Cenacuta del Municipio de San Miguel.

Figura 38. Suelo transportado de talus (Stt), observado sobre la vía San Miguel – Capitanejo, a 400 m de la finca Pita, vereda Platanal, del Municipio de Capitanejo. Fotografía tomada en las coordenadas E: 1.153.058 N: 1.217.455, en dirección S43°E.



Figura 39. Suelo transportado de talus (Stt), observado al lado de la escuela rural La Chorrera, en la entrada al sendero que conduce a la cascada La Chorrera.

⁹⁸ *Ibíd.*, p. 11-33.

Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1157139 N: 1213360 en dirección S30°W.

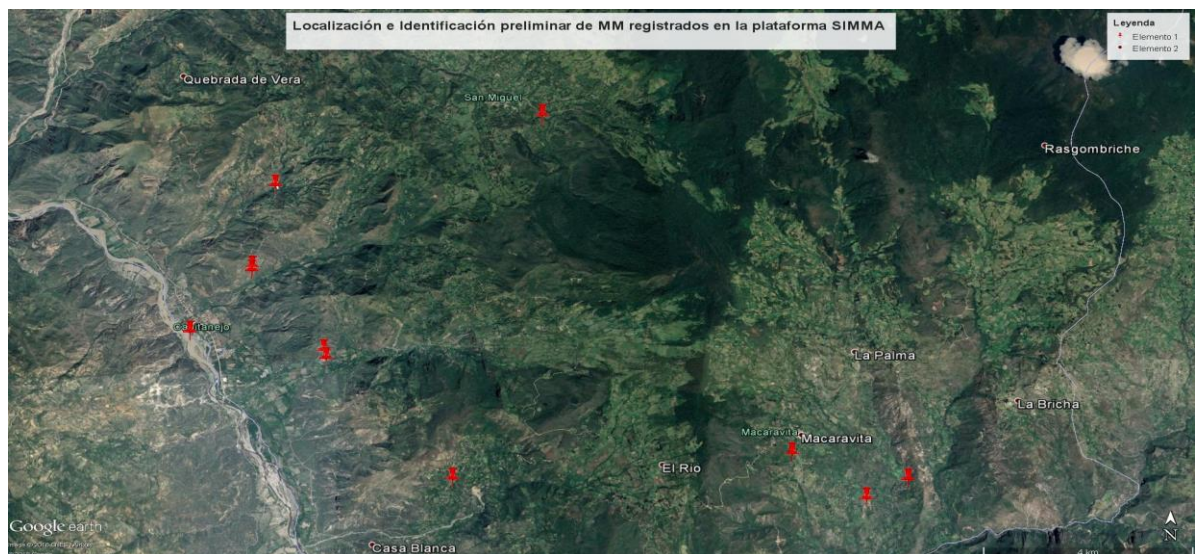


8. MORFODINÁMICA

Las causas de los movimientos en masa tienen como principales detonantes la lluvia y los sismos. Especialmente a la temporada invernal de la emergencia económica, social y ecológica del 2010 (Decreto 4580 del 7 de diciembre de 2010, Ministerio del interior y de Justicia, 2010), y el sismo del 10 de marzo de 2014; eventos que generaron inundaciones y deslizamientos en diferentes zonas de Colombia, afectando también al área de la Plancha 136 – IV – A. Otras causas son la erosión intensa y en menor proporción las actividades antrópicas.

La identificación y caracterización de áreas susceptibles a movimientos en masa, es un insumo importante para la zonificación de amenazas naturales. En la fase de pre – campo de la Plancha 136 – IV – A, se realizó una identificación preliminar de sitios que han presentado movimientos en masa; para lo cual se hizo la recopilación de información existente en documentos y la base de datos SIMMA (Sistema de Información de Movimientos en Masa).

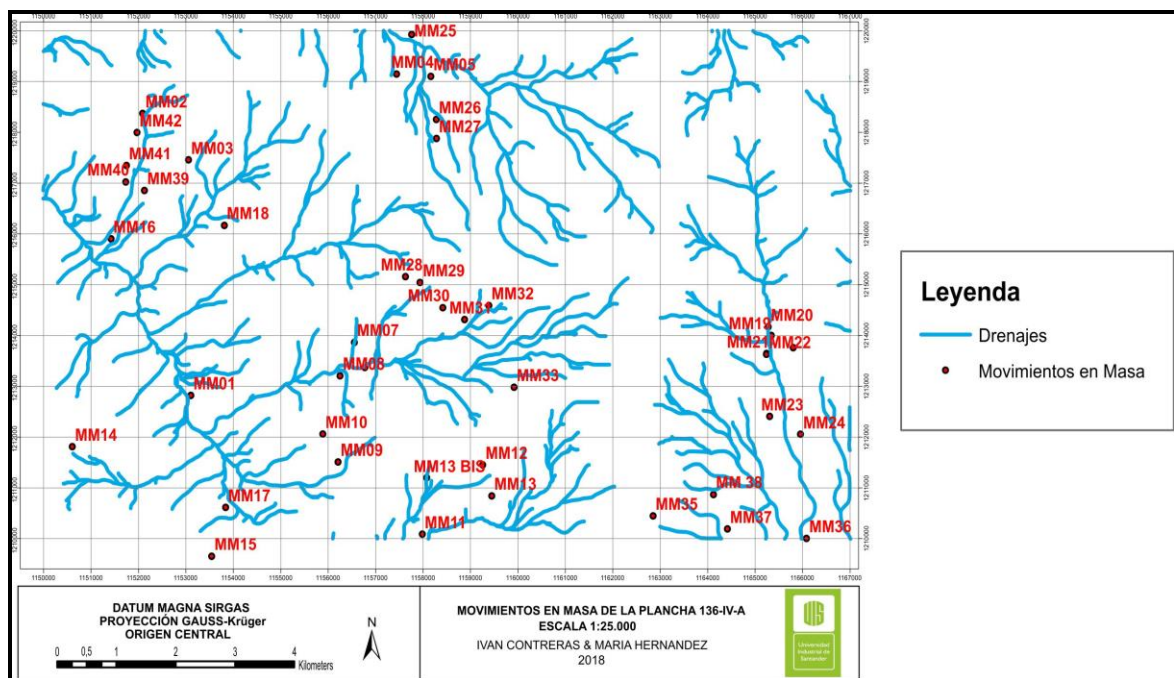
Figura 40. Identificación y localización preliminar de sitios que han presentado movimientos en masa registrados en la base de datos SIMMA.



8.1 MOVIMIENTOS EN MASA REGISTRADOS EN LA PLANCHA 136 – IV – A

Durante el trabajo de campo se registraron 43 movimientos en masa ver **Figura 41**, los cuales se muestran en la **Tabla 12**, con sus coordenadas, clasificados por tipo y subtipo, según Cruden y Varnes (1986)⁹⁹. La mayoría de los movimientos en masa registrados se encuentran ubicados cerca de las vías o senderos de vías, causando daños económicos, afectando cultivos, potreros, cercas, entre otros; y también daños de infraestructura, afectando vías, senderos, postes eléctricos y potencialmente viviendas. Cada uno de estos movimientos en masa, representan zonas del terreno susceptibles e inestables.

Figura 41. Movimientos en masa registrados en la plancha 136 – IV – A.



⁹⁹ CRUDEN, D., VARNES, D. Landslide Types and Processes, Special Report. Transportation Research Board, National Academy of Sciences. 1996, p.40-247.

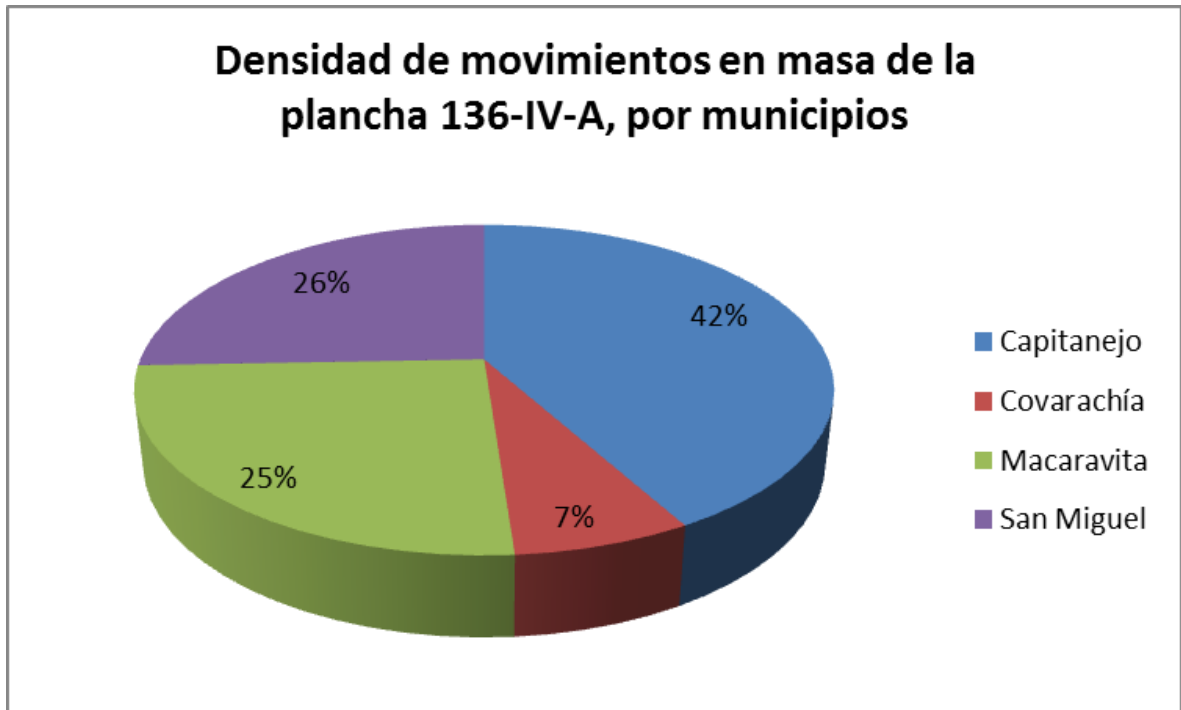
Tabla 12. Movimientos en masa registrados en el área de estudio.

Este	Norte	Municipio	Vereda	Tipo y Subtipo De Movimiento
1.164.121	1.210.868	Macaravita	La Palma	Caída de roca
1.153.106	1.212.820	Capitanejo	Casco Urbano	Volcamiento de rocas y caída de tierras
1.152.092	1.218.369	Capitanejo	La Mesa	Deslizamiento traslacional
1.153.059	1.217.455	Capitanejo	Platanal	Caída de roca
1.157.444	1.219.145	San Miguel	Zaragoza	Reptación de Suelo
1.158.165	1.219.098	San Miguel	Santa Helena	Deslizamiento rotacional
1.156.774	1.213.369	Capitanejo	La Chorrera	Deslizamiento rotacional
1.156.553	1.213.862	Capitanejo	La Chorrera	Flujo de detritos
1.156.252	1.213.204	Capitanejo	La Loma	Deslizamiento en cuña y flujo de detritos
1.156.209	1.211.508	Capitanejo	La Loma	Flujo de detritos
1.155.887	1.212.057	Capitanejo	La Loma	Deslizamiento en cuña
1.157.987	1.210.088	Capitanejo	Los Molinos	Deslizamiento rotacional
1.159.260	1.211.451	Capitanejo	Buena Vista	Deslizamiento rotacional
1.159.448	1.210.841	Capitanejo	Buena Vista	Caída de roca
1.158.080	1.211.197	Capitanejo	Gorguta	Deslizamiento rotacional
1.150.607	1.211.810	Covarachía	Limón Dulce	Caída de roca
1.153.548	1.209.652	Covarachía	Peña Lisa	Caída de roca y detritos
1.151.426	1.215.900	Capitanejo	Montecillo	Deslizamiento rotacional
1.153.840	1.210.614	Covarachía	Peña Lisa	Volcamiento
1.153.814	1.216.166	Capitanejo	Platanal	Caída de rocas y caída de detritos
1.165.802	1.213.758	Macaravita	Ilarguta	Reptación de Suelo
1.165.342	1.213.998	Macaravita	Ilarguta	Deslizamiento rotacional y caída de roca

Este	Norte	Municipio	Vereda	Tipo y Subtipo De Movimiento
1.165.277	1.214.167	Macaravita	Ilarguta	Deslizamiento rotacional
1.165.241	1.213.643	Macaravita	Ilarguta	Caída de roca
1.165.237	1.213.628	Macaravita	Ilarguta	Caída de roca
1.165.308	1.212.405	Macaravita	La Palma	Deslizamiento rotacional
1.165.958	1.212.053	Macaravita	Huertas	Caída de detritos
1.157.762	1.219.924	San Miguel	Tablón	Deslizamiento rotacional
1.158.280	1.218.251	San Miguel	Santa Helena	Caída de roca y detritos
1.158.283	1.217.879	San Miguel	Santa Helena	Caída de roca y detritos
1.157.629	1.215.156	San Miguel	San Ignacio	Reptación de Suelo
1.157.938	1.215.043	San Miguel	San Ignacio	Caída de detritos
1.158.417	1.214.547	San Miguel	San Ignacio	Deslizamiento rotacional
1.158.877	1.214.311	San Miguel	San Ignacio	Caída de roca
1.159.389	1.214.586	San Miguel	San Pedro	Caída de roca
1.159.920	1.212.980	San Miguel	San Pedro	Caída de roca
1.162.848	1.210.447	Macaravita	La Palma	Deslizamiento rotacional
1.166.084	1.210.001	Macaravita	Huertas	Deslizamiento rotacional y caída de rocas
1.164.415	1.210.188	Macaravita	El Juncal	Deslizamiento traslacional
1.152.130	1.216.853	Capitanejo	La Mesa	Caída de roca
1.151.737	1.217.022	Capitanejo	La Mesa	Deslizamiento en cuña y flujo de detritos
1.151.750	1.217.346	Capitanejo	La Mesa	Deslizamiento en cuña y flujo de detritos
1.151.972	1.217.997	Capitanejo	La Mesa	Caída de roca

El municipio más afectado por movimientos en masa en la Plancha 136 – IV – A es Capitanejo, con un 42% de los movimientos en masa identificados ver **Figura 42**.

Figura 42. Densidad en porcentaje de movimientos en masa registrados en campo por municipio, en el área de la Plancha 136 – IV – A.



Los movimientos en masa observados en la Plancha 136 – IV – A, fueron clasificados como Deslizamiento rotacional (ver **Figura 43**), Volcamiento (ver **Figura 44**), Caída de roca (ver **Figura 45**), Caída de detritos (ver **Figura 46**), Deslizamiento traslacional planar (ver **Figura 47**), Deslizamiento traslacional en cuña (ver **Figura 48**), Reptación de Suelo (ver **Figura 49**), Flujo de detritos (**Figura 50**). Siendo caída de roca y deslizamiento rotacional los movimientos en masa predominantes (ver **Figura 51**).

Figura 43. A. Deslizamiento rotacional de estilo compuesto, observado en la vía San Miguel – Macaravita, en la vereda La Palma, del Municipio de Macaravita. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.162.848, N: 1.210.447, en dirección N55°E. B. Deslizamiento rotacional de estilo único, observado al margen derecho de la quebrada La Miel, en la finca El Garbanzal, vereda Tablón del Municipio de San Miguel, registrado en las coordenadas: E: 1.157.762, N: 1.219.924. Fotografía tomada desde la vía San Miguel – Capitanejo, en dirección N25°E.



Figura 44. A. Movimiento en masa de tipo caída de detritos, registrado sobre la vía Capitanejo – Tipacoque, al margen izquierdo del río Chicamocha, afectando 100 m de la vía. Foto tomada en las coordenadas: E: 1.153.840, N: 1.210.614, en dirección S10°W. B. Movimiento en masa de tipo volcamiento y caída de detritos, observado a 20 m de la vía principal del casco urbano del Municipio de Capitanejo, al margen derecho del río Chicamocha, registrado en las coordenadas: E: 1.153.106, N: 1.212.120.



Figura 45. Caída de detritos observada en la vía San Miguel – Macaravita, a 200 m en línea recta de la escuela rural San Ignacio, vereda San Ignacio del Municipio de San Miguel. Fotografía tomada en las coordenadas E: 1.157.938, N: 1.215.043, en dirección N29°E.



Figura 46. Caída de Roca, observada en la vía Capitanejo – San Miguel, aproximadamente a 400 m de la finca Pita, vereda Platanal del Municipio de Capitanejo, registrado en las coordenadas: E: 1.153.057, N: 1.217.455. Fotografía panorámica tomada en dirección N40°.

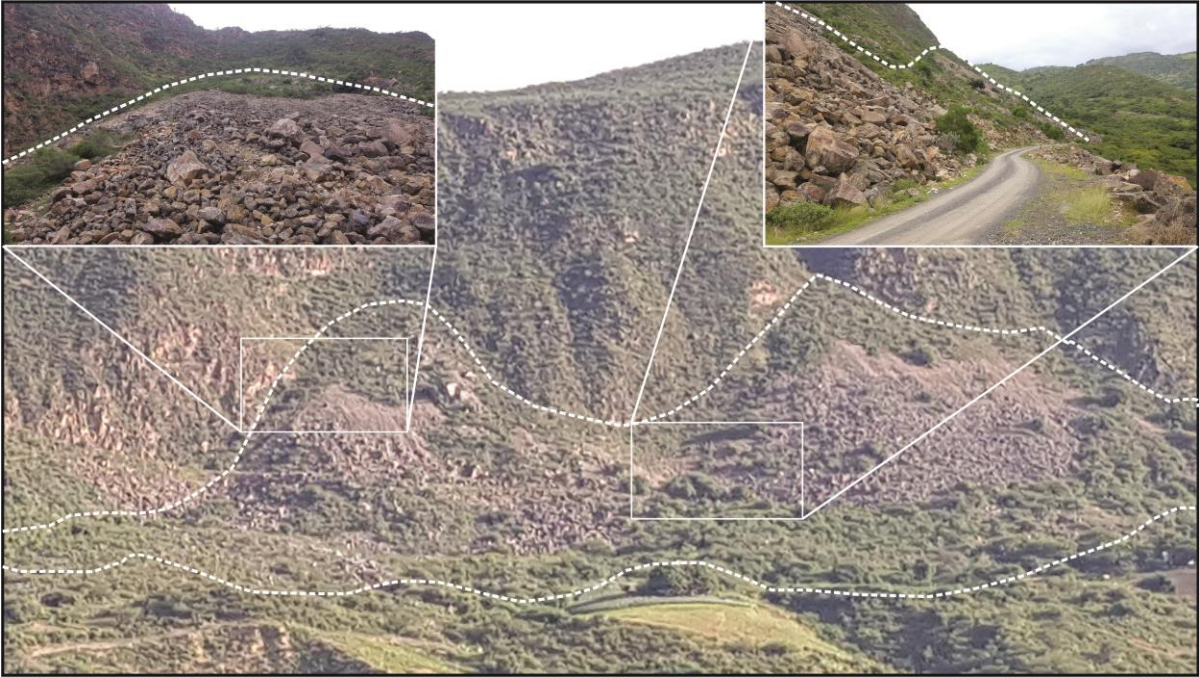


Figura 47. Deslizamiento traslacional planar, observado en la vía que conduce del casco urbano del Municipio de Macaravita a la vereda El Juncal, del Municipio de Macaravita. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.164.415, N: 1.210.188, en dirección N15°E.



