

**ANÁLISIS DE LAS CAUSAS DEL CARCAVAMIENTO EN EL
MUNICIPIO DE BRICEÑO, ANTIOQUIA.**

Verónica Torres Carrasquilla

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
MEDELLÍN

2021

**ANÁLISIS DE LAS CAUSAS DEL CARCAVAMIENTO EN EL
MUNICIPIO DE BRICEÑO, ANTIOQUIA.**

Verónica Torres Carrasquilla

vtorres3@eafit.edu.co

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de **geóloga**

DIRECTOR

Marco Fidel Gamboa Ramírez

mgamboa@eafit.edu.co

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

MEDELLÍN

2021

“No importa la lentitud con que avances,
siempre y cuando no te detengas”

Confucio

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por el apoyo.

A mis amigos por estar siempre.

A Maryory Yarce que fue mi apoyo en los momentos más difíciles de este proceso.

A Marco por su disposición, apoyo y paciencia durante la realización de este proyecto.

A Ana Lucía, Leidy y Wilton por su disposición.

A los profesores por sus enseñanzas.

A las personas que de alguna u otra forma hicieron parte de este camino.

Muchas gracias.

CONTENIDO

RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
GENERALIDADES	13
Pregunta de investigación	13
Hipótesis	13
Planteamiento del problema	13
Objetivo general	14
Objetivos específicos	14
1. LOCALIZACIÓN	14
2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	16
2.1. Geología regional	16
2.1.1. Grupo Valdivia	17
Esquistos clorítico-actinolítico.	17
Esquistos cuarzo-sericíticos.....	17
Esquistos intercalados	18
Edad y correlación.	18
2.2. Estructuras	18
2.2.1. Falla Romeral.....	18
2.2.2. Falla espíritu santo	19
3. CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS GENERALES	20
4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SUELOS	20

4.1.	GS – Complejo Girardota	20
	GSb:	21
4.2.	IT – Asociación Ituango	21
	ITe1:	22
	ITf2:	22
4.3.	MR – Misceláneo rocoso	22
4.4.	RV – Asociación Raudal.....	22
	RVf3:	22
4.5.	VC - Complejo Ventanas	22
	Vcf2:	23
5.	MARCO GEOMORFOLÓGICO REGIONAL	23
6.	METODOLOGÍA	24
6.1.	Recolección Bibliográfica.....	25
6.1.1.	Geología.....	26
6.1.2.	Geomorfología	26
6.1.3.	Coberturas terrestres	26
6.2.	Fotointerpretación y Sistema de Información Geográfica (SIG).....	26
6.2.1.	Geología.....	27
6.2.2.	Geomorfología	27
6.2.3.	Coberturas terrestres	29
6.3.	Campo	30

6.4.	Regresión logística.....	31
6.5.	Análisis y Resultados.....	32
6.5.1.	Geología.....	32
6.5.2.	Geomorfología.....	34
6.5.3.	Coberturas terrestres	42
6.5.4.	Regresión logística.....	45
6.5.4.1.	AÑO 1994	45
	Escenario 1	45
	Escenario 2	46
	Escenario 3	48
6.5.4.2.	AÑO 2005	49
	Escenario 1	49
	Escenario 2	50
	Escenario 3	51
6.5.4.3.	AÑO 2011	52
	Escenario 1	53
	Escenario 2	54
	Escenario 3	55
6.5.5.	Curvas de éxito	56
7.	DISCUSIÓN	62
8.	CONCLUSIONES.....	64

Lista de figuras

Figura 1. <i>Mapa de localización del área de estudio.</i>	15
Figura 2 <i>Mapa Geológico plancha 115. (Tomado de SGC, 2012)</i>	16
Figura 3. <i>Mapa de suelos del área de estudio (Tomado y modificado de IGAC, 2007)</i>	21
Figura 4 <i>Mapa geomorfológico plancha 115. (SGC, 2015)</i>	24
Figura 5 <i>Esquema de la metodología utilizada</i>	25
Figura 6. <i>Mapa cuencas hidrográficas</i>	27
Figura 7. <i>Mapa de estaciones</i>	30
Figura 8. <i>Mapa geológico (Tomado y modificado de SGC, 2010)</i>	34
Figura 8 a) <i>Grafica de diaclasas correspondiente a la vereda "La meseta" y " La Correa"</i>	
b) <i>Grafica de diaclasas correspondiente a la vereda "El pescado"</i>	33
Figura 9 <i>Mapa pendiente</i>	35
Figura 10 <i>Mapa de aspecto</i>	36
Figura 11 <i>Mapa Relieve relativo</i>	37
Figura 12 <i>Curva hipsométrica Cuenca El Auxilio</i>	39
Figura 13 <i>Curva hipsométrica cuenca la América 2</i>	39
Figura 14 <i>Curva hipsométrica cuenca la América 1</i>	39
Figura 15 <i>Curva hipsométrica Cuenca El Gato</i>	39
Figura 16 <i>Curva hipsométrica Cuenca La Ceiba</i>	40
Figura 17 <i>Curva hipsométrica cuenca La Juez</i>	40
Figura 18 <i>Curva hipsométrica cuenca Manizales</i>	40
Figura 19 <i>Curva hipsométrica cuenca La Correa</i>	40
Figura 20 <i>Mapa análisis multitemporal carcavamiento (1982, 1994, 2005 y 2011).</i>	41

Figura 21 a) <i>Mapa cobertura año 1994</i>	42
Figura 21 b) <i>Mapa cobertura año 2005</i>	43
Figura 21 c) <i>Mapa cobertura año 2011</i>	44
Figura 22 a) <i>Mapa susceptibilidad a carcavamiento 1994 escenario 1</i>	46
Figura 22 b) <i>Mapa susceptibilidad a carcavamiento 1994 escenario 2</i>	47
Figura 22 c) <i>Mapa susceptibilidad a carcavamiento 1994 escenario 3</i>	49
Figura 23 a) <i>Mapa susceptibilidad a carcavamiento 2005 escenario 1</i>	50
Figura 23 b) <i>Mapa susceptibilidad a carcavamiento 2005 escenario 2</i>	51
Figura 23 c) <i>Mapa susceptibilidad a carcavamiento 2005 escenario 3</i>	52
Figura 24 a) <i>Mapa susceptibilidad a carcavamiento 2011 escenario 1</i>	53
Figura 24 b) <i>Mapa susceptibilidad a carcavamiento 2011 escenario 2</i>	54
Figura 24 c) <i>Mapa susceptibilidad a carcavamiento 2011 escenario 3</i>	55

Lista de tablas

Tabla 1 Líneas de vuelo y fotografías aéreas.....	29
Tabla 2 <i>Datos estructurales recolectados en campo.</i>	32
Tabla 3 <i>Area correspondiente a los rengos de pendiente de las cuencas.</i>	35
Tabla 4 <i>Parámetro morfométricos de las cuencas.</i>	37
Tabla 5 <i>Area afectada para cada periodo</i>	42
Tabla 6 Tabla de colores coberturas terrestres.	44
Tabla 7 <i>Resultados coeficientes (wi) modelo 1994 escenario 1</i>	45
Tabla 8 <i>Resultados coeficientes (wi) modelo 1994 escenario 2</i>	46
Tabla 9 <i>Resultados coeficientes (wi) modelo 1994 escenario 3</i>	48
Tabla 10 <i>Resultados coeficientes (wi) modelo 2005 escenario 1</i>	49
Tabla 11 <i>Resultados coeficientes (wi) modelo 2005 escenario 2</i>	50
Tabla 12 <i>Resultados coeficientes (wi) modelo 2005 escenario 3</i>	51
Tabla 13 <i>Resultados coeficientes (wi) modelo 2011 escenario 1</i>	53
Tabla 14 <i>Resultados coeficientes (wi) modelo 2011 escenario 2</i>	54
Tabla 15 <i>Resultados coeficientes (wi) modelo 2011 escenario 3</i>	55

RESUMEN

En este proyecto la metodología de regresión logística fue usada para modelar la relación entre los procesos de erosión hídrica concentrada y múltiples variables independientes (pendiente, geología, cobertura, aspecto, relieve relativo y distancia a fallas) para parte del área rural del municipio de Briceño, Antioquia. Mapas en formato raster para diferentes tiempos fueron generados a partir de fotografías aéreas, mapas topográficos, geológicos y trabajo de campo, así como un análisis multitemporal de la evolución de los procesos erosivos y parámetros morfométricos de las cuencas. Como resultado de esta regresión se encuentra que la geología y la cobertura vegetal fueron los factores con mayor peso en los modelos; mientras distancia a fallas y aspecto fueron los factores de menos peso.

INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo por agua sigue siendo un problema en varias regiones del mundo y en muchos casos la fuente dominante de sedimentos es por procesos de cárcavamiento. A través de la historia el cárcavamiento ha sido reconocido como un proceso importante de degradación del suelo (Dotterweich et al., 2012). Las cárcavas son cursos de agua relativamente permanentes que experimentan flujos efímeros durante tormentas. Estas están caracterizadas por la corona y varios escalones a lo largo de su curso (Morgan, 2005).

Varios estudios muestran que el desarrollo de cárcavamiento conduce a un importante daño de la infraestructura (Poesen et al., 2003; Makanzu, 2014). Entender este proceso de erosión es de gran importancia tanto desde un punto de vista geomorfológico como ambiental (Poesen et al. 2003). En las últimas décadas varios estudios han sido enfocados en identificar las condiciones topográficas, climáticas, litológicas y de uso de suelo en las cuales se forman las cárcavas (Torri and Poesen, 2014).

Según Li et al. (2004) factores climáticos, a menudo combinados con otros elementos, tienen un importante rol en la formación de cárcavas. Cambios abruptos y frecuentes de temperatura y precipitación son señales de una inestabilidad climática que tiene como resultado la erosión del suelo. A lo largo del tiempo se han estudiado los papeles que cumple el clima, el tipo de roca, la geología, hidrología y hasta la intervención humana en el desarrollo de cárcavas, medidas de control y mitigación de posibles riesgos para las comunidades.

En este trabajo se busca definir si alguno de estos factores influye en la formación de cárcavas en el municipio de Briceño ubicado al norte del departamento de Antioquia y cuál de estos es el principal aportante a su rápida evolución.

GENERALIDADES

Pregunta de investigación

¿Cuál es el factor principal que contribuye a la formación de cárcavas en el municipio de Briceño, Antioquia?

Hipótesis

El desarrollo de procesos morfodinámicos en el municipio de Briceño, Antioquia está asociado a un control estructural, lo cual tendría como respuesta carcavamientos de grandes dimensiones.

Planteamiento del problema

La formación de cárcavas representa una amenaza para la agricultura, sostenibilidad ambiental y calidad de vida para las comunidades rurales; además puede causar grandes daños a la infraestructura como vías, edificaciones y puentes que a su vez sería desfavorable para el desarrollo económico de las comunidades. En el caso puntual del municipio de Briceño se han visto afectadas comunidades que dependen de la ganadería y/o agricultura para sobrevivir, no sólo por la pérdida de áreas destinadas a estas actividades sino también porque los caminos y vías de acceso desde el casco urbano han desaparecido por el avance del carcavamiento, especialmente en épocas de lluvia.

Lo mencionado anteriormente ha generado pérdidas monetarias no solo para las familias que residen en estas comunidades sino también para el municipio en general; por lo cual es necesario conocer las causas para tomar decisiones acertadas para el manejo de este proceso erosivo.

Objetivo general

Determinar las causas que generan la erosión concentrada en el municipio de Briceño, Antioquia y definición de elementos para su manejo.

Objetivos específicos

- Evaluar la geología y su susceptibilidad en la generación de erosión concentrada.
- Evaluar las estructuras geológicas presentes en el área de estudio y su susceptibilidad a partir de información primaria y secundaria.
- Generar un análisis multitemporal de las coberturas terrestres.
- Definir y analizar parámetros morfométricos que puedan influir en los procesos de cárcavamiento.
- Determinar la relación de las variables seleccionadas con el desarrollo del cárcavamiento.

1. LOCALIZACIÓN

El municipio de Briceño está ubicado sobre la cordillera central en la subregión norte del departamento de Antioquia (Gómez Mazo, J et al, 2015), la población del municipio es de 5946 (DANE, 2018). Su extensión es de 401km², donde el área urbana ocupa 27 km², mientras que el área rural posee 374 km².

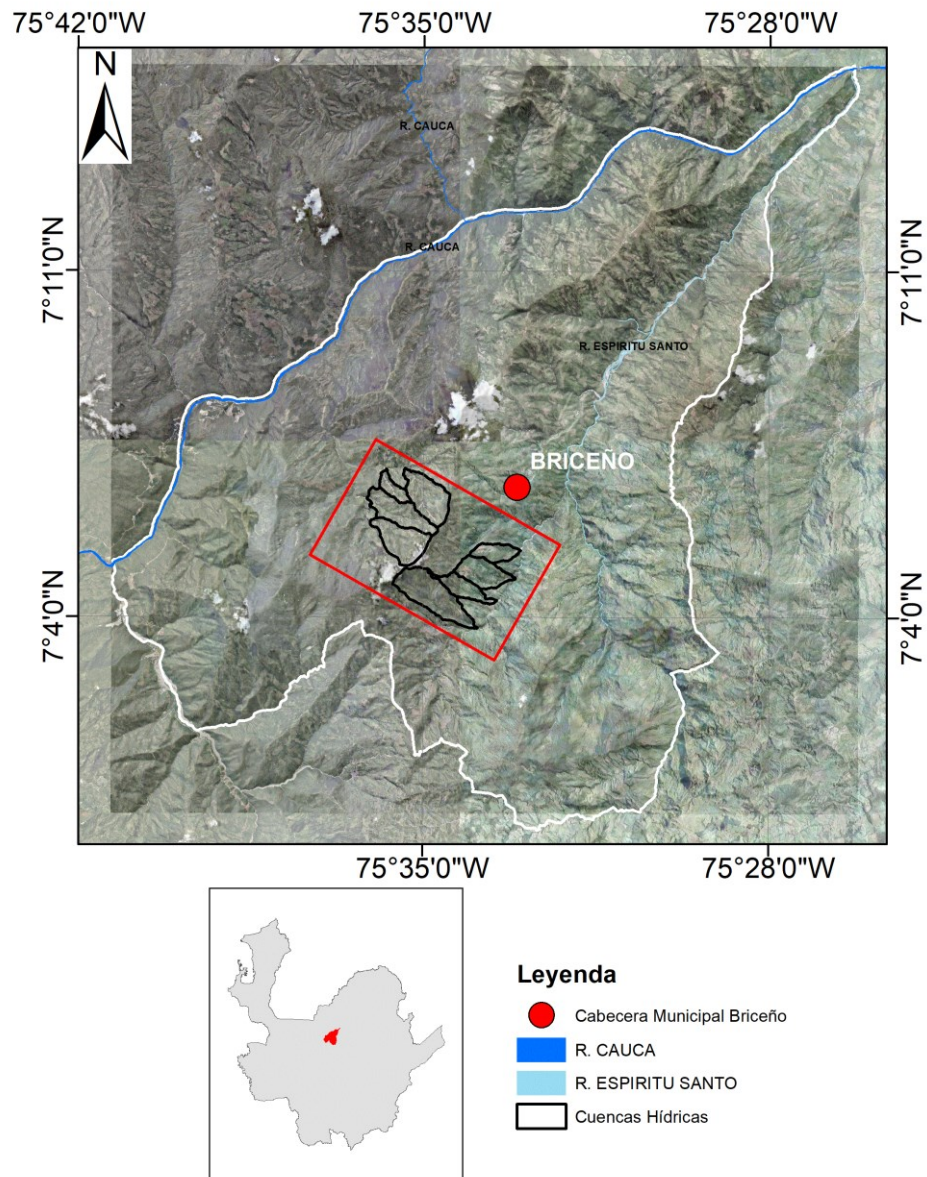


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.

En el esquema de ordenamiento territorial (EOT) para Briceño 2000-2008, clasifica como suelo urbano la cabecera municipal, como suelo suburbano a los centros poblados que se ubican en los corregimientos. En el suelo rural permite llevar a cabo actividades pecuarias, agrícolas, forestales y mineras. Por último, determina como suelo de protección a las áreas de nacimientos de agua, zonas de bosques, el área del relleno sanitario entre otras. Cabe

destacar que en el municipio se han identificado zonas de amenaza por inundación y avenidas torrenciales y áreas con suelos degradados por procesos erosivos que también se incluyen en esta categoría.

El área de estudio de este proyecto está localizada al suroccidente del municipio de Briceño (Figura 1), específicamente en las veredas de La Meseta, La correa, El Cedral y El Pescado.

2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

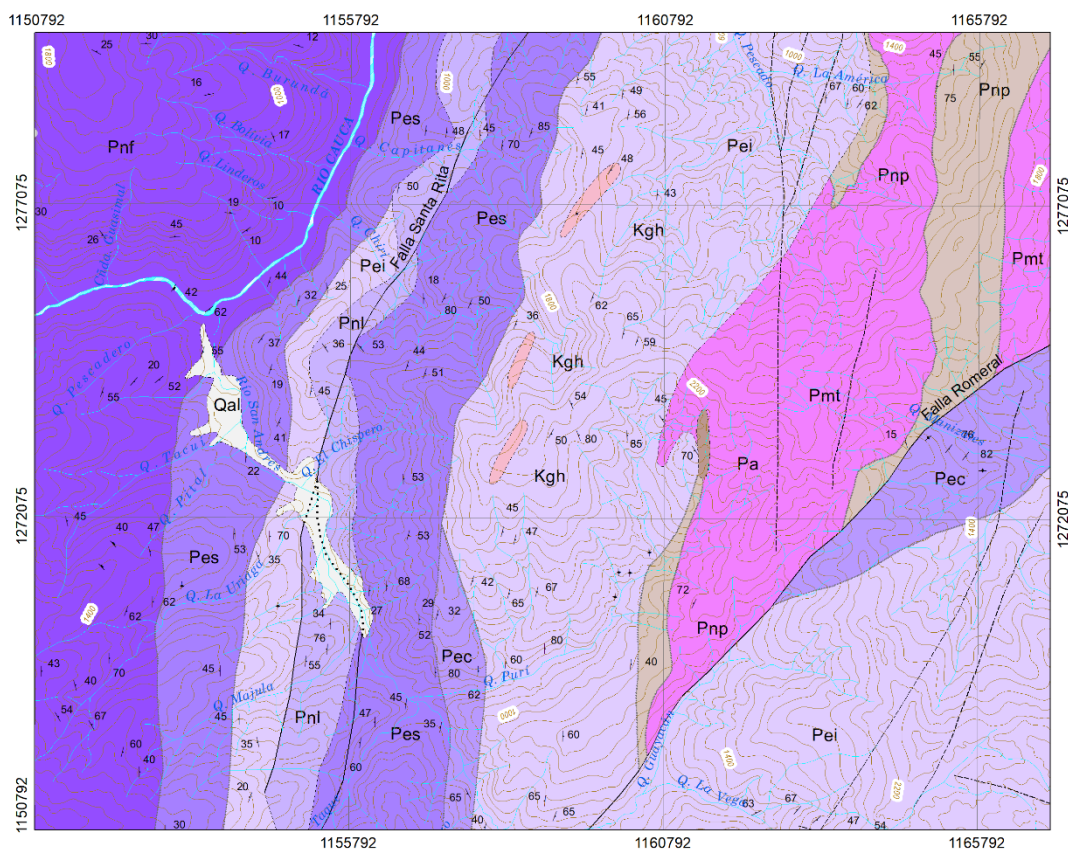


Figura 2 Mapa Geológica plancha 115. (Tomado de SGC, 2012)

2.1. Geología regional

A continuación, se realiza la descripción de las unidades geológicas a partir de la plancha 115 – Toledo y 116 – Yarumal. En la zona de estudio se encuentran principalmente rocas metamórficas, como esquistos, neises y anfibolitas.