Figura 48. Deslizamiento traslacional en cuña, observado al margen derecho de la quebrada La mesa, vereda La Mesa, del Municipio de Capitanejo. En las coordenadas: E: 1.151.750, N: 1.217.346. Fotografía tomada desde la vía Vereda La Mesa – Casco Urbano de Capitanejo, en dirección S40°W.

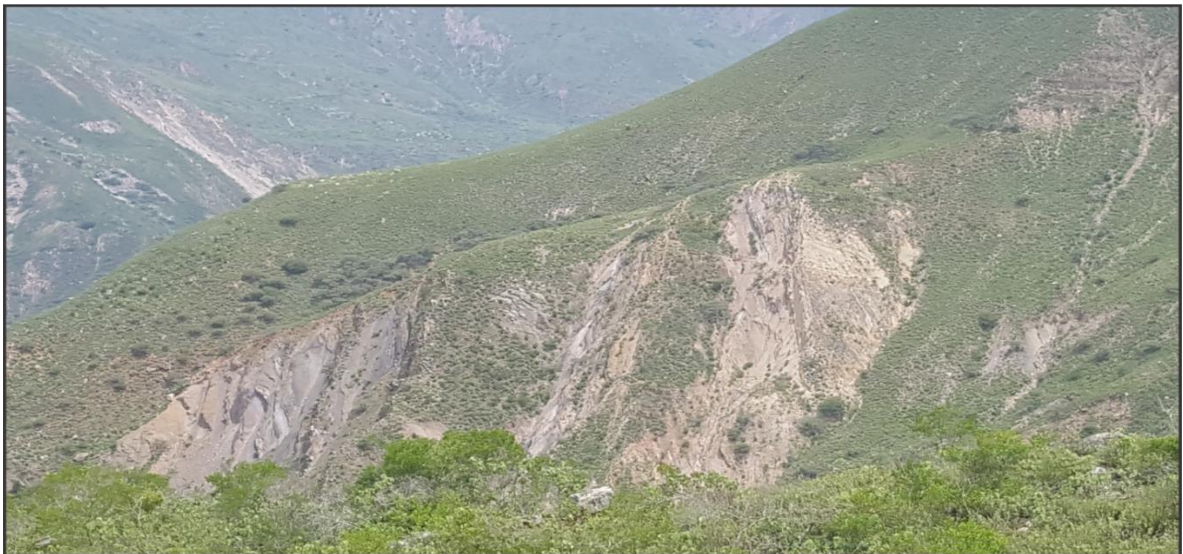


Figura 49. Reptación de suelos, observada al margen izquierdo la vía San Miguel – Macaravita, aproximadamente 50 m en línea recta de la escuela rural San Ignacio, vereda San Ignacio, del Municipio de San Miguel. Fotografía tomada en las coordenadas: E: 1.157.629, N: 1.215.156, en dirección S74°E.

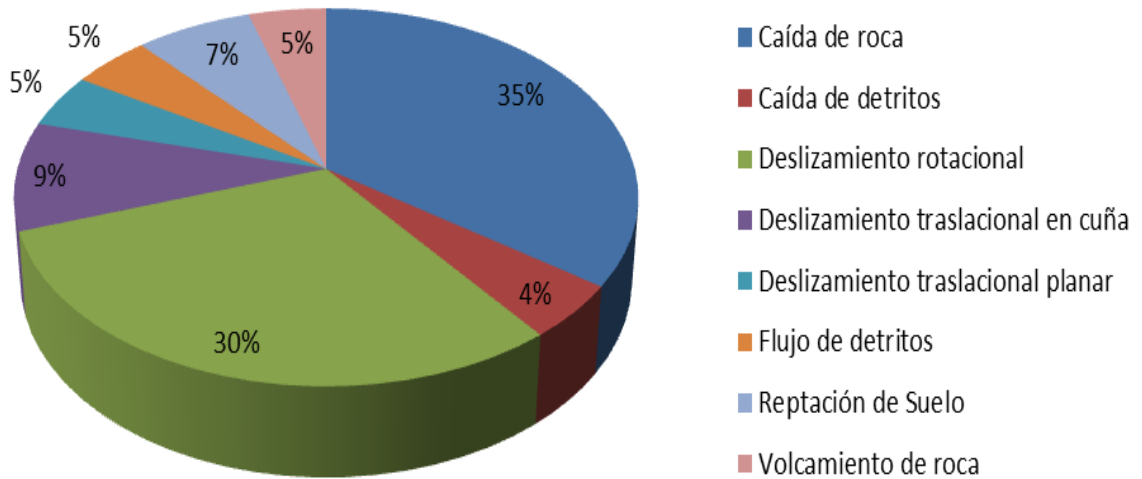


Figura 50. Flujo de detritos, observado al margen derecho de la quebrada San Pedro, registrado en las coordenadas: E: 1.156.553, N: 1.213.862. Fotografía tomada desde de la vía que conduce desde la escuela La Chorrera hacia el casco urbano del Municipio de Capitanejo, en dirección N7°E.



Figura 51. Densidad en porcentajes de tipos de movimientos en masa registrados en campo en el área estudio (Plancha 136 – IV – A).

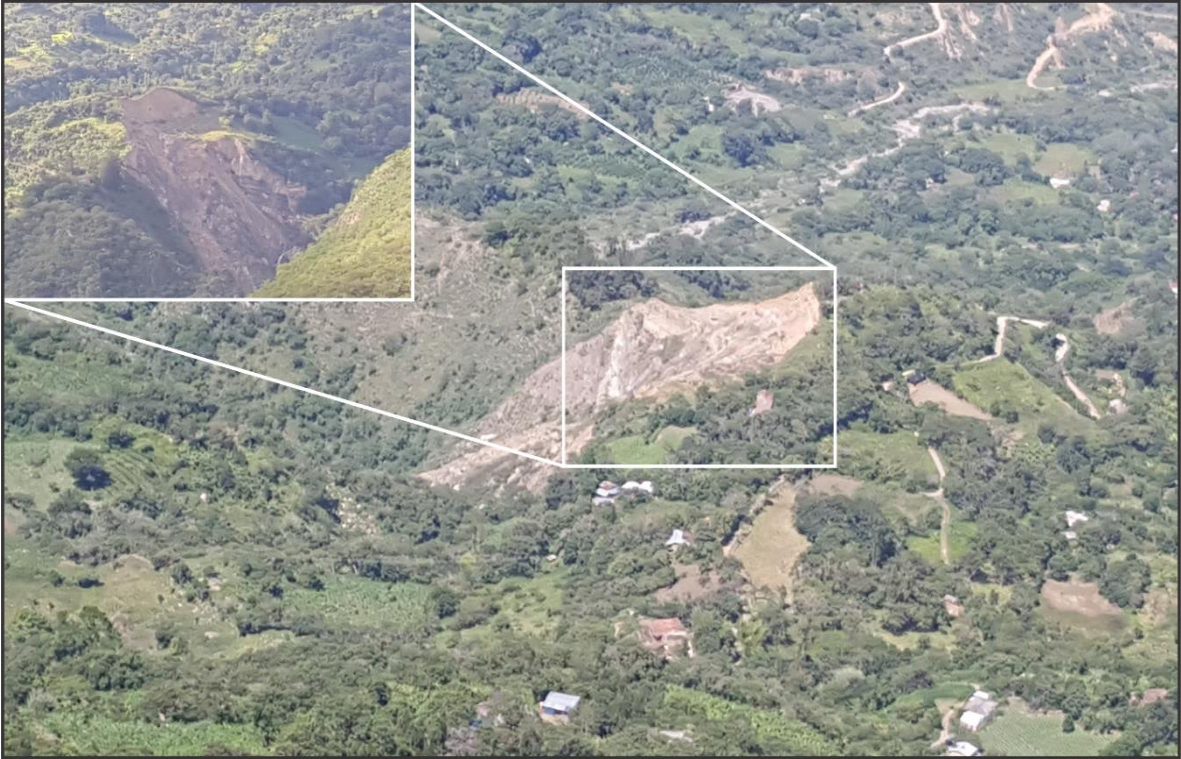
Tipo de movimientos en masa de la plancha 136-IV-A



El movimiento en masa de mayor dimensión fue registrado en el límite sur de la Plancha 136 – IV – A, al lado del centro educativo Los Molinos ver **Figura 52** , en la vereda Los Molinos del Municipio de Capitanejo, con un ancho de la masa desplazada de 200 m, una longitud horizontal de corona a punta de 150 m y diferencia de altura de corona a punta de 100 m, en estado activo, afectando la unidad Roca blanda de la Formación Tibú – Mercedes, este es un deslizamiento rotacional de estilo compuesto, de distribución retrogresiva, en estado activo, causado en gran medida por el contraste en permeabilidad de los materiales y la cercanía con la quebrada Los Molinos, y mal manejo de aguas por los cultivos, en donde el factor detonante fueron lluvias de duración mayor a 72 horas, según los pobladores de la vereda Gorguta, este evento ocurrió hace aproximadamente 4 años, causando daños a la infraestructura, tumbando 3 postes eléctricos, 3 casas ,

también causó daños económicos, con la pérdida de ganado; también causó el agrietamiento de la escuela Los Molinos, la cual se encuentra a escasos 15 m del movimiento en masa.

Figura 52. Deslizamiento rotacional de estilo compuesto, observado a 15 m al norte de la escuela Los Molinos, vereda Los Molinos del Municipio de Capitanejo. Registrado en las coordenadas: E: 1.157.980, N: 1.210.086.



9. MODELADO DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL Y RESULTADO

9.1 CREACIÓN DEL SET DE DATOS

Para la generación del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa de la plancha, se tuvieron en cuenta los mapas en formato raster de 10 variables, verificando que todos los mapas tuvieran el mismo número de píxeles (1.088.000 píxeles de tamaño 12,5 m x 12,5 m). Los mapas en formato shapefile se convirtieron a formato raster usando ARGIS 10.1, Esri (2012)¹⁰⁰, los mapas de las variables rugosidad, acuenca, pendiente y curvatura (ver **Figura 53**) se obtuvieron a partir del procesamiento del DEM ALOS PALSAR, con una resolución radiométrica de 16 bits y una resolución espacial de 12,5 m.

¹⁰⁰ ESRI, ArcGis Version (10.1) [Software]. En ESRI. 2012. Disponible en: <http://www.esri.com/software/arcgis>.

Mapas de: A). acuenca, B). curvatura, C). pendientes, D). rugosidad obtenidos a partir del DEM ALOS PALSAR.

Figura 53. A) Mapa de calificación de susceptibilidad por Acuenca.

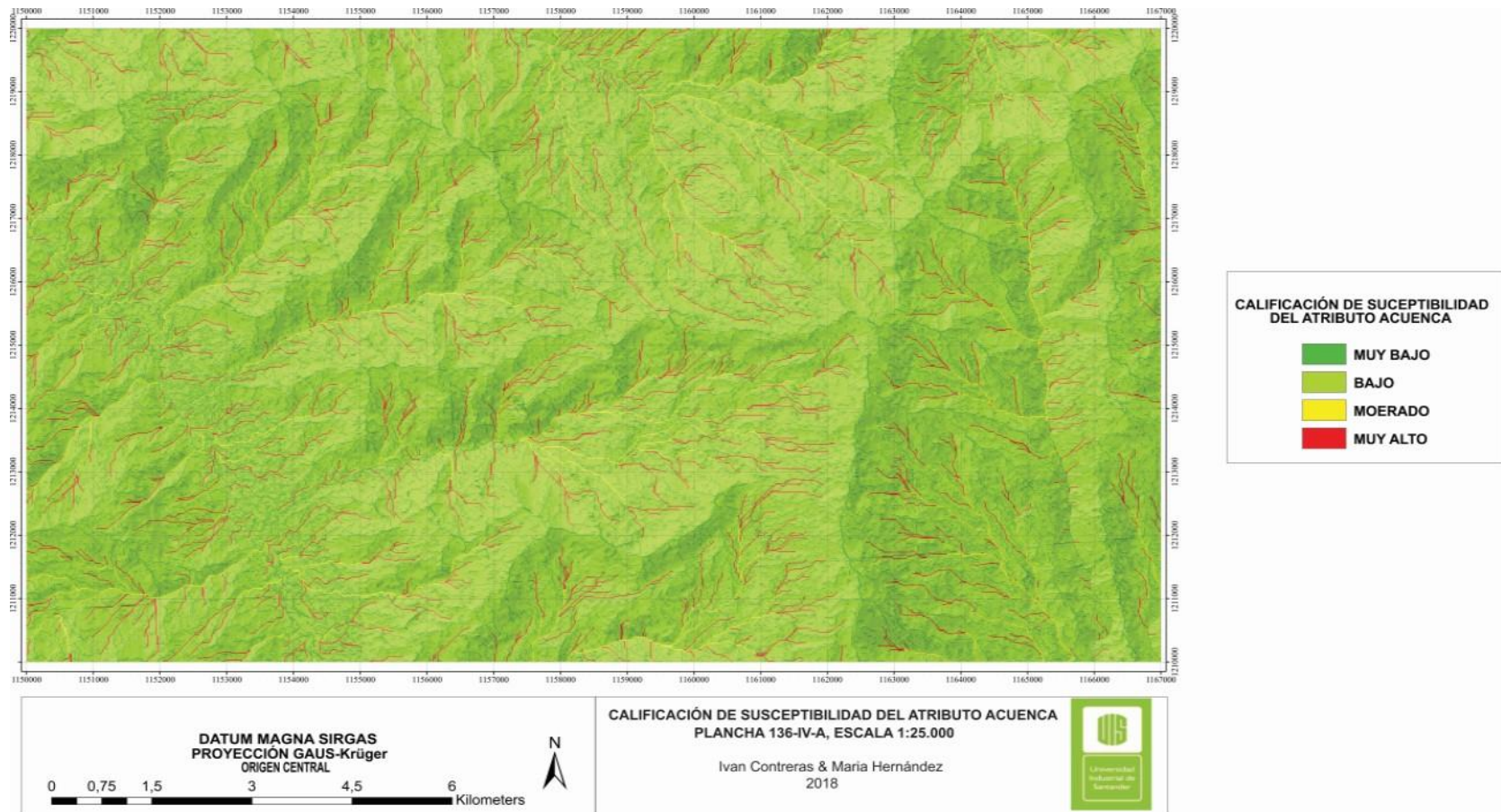


Figura 54. B) Mapa de calificación de susceptibilidad por curvatura.

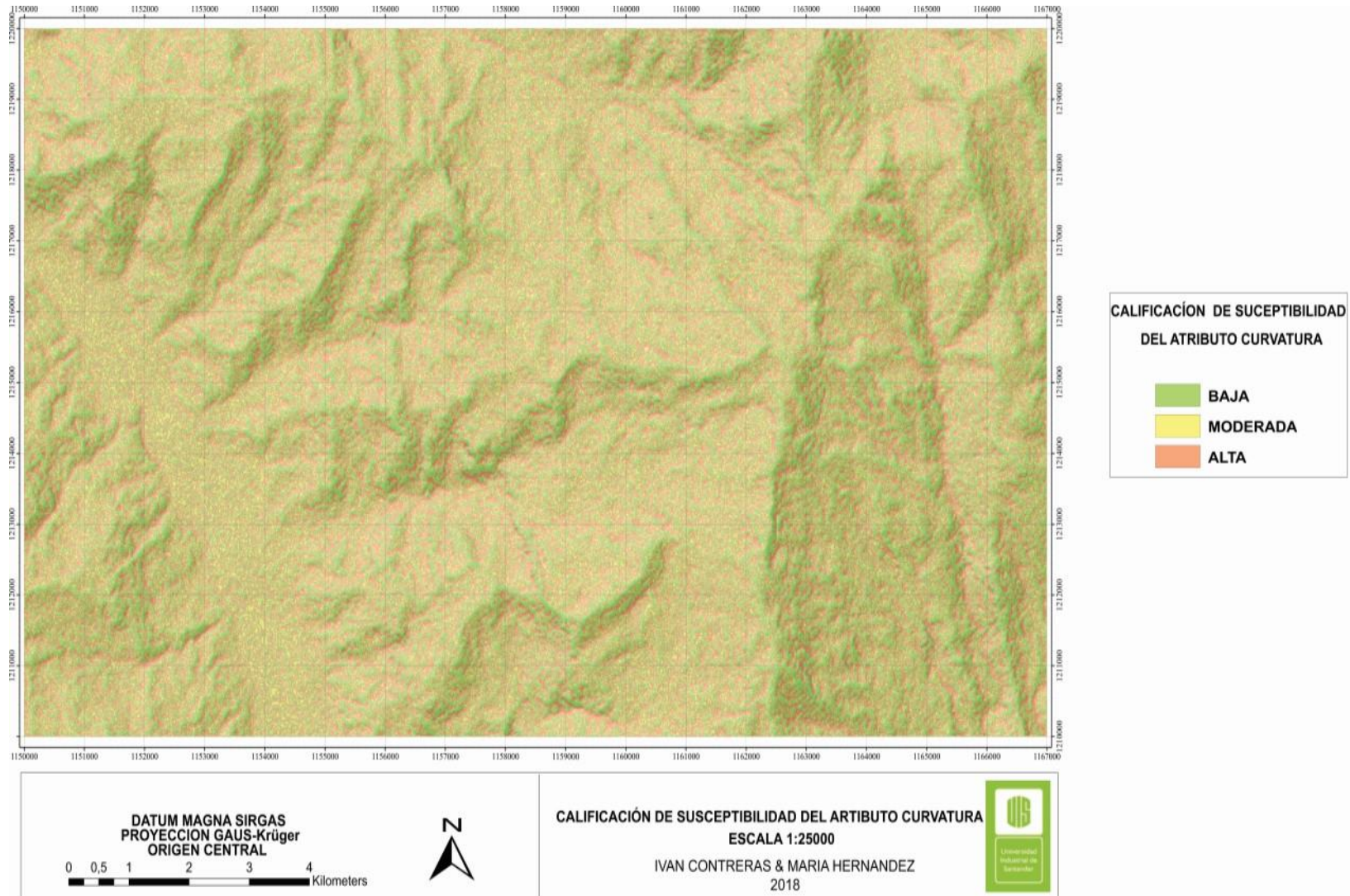


Figura 55. C) Mapa de calificación de susceptibilidad por pendiente.