2.1.1. Grupo Valdivia

Definida originalmente por Hall et al., (1970) es el conjunto de rocas metasedimentarias de edad Paleozoica compuesta por esquistos de bajo a medio grado intercalado con neises alumínicos de medio grado y localmente con mármoles (Hall et al., 1970; Gonzáles, 2001) que afloran cerca a las poblaciones de Yarumal, Ituango y Briceño. Autores como Maya y González (1995) y posteriormente González et al., (2001) proponen incluir este grupo como parte del Complejo Cajamarca, debido a similitudes texturales, composicionales y genéticas. Para efectos de este trabajo, se describen las tres unidades de esquistos definidas por Hall et al., (1970), ya que son las que afloran en los alrededores del municipio de Briceño.

Esquistos clorítico-actinolítico. Esquistos de tonos verdes a gris, mineralógicamente presenta bandas delgadas de clorita y primas o porfiroblastos de actinolita intercaladas con bandas de albita y epidota, como minerales accesorios presenta esfena, magnetita, pirita diseminada y venillas de calcita (Hall et al., 1970).

Esquistos cuarzo-sericíticos. Compuesta principalmente por esquistos o filitas con tonalidades grises a negras muy laminados, su mineralogía generalmente es de 50-85% cuarzo, 10-25% micas como sercita, biotita y clorita, además, minerales accesorios como grafito, epidota, magnetita, zircón y porfiroblastos de andalucita (Hall et al., 1970).

Esquistos intercalados. Hall et al., (1970) asigna este nombre a las zonas donde se intercalan abundantemente esquistos cuarzo-sericíticos y esquistos clorítico-actinolítico, y es difícil determinar cuál predomina.

Edad y correlación. Está unidad es correlacionada con el grupo Cajamarca debido a características composicionales y texturales de los esquistos definidos por Nelson, (1950) (Hall et al., 1970). En cuanto a la edad, se considera Paleozoica a partir de relaciones de campo y dataciones radiométricas (K/Ar) y (Rb/Sr) (Hall et al., 1970; Maya, 1992; Maya y González., 1995; Gonzáles, 2001).

2.2.Estructuras

A continuación, se describen las principales estructuras geológicas presentes en la zona que están indicadas en la plancha 115 – Toledo.

2.2.1. Falla Romeral

Esta estructura geológica marca el límite entre la corteza oceánica al occidente, conformada por las rocas de la Cordillera Occidental, y la corteza continental, constituida por las rocas intrusivas y metamórficas de la Cordillera Central (Meisser et al., 1976 y Case et al., 19719).

Con respecto a la dinámica de la falla existen estudios que difieren entre sí en sus resultados. Grosse (1926) la describe como una falla empinada, inversa, con buzamiento al E y grandes desplazamientos verticales, mientras que González (1974), basado en las características de la parte sur de la falla, asegura que presenta un ángulo de inclinación alto hacia el E, y desplazamientos con componentes de rumbo y buzamiento, Toussaint y Restrepo (1976) plantean una falla de rumbo, aunque con sentido y magnitud de desplazamiento desconocido.

2.2.2. Falla Espíritu Santo

Ubicada en la parte norte de la cordillera central, la Falla Espíritu Santo (FES) es una estructura de 124km de longitud que se extiende desde la falla de Sabanalarga cerca de la ciudad de Liborina, hasta el noreste de la ciudad de Cáceres en el área del Bajo Cauca (Paris et al, 2000) rumbo N25°E lateral derecho, presentando componentes inversos en sus segmentos suroeste y comportamiento normal en su porción noreste (Arias, 1981; Page, 1986; Integral, 1998; Mesa y Lalinde, 2001). Page (1986) incluye la FES dentro del sistema de fallas cauca-romeral (Page, 1986), aunque a partir de diferencias en geometría y cinemática otros autores la separan como una falla diferente a este sistema (Paris et al, 2000; Noriega et al, 2019) también es clasificada como el límite entre el terreno Tahamí y Panzenú (Ordóñez–Carmona y Pimentel, 2002; Restrepo, J.J y Toussaint, J.F, 2020).

La falla Espíritu Santo pone en contacto rocas metamórficas Permo-Triásicas del complejo Cajamarca y el Batolito Antioqueño con rocas paleozoicas asociadas al Complejo Puquí y el Grupo Valdavia (Etayo, 1986; Cediél et al., 2003; Ordóñez–Carmona y Pimentel, 2002; Noriega et al, 2019) y es cubierta por sedimentos de los río Cauca y Nechí al NE (Paris et al, 2000). En el Cenozoico, la FES presentó varios pulsos de actividad, siendo importante para el levantamiento de la parte norte de la cordillera Central (Noriega et al, 2019). También, teniendo en cuenta características neotectónicas a lo largo de la traza de la falla, se propone actividad reciente de la falla en el Holoceno con una tasa de 0.3-0.4 mm/año (Integral, 1998; Paris et al, 2000) siendo el último movimiento hace aproximadamente 500 años (Integral, 1998).

3. CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS GENERALES

El clima de un lugar depende de diferentes elementos, siendo los más relevantes la temperatura y la precipitación. Otros elementos como la altitud, la humedad, los vientos, la vegetación y nubosidad juegan un papel importante.

En Colombia hay una gran diversidad climática determinada principalmente por las variaciones altitudinales y su ubicación geográfica. El clima juega un papel importante en la formación de suelo, ya que la temperatura, el viento y las lluvias contribuyen en la erosión de las rocas.

El área de estudio se caracteriza por tener elevaciones que van desde los 722 msnm en la cuenca de la quebrada Socavones hasta los 2450 msnm y con temperaturas entre los 18° y los 27°C por lo que el clima de la zona va desde frío y húmedo hasta cálido y seco.

4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SUELOS

Los suelos presentes en la zona de estudio son principalmente inceptisol y andisol, donde las unidades predominantes son IT, RV, VC Y GS (Ver figura 3).

A continuación, se describen con más detalle las unidades de suelos presentes en el área de estudio.

4.1. GS – Complejo Girardota

Suelos superficiales y profundos, drenaje pobre a moderado, texturas moderadamente finas a gruesas, inundaciones ocasionales, fertilidad baja y alta.

Geomorfológicamente, se encuentran en el paisaje de montaña en el tipo de relieve correspondiente a vallecitos en los cuales se pueden encontrar pequeñas terrazas, vegas, diques y coluvios. El relieve es plano a fuertemente ondulado con pendientes hasta del 12% (IGAC,2007).

La vegetación original ha desaparecido en la mayor parte de las tierras de esta unidad, los suelos están utilizados en pastos para ganadería y algunos cultivos propios del clima templado como plátano, yuca, caña de azúcar, café, frutales (IGAC,2007).

Se delimitaron las siguientes fases por pendiente y erosión:

GSb: Complejo Girardota, ligeramente inclinada

MAPA DE SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

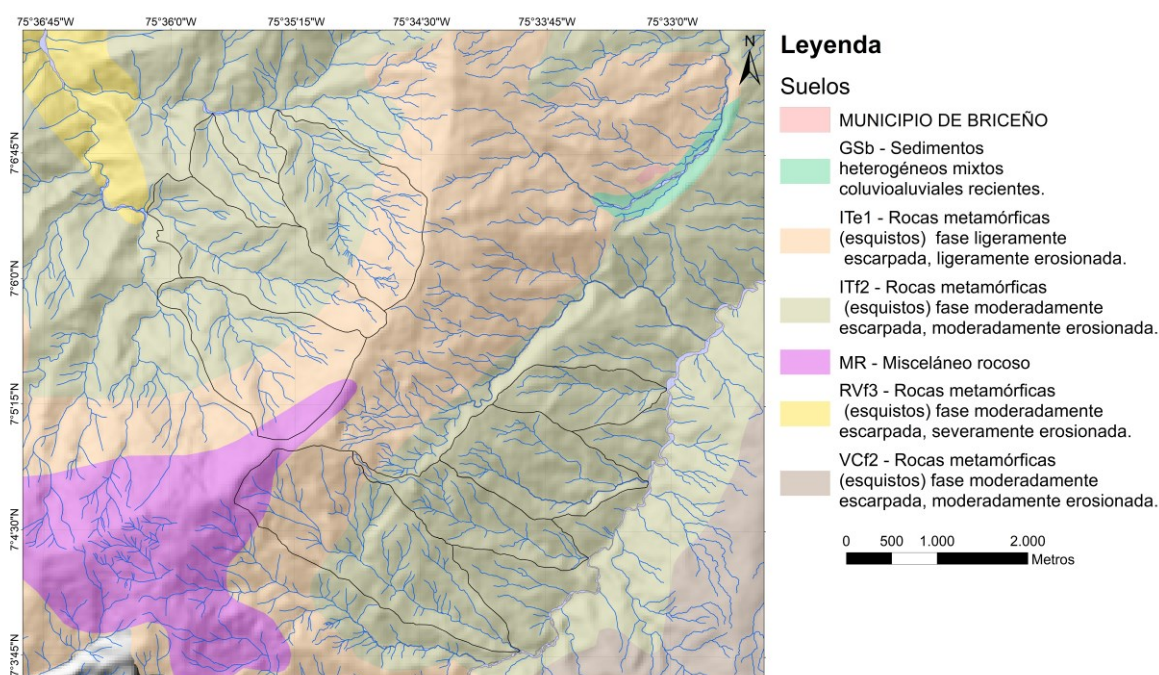


Figura 3. Mapa de suelos del área de estudio (Tomado y modificado de IGAC, 2007)

4.2. IT – Asociación Ituango

Suelos profundos, bien drenados, texturas finas a medias, erosión ligera y moderada, fertilidad baja, reacción ligera a fuertemente ácida.

Geomorfológicamente comprende filas y vigas de montaña, en las cuales se encuentran pequeños coluvios y afloramientos rocosos. El relieve varía de moderadamente inclinado a

moderadamente escarpado, las cimas o crestas son agudas, algunas redondeadas; las pendientes que oscilan de 7 a 75% (IGAC,2007).

Las fases que presenta la unidad son por pendiente y erosión:

ITe1: Asociación Ituango, fase ligeramente escarpada, ligeramente erosionada.

ITf2: Asociación Ituango, fase moderadamente escarpada, moderadamente erosionada.

4.3. MR – Misceláneo rocoso

Abarca afloramientos de rocas y suelos esqueléticos con cobertura vegetal muy rala: en zonas frías por líquenes, musgos y arbustos y en clima cálido por especies arbustivas y arbóreas muy escasas. El uso adecuado es para recreación y protección de la fauna y flora (IGAC,2007).

4.4. RV – Asociación Raudal

Suelos profundos y superficiales, bien drenados, texturas finas a medias, erosión ligera y moderada, fertilidad muy baja, reacción muy fuertemente ácida.

Presentan erosión por escurrimientos en masa localizados, el grado de erosión llega a severo especialmente en las laderas del Cauca y se pueden encontrar piedras y cascajo en la superficie (IGAC,2007).

RVf3: Asociación Raudal, fase moderadamente escarpada, severamente erosionada.

4.5. VC - Complejo Ventanas

Suelos profundos y superficiales limitados por roca, bien drenados, texturas moderadamente gruesas a finas, fertilidad baja a muy baja, erosión ligera a moderada.

Geomorfológicamente pertenece al paisaje de montaña y al tipo de relieve de filas y vigas. El relieve es fuertemente inclinado a moderadamente escarpado, con pendientes mayores del

12%. Se presenta erosión laminar ligera a moderada y movimientos en masa tipo terracetas; también se encuentra pedregosidad superficial localizada (IGAC,2007).

Los suelos, desarrollados a partir de rocas metamórficas (esquistos de diferente clase) con intrusiones de Neis; son profundos y superficiales, limitados por la roca compacta. Son bien drenados (en algunas áreas es excesivo), texturas moderadamente gruesas a finas y fertilidad baja a muy baja (IGAC,2007).

Las fases que se encuentran en la unidad de suelos son:

VCf2: Consociación Ventanas, fase moderadamente escarpada, moderadamente erosionada.

5. MARCO GEOMORFOLÓGICO REGIONAL

El norte del departamento de Antioquia se caracteriza por remanentes de varios altiplanos con alturas superiores a los 2800 msnm, que pueden estar segmentados por cañones profundos y desciende paulatinamente hasta los 500 msnm en las llanuras aluviales del Bajo Cauca (SGC; 2015).

En el municipio de Briceño, se presenta la expresión geomorfológica del cañón del río Cauca hacia el norte, el cual evidencia el control estructural del occidente colombiano y manifiesta expresiones geomorfológicas asociadas claras. De igual forma, el cañón del río Espíritu Santo y drenajes secundarios, que drenan al río Cauca, se destacan en el área.

Las unidades de carácter denudacional son típicas de la zona, tales como laderas onduladas, laderas erosivas, conos de deslizamientos, lomos y cimas; con la presencia de unidades geomorfológicas estructurales como espolones faceteados, escarpes y sierra (SGC; 2015).

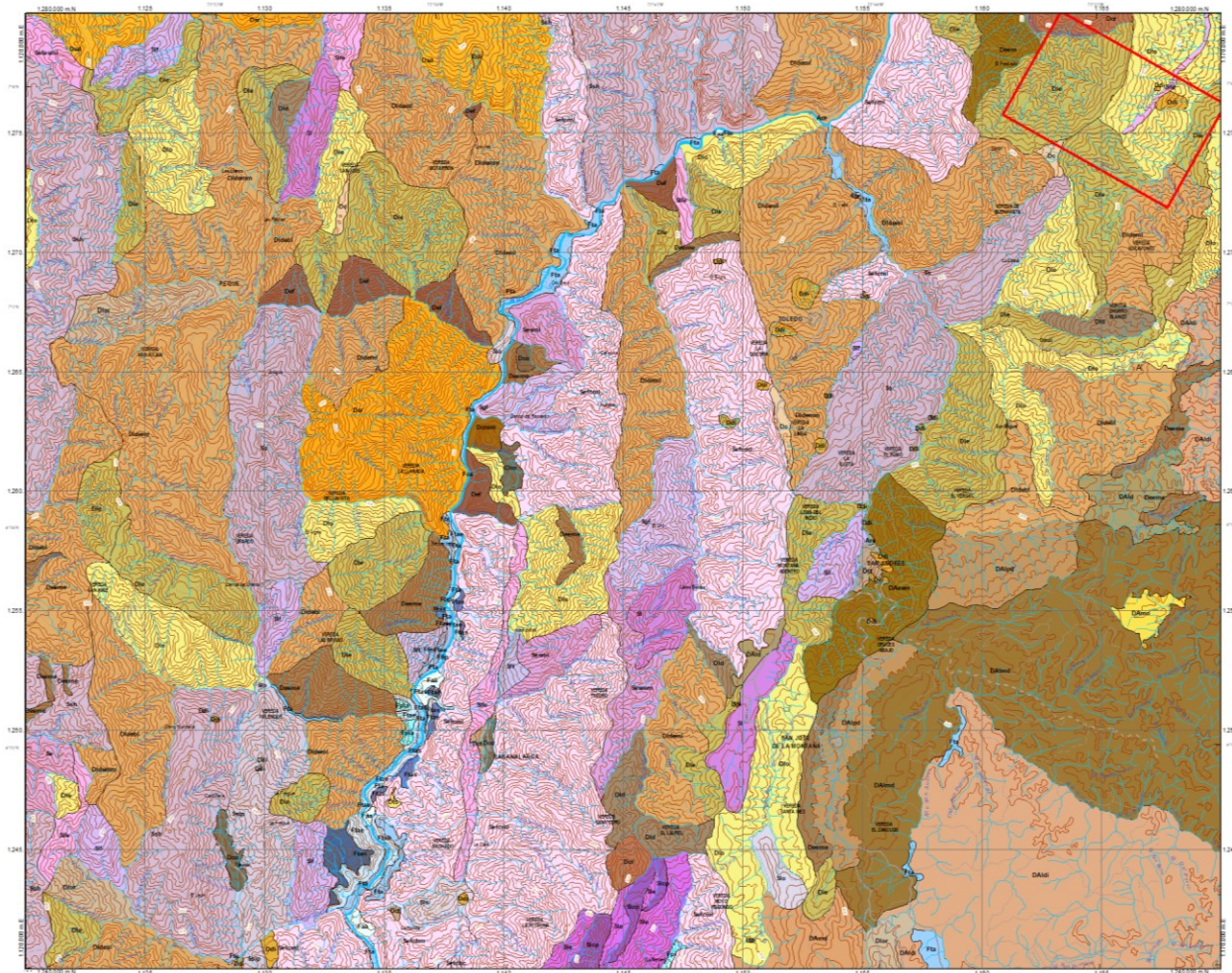


Figura 4 Mapa geomorfológico plancha 115. (SGC, 2015)

6. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se llevó a cabo un total de 4 fases, recolección bibliográfica, fotointerpretación y sistemas de información geográfica (SIG), salidas de campo; finalmente análisis y resultados, en cada una de ellas se analizaron 3 variables: geología, geomorfología y cobertura terrestre (figura 5).