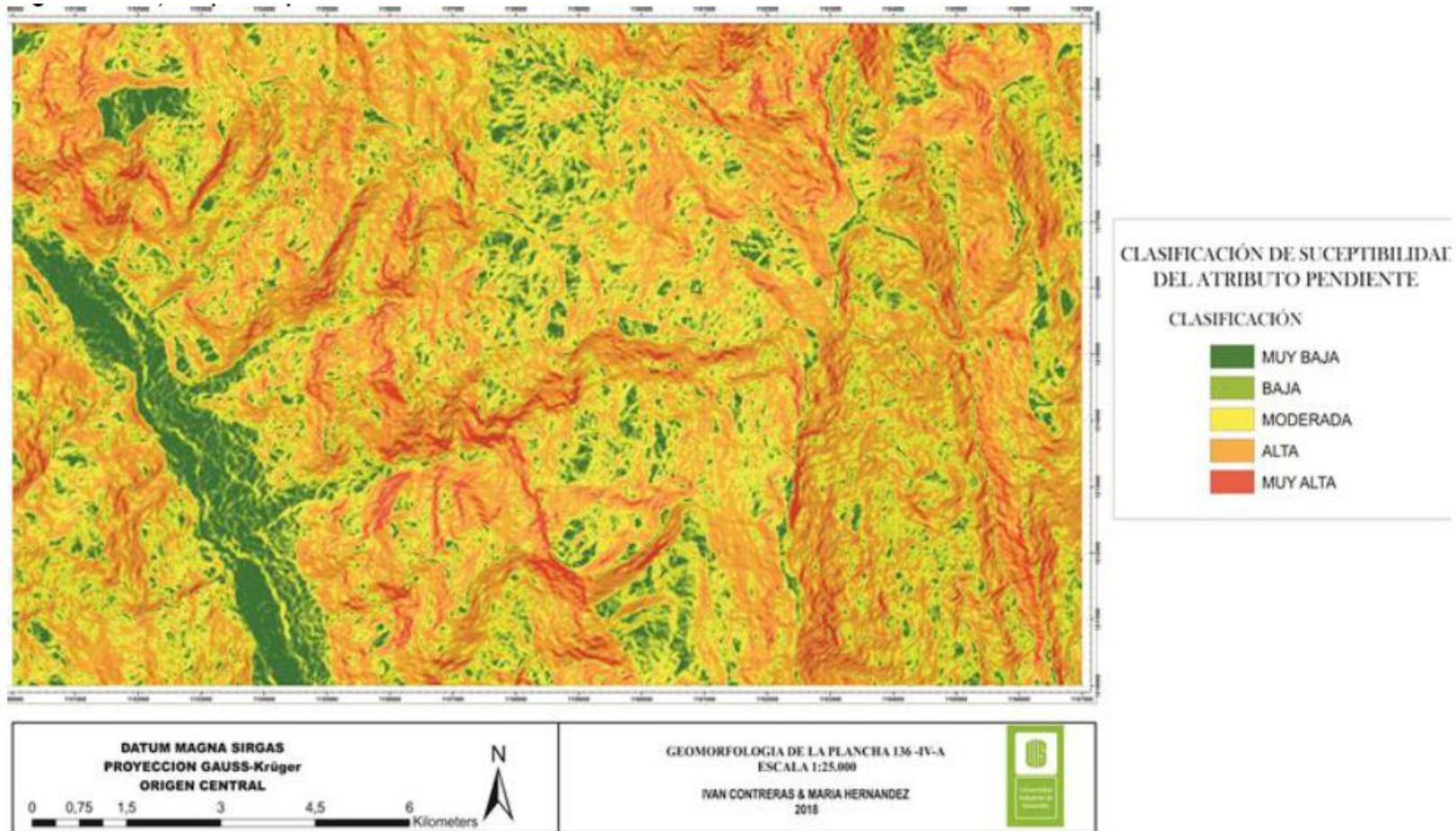
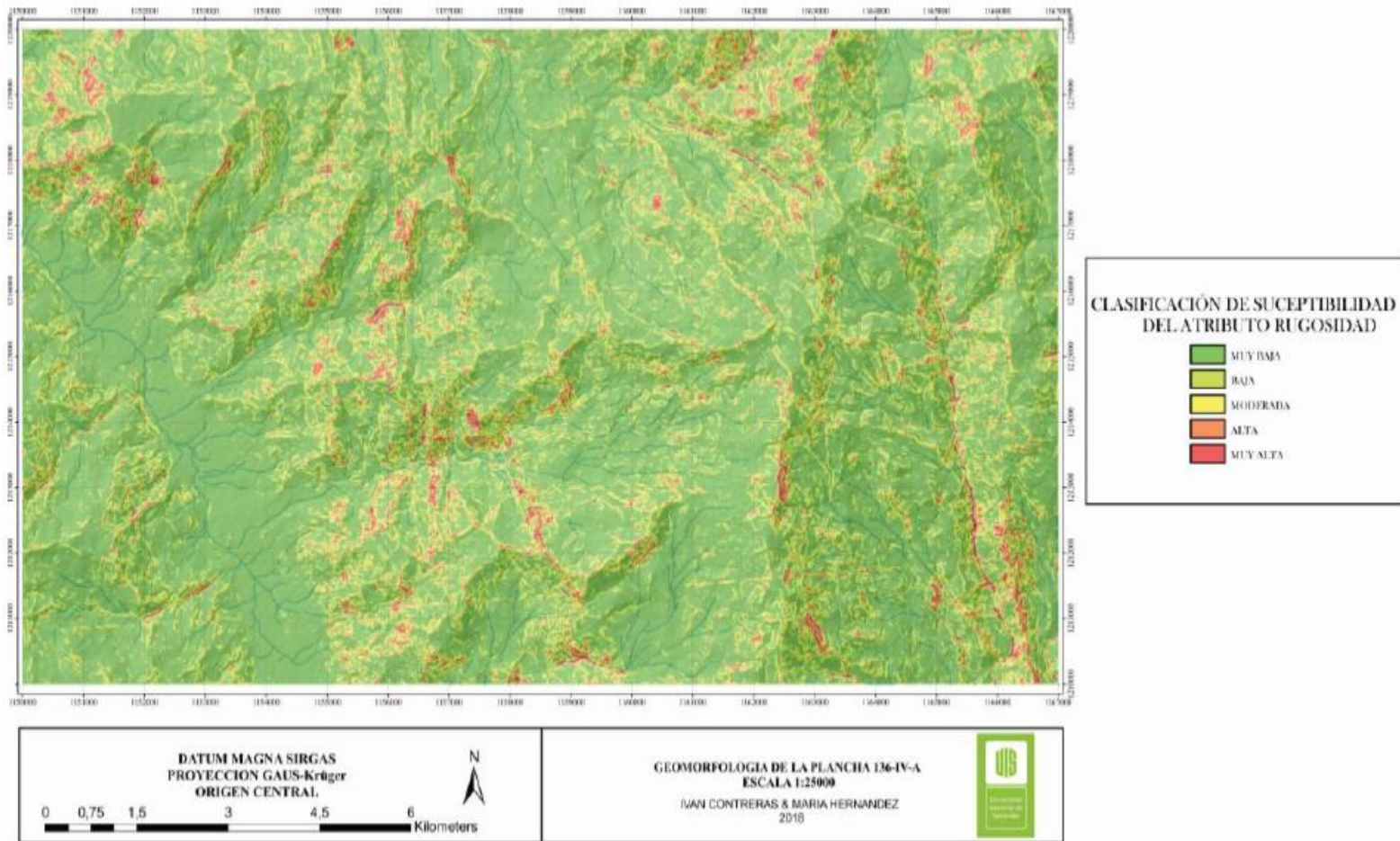


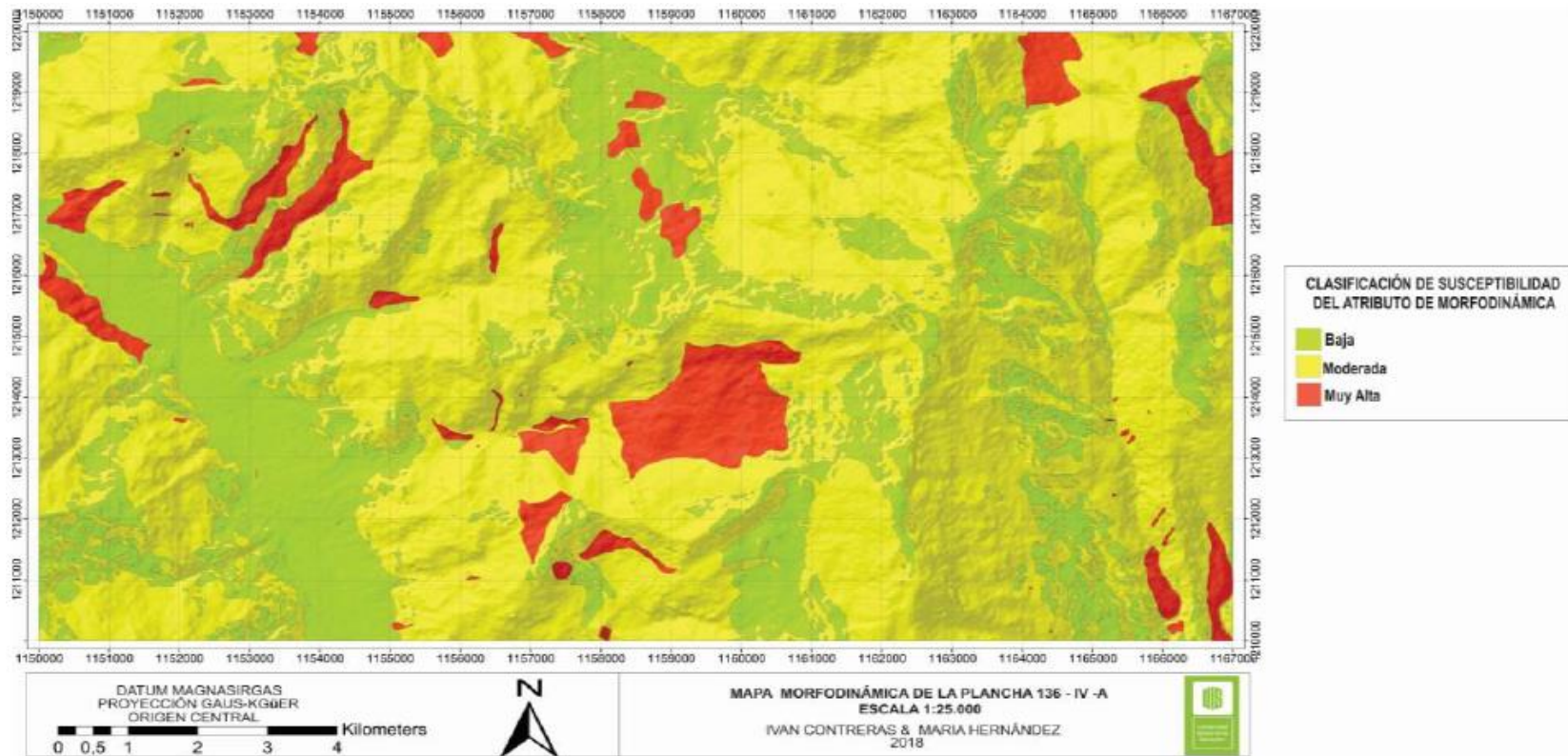
Figura 56. D) Mapa de calificación de susceptibilidad por rugosidad.



El mapa de morfodinámica (ver **Figura 54**) se obtuvo a partir del procesamiento de DEM ALOS PALSAR, a partir del cual se obtuvieron los mapas de relieve relativo y de inclinación de la Ladera, estos mapas se integraron con el

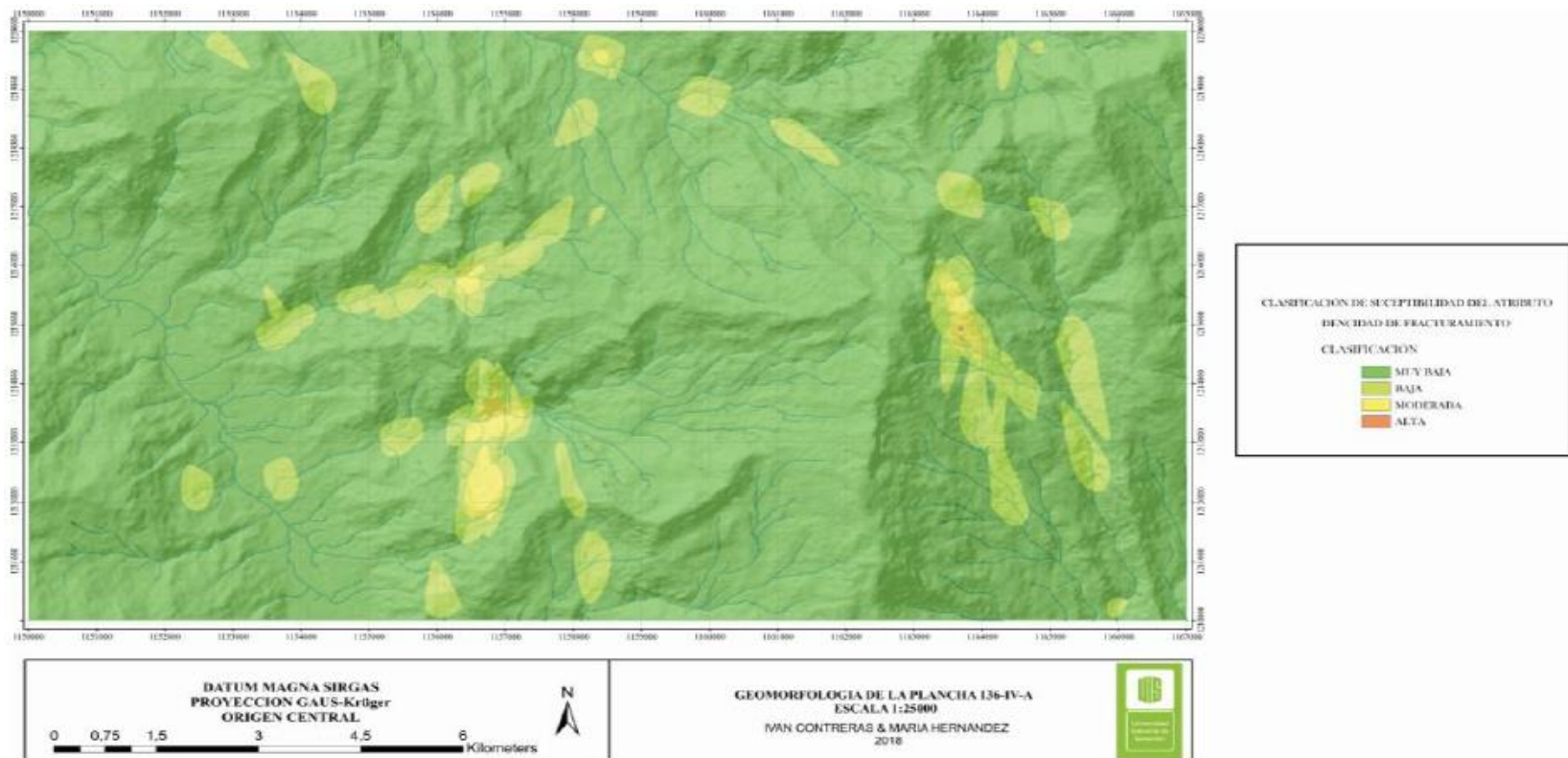
mapa de movimientos en masa del área de estudio, registrados en campo, aplicando la herramienta 'álgebra de mapas' de ArcGIS.

Figura 57. Mapa de calificación de susceptibilidad por morfodinámica obtenido a partir del procesamiento de DEM ALOS PALSAR.



El mapa de densidad de fracturamiento se obtuvo a partir del shapefile de fallas geológicas presentes en el área de estudio, (ver **Figura 55**). Los mapas de unidades geológicas superficiales y de subunidades geomorfológicas se obtuvieron a partir de la interpretación de sensores remotos y del reconocimiento durante el trabajo de campo.

Figura 58. El mapa de calificación de susceptibilidad por densidad de fracturamiento, obtenido a partir del shapefile de fallas geológicas presentes en el área de estudio.



El mapa de cobertura de la tierra y el mapa de suelos (ver **Figura 56**) así como sus calificaciones fueron suministrados por la Universidad Industrial de Santander, tomada de la plancha 136 – Málaga a escala 1:100.000. Los valores de calificación para cada una de las variables consideradas en el análisis de redes neuronales artificiales se resumen en la **Tabla 13**. Después de calificar los atributos de cada una de las variables, estos se integraron en una tabla, a partir de la herramienta 'Sample' de ArcGIS (ver **Figura 57**).