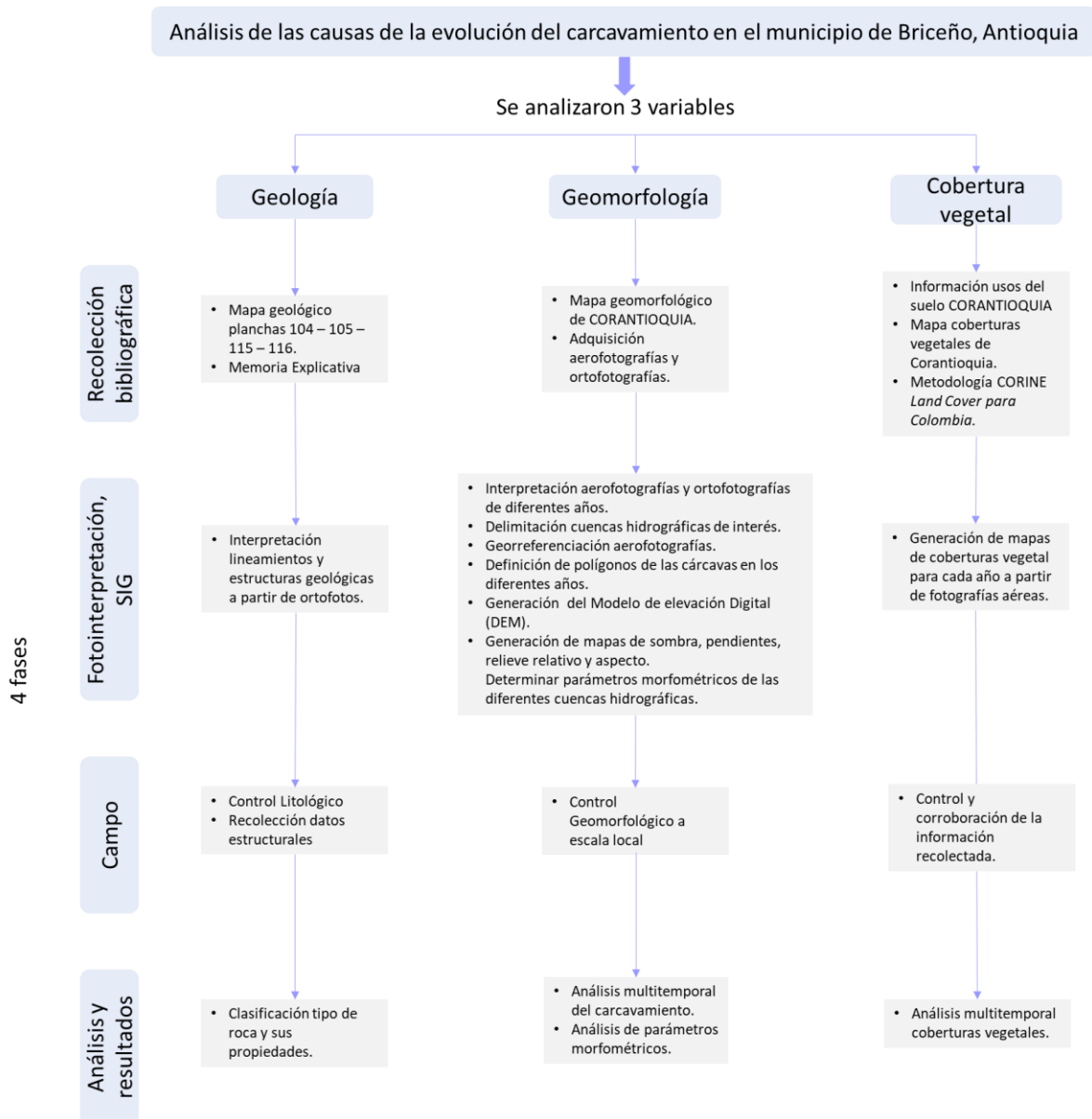


Figura 5 Esquema de la metodología utilizada

6.1. Recolección Bibliográfica

Esta primera fase comprendió la compilación y el análisis de información secundaria y material bibliográfico correspondiente a cada una de las variables mencionadas anteriormente y será explicada para cada una a continuación.

6.1.1. Geología

Como material bibliográfico para esta variable se utilizó el mapa geológico escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano, específicamente las planchas 104 – Ituango, 105 – Valdivia, 115 – Toledo y 116 – Yarumal con su respectiva memoria explicativa.

6.1.2. Geomorfología

La información bibliográfica recopilada para esta segunda variable incluye los *Mapas Geomorfológicos Aplicados a Movimientos en Masa* de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia y el Servicio Geológico Colombiano; planchas 104, 105, 115 y 116 y sus memorias técnicas explicativas, fotografías aéreas (Ver Tabla 1) y ortofotos correspondientes al área de estudio.

6.1.3. Coberturas terrestres

Mapas de uso del suelo, coberturas terrestres de CORANTIOQUIA e información relacionada comprende la primera fase para esta variable.

Para esta variable se utilizó la metodología para el inventario de cobertura de la tierra del proyecto CORINE Land Cover 1990 (CLC90), desarrollada en Europa dentro del programa CORINE (*Coordination of Information on the Environment*).

6.2. Fotointerpretación y Sistema de Información Geográfica (SIG)

Para el desarrollo de la segunda fase del proyecto se utilizó el programa ArcGis 10.5 y ArcGis Pro para la creación, adaptación y edición de los diferentes mapas; así como estereoscopio de espejos para la fotointerpretación.

En esta fase se realiza la evaluación de la información recolectada para cada una de las variables, la generación de mapas preliminares y la interpretación de las aerofotografías.

6.2.1. Geología

Se generó el mapa geológico a partir de los nativos proporcionados por el *Servicio Geológico Colombiano*.

Se realizó la interpretación de los lineamientos y estructuras geológicas a partir de las fotografías aéreas.

6.2.2. Geomorfología

La geomorfología se representa a partir de la morfometría. Para la zona de estudio se realizaron los mapas de pendiente, aspecto y relieve relativo, con reclasificación según Regmi et al., 2010

MAPA DE LOCALIZACIÓN ÁREAS DE ESTUDIO

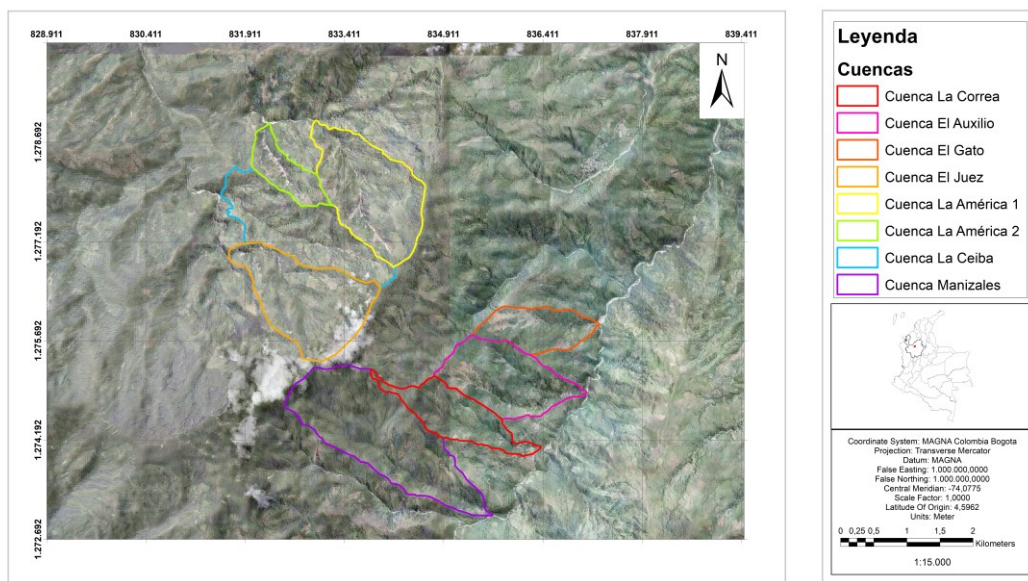


Figura 6. Mapa cuencas hidrográficas

Al estar el objeto de estudio relacionado a procesos de erosión hídrica concentrada es más certero realizarlo a partir de un análisis de cuencas, es por esto que se definieron 8

cuencas hidrográficas en las que hubiese presencia de procesos de erosión hídrica concentrada (Figura 6).

Se hallaron parámetros morfométricos como el perímetro, el índice de Gravelius, la densidad de drenaje, pendiente media de la cuenca y del cauce para cada una de las cuencas.

- Perímetro (P) (km). Es la dimensión de la línea que limita la cuenca hidrográfica, a lo largo de la divisoria topográfica de aguas.
- Longitud del cauce principal (L) (km). Es la distancia medida desde el punto más distante del curso colector (el de mayor orden) de la cuenca hasta la desembocadura.
- Longitud total del drenaje (Ln) (km). Es la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan en una cuenca determinada.
- Ancho (W) (km). Es la relación entre la superficie de la cuenca (A) y la longitud del cauce principal (L).
- Área de la cuenca (A) (km²). Es un parámetro que tiene una relación directa con el caudal de descarga. Se utiliza la clasificación de Campos Aranda (1992)
- El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (Kc) es un parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente al de la cuenca (Gravelius, 1914)

Un índice de compacidad cercano al valor 1 indica que la forma de la cuenca es redondeada, ya que hay una equidistancia relativa de los puntos de la divisoria con respecto a un punto central. Cuando estos valores se acercan progresivamente hasta 1,75, las cuencas tienden a ser alargadas. Valores superiores indican cuencas irregulares y con menor peligrosidad a las crecidas (Gaspari et al., 2012)

$$Kc = \frac{0.282 * P}{\sqrt{A}}$$

- Pendiente media del cauce principal. En muchas ocasiones es subjetivo estimar el comienzo del cauce principal, en este caso se considera el cauce de máxima longitud. La clasificación de dicho parámetro se realizó sobre la base de la propuesta por Ortiz Vera (2004)
- Pendiente media de la cuenca. Las cuencas de mayor pendiente tienden a responder con mayor celeridad ante las precipitaciones al aumentar los caudales (Horton, 1945; Strahler, 1964).

Se delimitaron los procesos asociados a erosión hídrica concentrada y visibles que estuvieran dentro de las cuencas de estudio para cada uno de los años con fotografías disponibles.

6.2.3. Coberturas terrestres

Se generaron mapas de uso de suelo y coberturas terrestres a partir de fotografías aéreas y ortofotos, utilizando la metodología CLC90 adaptada para Colombia para su clasificación correspondientes a cada año.

Tabla 1 Líneas de vuelo y fotografías aéreas

Línea de vuelo	Número de fotografía
C-2054	86 – 91
C-2529	118 – 121

La implementación de la metodología CORINE para coberturas de tierra se realizó a partir de fotografías aéreas correspondiente al año 1994, fotos satelitales correspondientes al año 2005 y ortofotografías correspondientes al año 2011. Además de la incorporación de

otras fuentes de información como cartografía base, mapas de suelos y de coberturas desarrollados por el IGAC (2007). Posteriormente, se realiza la interpretación y digitalización a escala detallada de las coberturas empleando ArcGis 10.5 y ArcGis Pro.

6.3. Campo

La fase de campo comprendió la identificación de las unidades geológicas presentes en el área de estudio, mediante 3 salidas de campo: La primera a la vereda La Meseta, la segunda a la vereda La Correa y El Cedral y la tercera a la vereda El Pescado. En total se realizaron 21 estaciones (Figura 7) en las cuales se tomaron datos estructurales principalmente de diaclasas, planos de foliación y esquistosidad.

Se llevó un control litológico, geomorfológico y de coberturas vegetales con el fin de corroborar la información recolectada y la inferida en las fases anteriores.

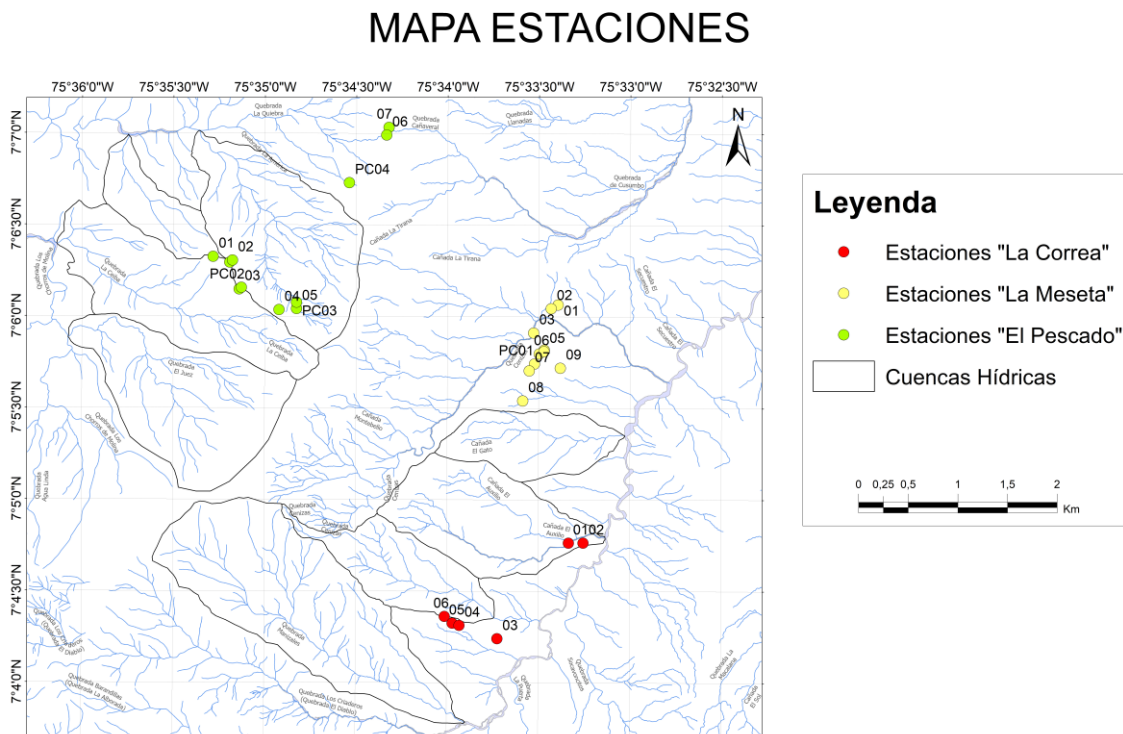


Figura 7. Mapa de estaciones

6.4. Regresión logística

Finalmente se evalúa la susceptibilidad por cárcavamiento en el área de estudio utilizando regresión logística. Un método estadístico multivariado que estima la relación entre una variable dependiente (Ocurrencia de procesos por erosión hídrica concentrada), que es binaria y representa la presencia (1) o la ausencia de procesos (0) y múltiples variables independientes, que serían los factores favorecedores a la ocurrencia de cárcavamiento.

La ventaja de la regresión logística comparado con una simple regresión lineal es que las variables pueden ser categóricas, no categóricas o cualquier combinación de ambos tipos (Atkinson & Massari, 1998)

El resultado de la regresión logística puede ser representado por la siguiente función:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-z}},$$

$$z = w_0 + w_1 a_1 + \dots + w_k a_k$$

Donde $f(x)$ es la probabilidad estimada de ocurrencia de procesos de erosión hídrica concentrada, w_0 es el intercepto del modelo de regresión logística, w_i son los valores correspondientes a los pesos de las variables, que mientras mayor sean estos valores, mayor será su incidencia en la generación de cárcavas y a_i equivalen a los valores de las variables independientes.

Para este caso se utilizan variables tanto categóricas como no categóricas. Las variables independientes utilizadas para este caso de estudio son geología, distancia a fallas, aspecto, pendientes, cobertura y relieve relativo en formato ráster.

Se definieron 3 escenarios diferentes para cada variable, en el primero se corrió el modelo con un radio de datos igual al tamaño de la muestra con procesos, R1, el segundo, con un radio dos veces el tamaño de la muestra, R2, y el tercero, tres veces el tamaño de la

muestra, R3. Estos datos fueron elegidos aleatoriamente entre las áreas con ausencia de procesos de erosión hídrica concentrada a partir de una malla de puntos.

Para cada uno de estos escenarios se realizó una curva de éxito para evaluar el desempeño del modelo. La curva de éxito es un criterio independiente del área susceptible y el área afectada. El eje X representa el porcentaje de área afectada y el eje Y el porcentaje de área susceptible. El Área bajo la Curva de Éxito es utilizado como una medida para evaluar la calidad total del modelo (Hanley & McNeil, 1982). Mientras mayor sea el área bajo la curva, en un rango de 0 a 1, mejor es considerado el desempeño del modelo.

6.5. Análisis y Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las variables:

6.5.1. Geología

Como resultado para esta variable, se produjo un mapa geológico de la zona de estudio (Figura 7), con base en la cartografía geológica 1:100.000 del *Servicio Geológico Colombiano (SGC)* y con ajustes a partir de la información recolectada en campo, como datos estructurales (Tabla 2).

Tabla 2 Datos estructurales recolectados en campo.

Salida	Estación	Coordenadas	Roca	dip	dip dir	Tipo dato
Meseta	003	N 07° 05' 54,7" W 75°33' 31,5"	Esquisto clorítico	35°	085°	Diaclasa
				75°	055°	Diaclasa
				63°	156°	Diaclasa
				82°	021°	Diaclasa
	005	N 07° 05' 48,6" W 75° 33' 28,1"	Esquisto clorítico	55°	302°	Diaclasa
				72°	335°	Diaclasa
La Correa	001	N 07° 04' 46,0" W 75° 33' 20,2"	Esquisto clorítico	68°	017°	Diaclasa
				84°	008°	Diaclasa
				24°	264°	Diaclasa
				34°	029°	Diaclasa
				08°	185°	Diaclasa

Salida	Estación	Coordenadas	Roca	dip	dip dir	Tipo dato
El Pescado	007	N 7° 4' 20,2" W 75° 3' 40,6"	Esquisto	74°	125°	Esquistosidad
				89°	304°	Foliación
				79°	301°	Esquistosidad
	001	N 07° 06' 19,6" W 75° 35' 16,7"	Esquisto	42°	241°	Foliación
	003	N 7° 6' 8,9" W 75° 35' 8,2"	Anfibolita	41°	014°	Diaclasa
				33°	170°	Diaclasa
	pc002		Esquisto	36°	344°	Esquistosidad
				38°	338°	Esquistosidad
	004	N 7° 6' 2,1" W 75° 34' 55,1"	Esquisto/Anfibolita	54°	291°	Diaclasa
				64°	276°	Diaclasa
				54°	323°	Diaclasa
				60°	337°	Diaclasa
				50°	334°	Contacto

Se observa al Grupo Valdivia, específicamente las unidades de esquistos “Pes”, “Pec” y “Pei”, y la unidad “Pmt” como los grupos de rocas predominantes en el área, con ocurrencias de las unidades “Pnp” y “Pa”.

Se graficaron los datos estructurales tomados en las diaclasas en el programa Stereo32 y como resultado se observa una tendencia NE (Figura 8), que es consistente con la dirección de la falla Espíritu Santo según lo reportado por el Consorcio INTEGRAL (2007) que dice que tiene una dirección aproximada N45°E.