Mapas de: A). susceptibilidad por cobertura de la tierra, B). susceptibilidad por suelos (edafológico), suministrados por la Universidad Industrial de Santander, tomada de la plancha 136 – Málaga a escala 1:100.000.

Figura 59. A) Mapa de calificación de susceptibilidad por cobertura de la tierra.

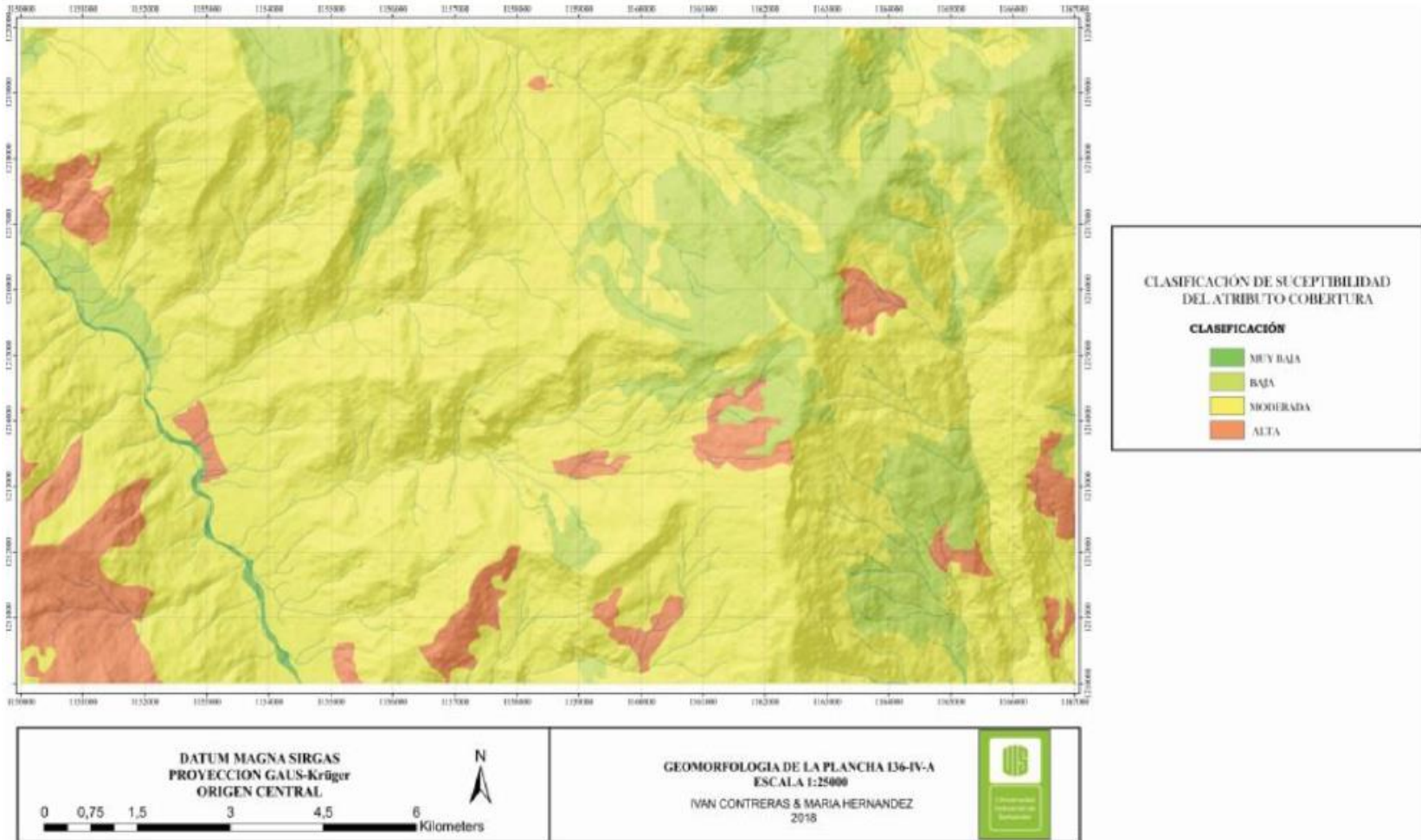


Figura 60. B) Mapa de calificación de susceptibilidad por suelos (Edafológico).

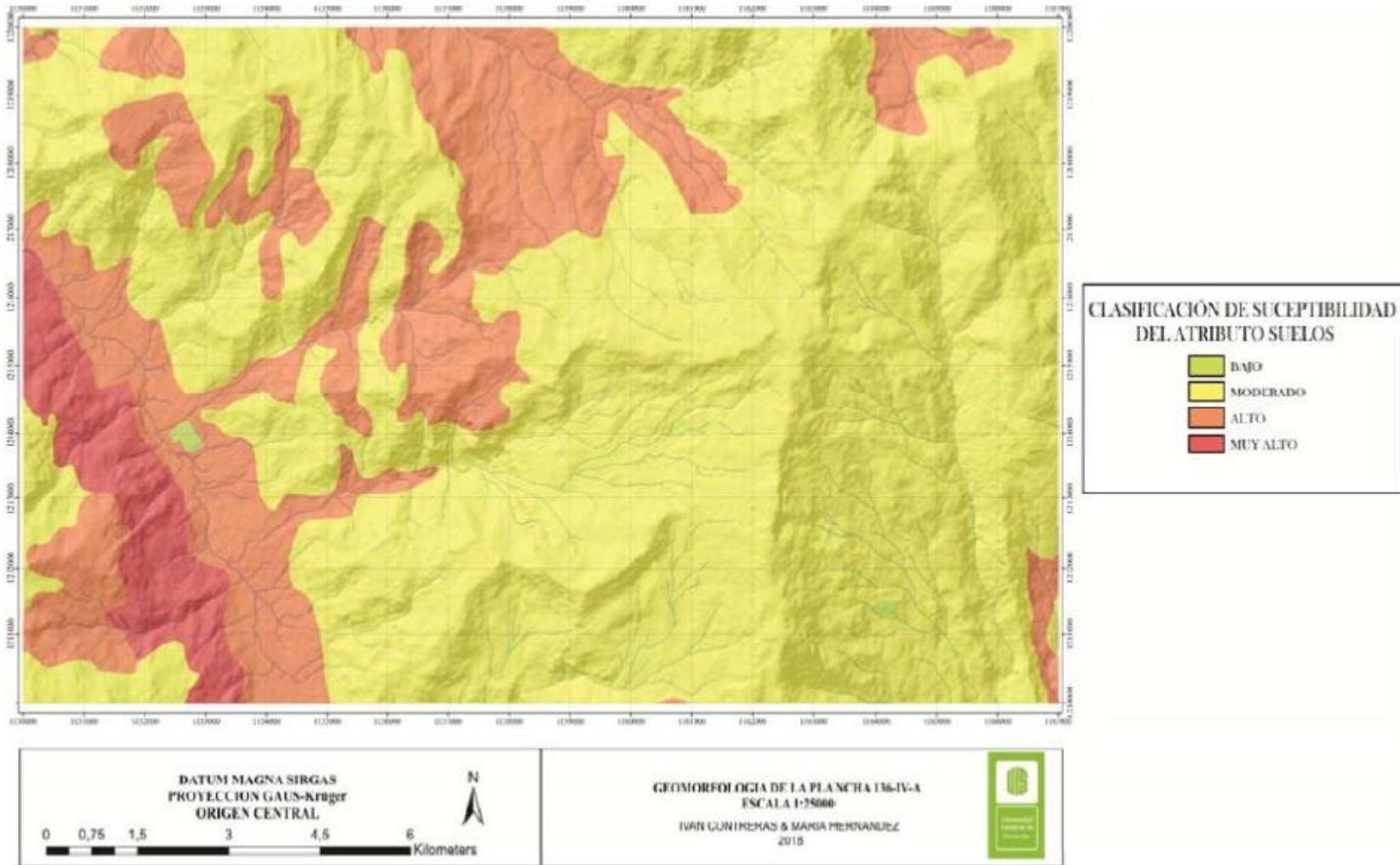


Tabla 13. Valores de calificación normalizados para cada variable a tener en cuenta en cálculo de la Susceptibilidad total.

Criterio	Categoría	Valor de calificación	Valor de calificación normalizado
Subunidad Geomorfológica	Acp	4	0,7
	Dc	3	0,5
	Dt	4	0,7
	Ddi	4	0,7
	Deed	3	0,5
	Deem	3	0,5
	Deeme	3	0,5
	Def	3	0,5
	Dldebl	3	0,5
	Dldeml	3	0,5
	Dldma	3	0,5
	Dle	3	0,5
	Dlea	3	0,5
	Dlema	3	0,5
	Dlo	3	0,5
	Dloa	3	0,5
	Dlom	3	0,5
	Dsa	3	0,5
	Fts	2	0,3
	Ftse	2	0,3
	Fbc	2	0,3
	Fbl	2	0,3
	Fca	1	0,1
	Fcdy	2	0,3
	Fpi	2	0,3
	Fta	2	0,3
	Ftae	1	0,1
	Ftan	2	0,3
	Ftas	2	0,3
	Fte	1	0,1

Criterio	Categoría	Valor de calificación	Valor de calificación normalizado
	Scor	4	0,7
	Secp	4	0,7
	See	4	0,7
	Sefcal	4	0,7
	Sefcbl	4	0,7
	Sefesbl	4	0,7
	Sefesbm	4	0,7
	Ses	4	0,7
	Sesbm	4	0,7
	Sesmm	4	0,7
	Sgf	4	0,7
	Sl	4	0,7
	Slcp	4	0,7
	Slcpco	4	0,7
	Sle	4	0,7
	Sles	4	0,7
	Slfe	3	0,5
	Ss	4	0,7
	Sshlc	4	0,7
	Sshle	4	0,7
	Sslp	4	0,7
	Ssslc	4	0,7
	Sssle	4	0,7
Unidad Geológica superficial	Rblafa	4	0,7
	Rblftm	4	0,7
	Rblcfc	4	0,7
	Rbilafcm	4	0,7
	Rbilafb	4	0,7
	Riacfa	3	0,5
	Rilafm	3	0,5
	Rmbifa	5	0,9
	Rmbiftm	5	0,9

Criterio	Categoría	Valor de calificación	Valor de calificación normalizado
	Rmblfc	5	0,9
	RmbilafI	5	0,9
	Rmblfc	5	0,9
	Sa	3	0,5
	Srgfa	4	0,7
	Stal	1	0,1
	Stbal	1	0,1
	Stcal	3	0,5
	Stt	5	0,9
	Stllal	1	0,1
	Sttal	2	0,3
	Stts	4	0,7
	Rugosidad	Muy baja	1
Baja		2	0,3
Media		3	0,5
Alta		4	0,7
Muy alta		5	0,9
Pendiente	Plana a Suavemente Inclinada	1	0,1
	Inclinada	2	0,3
	Muy Inclinada	3	0,5
	Abrupta	4	0,7
	Escarpada	5	0,9
Densidad de fracturamiento	Muy baja	1	0,1
	Baja	2	0,3
	Media	3	0,5
	Alta	4	0,7
	Muy alta	5	0,9
Acuena	Divisoria de Aguas	1	0,1
	Escorrentía Lenta	2	0,3
	Flujo Acumulado	5	0,9
	Drenaje no permanente	3	0,5
	Quebradas, Ríos	1	0,1

Criterio	Categoría	Valor de calificación	Valor de calificación normalizado
Curvatura	Cóncavo	3	0,9
	Plano	2	0,5
	Convexo	1	0,1
Unidad Cartográfica de suelo	ME	5	0,9
	MHA	3	0,5
	MHC	3	0,5
	MLA	3	0,5
	MLD	4	0,7
	MMA	3	0,5
	MMD	3	0,5
	MRA	3	0,5
	MRE	3	0,5
	MRG	4	0,7
	MRH	4	0,7
	MRX	4	0,7
	MWD	4	0,7
	ZU	2	0,3
Unidad de cobertura	Arbustal abierto	3	0,5
	Arbustal denso	3	0,5
	Bosque de galería y/o ripario	2	0,3
	Bosque denso alto de tierra firme	2	0,3
	Bosque denso bajo de tierra firme	3	0,5
	Bosque fragmentado con pastos y cultivos	3	0,5
	Herbazal abierto	3	0,5
	Herbazal denso de tierra firme	3	0,5
	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	3	0,5
	Mosaico de pastos con espacios naturales	3	0,5
	Mosaico de pastos y cultivos	3	0,5
	Pastos enmalezados	3	0,5
	Pastos limpios	4	0,7
	Ríos (50 m)	1	0,1

Criterio	Categoría	Valor de calificación	Valor de calificación normalizado
	Tejido urbano discontinuo	4	0,7
	Tierras desnudas y degradadas	4	0,7
Morfodinámica	Bajos valores de relieve relativo, con pendiente plana a inclinada	2	0,3
	Altos valores de relieve relativo, pendiente muy inclinada a escarpada	3	0,5
	Movimientos en masa y depósitos coluviales	5	0,9

Figura 61. Tabla con la calificación de los atributos de cada una de las variables, tenidas en cuenta para el análisis de redes neuronales artificiales, obtenida con la herramienta Sample de ArcGIS, en donde se muestran los valores para los primeros 63 pixeles.

Rowid	PENDIENTE	X	Y	UGS	SUELOS	RUGOSIDAD	PENDIENTE	MORFOGENESIS	MORFODINAMICA	DENSIDAD DE FRACTURAMIENTO	CURVATURA	COBERTURA	ACUENCA
1	1	1150006,25	1219993,75	2	4	1	1	1	2	1	4	2	2
2	1	1150018,75	1219993,75	2	4	2	1	1	2	1	4	2	2
3	2	1150031,25	1219993,75	2	4	2	1	1	1	1	4	2	2
4	3	1150043,75	1219993,75	2	4	1	3	1	2	1	4	2	2
5	3	1150056,25	1219993,75	2	4	1	3	1	2	1	4	2	2
6	4	1150068,75	1219993,75	2	4	1	4	1	2	1	4	3	2
7	4	1150081,25	1219993,75	2	3	1	4	1	2	1	4	3	2
8	4	1150093,75	1219993,75	4	3	1	4	4	1	1	3	3	2
9	4	1150106,25	1219993,75	4	3	1	4	4	1	1	4	3	2
10	4	1150118,75	1219993,75	4	3	2	4	4	2	1	4	3	2
11	4	1150131,25	1219993,75	4	3	2	4	4	2	1	4	3	2
12	4	1150143,75	1219993,75	4	3	1	4	4	2	1	4	3	2
13	4	1150156,25	1219993,75	4	3	1	4	4	2	1	2	3	2
14	4	1150168,75	1219993,75	4	3	1	4	4	2	1	3	3	2
15	4	1150181,25	1219993,75	4	3	1	4	4	1	1	2	3	2
16	4	1150193,75	1219993,75	4	3	1	4	4	2	1	2	3	2
17	4	1150206,25	1219993,75	4	3	1	4	4	2	1	4	3	2
18	4	1150218,75	1219993,75	4	3	1	4	4	2	1	2	3	2
19	4	1150231,25	1219993,75	4	3	2	4	4	2	1	3	3	1
20	4	1150243,75	1219993,75	4	3	2	4	4	2	1	3	3	2
21	4	1150256,25	1219993,75	4	3	1	4	4	1	1	2	3	2
22	4	1150268,75	1219993,75	4	3	1	4	4	2	1	4	3	2
23	4	1150281,25	1219993,75	4	3	1	4	4	2	1	4	3	2
24	4	1150293,75	1219993,75	4	3	1	4	4	2	1	4	3	2
25	4	1150306,25	1219993,75	4	3	1	4	4	2	1	4	3	2
26	4	1150318,75	1219993,75	4	3	1	4	4	2	1	2	3	2
27	4	1150331,25	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	3	3	2
28	5	1150343,75	1219993,75	4	3	1	5	4	1	3	2	3	2
29	5	1150356,25	1219993,75	4	3	2	5	4	1	3	2	3	2
30	5	1150368,75	1219993,75	4	3	1	5	4	3	1	2	3	2
31	4	1150381,25	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	2	3	2
32	4	1150393,75	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	3	3	2
33	4	1150406,25	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	4	3	2
34	4	1150418,75	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	2	3	2
35	4	1150431,25	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	3	3	2
36	4	1150443,75	1219993,75	4	3	2	4	4	3	1	2	3	2
37	4	1150456,25	1219993,75	4	3	2	4	4	3	1	3	3	2
38	4	1150468,75	1219993,75	4	3	2	4	4	3	1	2	3	1
39	4	1150481,25	1219993,75	4	3	3	4	4	3	1	2	3	2
40	4	1150493,75	1219993,75	4	3	3	4	4	3	1	3	3	2
41	4	1150506,25	1219993,75	4	3	3	4	4	2	1	2	3	1
42	3	1150518,75	1219993,75	4	3	3	3	4	2	1	2	3	1
43	3	1150531,25	1219993,75	4	3	3	3	4	2	1	2	3	1
44	3	1150543,75	1219993,75	4	3	3	3	4	2	1	2	3	2
45	3	1150556,25	1219993,75	4	3	2	3	4	2	1	2	3	2
46	3	1150568,75	1219993,75	1	3	2	3	1	1	1	2	3	2
47	3	1150581,25	1219993,75	1	3	2	3	1	2	1	4	3	2
48	1	1150593,75	1219993,75	1	3	4	1	1	2	1	2	3	5
49	1	1150606,25	1219993,75	1	3	4	1	1	2	1	3	3	1
50	3	1150618,75	1219993,75	4	3	3	3	4	2	1	4	3	2
51	4	1150631,25	1219993,75	4	3	2	4	4	2	1	3	3	2
52	4	1150643,75	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	3	3	2
53	4	1150656,25	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	2	3	2
54	4	1150668,75	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	2	3	2
55	4	1150681,25	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	2	3	2
56	4	1150693,75	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	2	3	2
57	4	1150706,25	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	4	3	2
58	4	1150718,75	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	2	3	1
59	4	1150731,25	1219993,75	4	3	1	4	4	3	1	4	3	2
60	3	1150743,75	1219993,75	4	3	1	3	4	1	1	2	3	1
61	3	1150756,25	1219993,75	4	3	1	3	4	1	1	2	3	2
62	3	1150768,75	1219993,75	4	3	1	3	4	1	1	4	3	2
63	3	1150781,25	1219993,75	4	3	1	3	4	3	1	2	3	2

Seguidamente los valores de calificación se normalizaron a partir de la aplicación de la fórmula de normalización Max-Min ver fórmula 3, en donde “v’” es el dato normalizado, “v” el dato original, “U” el límite de normalización superior igual a 0.9 y “L” el límite de normalización inferior, igual a 0.1.