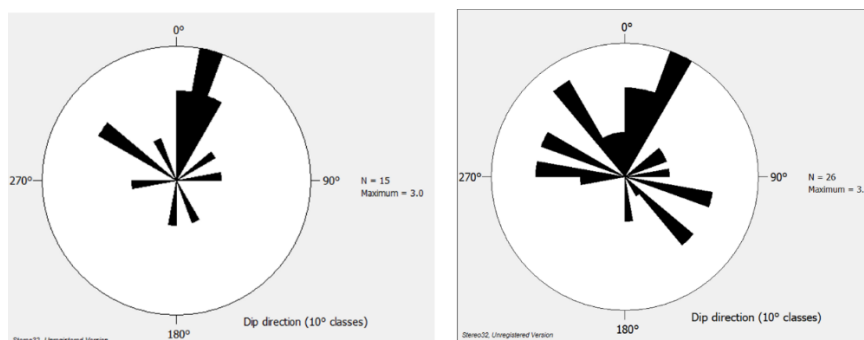


Figura 8 a) Grafica de diaclasas correspondiente a la vereda "La meseta" y "La Correa" **b)** Grafica de diaclasas correspondiente a la vereda "El pescado"

Tabla 3 Area correspondiente a los rangos de pendiente de las cuencas.

AREA RANGOS PENDIENTE (porcentaje)								
Rango pendiente (grados)	Área de la cuenca	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60	>60
El Auxilio	1,6233	1,68%	10,12%	23,71%	36,06%	22,23%	5,39%	0,80%
El Gato	0,9193	1,15%	8,38%	24,17%	38,36%	22,77%	4,90%	0,26%
La América 1	2,2082	1,62%	6,07%	23,65%	40,86%	24,67%	3,10%	0,02%
La América 2	0,6293	1,22%	5,88%	21,20%	41,70%	28,01%	1,99%	0,00%
La Ceiba	2,015	0,49%	3,02%	17,81%	52,40%	24,69%	1,58%	0,00%
El Juez	2,1632	1,39%	8,60%	31,87%	43,95%	13,50%	0,68%	0,00%
Manizales	3,0144	1,51%	6,85%	21,52%	43,69%	24,69%	1,73%	0,00%
Correa	1,2322	1,59%	8,45%	27,23%	42,59%	17,48%	2,27%	0,38%

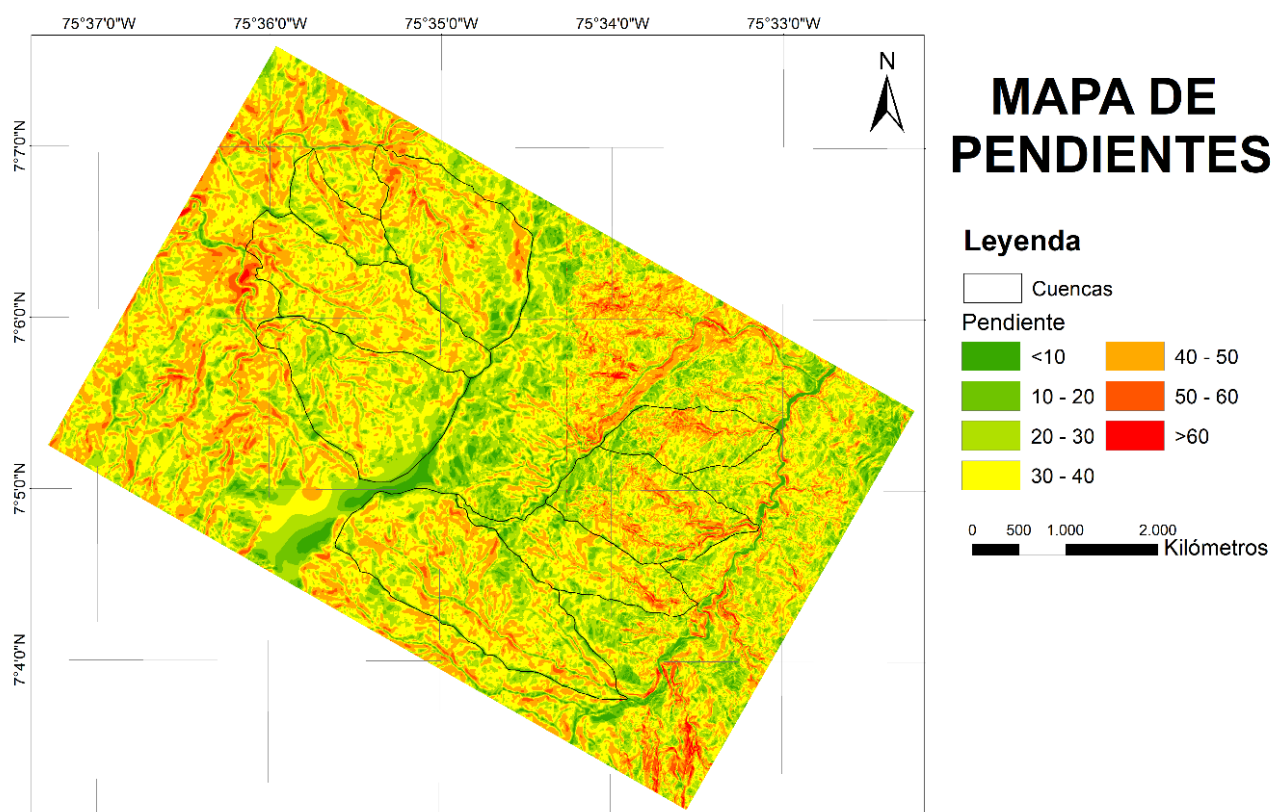


Figura 10 Mapa pendiente

Aspecto

El mapa de aspecto (figura 10) muestra cambios que rompen con el relieve en el área central del mapa y hacia la parte alta de las cuencas del norte. Con este mapa fue posible identificar lineamientos y cambios en los drenajes.

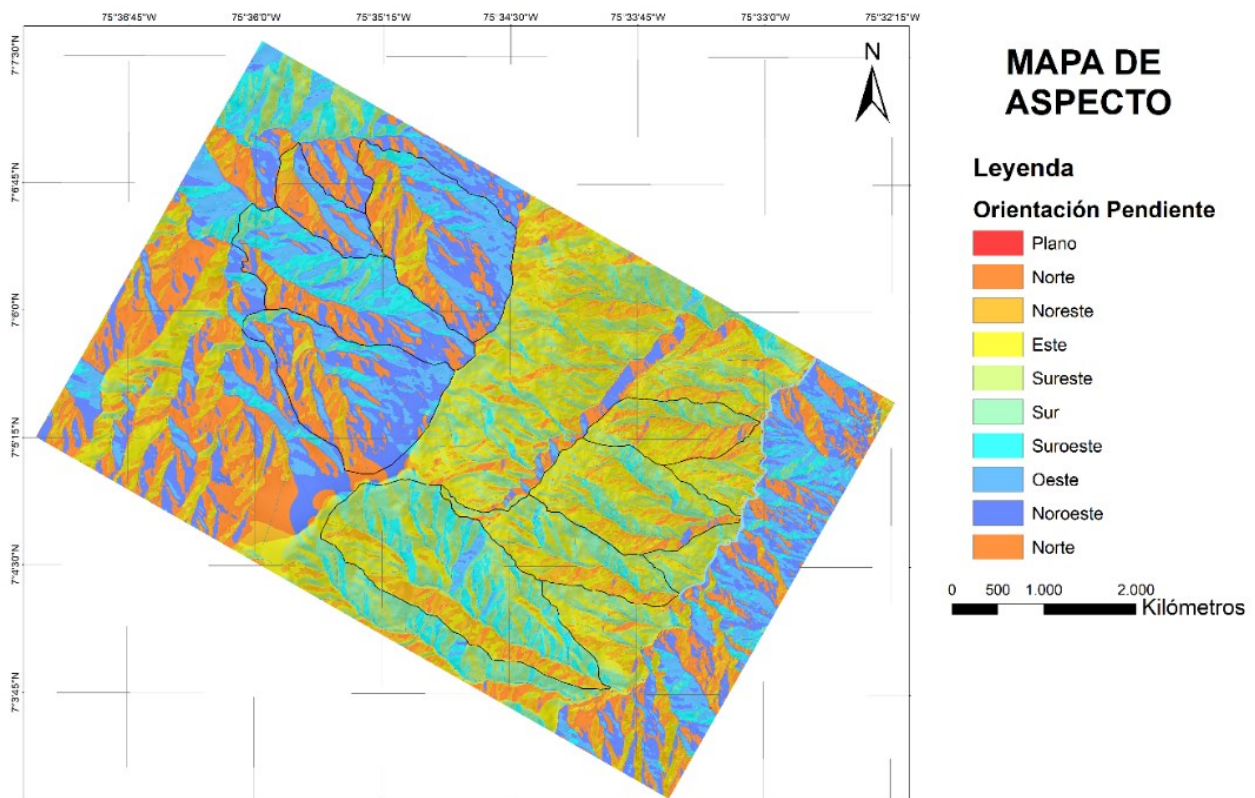


Figura 11 *Mapa de aspecto*

Relieve Relativo

El relieve relativo en la zona (figura 11) se caracteriza por presentar valores entre los 15 y 60 m, con pequeños puntos que puedan superar estos valores. Es un relieve ondulado, poco escarpado y sin cortes abruptos.

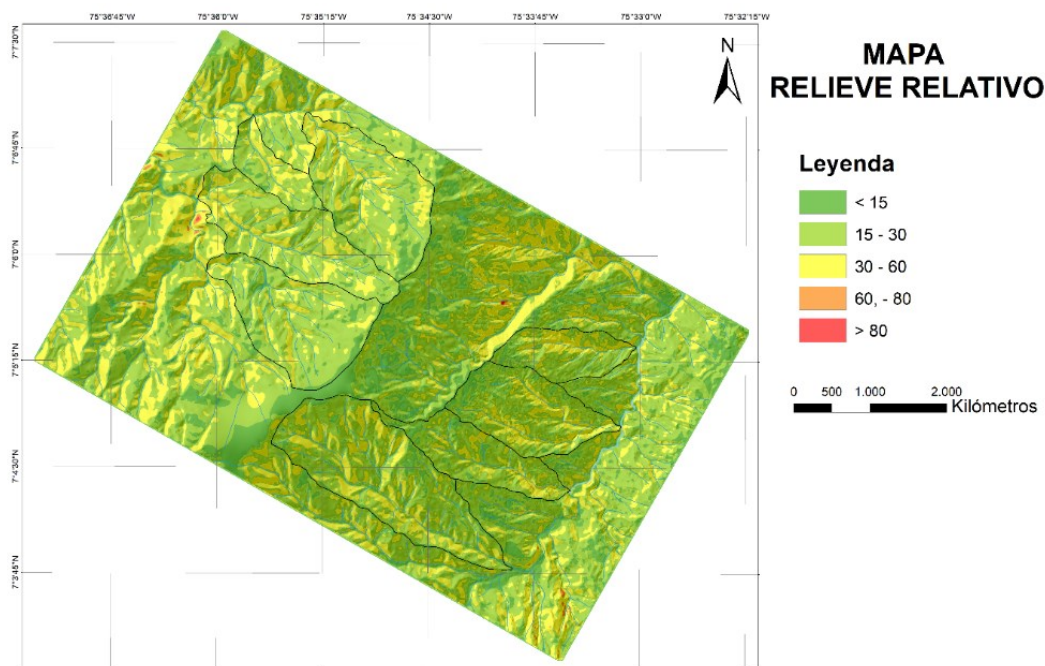


Figura 12 Mapa Relieve relativo

Para cada una de las cuencas hidrográficas se hallaron parámetros morfométricos (Tabla 4) para definir la madurez y forma de la cuenca.

Tabla 4 Parámetro morfométricos de las cuencas.

Cuenca	El Auxilio	El Gato	La América 1	La América 2	La Ceiba	El Juez	Manizales	Correa	Unidad
Área (A)	1,6233	0,9193	2,2082	0,6293	2,0150	2,1632	3,0144	1,2322	km
Perímetro (P)	5,6115	4,3888	6,3829	4,0030	7,3960	6,4671	8,5277	5,6224	km
Longitud Cauce Principal (L)	2,322	1,8965	2,6839	1,5057	2,9311	2,3463	3,6137	2,8553	km
Ancho (W)	0,6991	0,4847	0,8227	0,4180	0,6874	0,9220	0,8342	0,4315	
Z max	1822,4312	1678,6802	2171,1142	1782,2563	2202,7232	2203,8032	2209,8338	2110,8508	msnm
Z min	877,5679	826,8689	1094,8278	969,8411	882,7599	1220,7891	1118,5218	1108,1133	msnm
Diferencia Alturas	0,9449	0,8518	1,0763	0,8124	1,3200	0,9830	1,0913	1,0027	km
Índice de Gavelius (Kc)	1,2420	1,2908	1,2113	1,4230	1,4693	1,2400	1,3851	1,4283	
Longitud total de drenaje	8,6947	4,5475	17,8189	0,7338	10,8285	11,5381	19,9736	9,0434	km
Densidad de Drenaje	5,3561	4,9468	8,0695	1,1660	5,3741	5,3338	6,6261	7,3393	Km/km ²
Pendiente media del cauce	0,4069	0,4491	0,4010	0,5396	0,4503	0,4190	0,3020	0,3512	
Pendiente media de la cuenca	33,66°	33,89°	34,05°	34,56°	35,35°	31,2°	33,84°	32,49°	

Como resultados se observa que entre las cuencas de mayor área se encuentran las cuencas Manizales, La América 1 y El Juez con 3.01 km², 2.21 km² y 2.16 km² respectivamente y con el área menor se tiene la cuenca La América 2 con un total de 0.63 km², microcuencas, según la clasificación de Campos Aranda (1992). En perímetro, el mayor valor lo tiene la cuenca La Ceiba con 7.4 km, seguida de la cuenca El Juez con 6.47 km.

El índice de Gravelius muestra que las cuencas se aproximan a una forma redondeada. Estando dentro de la categoría oval-redonda las cuencas El Auxilio, la América 1 y el Juez y dentro de la categoría oval-oblonga La América 2, La ceiba, Manizales y la Correa.

La diferencia de alturas varía ente 800 m y los 1300 m. Las pendientes del cauce principal oscilan entre 30,25% y 53,96%, correspondiente a un relieve fuerte. Las pendientes de las cuencas son consistentes con valores entre los 31,2° y 35,35°.

La densidad de drenaje por su parte es la relación entre la longitud total del drenaje y el área total de la cuenca (Horton, 1932, 1945). Según Delgadillo y Páez (2008) se considera una cuenca bien drenada y con alta densidad de drenaje aquellas que presenten valores entre los 2 y 3 km/km², y según Fuentes Junco (2004) entre 3.7 y 5.6 km/ km².

Según lo anterior, a excepción de La América 2 (1.16 km/km), todas las cuencas del área de estudio presentan una alta densidad de drenaje, llegando hasta los 8.06 km/km².

Según la clasificación de Minambiente (2017) las curvas hipsométricas de las cuencas (Figuras 12-19) revelan un cauce joven.