Formula 3.

$$v' = \frac{v - \min(v)}{\max(v) - \min(v)} (U - L) + L$$

El valor “v” es el identificador de las categorías; el valor mínimo de “v” siempre es 1 mientras el máximo es el número de categorías de cada variable tomada en cuenta para la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa.

La normalización de los valores de calificación se hace con el objetivo de generar valores entre 0 y 1, para hacer el análisis de redes neuronales artificiales en MATLAB, MathWorks R2017a¹⁰¹ (ver **Figura 61**).

¹⁰¹ MATHWORKS. MATLAB (Version R2017a) [Software]. Disponible en MathWorks: <https://www.mathworks.com/company/newsroom/mathworks-R2017a>. 2017.

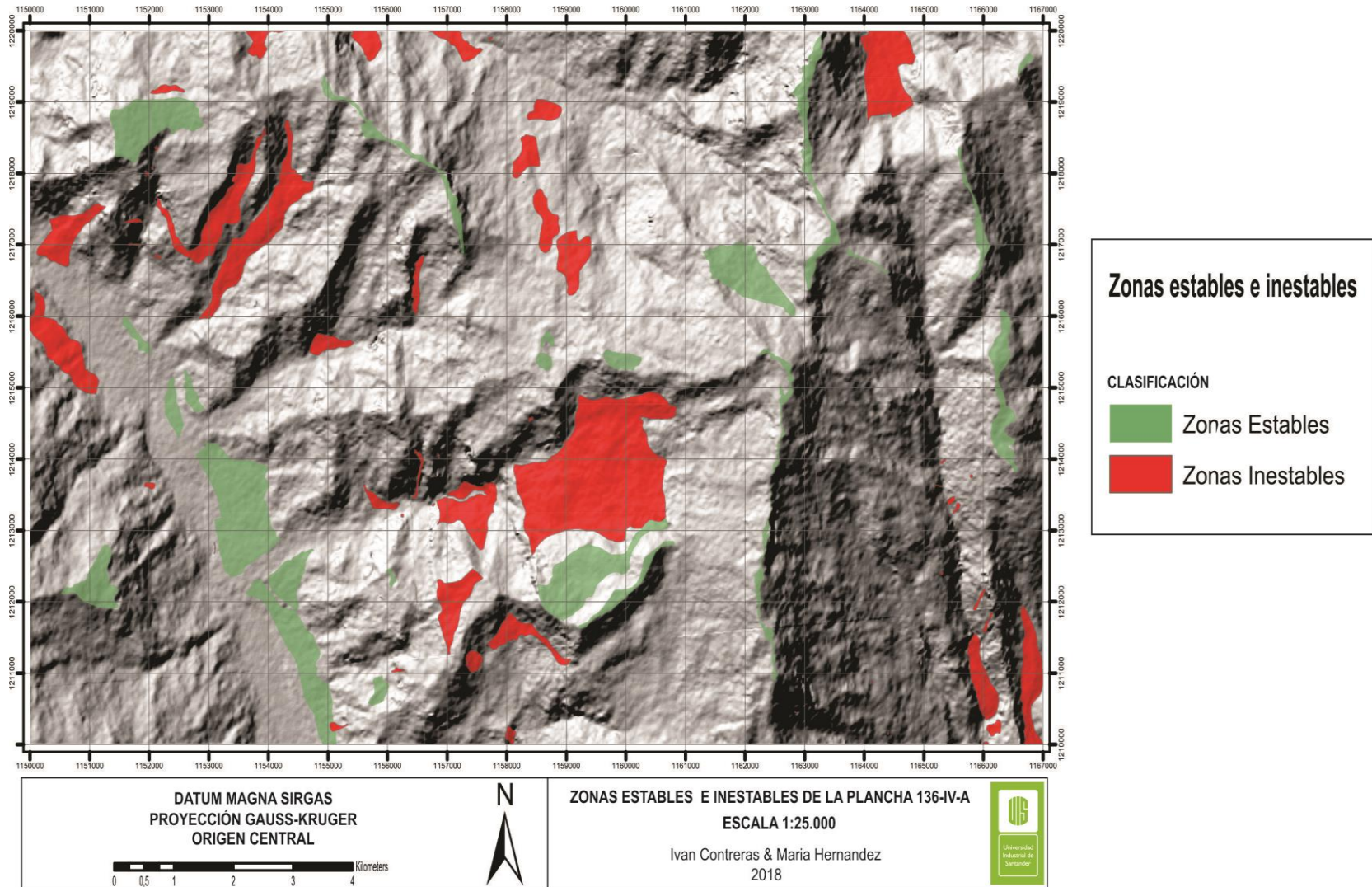
Figura 62. Valores normalizados para las 10 variables a tener en cuenta en la generación del mapa de susceptibilidad total de la Plancha, de los primeros 63 pixeles.

Rowid	RUGOSIDAD	X	Y	UG.S.	SUELOS	RUGOSIDAD	PENDIENTE	MORFOGENESIS	MORFODINAMICA	DENSIDAD DE FRACTURAMIENTO	CURVATURA	COBERTURA	ACUENCA
1	1	1150006,25	1219993,75	0,3	0,7	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,9	0,3	0,3
2	2	1150018,75	1219993,75	0,3	0,7	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,9	0,3	0,3
3	2	1150031,25	1219993,75	0,3	0,7	0,3	0,3	0,1	0,3	0,1	0,9	0,3	0,3
4	1	1150043,75	1219993,75	0,3	0,7	0,1	0,5	0,1	0,3	0,1	0,9	0,3	0,3
5	1	1150056,25	1219993,75	0,3	0,7	0,1	0,5	0,1	0,3	0,1	0,9	0,3	0,3
6	1	1150068,75	1219993,75	0,3	0,7	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,9	0,3	0,3
7	1	1150081,25	1219993,75	0,3	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,9	0,5	0,3
8	1	1150093,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,5	0,5	0,3
9	1	1150106,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,9	0,5	0,3
10	2	1150118,75	1219993,75	0,7	0,5	0,3	0,7	0,1	0,3	0,1	0,9	0,5	0,3
11	2	1150131,25	1219993,75	0,7	0,5	0,3	0,7	0,1	0,3	0,1	0,9	0,5	0,3
12	1	1150143,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,9	0,5	0,3
13	1	1150156,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,5	0,3	0,3
14	1	1150168,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,5	0,5	0,3
15	1	1150181,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,3
16	1	1150193,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,3
17	1	1150206,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,9	0,5	0,3
18	1	1150218,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,3
19	2	1150231,25	1219993,75	0,7	0,5	0,3	0,7	0,1	0,3	0,1	0,5	0,5	0,1
20	2	1150243,75	1219993,75	0,7	0,5	0,3	0,7	0,1	0,3	0,1	0,5	0,5	0,3
21	1	1150256,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,3
22	1	1150268,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,3
23	1	1150281,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,9	0,5	0,3
24	1	1150293,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,9	0,5	0,3
25	1	1150306,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,9	0,5	0,3
26	1	1150318,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,3
27	1	1150331,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,5	0,5	0,3
28	1	1150343,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,9	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3
29	2	1150356,25	1219993,75	0,7	0,5	0,3	0,9	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3
30	1	1150368,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,9	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3
31	1	1150381,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3
32	1	1150393,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,5	0,5	0,3
33	1	1150406,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,9	0,5	0,3
34	1	1150418,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3
35	1	1150431,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,5	0,5	0,3
36	2	1150443,75	1219993,75	0,7	0,5	0,3	0,7	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3
37	2	1150456,25	1219993,75	0,7	0,5	0,3	0,7	0,1	0,5	0,1	0,5	0,5	0,3
38	3	1150468,75	1219993,75	0,7	0,5	0,5	0,7	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,1
39	3	1150481,25	1219993,75	0,7	0,5	0,5	0,7	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3
40	3	1150493,75	1219993,75	0,7	0,5	0,5	0,7	0,1	0,5	0,1	0,5	0,5	0,3
41	3	1150506,25	1219993,75	0,7	0,5	0,5	0,7	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,1
42	3	1150518,75	1219993,75	0,7	0,5	0,5	0,5	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,1
43	3	1150531,25	1219993,75	0,7	0,5	0,5	0,5	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,1
44	3	1150543,75	1219993,75	0,7	0,5	0,5	0,5	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,3
45	2	1150556,25	1219993,75	0,7	0,5	0,3	0,5	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,3
46	2	1150568,75	1219993,75	0,1	0,5	0,3	0,5	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,3
47	3	1150581,25	1219993,75	0,1	0,5	0,5	0,5	0,1	0,3	0,1	0,9	0,5	0,3
48	4	1150593,75	1219993,75	0,1	0,5	0,7	0,1	0,1	0,3	0,1	0,5	0,5	0,3
49	4	1150606,25	1219993,75	0,1	0,5	0,7	0,1	0,1	0,3	0,1	0,5	0,5	0,1
50	3	1150618,75	1219993,75	0,7	0,5	0,5	0,5	0,1	0,3	0,1	0,9	0,5	0,3
51	2	1150631,25	1219993,75	0,7	0,5	0,3	0,7	0,1	0,3	0,1	0,5	0,5	0,3
52	1	1150643,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,5	0,5	0,3
53	1	1150656,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3
54	1	1150668,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3
55	1	1150681,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3
56	1	1150693,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3
57	1	1150706,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,9	0,5	0,3
58	1	1150718,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,1
59	1	1150731,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,9	0,5	0,3
60	1	1150743,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,7	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,1
61	1	1150756,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3
62	1	1150768,75	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,9	0,5	0,3
63	1	1150781,25	1219993,75	0,7	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3

Posteriormente se creó un shapefile delimitando las zonas estables e inestables, a partir de la información de campo (ver **Figura 62**), con el objetivo de definir las zonas que el software MATLAB, MathWorks R2017a¹⁰² usa como Targets para hacer el análisis de red neuronal artificial. En general para las zonas inestables se tomaron los polígonos de movimientos en masa y los polígonos de suelos transportados coluviales, asignándoles el máximo valor de calificación (5) y un valor normalizado de 1. En contraste, las zonas estables se tomaron como zonas de pendiente plana a suavemente inclinada, con ausencia de movimientos en masa, correspondiendo con cimas, terrazas aluviales, asignándoles el mínimo valor de calificación (1) y un valor normalizado de 0. Posteriormente este shapefile de zonas estables e inestables se transformó a formato raster, el cual corresponde con los Targets. Estos valores se integraron en una tabla, usando la herramienta 'Sample' de ArcGIS.

¹⁰² MATHWORKS. MATLAB (Version R2017a) [Software]. En MathWorks. 2017. Disponible en: <https://www.mathworks.com/company/newsroom/mathworks-R2017a>.

Figura 63. Mapa de zonas estables e inestables de la plancha 136 –IV-A.



Una vez definidas estas zonas, se extrajeron los mapas de las 10 variables a tener en cuenta en el análisis de redes neuronales artificiales (acuena, cobertura de la tierra, curvatura, densidad de fracturamiento, morfodinámica, pendientes, rugosidad, Suelos (edafológico), geomorfología, unidades geológicas superficiales) para esto se tuvo en cuenta que el número de pixeles de las zonas estables e inestables fuera el mismo.

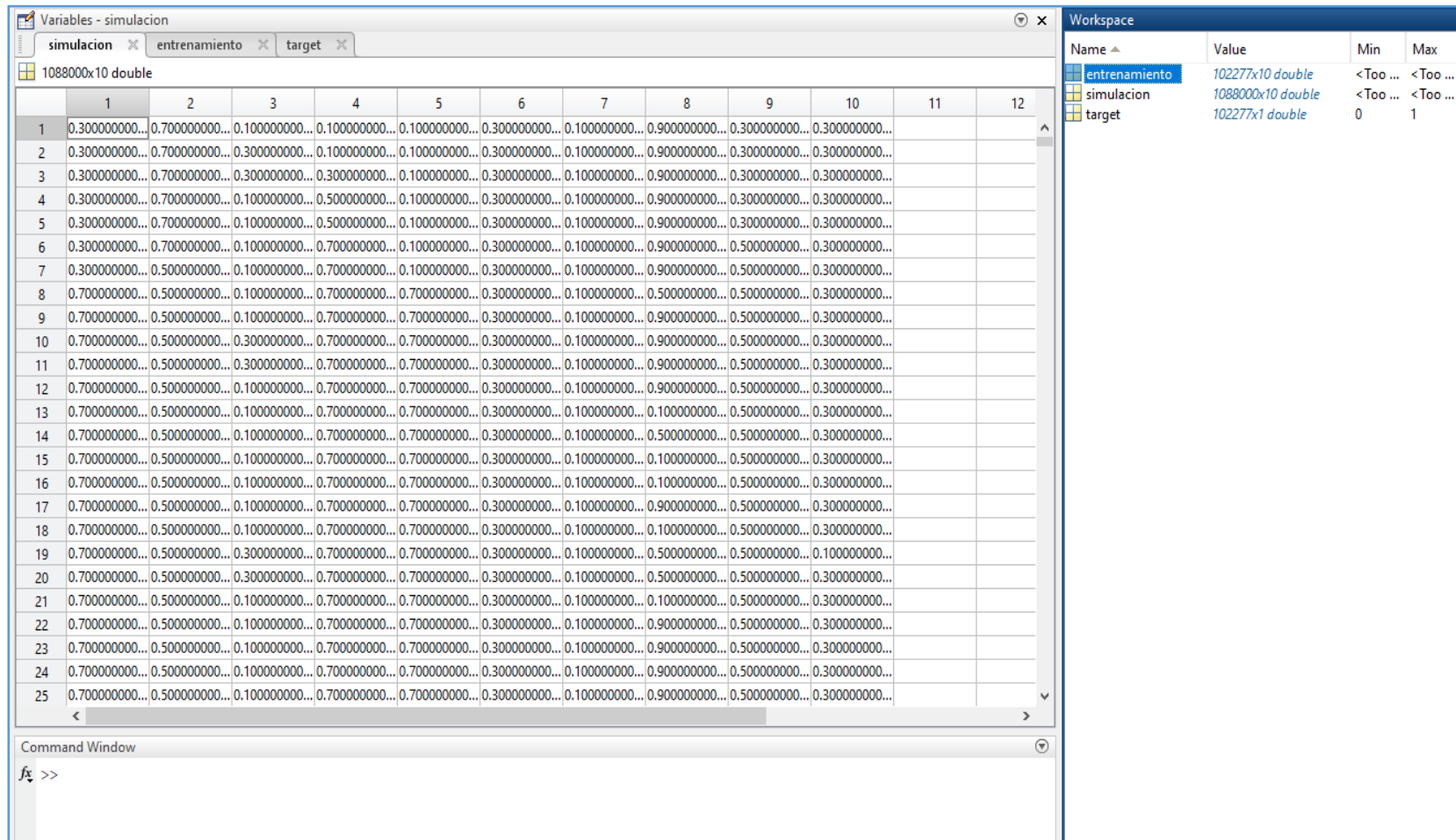
Luego de que se obtuvieron los mapas de las 10 variables a tener en cuenta en la generación de la susceptibilidad, se procedió integrar estos valores en una sola tabla, usando nuevamente la herramienta 'Sample' de ArcGIS, Seguidamente estos valores de calificación de las zonas estables e inestables se normalizaron, usando la fórmula de normalización, con el objetivo de tener valores entre 0 y 1.

9.2 PROGRAMACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Una vez se generaron las tablas con los valores normalizados de las zonas estables e inestables (matriz de entrenamiento), la tabla con los valores normalizados de la totalidad del área de estudio (matriz de simulación) y la tabla de targets con valores de 0 y 1 (matriz de targets); se importaron al software MATLAB, MathWorks R2017a¹⁰³ (ver **Figura 64**).

¹⁰³ MATHWORKS. MATLAB (Version R2017a) [Software]. En MathWorks. 2017. Disponible en: <https://www.mathworks.com/company/newsroom/mathworks-R2017a>.

Figura 64. Matrices de entrenamiento, simulación y targets, importadas en software Matlab R2017a.



Posteriormente ejecutó el comando 'nntool' para ejecutar el análisis de red neuronal artificial. Los parámetros apropiados para el diseño de la red neuronal se eligieron con base en los trabajos Ermini et al., (2005)¹⁰⁴, Gómez y Kavzoglu (2005)¹⁰⁵, Tien et al., (2012)¹⁰⁶, quienes coinciden en la implementación del modelo neuronal Multilayer Perceptrón y algoritmo de aprendizaje Back Propagation (MLP-BP) por ser el tipo de red más utilizado en el campo de las geoamenazas y en general en otras áreas, por su versatilidad y adaptabilidad ante el modelado de problemas que involucren un amplio rango de variables. Seguidamente se creó la red neuronal artificial, definiendo el modelo de red y las características de su arquitectura en la ventana "Create Network or Data" (ver **Figura 64**). En el campo Network Type se optó por el tipo de red Feed-forward backprop equivalente al MLP-BP. Las demás propiedades se definieron con base en el trabajo de Tien et al. (2012)¹⁰⁷. Sin embargo, el campo "Adaption learning function" se dejó como el predeterminado. En la pestaña "Training Parameters" se estableció el número de épocas o iteraciones "epochs" y el objetivo de la suma de errores cuadrados "goal", 1000 y 0,001, respectivamente (ver **Figura 65**). Los demás parámetros fueron establecidos por defecto por Matlab. Seguidamente se observa el banner de ejecución del proceso de entrenamiento de la red neuronal para que sistematizaran los parámetros de zonas estables e inestables (ver **Figura 66**).

¹⁰⁴ ERMINI, Leonardo. CATANI, Filippo, y CASAGLI, Nicola., Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. Geomorphology magazine. 2005, 16 (66), p.327–343.

¹⁰⁵ GÓMEZ, H., KAVZOGLU, T. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. Engineering Geology. 2005, 16 (78), p.11–27.