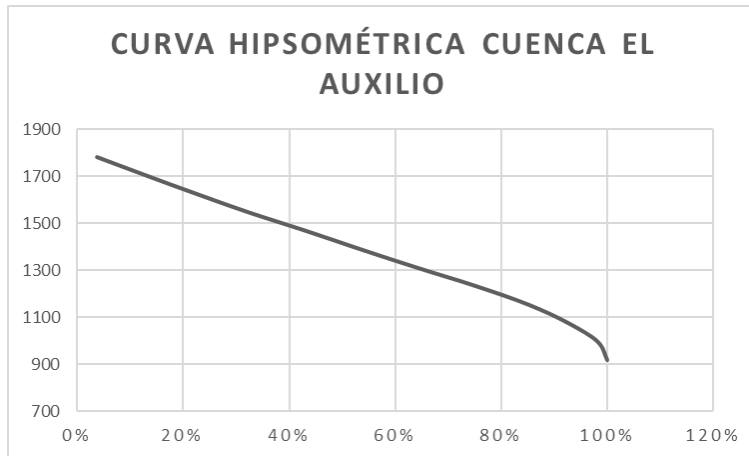


Figura 13 *Curva hipsométrica cuenca El Auxilio*

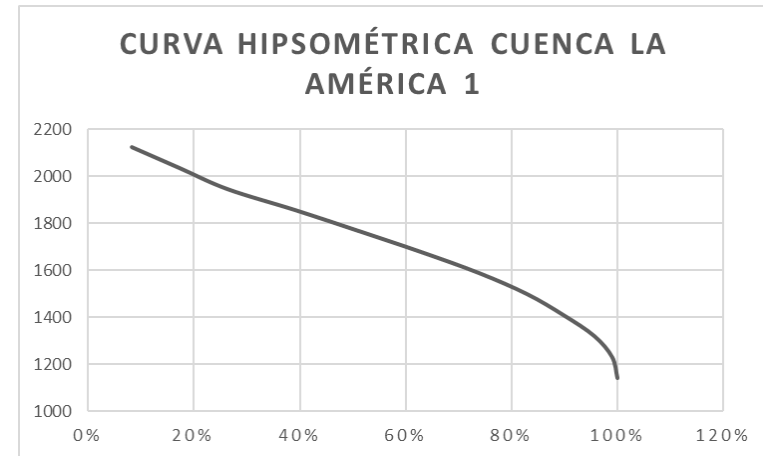


Figura 15 *Curva hipsométrica cuenca La América 1*

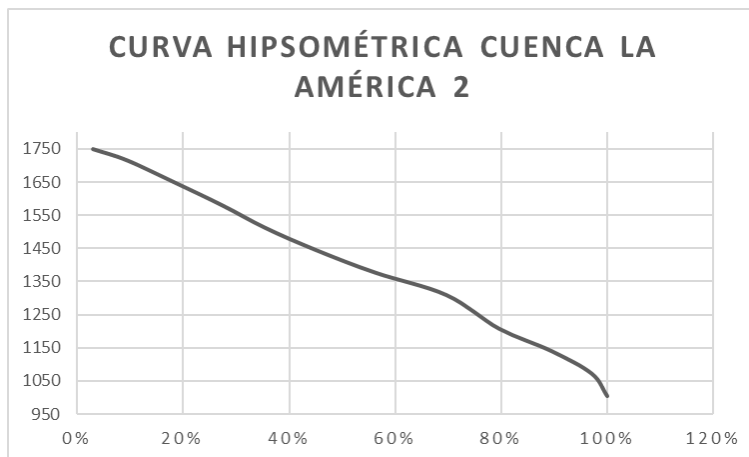


Figura 14 *Curva hipsométrica cuenca La América 2.*

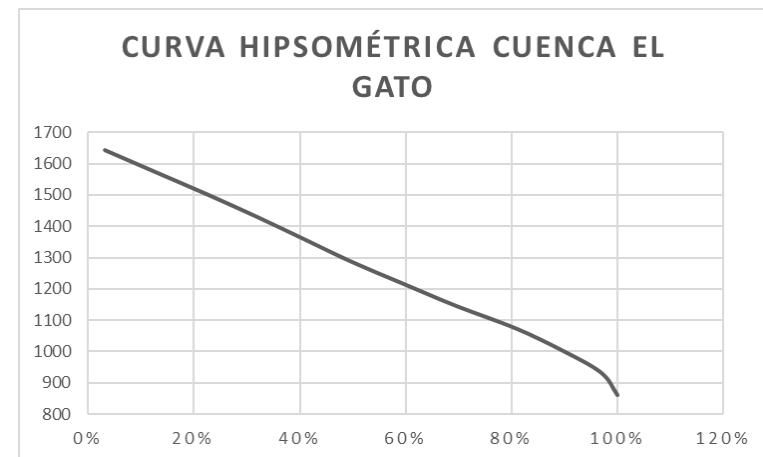


Figura 16 *Curva hipsométrica cuenca El Gato*

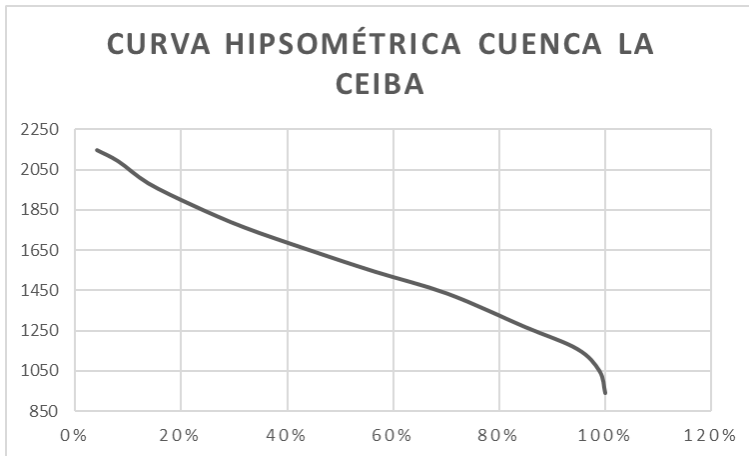


Figura 17 *Curva hipsométrica cuenca La Ceiba*

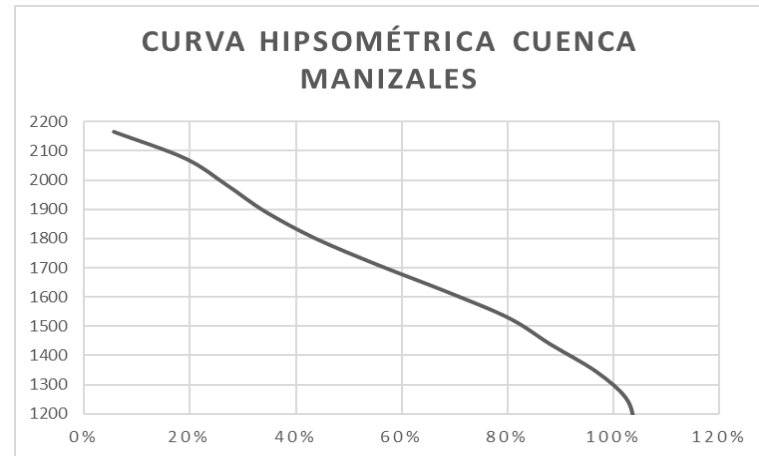


Figura 19 *Curva hipsométrica cuenca Manizales*

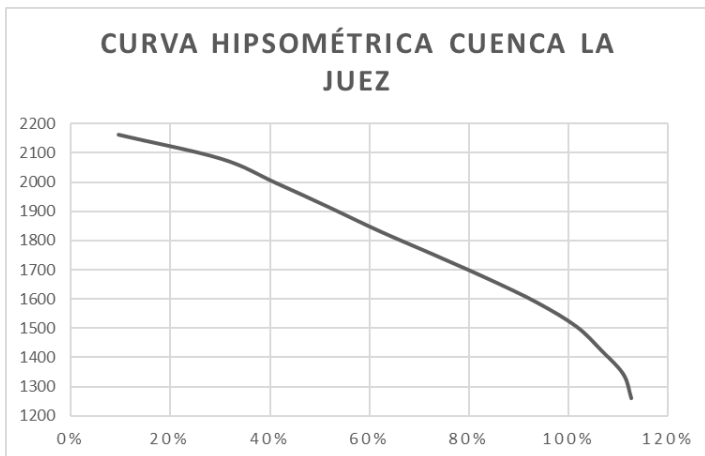


Figura 18 *Curva hipsométrica cuenca La Juez*

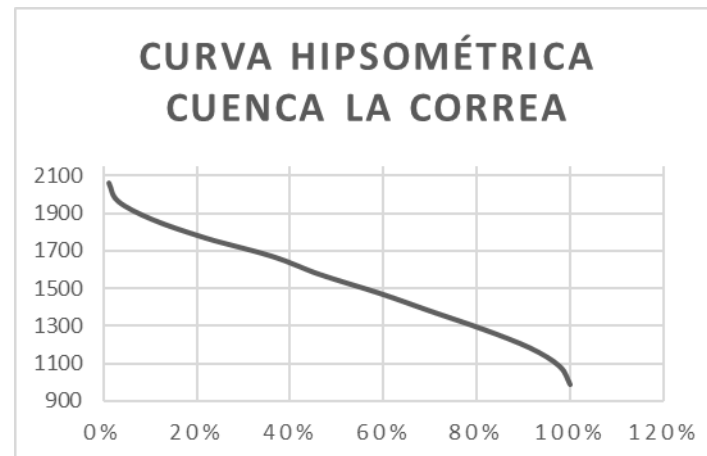


Figura 20 *Curva hipsométrica cuenca La Correa*

Posteriormente se realizó un análisis multitemporal del carcavamiento, en el cual se generó un mapa a partir de las fotografías disponibles de la zona. En este es posible observar la evolución de los procesos erosivos preexistentes y la generación de nuevos.

MAPA ANÁLISIS MULTITEMPORAL CARCAVAMIENTO

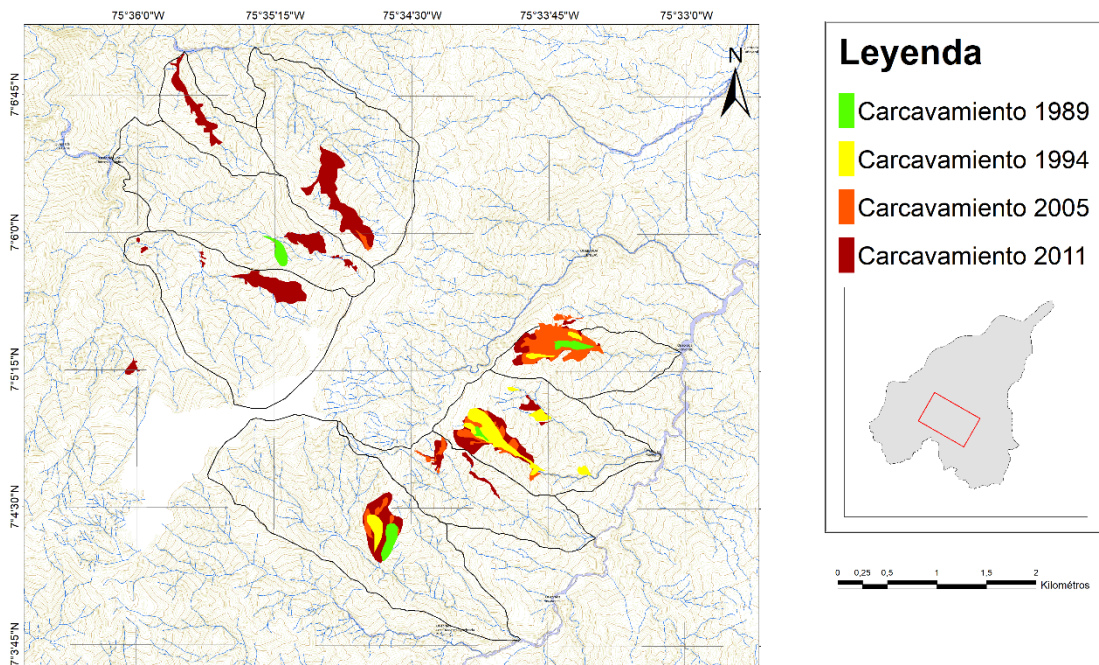


Figura 21 Mapa análisis multitemporal carcavamiento (1982, 1994, 2005 y 2011).

Para el año 1989 (Verde) se puede observar procesos en las cuencas La Ceiba, Manizales, El Auxilio y el Gato con un área afectada de 0,096 km² (Tabla 5), para 1994 (Amarillo) los procesos evolucionan en un 87%, no se identifican procesos en cuencas nuevas. Para el año 2005 (Naranja) las cuencas La América 1 y La Correa presentan procesos de pequeñas magnitudes y se observa evolución en los procesos ya existentes aumentando así el área afectada a 0,39 km². Para el año 2011 (Rojo) todas las cuencas están afectadas por procesos de carcavamiento. Con un área total afectada de 1.13 km² casi 12 veces el área afectada de 1989.

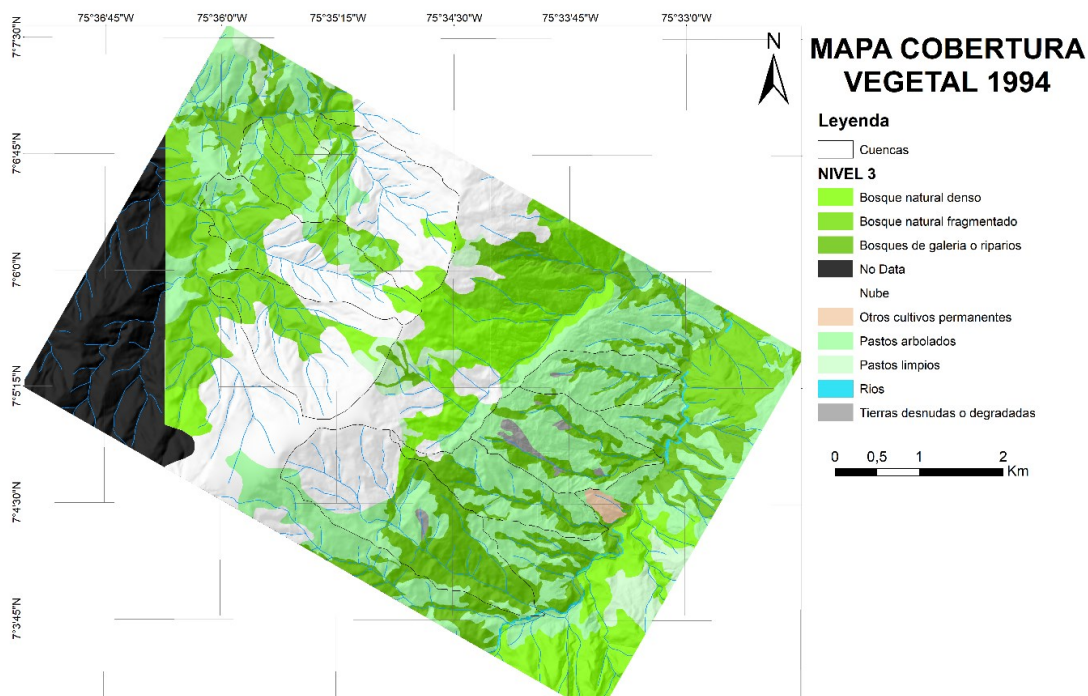
Tabla 5 *Area afectada para cada periodo*

	AÑO	AREA km2
	1989	0,096
	1994	0,18
	2005	0,39
	2011	1,13

6.5.3. Coberturas terrestres

La implementación de la metodología CORINE Land Cover que se llevó a cabo en el área de estudio arrojó como resultados 3 mapas de coberturas para los años 1994, 2005 y 2011 (figuras 21 a, b y c) utilizando las leyendas y definiciones de las unidades de cobertura correspondientes al nivel 3 desarrolladas por el IDEAM (2008).

Como resultado adicional se obtiene la Tabla de colores para la representación de las unidades de cobertura según la leyenda que fue adaptada para Colombia (Tabla 6).

**Figura 22 a)** *Mapa cobertura año 1994*

A partir de estos mapas se realiza un análisis multitemporal en el cual se evidencia la disminución de coberturas como Bosque fragmentado y Bosque natural denso y el aumento de coberturas de pastos y Bosques de galería o ripario, sobre todo en las áreas correspondientes a las cuencas definidas para el estudio.

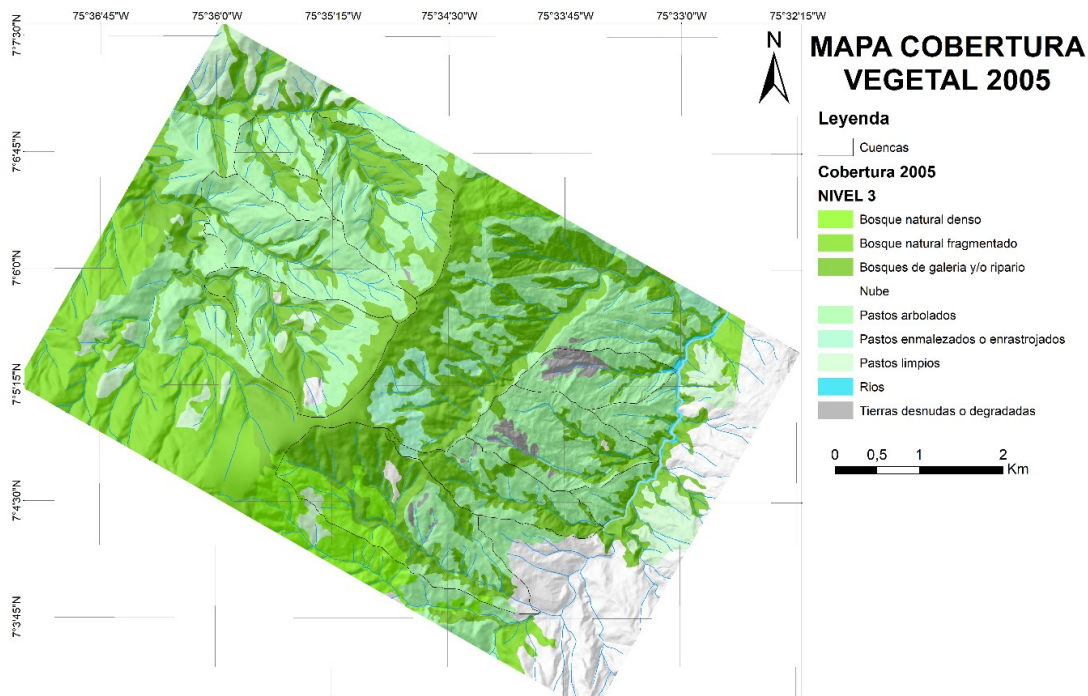


Figura 23 b) *Mapa cobertura año 2005*

Para el 2011 se empiezan a presentar coberturas de cultivos, disminuyen los pastos enmalezados y se observa un aumento significativo de los Pastos limpios. Los Bosques de galería o ripario disminuyen su área al igual que el bosque natural denso.

Los terrenos desnudos o degradados tienen ocurrencia principalmente en zonas donde prevalecen coberturas como pastos y cultivos.

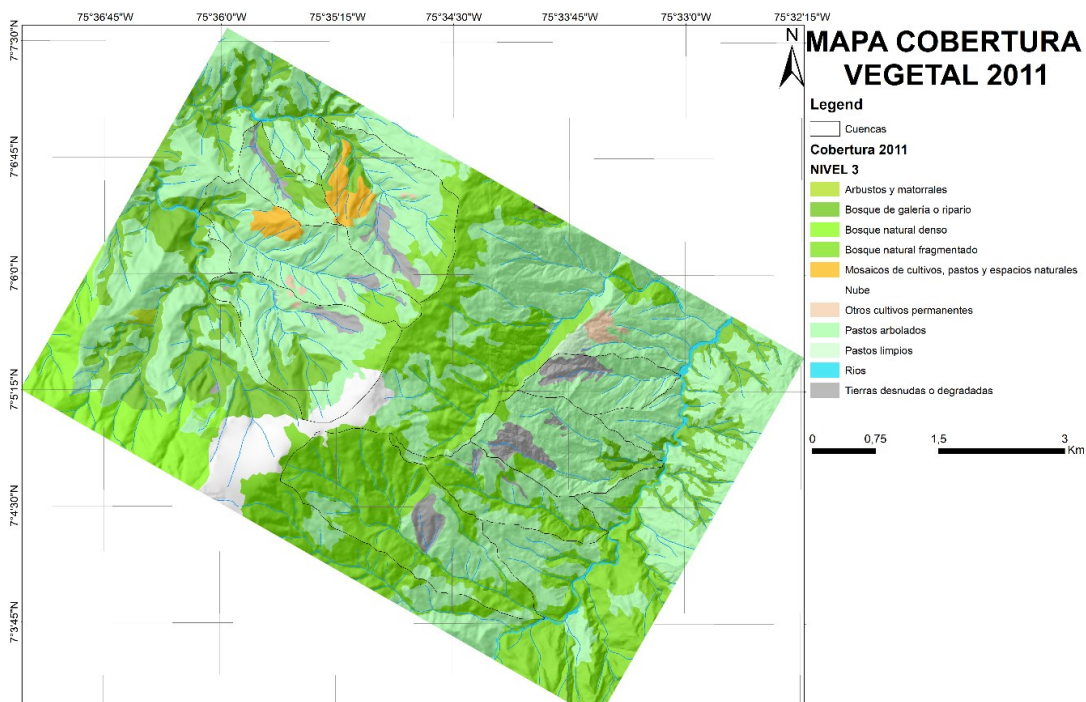


Figura 24 c) Mapa cobertura año 2011

Tabla 6 Tabla de colores coberturas terrestres.

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	SIMBOLO
TERRENOS AGRÍCOLAS	PASTOS	Pastos limpios	231
		Pastos arbolados	232
		Pastos enmalezados o enrastrajados	233
	ÁREAS AGRÍCOLAS HETEROGÉNEAS - MOSAICOS	Mosaico de pastos y espacios naturales	244
BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES	BOSQUES	Bosque natural denso	311
		Bosque natural fragmentado	3121
		Bosque plantado	3122
	ÁREAS CON VEGETACIÓN HERBÁCEO Y/O ARBUSTIVA	Pastos naturales y sabanas herbáceas	3151
		Arbustos y matorrales	3211
SUPERFICIES DE AGUAS	AGUAS CONTINENTALES	Ríos (50 metros)	322
			511

6.5.4. Regresión logística

Para cada uno de los escenarios se generó un mapa de susceptibilidad, categorizado en tres posibles niveles, susceptibilidad alta, media y baja. Tomando como umbral de clasificación el 70% de los casos para susceptibilidad alta, entre el 70% y 90% para susceptibilidad media y entre 90% y 100% susceptibilidad baja.

A continuación, se muestran los coeficientes de las variables y los mapas para cada escenario.

6.5.4.1. AÑO 1994

Para este año se obtuvo un total de 11.269 puntos que presentaban proceso de carcavamiento, por lo cual se tomaron 11.269 puntos para el escenario 1 (R1), para el escenario 2 se tomaron 22.583 puntos (R2) y finalmente 33.807 puntos para el escenario 3 (R3).

Escenario 1

Para el modelo del radio 1 en el año 1994 la variable más importante es la cobertura con un coeficiente de 891, seguida de la geología con 804.

Tabla 7 Resultados coeficientes (w_i) modelo 1994 escenario 1

1994. Escenario 1				
	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>z Value</i>	<i>Pr(> z)</i>
<i>(Intercept)</i>	-	1,02E+02	-	< 2e-16
	3,45E+03		33,96	
<i>Relieve Relativo</i>	7,98E+01	4,46E+00	17,90	< 2e-16
<i>Pendiente</i>	2,33E+01	3,55E+00	6,55	5.85e-11
<i>Distancia a Fallas</i>	-	8,82E-02	-	< 2e-16
	3,17E+00		35,98	
<i>Aspecto</i>	-	2,43E-01	-	< 2e-16
	3,15E+00		12,95	
<i>Geología</i>	8,04E+02	2,98E+01	26,98	< 2e-16

1994. Escenario 1				
	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>z Value</i>	<i>Pr(> z)</i>
Cobertura	8,91E+02	1,46E+01	60,87	< 2e-16

MAPA SUSCEPTIBILIDAD A CARCAVAMIENTO

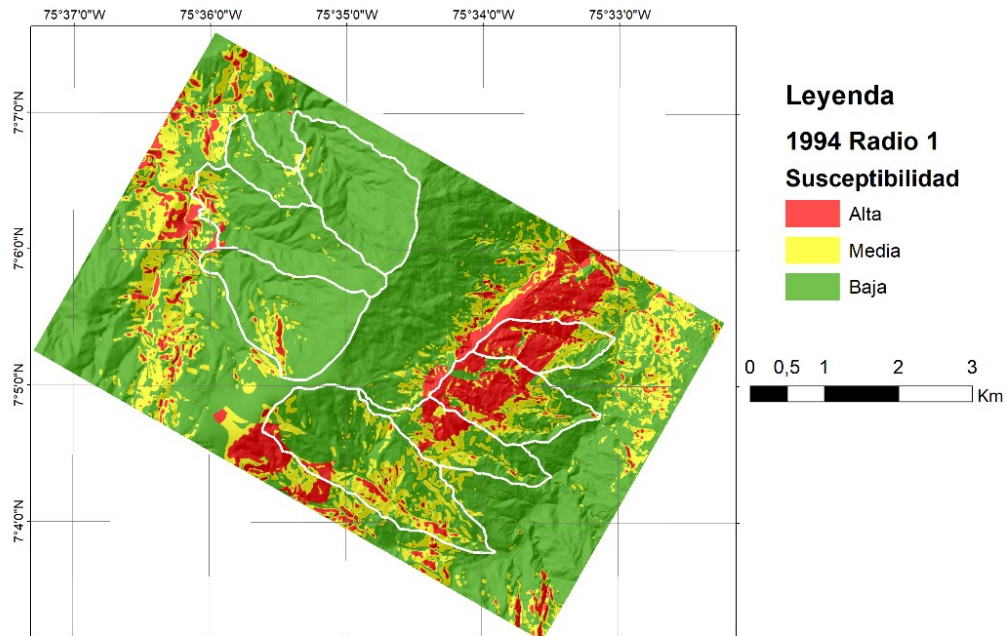


Figura 25 a) Mapa susceptibilidad a carcaamiento 1994 escenario 1.

Escenario 2

Para este escenario las variables geología y cobertura vegetal presentan el mayor coeficiente y la de menor peso es la variable de aspecto.

Tabla 8 Resultados coeficientes (w_i) modelo 1994 escenario 2

1994. Escenario 2				
	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>z value</i>	<i>Pr(> z)</i>
(Intercept)	-4,17E+03	8,65E+01	- 48,20	<2e-16
Relieve Relativo	7,15E+01	3,67E+00	19,51	<2e-16

1994. Escenario 2				
	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>z value</i>	<i>Pr(> z)</i>
<i>Pendiente</i>	2,56E+01	3,03E+00	8,46	<2e-16
<i>Distancia a Fallas</i>	-2,92E+00	7,43E-02	-39,33	<2e-16
<i>Aspecto</i>	-2,81E+00	2,01E-01	-13,98	<2e-16
<i>Geología</i>	8,98E+02	2,46E+01	36,56	<2e-16
<i>Cobertura</i>	8,85E+02	1,26E+01	70,12	<2e-16

MAPA SUSCEPTIBILIDAD A CARCAVAMIENTO

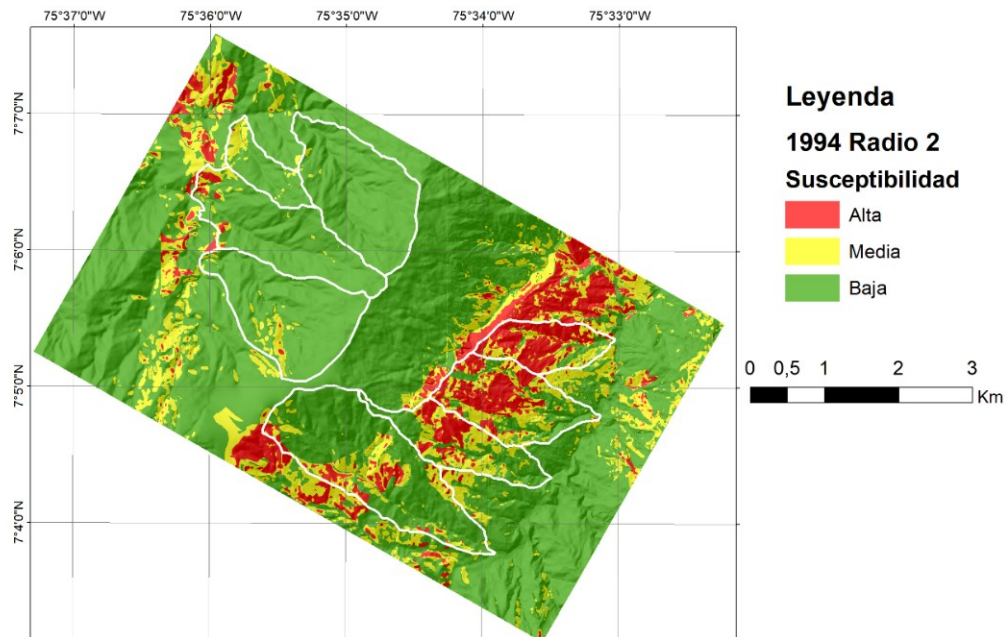


Figura 26 b) Mapa susceptibilidad a carcaamiento 1994 escenario 2.

Escenario 3

Al igual que en los escenarios anteriores para este modelo la geología y la cobertura son las variables más importantes y la menos importante corresponde al coeficiente de distancia a fallas

Tabla 9 Resultados coeficientes (w_i) modelo 1994 escenario 3

1994. Escenario 3				
	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>z</i>	<i>Pr(> z)</i>
<i>(Intercept)</i>	-	0.0800434	-	<2e-16
	46.446.633		58,03	
<i>Relieve Relativo</i>	0.0679600	0.0033376	20,36	<2e-16
<i>Pendiente</i>	0.0267000	0.0028239	9,46	<2e-16
<i>Distancia a Fallas</i>	-0.0027720	0.0000674	-	<2e-16
			41,13	
<i>Aspecto</i>	-0.0025492	0.0001821	-	<2e-16
			14,00	
<i>Geología</i>	0.9307789	0.0222872	41,76	<2e-16
<i>Cobertura</i>	0.9006003	0.0118543	75,97	<2e-16

MAPA SUSCEPTIBILIDAD A CARCAVAMIENTO

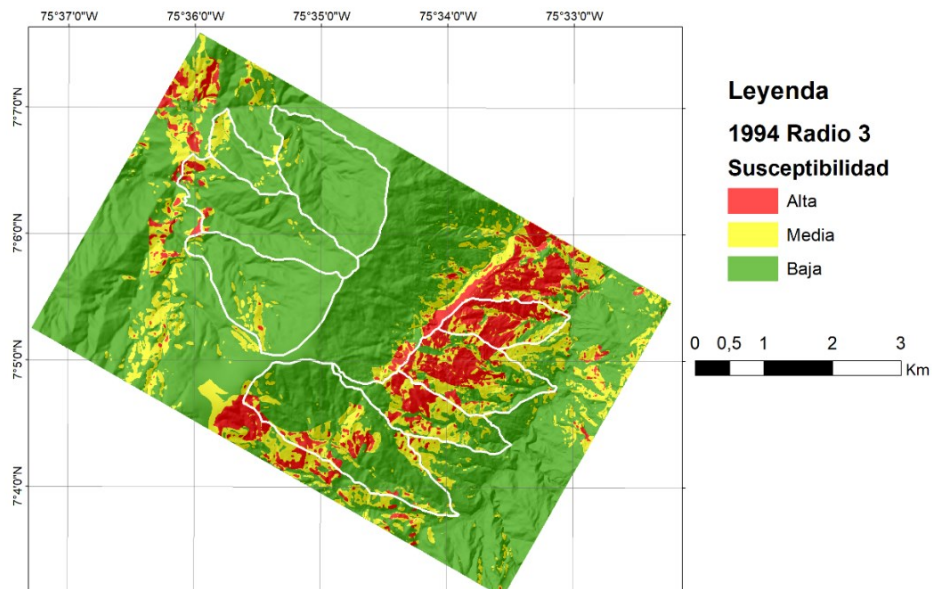


Figura 27 c) Mapa susceptibilidad a carcavamiento 1994 escenario 3.

6.5.4.2. AÑO 2005

Para el caso del modelo de 2005, 24.305 puntos con procesos de carcavamiento fueron obtenidos, se seleccionó la misma cantidad para el escenario 1 (radio 1), 48.610 puntos para el escenario 2 (radio 2) y 72.915 puntos para el escenario 3 (radio 3).

Al igual que en el modelo anterior, los coeficientes (w_i) relacionados a la geología son los de mayor peso en los tres escenarios. Siendo la distancia a fallas la variable menos importante.

Escenario 1

Tabla 10 Resultados coeficientes (w_i) modelo 2005 escenario 1

2005. Escenario 1				
	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>z value</i>	<i>Pr(> z)</i>
<i>(Intercept)</i>	- 2,54E+02	4,97E+01	-5,12	3.07e-07
<i>Relieve Relativo</i>	2,78E+01	2,62E+00	10,60	< 2e-16
<i>Pendiente</i>	1,84E+01	2,21E+00	8,33	< 2e-16
<i>Distancia a Fallas</i>	- 2,53E+00	4,36E-02	- 58,17	< 2e-16
<i>Aspecto</i>	4,77E+00	1,29E-01	36,93	< 2e-16
<i>Geología</i>	6,23E+02	8,43E+00	73,88	< 2e-16
<i>Cobertura</i>	3,14E+02	8,12E+00	38,72	< 2e-16

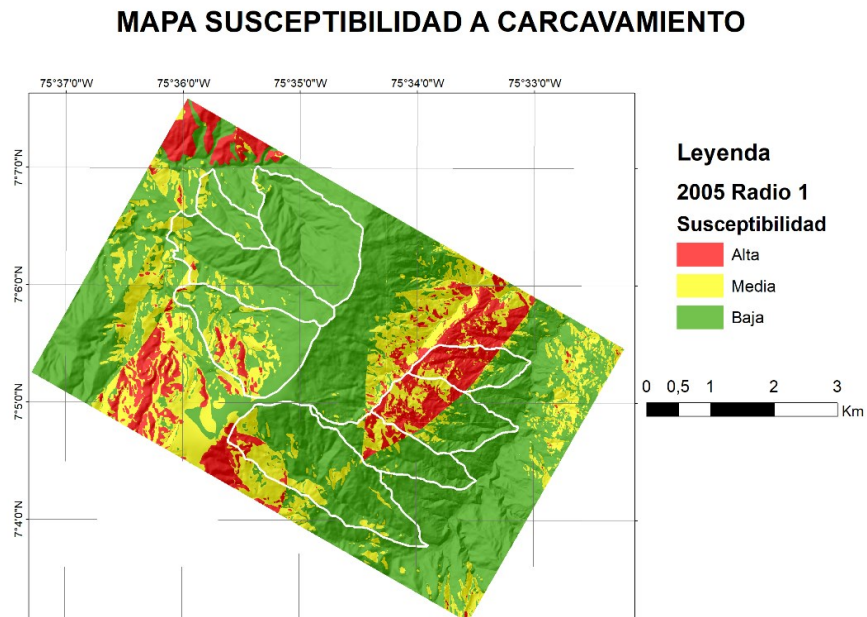


Figura 28 a) Mapa susceptibilidad a carcamiento 2005 escenario 1.

Escenario 2

Tabla 11 Resultados coeficientes (w_i) modelo 2005 escenario 2

2005. Escenario 2				
	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>z value</i>	<i>Pr(> z)</i>
<i>(Intercept)</i>	-9,00E+02	4,36E+01	-	<2e-16
			20,65	
<i>Relieve Relativo</i>	3,31E+01	2,27E+00	14,62	<2e-16
<i>Pendiente</i>	1,79E+01	1,94E+00	9,2	<2e-16
<i>Distancia a Fallas</i>	-2,59E+00	4,00E-02	-	<2e-16
			64,86	
<i>Aspecto</i>	-5,35E+00	1,11E-01	-	<2e-16
			48,23	
<i>Geología</i>	6,18E+02	8,00E+00	77,32	<2e-16
<i>Cobertura</i>	2,54E+02	5,44E+00	46,66	<2e-16

MAPA SUSCEPTIBILIDAD A CARCAVAMIENTO

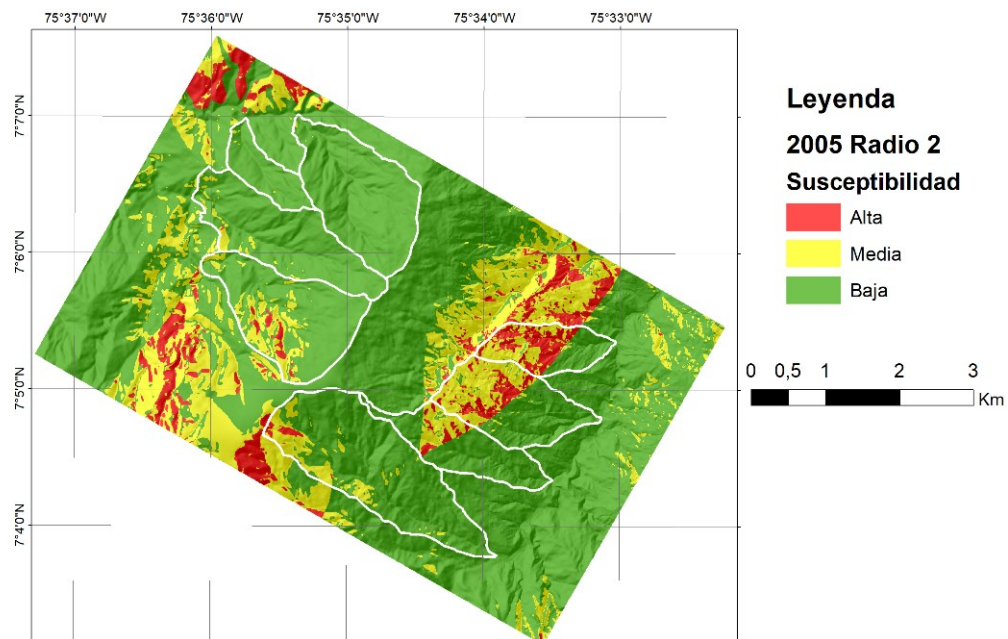


Figura 293 b) Mapa susceptibilidad a carcaamiento 2005 escenario 2.

Escenario 3

Tabla 12 Resultados coeficientes (w_i) modelo 2005 escenario 3

2005. Escenario 3				
	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>z value</i>	<i>Pr(> z)</i>
<i>(Intercept)</i>	-3,08E+03	6,77E+01	-45.46	<2e-16
<i>Relieve Relativo</i>	2,81E+01	2,48E+00	11.30	<2e-16
<i>Pendiente</i>	2,44E+01	2,14E+00	11.38	<2e-16
<i>Distancia a Fallas</i>	-2,66E+00	4,29E-02	-62.09	<2e-16
<i>Aspecto</i>	-6,22E+00	1,33E-01	-46.84	<2e-16
<i>Geología</i>	1,65E+03	2,21E+01	74.44	<2e-16
<i>Cobertura</i>	3,38E+02	6,20E+00	54.45	<2e-16

MAPA SUSCEPTIBILIDAD A CARCAVAMIENTO

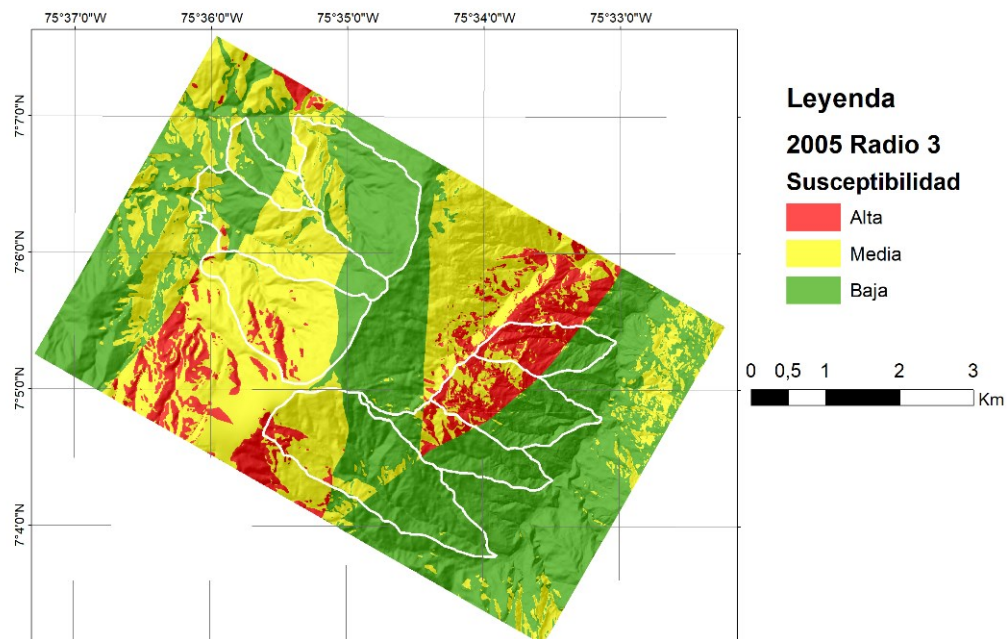


Figura 303 c) Mapa susceptibilidad a carcamiento 2005 escenario 3.