¹⁰⁶ TIEN, D., PRADHAN, B., et al. Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh province of Vietnam: A comparison of the Levenberg-Marquardt and Bayesian regularized neural networks. 2012. p12–29

¹⁰⁷ *Ibíd.*, p. 12–29.

Figura 65. Captura de pantalla que muestra la forma de crear la RNA en la herramienta nntool de software MATLAB R2017A.

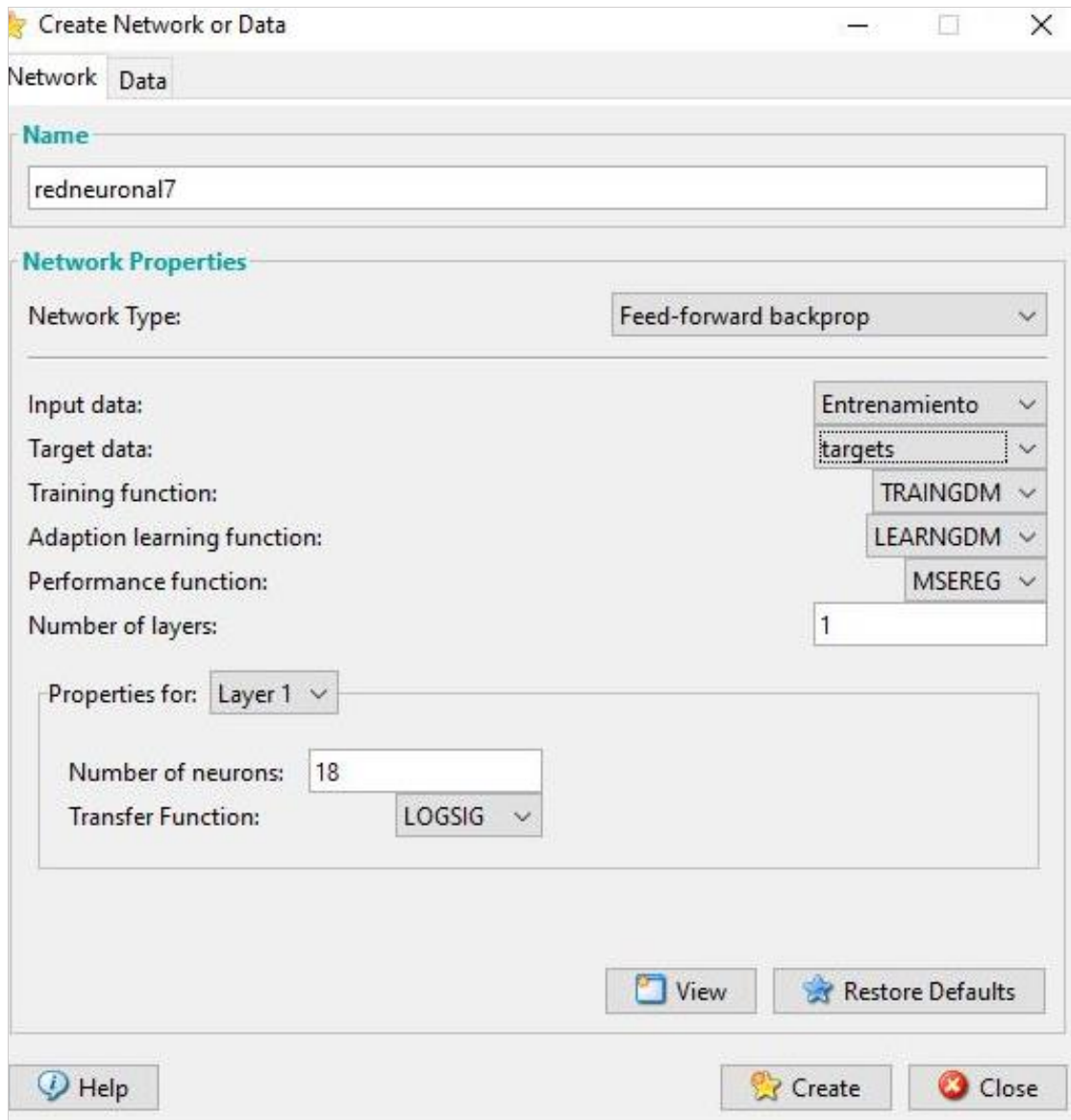


Figura 66. Pestaña “Training Parameters”, en la que se estableció el número de épocas o iteraciones “epochs” y el objetivo de la suma de errores cuadrados “goal”.

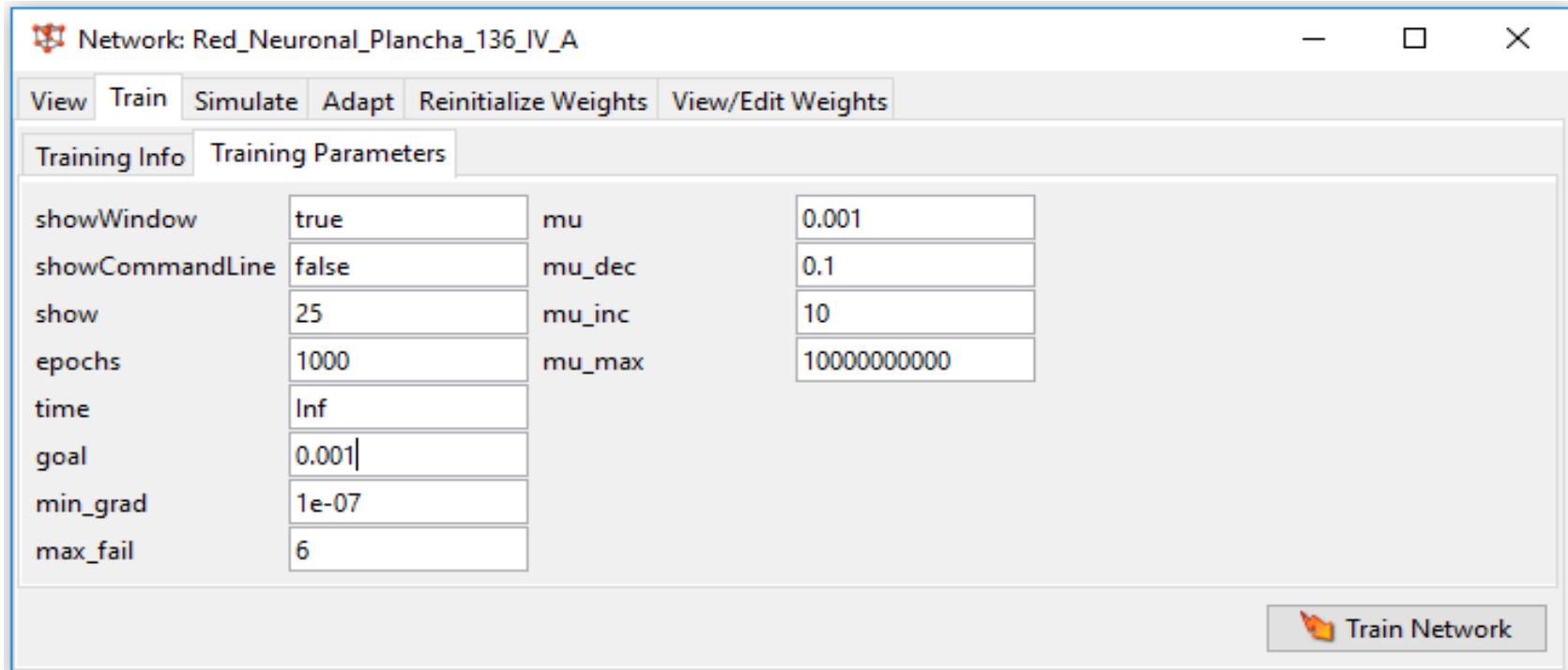
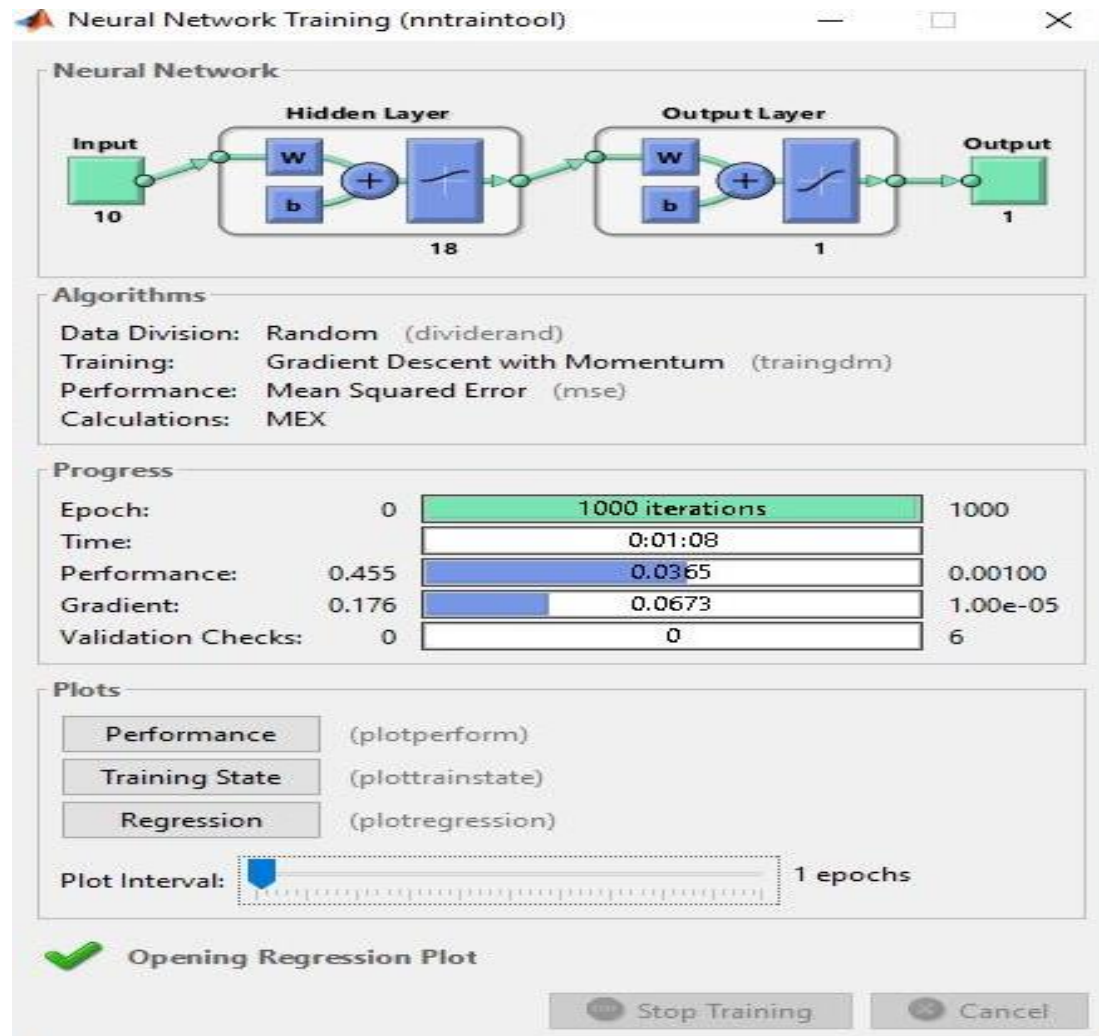


Figura 67. Posteriormente se ejecutó el proceso de entrenamiento de la red neuronal, con el objetivo de que software Matlab R2017a sistematizara los parámetros que definen si una zona es estable o inestable, para después aplicarla a la totalidad del área de estudio.

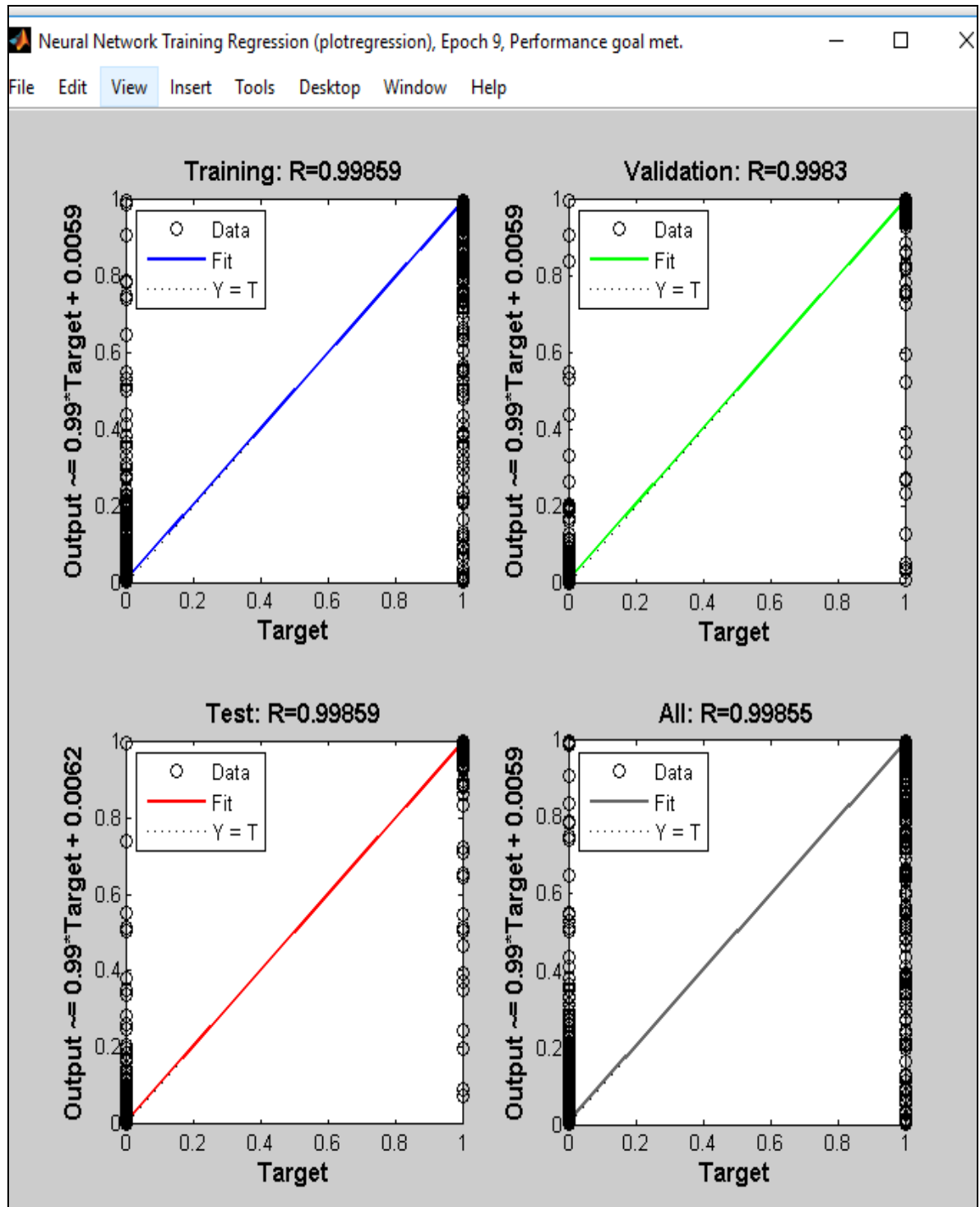


9.3 VALIDACIÓN DE LA RED NEURONAL FINAL

Una vez seleccionada la red neuronal artificial, se generó un proceso de validación de la misma, teniendo en cuenta la Exactitud (ACC) y el Ranking de entradas (ver **Figura 67**).

De manera general, la exactitud del modelo (ACC) se calculó a partir de la matriz de confusión; el cálculo del ranking de las entradas que más contribuyen en la respuesta de la red, se realizó de acuerdo al método "Stepwise". Primero se seleccionó la entrada a evaluar, luego se suprimió el set de datos de las demás variables, y finalmente se simuló la red y se calculó el MSE. Debido a que el MSE mínimo es el de la simulación de la red con los valores de las entradas sin alterar, se estableció que el MSE más bajo correspondería a la variable de mayor contribución al modelo; mientras que el MSE más alto correspondió a la variable de menor contribución al modelo. Posteriormente, se ordenaron ascendentemente los valores de MSE y con ello se obtuvo la importancia relativa de cada factor causante.

Figura 68. Gráficos de validación generados por software Matlab R2017a.



Después de hacer el entrenamiento, se procedió a simular según la totalidad de los datos, en la pestaña 'simulate' (ver **Figura 68**), Lo cual generó una tabla de valores en Matlab con 1.088.000 valores, que corresponden a los 1.088.000 píxeles que abarca el área de estudio (ver **Figura 69**), estos valores se integraron con sus respectivas coordenadas y se importaron en ArcGIS, para luego representar esos valores como píxeles. A cada valor normalizado se le dio un valor de susceptibilidad de 1 a 5, según la **Tabla 14**.

Figura 69. Captura de pantalla del software Matlab R2017a, que muestra la pestaña 'simulate'.