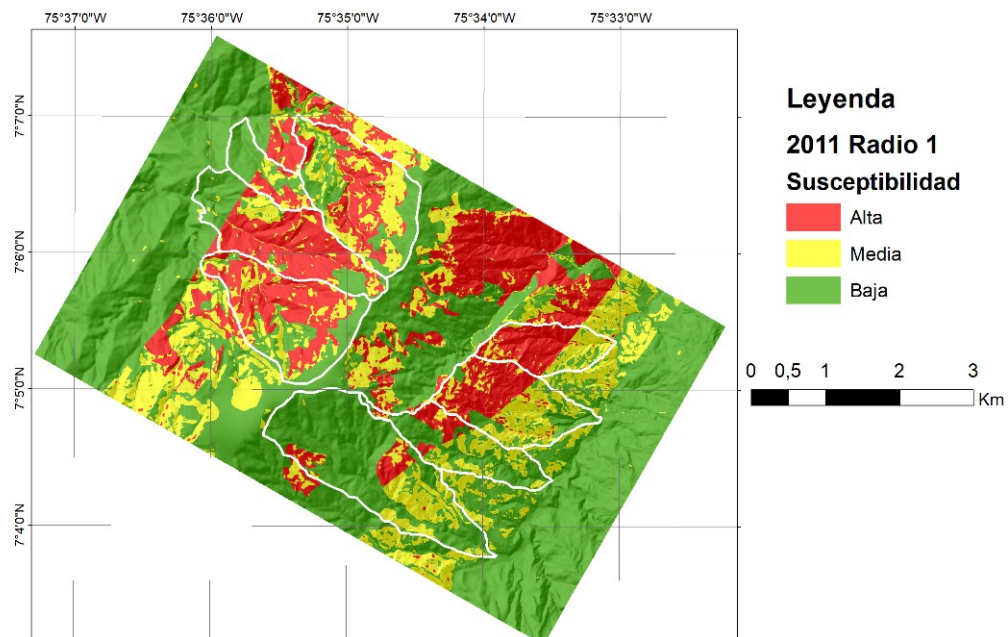
6.5.4.3. AÑO 2011

Finalmente, para el 2011 los puntos con procesos de carcamiento corresponden a un total de 70489. Se tomaron 70.489 puntos para el escenario 1 (radio 1), 140.978 para el escenario 2 (radio 2) y 211.467 puntos para el escenario 3 (radio 3).

La variable con más peso en este modelo es la geología y la variable de menos peso la distancia a fallas.

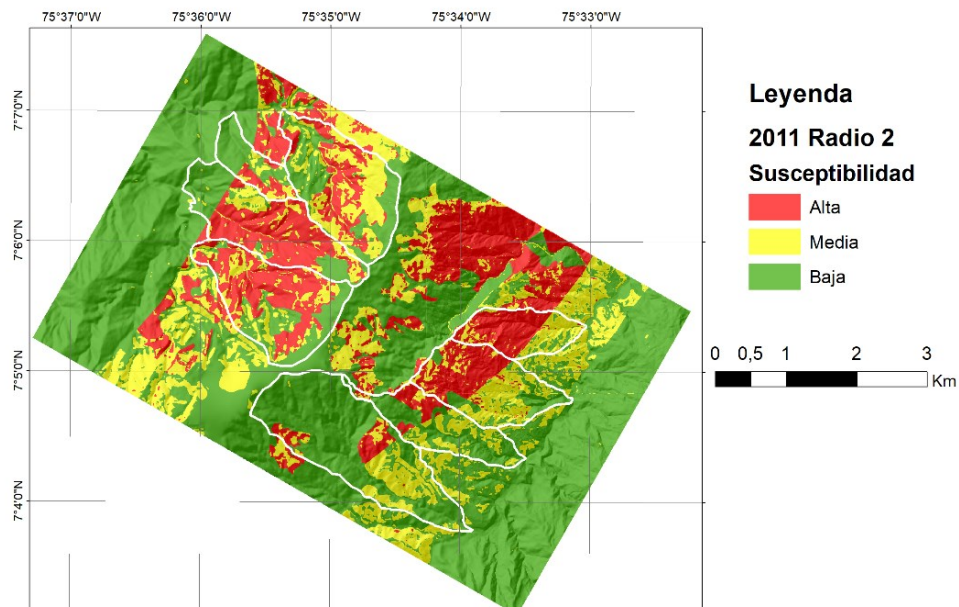
Escenario 1**Tabla 13** Resultados coeficientes (w_i) modelo 2011 escenario 1

2011. Escenario 1				
	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>z value</i>	<i>Pr(> z)</i>
(Intercept)	- 2,28E+03	2,84E+01	-80.402	<2e-16
Relieve Relativo	2,61E+01	1,69E+00	15.420	<2e-16
Pendiente	2,41E+01	1,40E+00	17.252	<2e-16
Distancia a Fallas	-2,67E-01	1,19E-02	-22.411	<2e-16
Aspecto	8,95E-02	6,49E-02	1.379	0.168
Geología	8,39E+02	7,18E+00	116.847	<2e-16
Cobertura	6,01E+02	4,45E+00	135.056	<2e-16

MAPA SUSCEPTIBILIDAD A CARCAVAMIENTO**Figura 2431 a)** Mapa susceptibilidad a carcaamiento 2011 escenario 1.

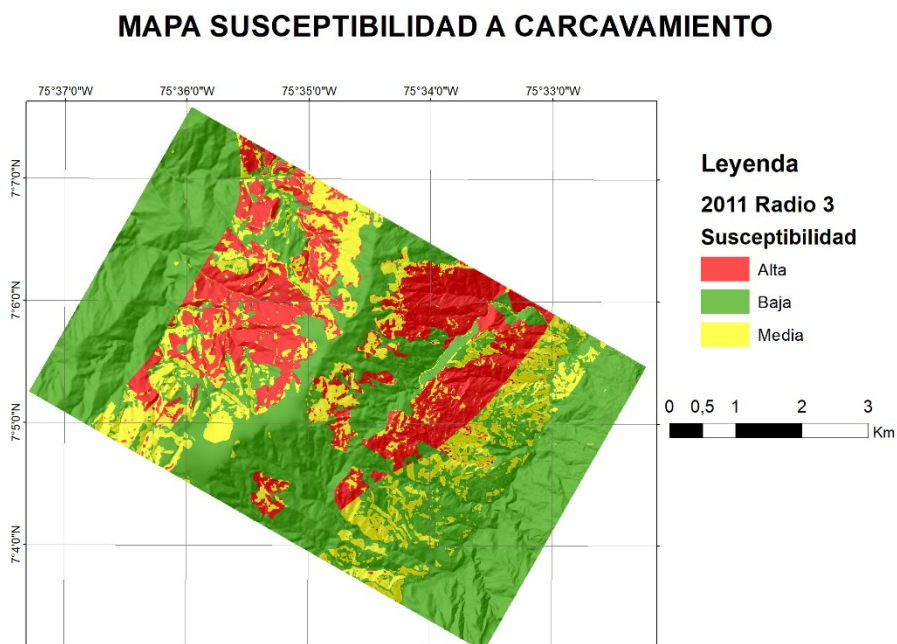
Escenario 2**Tabla 14** Resultados coeficientes (w_i) modelo 2011 escenario 2

2011. Escenario 2				
	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>z value</i>	<i>Pr(> z)</i>
<i>(Intercept)</i>	- 2,48E+01		-	< 2e-16
	3,02E+03		121.78	16
<i>Relieve Relativo</i>	2,30E+01	1,43E+00	16.11	< 2e-16
<i>Pendiente</i>	2,68E+01	1,20E+00	22.35	< 2e-16
<i>Distancia a Fallas</i>	-3,54E-01	1,01E-02	-35.01	< 2e-16
<i>Aspecto</i>	2,51E-01	5,45E-02	4.61	4.03e-06
<i>Geología</i>	8,88E+02	6,58E+00	134.87	< 2e-16
<i>Cobertura</i>	6,33E+02	4,20E+00	150.71	< 2e-16

MAPA SUSCEPTIBILIDAD A CARCAVAMIENTO**Figura 324 b)** Mapa susceptibilidad a carcaamiento 2011 escenario 2.

Escenario 3**Tabla 15** Resultados coeficientes (w_i) modelo 2011 escenario 3

2011. Escenario 3				
	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>z value</i>	<i>Pr(> z)</i>
(Intercept)	-	2,32E+01	-	< 2e-16
	3,42E+03		147.045	
Relieve Relativo	2,06E+01	1,32E+00	15.653	< 2e-16
Pendiente	2,80E+01	1,12E+00	25.052	< 2e-16
Distancia a Fallas	-3,99E-01	9,38E-03	-42.572	< 2e-16
Aspecto	3,48E-01	5,01E-02	6.947	3.74e-12
Geología	9,10E+02	6,33E+00	143.669	< 2e-16
Cobertura	6,48E+02	4,10E+00	158.113	< 2e-16

**Figura 33 c)** Mapa susceptibilidad a carcamiento 2011 escenario 3.

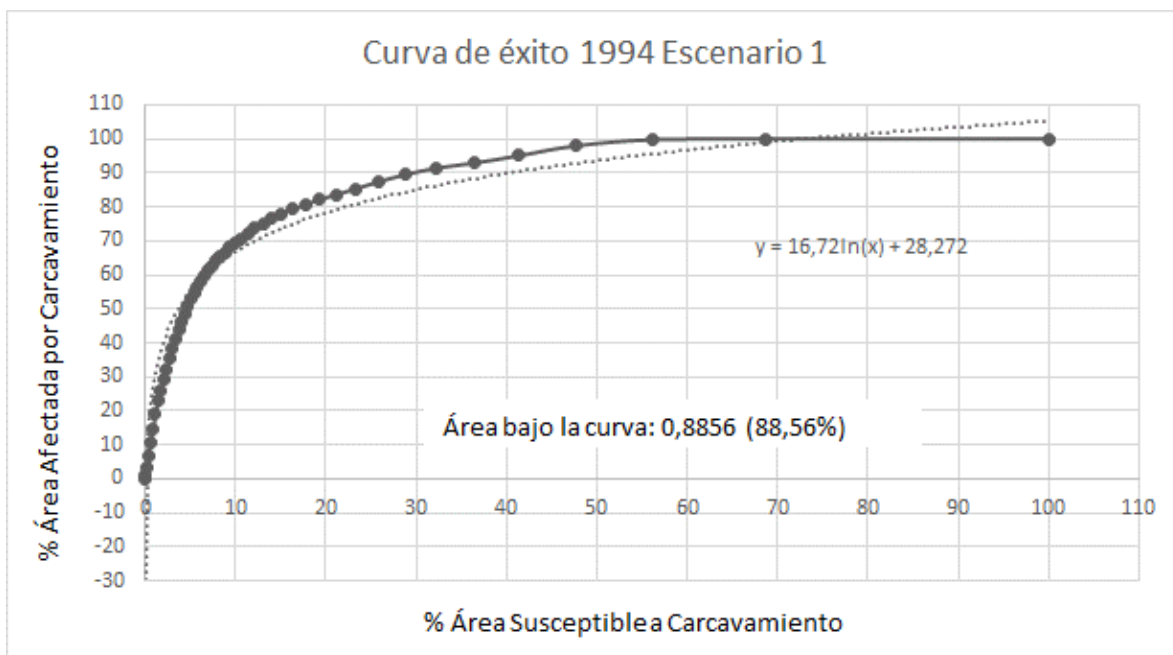
6.5.5. Curvas de éxito

Los resultados de las curvas de éxito (Área bajo la curva) se utilizaron para establecer los rangos de susceptibilidad en términos de probabilidad espacial de ocurrencia para cada escenario así:

6.5.5.1. AÑO 1994

Escenario 1

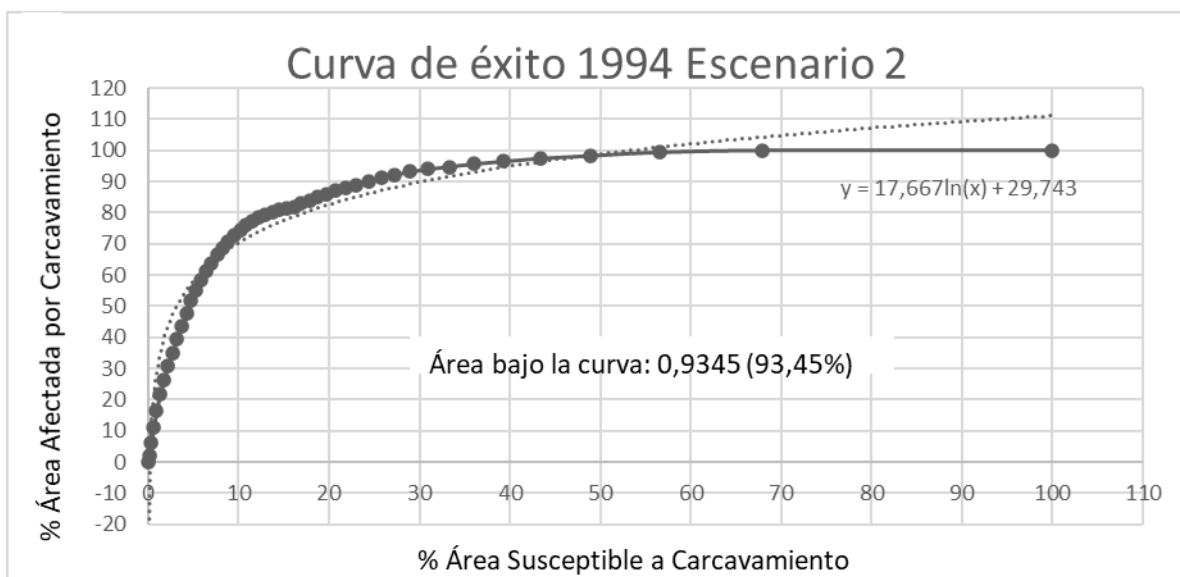
Para este escenario el área bajo la curva arrojó un valor de 0,88, indicando un buen ajuste del modelo a los datos de carcavamiento. El rango correspondiente a susceptibilidad alta fue definido para el 10,02% del área donde se encuentra un 69,41% de área afectada. El rango de susceptibilidad media corresponde al 18,75% del área donde se localiza el 20% del área afectada. Por último, el rango correspondiente a susceptibilidad baja fue definido para el 71,23% donde se localiza el 10,5% del área afectada por carcavamiento.



Gráfica 1 Curva de éxito 1994. Escenario 1

Escenario 2

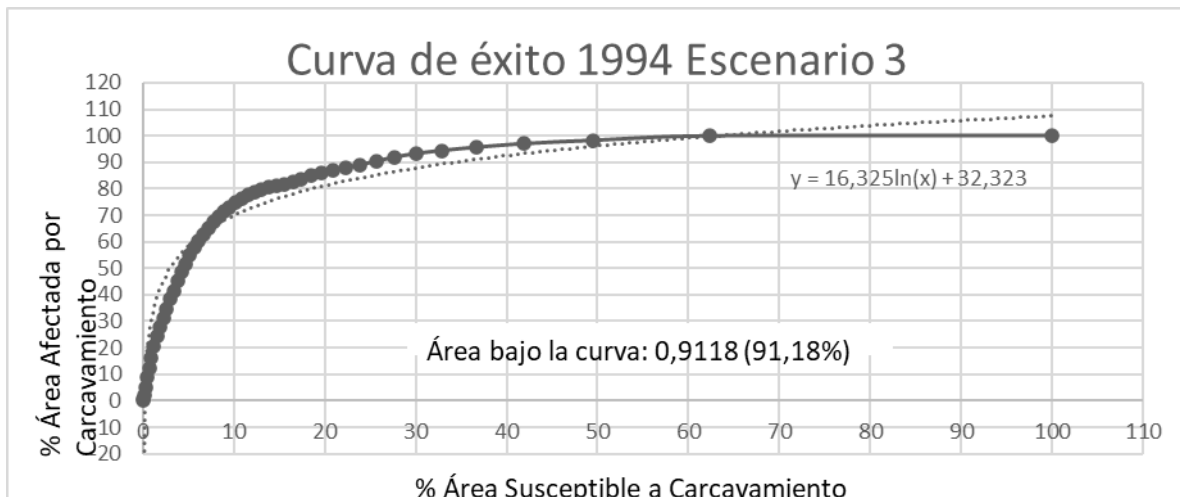
Para el escenario 2 se encuentra un área bajo la curva de 0,93, siendo este el escenario con mayor ajuste de modelo. El rango correspondiente a susceptibilidad alta fue definido para el 8,24% del área donde se encuentra un 68,72% de área afectada. El rango de susceptibilidad media corresponde al 14,81% del área donde se localiza el 20,25% del área afectada. Por último, el rango correspondiente a susceptibilidad baja fue definido para el 76,95 % donde se localiza el 11,03% del área afectada por carcavamiento.



Gráfica 2 Curva éxito 1994. Escenario 2

Escenario 3

El tercer escenario arroja un área bajo la curva de 0,91. El rango correspondiente a susceptibilidad alta fue definido para el 8,27% del área donde se encuentra un 69,40% de área afectada. El rango de susceptibilidad media corresponde al 15,57 % del área donde se localiza el 19,71% del área afectada. Por último, el rango correspondiente a susceptibilidad baja fue definido para el 76,16% donde se localiza el 10,89% del área afectada por carcavamiento.