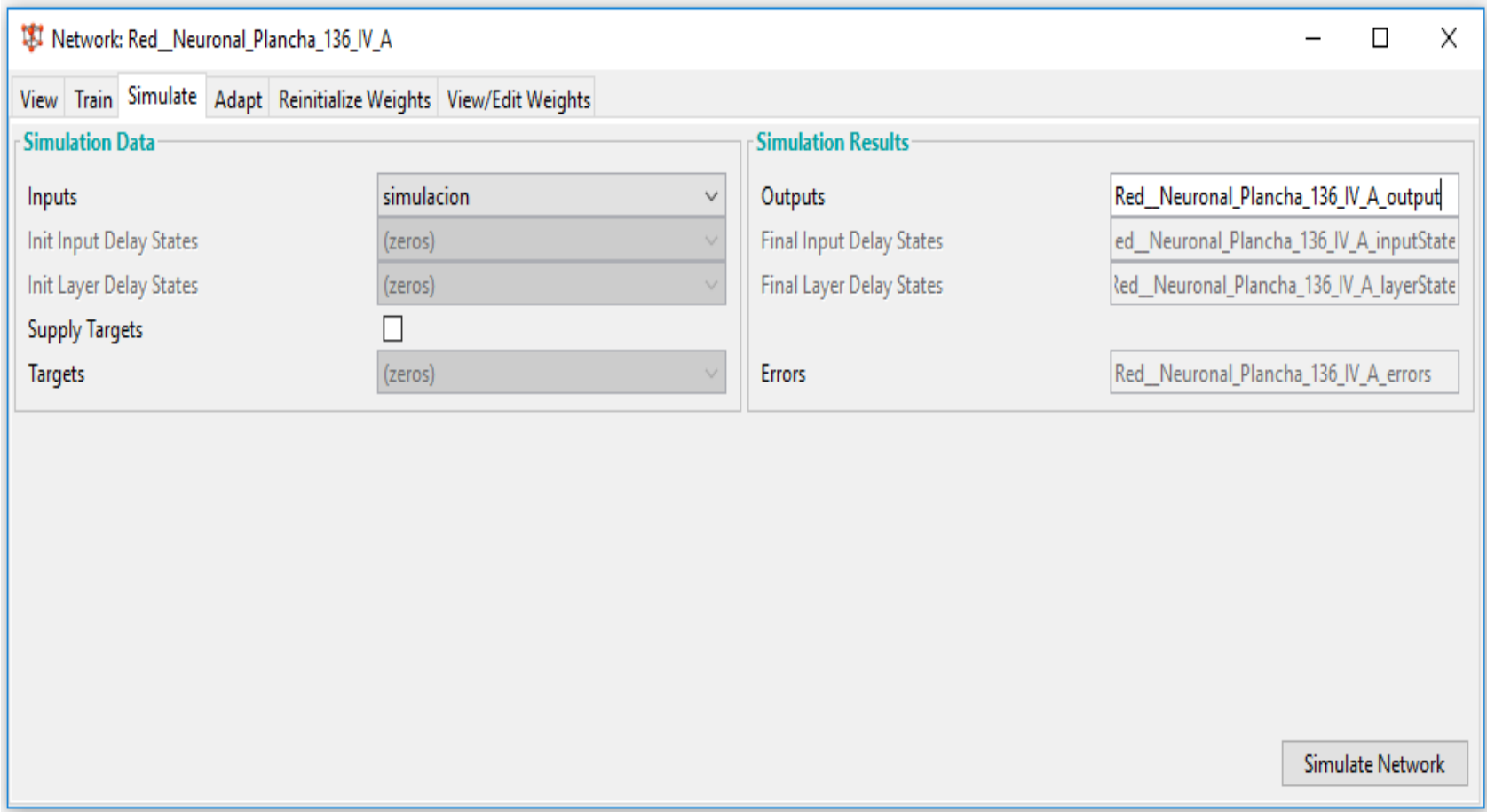


Figura 70. Tabla muestra los valores se integraron con sus respectivas coordenadas y se importaron en ArcGIS.

The screenshot displays the ArcGIS interface with the following components:

- Table View:** A table with 25 rows and 11 columns. The first column contains row numbers (1-25). The second column contains numerical values in scientific notation, such as 6.895957916253082e-05, 9.959029162953659e-05, and 0.029850218238851. The remaining columns (3-11) are empty.
- Workspace Panel:** A table listing variables and their properties:

Name	Value	Min	Max
entrenamiento	102277x10 double	<Too ...	<Too ...
Red_Neural_Plancha_136_IV_A_output	1088000x1 double	<Too ...	<Too ...
simulacion	10x1088000 double	<Too ...	<Too ...
target	1x102277 double	0	1
- Command Window:** Shows the execution of the 'nntool' command:


```
>> nntool
>> nntool
fx >>
```

Tabla 14. Clasificación de susceptibilidad y valores generados por software Matlab R2017a.

Valor generado por Matlab	Calificación de susceptibilidad	Susceptibilidad
0 - 0.1	1	Muy Baja
0.1 - 0.3	2	Baja
0.3 - 0.5	3	Moderada
0.5 - 0.7	4	Alta
0.7 - 1	5	Muy Alta

Posteriormente este mapa se procesó, usando el sistema de información geográfica ArcGIS, teniendo en cuenta el área mínima cartografiable, para la escala de trabajo, la cual corresponde a 10.000 m², lo cual dio como resultado el mapa final de susceptibilidad por movimientos en masa de la Plancha 136 – IV – A.

10. SUSCEPTIBILIDAD RELATIVA A LOS MOVIMIENTOS EN MASA

Para generar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa de la Plancha (ver **Figura 70**), se tuvieron en cuenta variables como la Geología, Geomorfología, Coberturas y Suelos, y curvatura, acuenca.

El mapa de susceptibilidad por movimientos en masa de la Plancha 136 – IV – A plancha (ver **Figura 68**), se obtuvo a partir del análisis de los factores causantes calificados, aplicando el método matemático de redes neuronales artificiales, usando el Software MATLAB, MathWorks R2017a¹⁰⁸, este mapa presenta 5 categorías de susceptibilidad que van desde muy baja, baja, moderada, alta y muy alta.

¹⁰⁸ MATHWORKS. MATLAB (Version R2017a) [Software]. En MathWorks. 2017. Disponible en: <https://www.mathworks.com/company/newsroom/mathworks-R2017a>.

Figura 71. Mapa de susceptibilidad total por movimientos en masa para la Plancha 136 – IV- A.

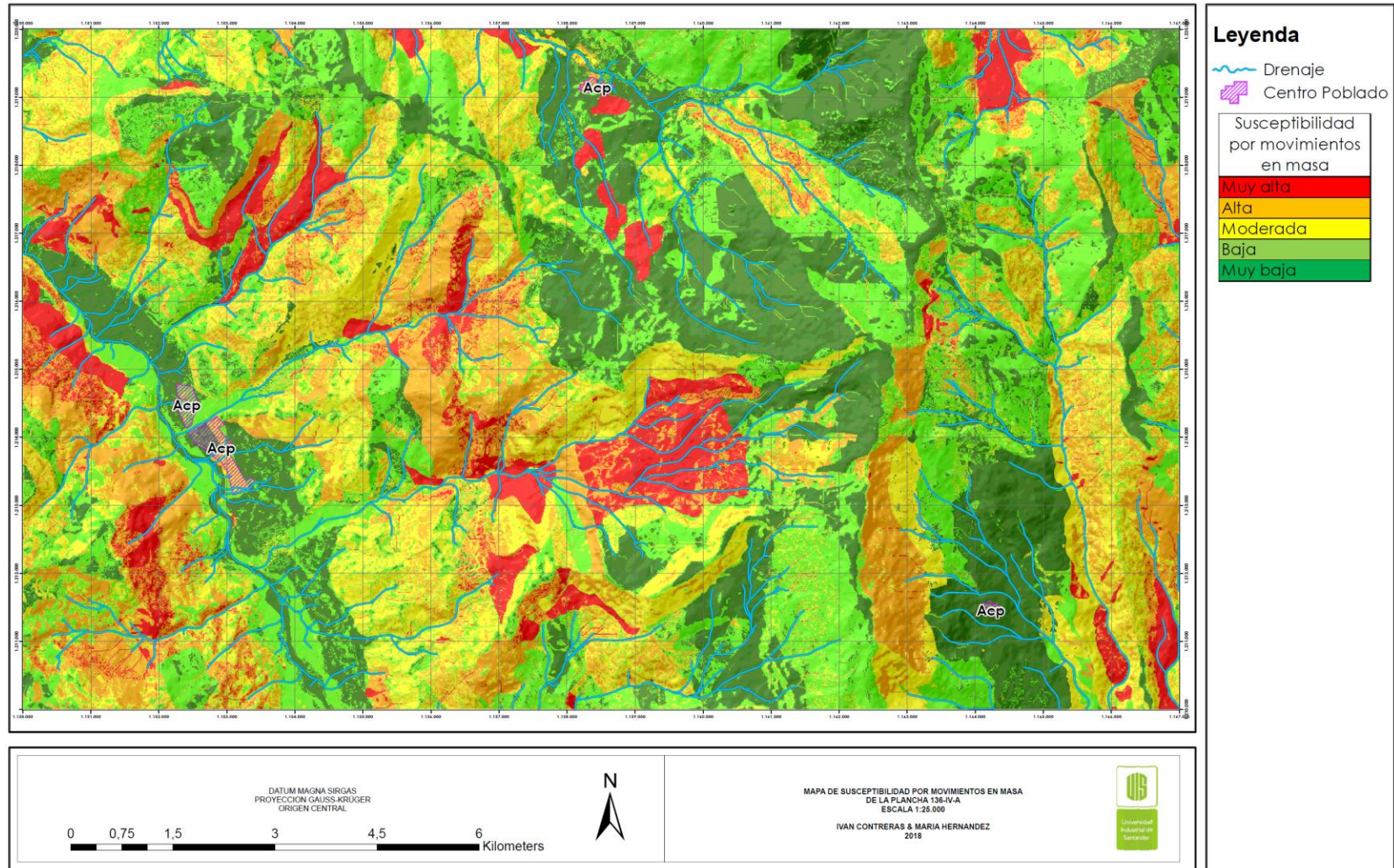


Tabla 15. Susceptibilidad por Movimientos en masa

Susceptibilidad por movimientos en masa	Área (%)	Área (m²)
Muy alta	8,37	14.231.718,75
Alta	17,68	30.052.812,50
Moderada	21,94	37.297.500,00
Baja	29,03	49.352.968,75
Muy baja	22,98	39.065.000,00
Total:	100	170.000.000,00

La categoría de susceptibilidad más predominante fue susceptibilidad baja con un 29,03%, seguida de susceptibilidad Muy baja con un 22,98% la menos predominante fue susceptibilidad Muy alta con un 8,37% ver Figura 68.

10.1 SUSCEPTIBILIDAD MUY ALTA

Este rango de susceptibilidad por movimientos en masa representa el 8,37% equivalente a 14.231.718,75 m² del área total de la plancha, correspondiendo a la primera categoría de mayor extensión en el área de estudio. Aunque esta categoría de susceptibilidad en algunos casos corresponde a pequeños segmentos donde el procesamiento del modelo digital de terreno (DEM ALOS PALSAR) presenta errores. Los puntos que no se encuentran agrupados, formando polígonos extensos sobre este tipo de error, se asocian principalmente a movimientos en masa aislados.

Este rango de susceptibilidad se encuentra distribuido uniformemente en varios sectores de la plancha, principalmente en las partes central y oriental, a manera de franjas en dirección NW-SE, en gran parte de la zona rural de los municipios de Capitanejo y Macaravita, en donde se presentan procesos morfodinámicos, con

predominio de movimientos en masa de tipo caídas de rocas, deslizamiento rotacional, deslizamiento traslacional y procesos erosivos, como surcos y cárcavas.

Es importante mencionar que uno de los factores relevantes que favorecen las condiciones de susceptibilidad muy alta, es el fuerte control estructural, que es ejercido por la falla de Chicamocha y el conjunto de fallas satélites asociadas a ella, la cual es una estructura regional, tectónicamente activa, así como también por los pliegues anticlinales y sinclinales presentes en el área de estudio.

También es importante indicar que la dinámica fluvial de los ríos y quebradas importantes, como los ríos Chicamocha y Tunebo; quebrada San Pedro, en jurisdicción del Municipio de Capitanejo; quebrada La Miel en jurisdicción del Municipio de San Miguel, y quebrada El Ramal, en jurisdicción del Municipio de Macaravita, presentan zonas de alta energía, que generan procesos de socavación lateral muy locales, que pueden generar movimientos en masa de tipo volcamiento y caída de rocas y suelos, afectando ciertos tramos de algunas vías interveredales, vías municipales, viviendas, cultivos, etc. ubicadas en sus márgenes.

Los sectores clasificados con susceptibilidad muy alta se caracterizan por presentar diferentes tipos de vegetación, que varían entre Tierras desnudas y degradadas, Pastos limpios y Mosaico de pastos, cultivos y espacios naturales.

Morfométricamente se caracteriza por estar asociada a pendientes abruptas a muy escarpadas ($>19^\circ$), rugosidades moderadas a muy altas, curvatura cóncava principalmente, y diferentes valores de acuenca, siendo las zonas de escorrentía lenta y flujo acumulado las más frecuentes. Morfodinámicamente las zonas de susceptibilidades muy altas se presentan en zonas con calificaciones morfodinámicas moderadas, altas y muy altas; correspondientes a materiales

resistentes y erosión moderada, con relieves relativos altos (superiores a 400 metros).

Morfogenéticamente se encuentra asociada a subunidades geomorfológicas de origen estructural, denudacional y antrópico, siendo el ambiente estructural el de mayor asociación. Estas subunidades geomorfológicas presentan morfologías abruptas, de pendientes escarpadas, con índices de relieve moderados a alto. Dentro de las unidades de origen estructural, destacan las geoformas : escarpe de línea de falla (Slfe), escarpe de contrapendiente (Secp), Ladera contrapendiente (Slcp), Sierra y lomo de presión (Sslp), escarpe estructural (See), Espolón bajo de longitud media (Sesbm), Espolón moderado de longitud media (Sesmm), Espolón festoneado bajo de longitud media (Sefesbm), Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc), Ladera escalonada (Sles), Espolón facetado alto de longitud larga (Sefcal), ladera estructural de sierra homoclinal (Sshle). En cuanto a las subunidades de origen denudacional, este rango de susceptibilidad se encuentra relacionada con: escarpe de erosión menor (Deeme), escarpe de erosión mayor (Deem), Talus (Dt), Ladera disectada muy abrupta (Dldma), Ladera erosiva (Dle) y Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi).

En términos de Unidades Geológicas Superficiales y litología, las zonas que presentan susceptibilidad muy alta se encuentran relacionadas a las UGS: Suelo transportado de talus (Stt), Roca blanda de lodolitas y areniscas de la Formación Aguardiente (Rblafa), Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Tibu - Mercedes (Rmbifm), Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Capacho (Rmbifc), Roca blanda de lodolitas y calizas de la Formación Capacho (Rblcfc), Roca muy blanda de intercalación lodolitas y areniscas de la Formación La Luna (Rmbilaf), Roca intermedia de areniscas y calizas de la Formación Aguardiente (Riacfa), Roca blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación Colón Mito - Juan (Rbilafcm), Roca blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación Barco (Rbilafb), Roca blanda de lodolitas de la Formación Tibu -

Mercedes (Rblftm). A nivel estructural, estas susceptibilidades se presentan en zonas de media a muy alta densidad de fracturamiento, principalmente en las estructuras anticlinales y sinclinales de la plancha.

Con respecto al atributo de suelo, las unidades que más se encuentran relacionadas a susceptibilidad muy alta por movimientos en masa son: MLA (Typic Troorthents, Typic Dystropepts y Typic Humitropepts). MHA (Lithic Troorthents – Typic Dystropepts) y MRA (Typic Ustorthents).

10.2 SUSCEPTIBILIDAD ALTA

Este rango de susceptibilidad por movimientos en masa representa 17,68% equivalente a 30.052.812,50 m² del área total de la plancha, correspondiendo a la cuarta categoría de mayor extensión en el área de estudio.

Este rango de susceptibilidad se presenta en varios sectores de la Plancha, principalmente en la vereda La Palma, Pajarito e Ilarguta, del Municipio de Macaravita; vereda Aguachica y La Chorrera, del Municipio de Capitanejo ;Departamento de Santander; veredas Limón Dulce y Peña Lisa, del Municipio de Covarachía, Departamento de Boyacá, en donde se presentan procesos morfodinámicos, con predominio de movimientos en masa de tipo caídas de rocas, deslizamiento rotacional, deslizamiento traslacional, reptación y procesos erosivos, como surcos y cárcavas.

El fuerte control estructural ejercido por el conjunto de fallas satélites asociadas a la falla de Chicamocha, es uno de los factores relevantes que favorece las condiciones de susceptibilidad alta.

Es importante mencionar que la dinámica fluvial de los zanjones y los drenajes tributarios de los principales ríos y quebradas, presentan zonas de alta energía,

que generan procesos de socavación lateral muy locales, que pueden generar movimientos en masa de varios tipos.

Los sectores clasificados con susceptibilidad alta se caracterizan por presentar diferentes tipos de vegetación, que varían entre Tierras desnudas y degradadas, Pastos limpios, Herbazal denso de tierra firme, Mosaico de pastos, cultivos y espacios naturales.

Morfométricamente se caracteriza por estar asociada a pendientes muy inclinadas a abruptas (11° - 40°), rugosidades bajas a moderadas, curvatura cóncava principalmente a ligeramente convexas, y diferentes valores de acuenca, siendo las zonas de drenaje no permanente y flujo acumulado las más frecuentes. Morfodinámicamente las zonas de susceptibilidad alta se presentan en áreas con calificaciones morfodinámicas moderadas; correspondientes a materiales resistentes y erosión moderada, con relieves relativos entre 200 y 500 m.

Morfogenéticamente se encuentra asociada a subunidades geomorfológicas de origen estructural, denudacional y antrópico, siendo el ambiente denudacional el de mayor asociación, estas subunidades geomorfológicas presentan morfologías de pendientes abruptas a muy abruptas, con índice de relieve moderado. Dentro de las unidades de origen estructural, destacan las geoformas: escarpe de contrapendiente (Secp), Ladera contrapendiente (Slcp) y escarpe estructural (See). En cuanto a las subunidades de origen denudacional, esta susceptibilidad se encuentra relacionada con: Ladera disectada muy abrupta (Dldma), Ladera ondulada muy abrupta (Dloma), Ladera erosiva (Dle), Ladera ondulada abrupta (Dloa). La única unidad geomorfológica de ambiente antrópico relacionada con susceptibilidad muy alta fue Centro Poblado (Acp).

En términos de Unidades Geológicas superficiales y Litología, las zonas que presentan susceptibilidad muy alta se encuentran relacionadas a las UGS: Roca

muy blanda de lodolitas de la Formación Tibu - Mercedes (Rmblftm), Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Capacho (Rmblfc), Roca blanda de lodolitas y calizas de la Formación Capacho (Rblcfc), Roca blanda de intercalación de lodolitas y areniscas de la Formación Colón Mito - Juan (Rbilafcm), Roca blanda de lodolitas de la Formación Tibu - Mercedes (Rblftm) y ligeramente en Roca intermedia de areniscas y calizas de la Formación Aguardiente (Riacfa). A nivel estructural, estas susceptibilidades se presentan en zonas de densidad de fracturamiento moderada a baja.

10.3 SUSCEPTIBILIDAD MODERADA

El rango de susceptibilidad moderada por movimientos en masa abarca un área de 37.297.500,00 m², equivalente a 21,94% del área total de la plancha. Se encuentra en el sector suroccidental de la plancha, en las veredas Peña Lisa, Limón Dulce, Siotes y Tapias, en jurisdicción del Municipio de Covarachía, Departamento de Boyacá; También se presenta en el sector suroriental de la plancha, en las veredas el Juncal y La Palma, del Municipio de Macaravita; y en la parte central de la zona de estudio en las veredas San Ignacio, Santa Helena y Lajas, del Municipio de San Miguel, Departamento de Santander, en donde se presentan algunos procesos morfodinámicos, con predominio de movimientos en masa de tipo reptación y deslizamiento rotacional, con erosión laminar y en surcos.

Los sectores clasificados con susceptibilidad moderada se caracterizan por presentar diferentes tipos de vegetación, que varían entre Herbazal denso de tierra firme, Mosaico de pastos y cultivos y Bosque denso alto de tierra firme.

Morfométricamente se caracteriza por estar asociada a pendientes inclinadas a muy inclinadas ($^{\circ}6- 15^{\circ}$), rugosidades bajas a moderadas, curvatura

predominantemente cóncava y en menor proporción convexa y diferentes valores de acuenca, siendo las zonas de escorrentía lenta y flujo acumulado las más frecuentes. Morfodinámicamente las zonas de susceptibilidad moderada se presentan en zonas con calificación morfodinámica moderada y baja; correspondiente a materiales moderadamente blandos y erosión moderada a severa, con relieves relativos entre 200 y 400 metros.

Morfogenéticamente se encuentra asociada principalmente a subunidades geomorfológicas de origen denudacional y en menor medida de origen estructural, estas subunidades geomorfológicas presentan morfologías suaves, de pendientes inclinadas a muy inclinadas, con índice de relieve moderado. En cuanto a las subunidades de origen denudacional, esta susceptibilidad se encuentra relacionada con: Ladera ondulada muy abrupta (Dloma), Ladera disectada muy abrupta (Dldma), Escarpe faceteado (Def), Ladera ondulada (Dlo), Ladera ondulada abrupta (Dloa), Ladera erosiva (Dle) y Ladera erosiva muy abrupta (Dlema).

En términos de Unidades Geológicas superficiales y Litología, las zonas que presentan susceptibilidad moderada se encuentran relacionadas a las UGS: Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Capacho (Rmblfc), Roca blanda de lodolitas y calizas de la Formación Capacho (Rblcfc), Roca blanda de lodolitas de la Formación Tibu - Mercedes (Rblftm), Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Aguardiente (Rmblfa) y Suelo residual granular de la Formación Aguardiente (Srgfa). A nivel estructural, este rango de susceptibilidad se presenta en zonas de baja densidad de fracturamiento.

Con respecto al atributo de suelo, las unidades que más se encuentran relacionadas a susceptibilidad moderada por movimientos en masa son: MRE (Typic Ustorthents), MMD (Ustic Dystropepts), MHA (Lithic Troorthents – Typic Dystropepts) y MRA (Typic Ustorthents).

10.4 SUSCEPTIBILIDAD BAJA

El rango de susceptibilidad baja por movimientos en masa abarca un área de 49.352.968,75 m², equivalente a 29,03% del área total de la plancha. Se localiza en el sector central y noroccidental de la plancha, en las veredas La Mesa y La Chorrera del Municipio de Capitanejo, veredas Santa Helena, San Ignacio, Llano Grande y Tablón, del Municipio de San Miguel, Departamento de Santander, en donde se presentan algunos movimientos en masa de tipo reptación, con erosión laminar.

Los sectores clasificados con susceptibilidad baja se caracterizan por presentar diferentes tipos de vegetación, que varían entre Herbazal denso de tierra firme, Pastos limpios y Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales.

Morfométricamente se caracteriza por estar asociada a pendientes inclinadas (°6-10°), rugosidades bajas y muy bajas, curvaturas predominantemente convexas a rectas y en menor proporción cóncava, y diferentes valores de acuenca, siendo las zonas de esorrentía lenta las más frecuentes. Morfodinámicamente las zonas de susceptibilidad baja se presentan en zonas con calificación morfodinámica baja y muy baja; correspondiente a materiales blandos, erosionables, con relieves relativos menores a 200 m.

Morfogenéticamente se encuentra asociada principalmente a subunidades geomorfológicas de origen denudacional, estas subunidades geomorfológicas presentan morfologías suaves, de pendientes planas, suavemente inclinadas e inclinadas, con índice de relieve bajo a muy bajo. En cuanto a las subunidades geomorfológicas son: Terrazas sobreelevadas “colgadas” (Fts) y Ladera ondulada (Dlo).

En términos de Unidades Geológicas superficiales y Litología, las zonas que presentan susceptibilidad baja se encuentran relacionadas a las UGS: Suelo

transportado de terraza aluvial (Sttal), Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Los Cuervos (Rmbflfc), Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Capacho (Rmbflfc), y Suelo residual granular de la Formación Aguardiente (Srgfa). A nivel estructural, este rango de susceptibilidad se presenta en zonas de muy baja densidad de fracturamiento.

Con respecto al atributo de suelo, las unidades que más se encuentran relacionadas a susceptibilidad baja por movimientos en masa son: MWD (Typic Ustifluvents - Fluventic Ustropepts - Typic Ustipsamments) y MRG (Typic Ustropepts- Typic Ustorthents - Entic Haplustolls).

10.5 SUSCEPTIBILIDAD MUY BAJA

El rango de susceptibilidad muy baja por movimientos en masa abarca un área de 39.065.000 m², equivalente a 22.98% del área total de la plancha, siendo la segunda categoría de mayor extensión en el área de estudio. Aunque esta categoría de susceptibilidad en algunos casos corresponde a pequeños segmentos donde el procesamiento del modelo digital de terreno (DEM ALOS PALSAR) presenta errores. Los puntos que no se encuentran agrupados, formando polígonos extensos sobre este tipo de error, se asocian principalmente a zonas estables aisladas.

Este rango de susceptibilidad se encuentra distribuido uniformemente en varios sectores de la plancha, principalmente en la parte occidental y central, a manera de franjas en dirección NW-SE, en gran parte de la zona rural de los municipios de Capitanejo y San Miguel, y también en algunos sectores del Municipio de Covarachía.

Los sectores clasificados con susceptibilidad muy baja, se caracterizan por presentar diferentes tipos de vegetación, que varían entre Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, Bosque denso alto de tierra firme, Arbustal denso y Pastos Enmalezados.

Morfométricamente se caracteriza por estar asociada a pendientes planas a suavemente inclinadas ($<5^\circ$), rugosidades muy bajas a bajas, curvaturas predominantemente convexas a recta, y diferentes valores de acuenca, siendo las zonas de escorrentía lenta la de mayor asociación. Morfodinámicamente las zonas de susceptibilidad muy baja se presentan en zonas con calificación morfodinámica muy baja; correspondiente a materiales blandos y erosionables, con relieves relativos menores a 50 m.

Morfogenéticamente se encuentra asociada principalmente a subunidades geomorfológicas de origen denudacional y fluvial, estas subunidades geomorfológicas presentan morfologías suaves, de pendientes planas a suavemente inclinada e inclinadas, con índice de relieve muy bajo. Dentro de las unidades de origen fluvial, destacan las geoformas: Plano o llanura de inundación (Fpi), Terraza de acumulación (Fta). En cuanto a las subunidades de origen denudacional, este rango de susceptibilidad se encuentra relacionada con: Cima (Dc), Terrazas sobreelevadas “colgadas” (Fts), Ladera ondulada (Dlo) y Superficie de erosión o aplanamiento (Dsa).

En términos de Unidades Geológicas superficiales y Litología, las zonas que presentan susceptibilidad muy baja se encuentran relacionadas a las UGS: Suelo transportado de terraza aluvial (Sttal), Suelo transportado de llanura aluvial (Stllal), Roca intermedia de areniscas y calizas de la Formación Aguardiente (Riacfa), Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Los Cuervos (Rmblfc) y Roca muy blanda de lodolitas de la Formación Capacho (Rmblfc). A nivel estructural, este

rango de susceptibilidad se presenta en zonas de muy baja densidad de fracturamiento.

Con respecto al atributo de suelo, las unidades que más se encuentran relacionadas a susceptibilidad muy baja por movimientos en masa son: MWD (Typic Ustifluvents - Fluventic Ustropepts - Typic Ustipsamments), MRH (Mollic Ustifluvents - Typic Ustorthents), MRG (Typic Ustropepts- Typic Ustorthents - Entic Haplustolls) y MHA (Lithic Troorthents, Typic Dystropepts y Afloramiento rocosos). En la **Tabla 15** se observa la clasificación de susceptibilidad junto con su totalidad de pixeles correspondiente a cada categoría.

Tabla 16. Clasificación de susceptibilidad junto con su totalidad de pixeles correspondiente a cada categoría.

Susceptibilidad por movimientos en masa	Pixeles
Muy alta	91.083
Alta	192.338
Moderada	238.704
Baja	315.859
Muy baja	250.016
Total:	1.088.000
Valor del pixel: 12,5 m ²	

11. CONCLUSIONES

- Se generó el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 de la plancha 136-IV-A, clasificado en 5 categorías de susceptibilidad: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta. Siendo la susceptibilidad baja, la que prevalece en la zona de estudio, seguida de susceptibilidad muy baja y moderada, y, por último, el menos predominante fue la susceptibilidad muy alta.
- En la realización y análisis de diferentes modelos de redes neuronales artificiales, se identificó que estas redes, consideran, que el factor más influyente es el de morfodinámica; ya que es fácil deducir, si tenemos en cuenta que todos los movimientos en masa se encuentran dentro de la clase de susceptibilidad muy alta “5” de este atributo; esta clase también incluye todos los depósitos coluviales presentes en la zona, los cuales al aplicar la red neuronal artificial, son considerados en la mayoría de los casos como zonas de muy alta susceptibilidad a los movimientos en masa.
- A partir de la cartografía geomorfológica a escala 1:25.000, se estableció que la configuración actual del relieve de la plancha 136-IV-A es reflejo del resultado de procesos endógenos y exógenos. Dentro de los ambientes morfogenéticos; se observan las subunidades geomorfológicas de origen denudativo que están conformados en un (51,47%), seguido de las subunidades estructurales – denudacional conformados en un (39,08%), y por último las subunidades geomorfológicas fluviales conformados en un (7,93%).
- En la mayoría de los atributos se presenta una relación entre los rangos de variación, las categorías de susceptibilidad y la frecuencia de incidencia de los movimientos en masa. Tal es el caso de las pendientes, donde el nivel de

susceptibilidad se va incrementando con las mismas y a la par con la incidencia de los movimientos en masa. De igual manera los atributos morfogenéticos y morfodinámicos, presentan una relación directamente proporcional y análoga con las categorías de mayor susceptibilidad y la ocurrencia de movimientos en masa.

- En la evaluación de la red neuronal representados en el mapa de susceptibilidad con respecto, a la localización de los movimientos utilizados en el entrenamiento, muestran que los eventos fueron clasificados en las categorías de mayor susceptibilidad como era lo esperado. Por su parte, las curvas Best Performance de éxito y predicción, cuyas áreas de las líneas cercanas a uno, confirman el óptimo entrenamiento de la red y la buena capacidad de predicción del método, respectivamente.
- Con este trabajo de investigación se generó una metodología segura, que oriente a las personas o entidades a elaborar de manera técnica futuros estudios de susceptibilidad a movimientos en masa, a escala 1:25.000 con éxito.

12. RECOMENDACIONES

- Debido a que todavía no hay unas calificaciones claras para algunos atributos que se ajusten a la escala de trabajo (1:25.000), algunas se tomaron de la metodología a escala 1:100.000 establecida por el Servicio Geológico Colombiano, por lo tanto, para mayor confiabilidad, se requiere mejores calificaciones.
- Este trabajo de investigación es un insumo para completar el esquema de ordenamiento territorial y se recomienda realizar estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo a escala 1:25.000, con el fin de completar la información del área de trabajo que contienen los municipios tales como Capitanejo, San Miguel y Macaravita; con respecto a los movimientos en masa, e incluirlos como base para la realización de proyectos de infraestructura, mitigación, atención de desastre y planes de desarrollo.
- Realizar para futuros trabajos una cartografía más detallada del uso del suelo e hidrogeología, como también información geotécnica suficiente para el estudio y análisis de estas y así obtener una mejor clasificación de las unidades geológicas superficiales, con el objeto de mejorar los resultados de los mapas de susceptibilidad por MM.

BIBLIOGRAFIA

ALCALDÍA DE CAPITANEJO. Estudio de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de Capitanejo. Alcaldía municipal de Capitanejo. 2003, Tomo II. p154

ALCÁNTARA, Irasema. Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Investigaciones Geográficas, Boletín del instituto de Geografía (19). 2000. p.8-12.

CARDOZO, Paola. Zonación de susceptibilidad Por procesos de remoción en masa en la Cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina). Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Córdoba. 2013. p.127.

CARRARA, Alberto. CARDINALI, Mauro. GUZZETTI, Fausto. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk, ITC Journal. 1992. 2, p.172–183.

CARVAJAL, H. Primeras aproximaciones a la estandarización de la geomorfología en Colombia. Documento INGEOMINAS, 30 P. 2008, Bogota.

CARVAJAL, Henry. Primeras aproximaciones a la estandarización de la geomorfología en Colombia. Documento INGEOMINAS. Bogotá D.C. 2008. p.30.

CRUDEN, D., VARNES, D. Landslide Types and Processes, Special Report. Transportation Research Board, National Academy of Sciences. 1996, 247:40p.

ERMINI, Leonardo. CATANI, Filippo, y CASAGLI, Nicola. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. Geomorphology magazine. 2005, 16 (66), p.327–343.

ESRI, ArcGis Version (10.1) [Software]. Disponible en ESRI: <http://www.esri.com/software/arcgis>. 2012.

GÓMEZ, H., KAVZOGLU, T. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology*. 2015, 16 (78), 11–27p.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, M. FERRER, L. ORTUÑO., OTEO, C. Ingeniería geológica. Prentice Hall. Madrid, 2002.715 p. Ingeniería geológica, 2007 14p.

HAYKIN, Simon. *Neural networks: a comprehensive foundation*. 2 ed. Prentice-Hall. New Jersey, 1999. p. 42 y 842.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM), Metodología para la Zonificación de Susceptibilidad General del Terreno a los Movimientos En Masa. 2012, 28p.

JULIVERT, ET AL., *Lexique Stratigraphique International*. Amerique Latine. Colombie. Centre National de la Recherche Scientiphique (Paris). 1968, 5 (4a): 651.

KELLOGG, N. Cenozoic Tectonic History of the Sierra del Perijá, Venezuela – Colombia, and Adjacent Basins. *Geological Society of America, Memoir 162*. Boulder, Colorado, USA. 1984, 239 – 261p.

LEE, Saro, et al. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology*. 2004, 13 (71), pp. 289–302.

LEIVA, Omar Yesid, et, al. Metodológica Sistemática para La Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados a La Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:100.000. Ministerio de Minas y Energía; Servicio Geológico Colombiano, 2012. p. 88.

MARTÍN DEL BRÍO, Bonifacio y SANZ, Alfredo. Redes Neuronales y Sistemas Borrosos. 3 ed. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. México D.F., 2007. 440 p.

MATHWORKS. MATLAB (Version R2014a) [Software]. En MathWorks. 2014. Disponible en: <https://www.mathworks.com/company/newsroom/mathworks-2014a>.

MATHWORKS. MATLAB (Version R2017a) [Software]. En: MathWorks. 2017. Disponible en: <https://www.mathworks.com/company/newsroom/mathworks-R2017a>.

NOTESTEIN, F., HUBMAN, C., BOWLER, J. Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. Bulletin of the Geological Society of America, 55(10). 1944, 165–1216p.

PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: Geociencias para las Comunidades Andinas. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional. 2007, No. 4, 432 p.

RODRIGUEZ, J. Caracterización de macizos rocosos. Revisión de los libros de M. FERRER., L. GONZÁLEZ DE VALLEJO. Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME, Madrid, 1999. 107p.

ROYERO, Juan y CLAVIJO, Jairo. Memoria explicativa del mapa geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1:300.000. INGEOMINAS. Bucaramanga, Colombia. 2001.

RUEDA, Adrián y TAVERA, Carlos. Zonificación de la susceptibilidad relativa por movimientos en masa empleando el método matemático de lógica difusa en un área de 150 Km² pertenecientes a la plancha 136-I-B escala 1:25.000. (Trabajo de grado). 2016, p120.

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO, Guía metodológica para para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000,2017. 288 p.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Versión No. 2. Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental. Bogotá. 2013, 158 p.

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015. p.182.

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Colección de Guías y Manuales, 2015.182p.

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en masa Escala 1: 25.000. 2017. p. 288.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de Caqueza-Cundinamarca. 2013. p. 611.

SUAREZ, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Capítulo 11. Zonificación de amenaza y riesgo. Geotecnología S.A. 2009, 13. pp. 528-587.

TERRAZAS DMÍNGUEZ, S., et al., Aplicación de redes neuronales artificiales y técnicas SIG para la predicción de coberturas forestales. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 1998, p31-37.

TIEN, D., PRADHAN, B., LOFMAN, O., REVHAUG, I., DICK, O. Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh province of Vietnam: A comparison of the Levenberg-Marquardt and Bayesian regularized neural networks. Geomorphology. 2012, 17 (171-172), 12–29p.

VARGAS, R., ARIAS, A., JARAMILLO, L., TÉLLEZ, N. Geología de las planchas 136 Málaga y 152 Soatá Cuadrángulo I-13. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Colombia. 1981.

VARNES, David. Slope movement Types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control, Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C.1978. p. 11-33

YEGNANARAYANA, B Artificial Neural Networks, Prentice Hall Of India Limited, New Delhi, 2005. 479 p.