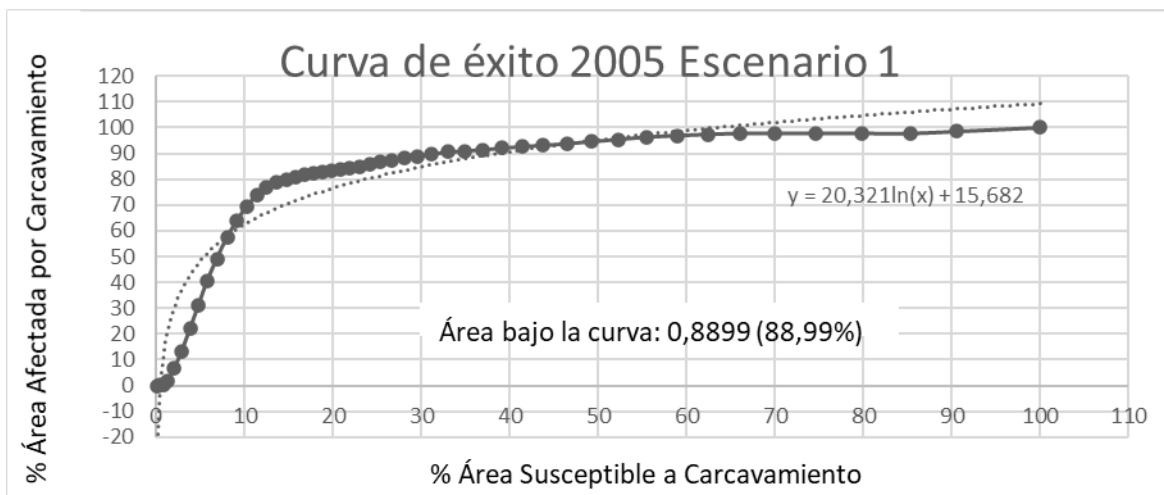


Gráfica 3 Gráfica curva de éxito 1994 Escenario 3

6.5.5.2. AÑO 2005

Escenario 1

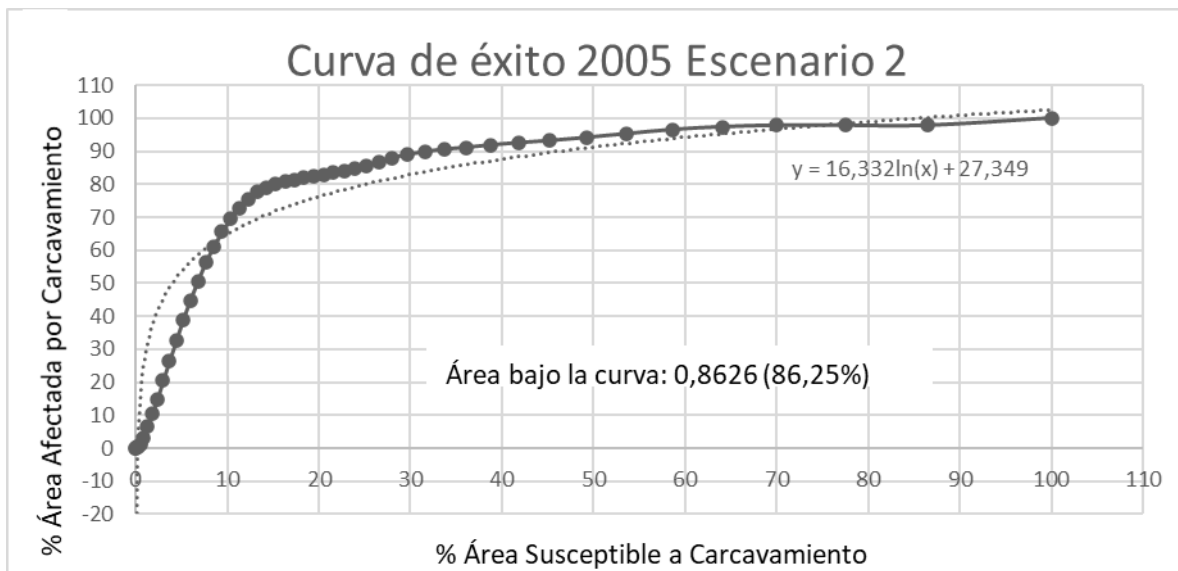
El área bajo la curva para el primer escenario de este año arrojó un valor de 0,89. El rango correspondiente a susceptibilidad alta fue definido para el 10,26% del área donde se encuentra un 69,47% de área afectada. El rango de susceptibilidad media corresponde al 20,92% del área donde se localiza el 20,34% del área afectada. Por último, el rango correspondiente a susceptibilidad baja fue definido para el 68,82% donde se localiza el 10,19% del área afectada por carcavamiento.



Gráfica 4 Gráfica curva de éxito 2005. Escenario 1.

Escenario 2

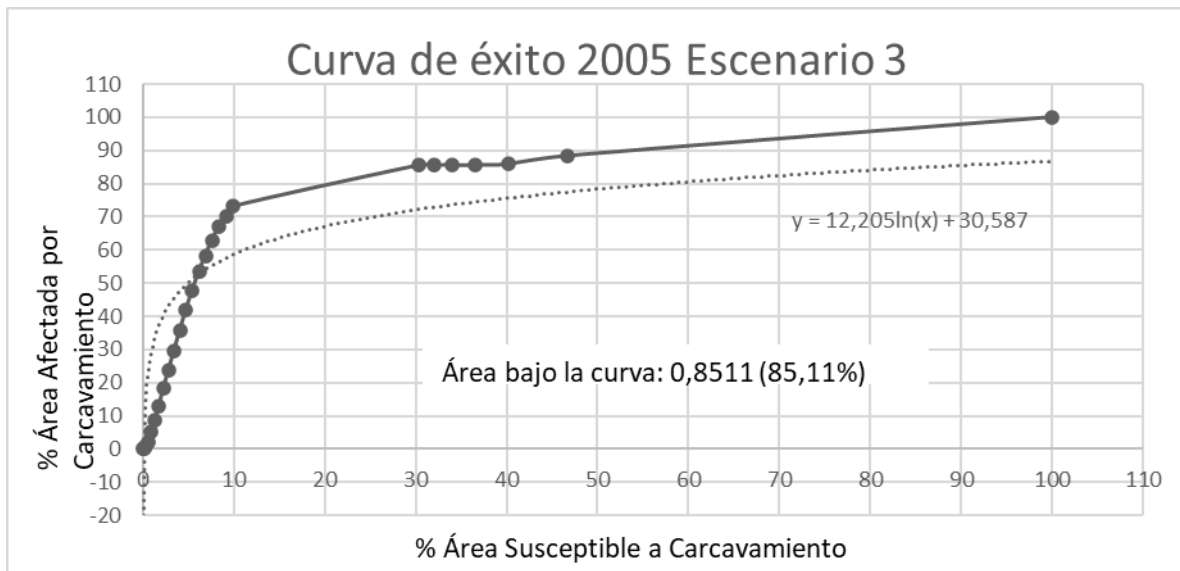
El área bajo la curva arrojó un valor de 0,86. El rango definido como susceptibilidad alta fue determinado para el 10,34% del área correspondiente al 69,41% del área afectada por carcavamiento. Para el rango de susceptibilidad media se define para el 21,21% del área donde se localiza el 20,41% de los procesos. Finalmente, el rango de susceptibilidad baja se define para el 68,45% del área correspondiente al 10,18% de los procesos por carcavamiento.



Gráfica 5 Gráfica curva de éxito 2005. Escenario2.

Escenario 3

El área bajo la curva para este escenario muestra un valor de 0,85. El rango correspondiente a susceptibilidad alta fue definido para el 9,14% del área donde se encuentra un 70,35% de área afectada. El rango de susceptibilidad media corresponde al 37,54% del área donde se localiza el 18% del área afectada. Por último, el rango correspondiente a susceptibilidad baja fue definido para el 53,32% donde se localiza el 11,66% del área afectada por carcavamiento.

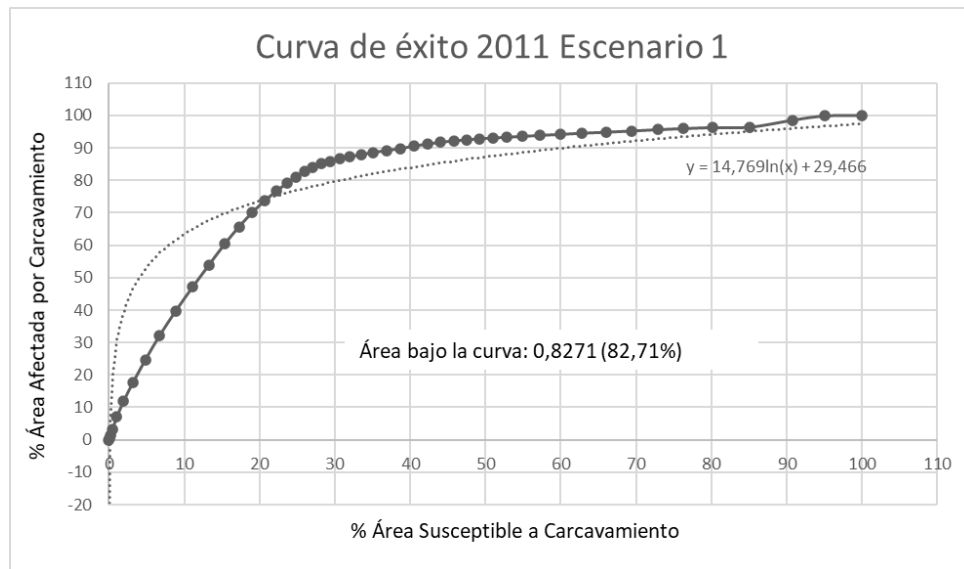


Gráfica 6 Gráfica curva de éxito 2005. Escenario3.

6.5.5.3. AÑO 2011

Escenario 1

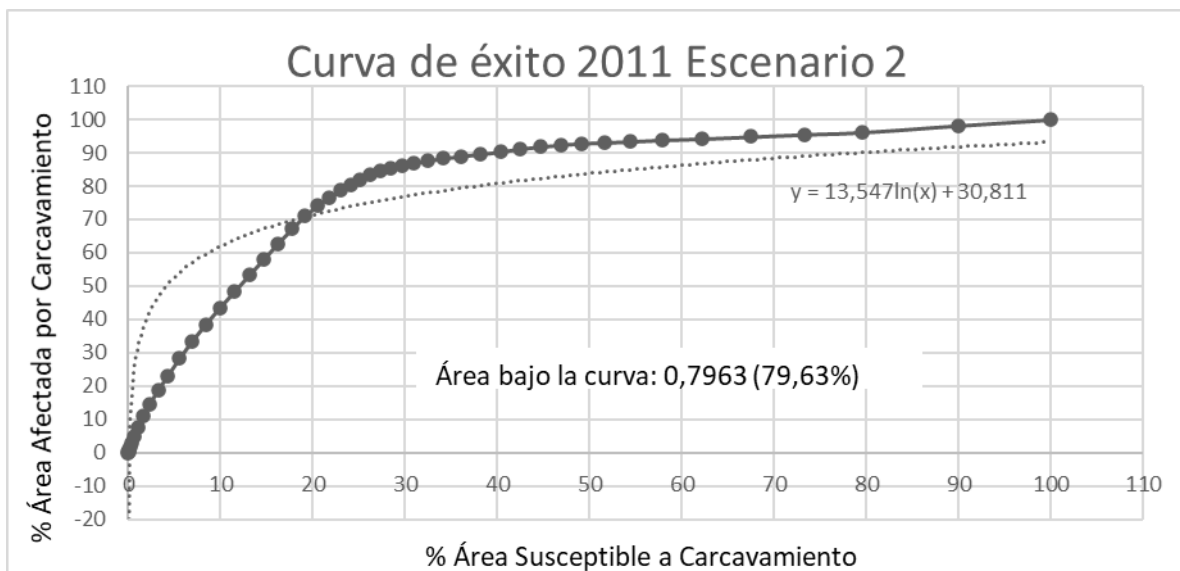
El área bajo la curva para el primer escenario de este año arrojó un valor de 0,82. El rango correspondiente a susceptibilidad alta fue definido para el 19,06% del área donde se encuentra un 70,23% de área afectada. El rango de susceptibilidad media corresponde al 19,58% del área donde se localiza el 19,57% del área afectada. Por último, el rango correspondiente a susceptibilidad baja fue definido para el 61,35% donde se localiza el 10,20% del área afectada por carcamamiento.



Gráfica 7 Gráfica curva de éxito 2011. Escenario 1.

Escenario 2

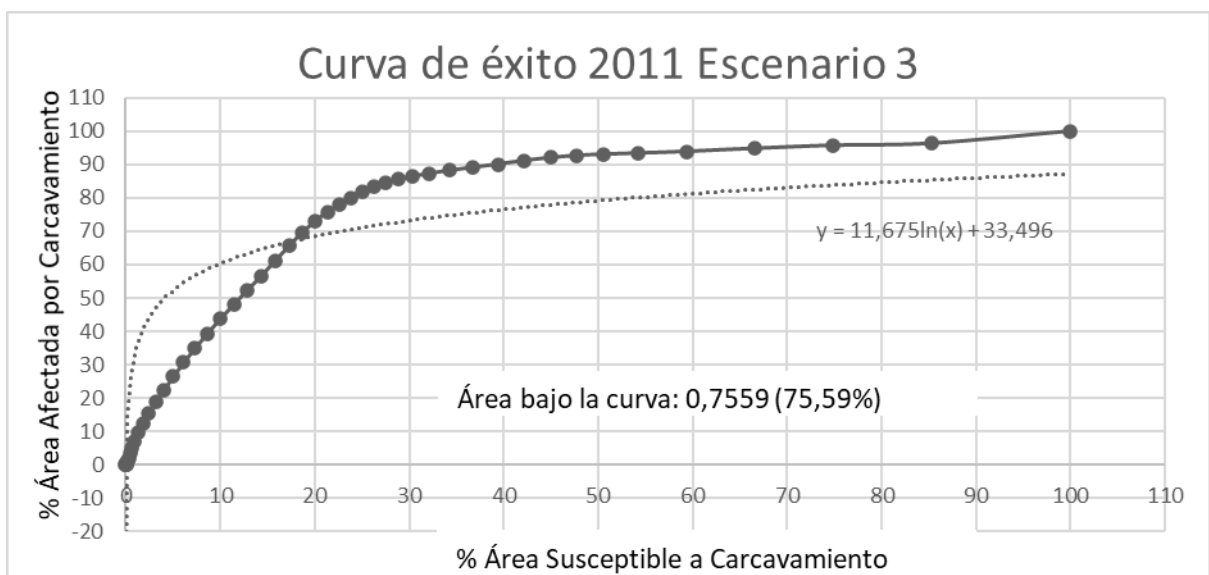
El área bajo la curva arrojó un valor de 0,79. El rango definido como susceptibilidad alta fue determinado para el 17,73% del área correspondiente al 67,09% del área afectada por carcavamiento. Para el rango de susceptibilidad media se define para el 20,39% del área donde se localiza el 22,52% de los procesos. Finalmente, el rango de susceptibilidad baja se define para el 61,88% del área correspondiente al 10,38% de los procesos por carcavamiento.



Gráfica 8 Gráfica curva de éxito 2011. Escenario 2.

Escenario 3

El tercer escenario arroja un área bajo la curva de 0,76. El rango correspondiente a susceptibilidad alta fue definido para el 18,66% del área donde se encuentra un 69,66% de área afectada. El rango de susceptibilidad media corresponde al 18,01 % del área donde se localiza el 19,46% del área afectada. Por último, el rango correspondiente a susceptibilidad baja fue definido para el 63,33% donde se localiza el 10,87% del área afectada por carcavamiento.



Gráfica 9 Gráfica curva de éxito 2011. Escenario 3.

7. DISCUSIÓN

Para el año 1994 escenario 2, el modelo más aproximado, presenta un valor de área bajo la curva de 0,93, es decir el modelo más preciso en la validación de los datos, se observa un coeficiente (w_i) de 898 para la geología y 885 para la cobertura, mientras que para variables como aspecto este valor es de -2,8. y -2,9 para distancia a fallas. Las variables de pendiente y relieve relativo presentan valores intermedios, 25,6 y 71,5 respectivamente.

Para el año 2005 escenario 1, modelo más aproximado con un área bajo la curva de 0,89, la geología presenta un coeficiente (w_i) de 626, cobertura de 314, relieve relativo 27,8, pendiente 18,4 distancia a fallas -2,53 y aspecto -4,77.

Finalmente, para el 2011 escenario 1, el modelo más aproximado tiene un valor de 0,83 para el área bajo la curva, el coeficiente (w_i) para la geología es de 839, 601 para cobertura, 26,1 para relieve relativo, 24,1 para la pendiente 0.089 para aspecto y -26,7 para distancia a fallas.

Las variables geología y cobertura comprenden valores de w_i más altos, esto habla de la alta incidencia y el papel que cumplen estas varias en el desarrollo de los procesos erosivos, por el contrario, variables como aspecto y distancia a fallas donde los valores de este coeficiente son bajos no son factores determinantes.

Cambios en la cobertura terrestre y el uso del suelo se traducen en un aumento de la susceptibilidad. En los mapas de susceptibilidad se observa que las áreas clasificadas como de alta susceptibilidad están ubicadas en donde predomina coberturas como pastos. Estas áreas son mayores en el mapa de susceptibilidad correspondiente al año 2005 a pesar de presentar valores de w_i más altos en el modelo de 1994. Este valor se puede ver afectado por el área de la zona de estudio de la cual no se tiene información, ya sea porque la fotografía no cubre completamente la zona o por la porción de la fotografía que está cubierta por nubes.

Las cuencas en las cuales se presentan actualmente procesos de erosión hídrica concentrada son cuencas jóvenes, redondeadas, con índices de compacidad cercanos a 1 y diferencias altitudinales considerables, esas características eran indicios de que el relieve y la pendiente estuvieran asociadas al desarrollo del cárcavamiento, a pesar de esto, el modelo arroja valores para estas variables que no apoyan esta hipótesis.

Es importante tener en cuenta que debido a la escasez de información disponible del área de estudio los resultados se pueden ver afectados; por ejemplo, para variables como la cobertura no fue posible realizar un mapeo completo del área de estudio, lo que pudo ser condicional en los valores arrojados por el modelo.

De acuerdo con los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo se puede afirmar que los principales factores que aportan al desarrollo de cárcavas en el municipio de Briceño, Antioquia es la geología seguido de las coberturas vegetales.

8. CONCLUSIONES

La geología presente en el área tiene alta susceptibilidad para la generación de erosión hídrica concentrada, esta variable presenta los valores más altos en los modelos desarrollados.

A pesar del alto control estructural que hay en la zona, el modelo descarta la variable distancia a fallas como un factor significativo; siendo esta la variable con menos peso en todos los modelos corridos.

Las coberturas terrestres en el área de estudio han sufrido cambios drásticos en pocos años. Coberturas como los pastos y cultivos han ido remplazando los boques. La disminución de plantas de raíces profundas aumenta la probabilidad de ocurrencia de procesos erosivos. La variable cobertura fue junto con la geología la segunda variable en importancia.

Los parámetros morfométricos de las cuencas hídricas a pesar de estar en rangos que pueden ser favorecedores para este tipo de procesos no son un factor significativo en el desarrollo del carcavamiento.

El cubrimiento de las fotografías aéreas y el lapso entre las fotografías han sido las principales limitaciones para el desarrollo del proyecto, sesgando los resultados y siendo estos dependientes a la brecha de información.

El municipio de Briceño es de difícil acceso no solo por su ubicación geográfica y poco desarrollo de infraestructura vial, sino también por su situación de orden público, lo que disminuye las áreas que pueden ser estudiadas y los métodos que pueden ser usados para la recolección de información.

Referencias

- Arias L. L. 2011. Estructura, Clasificación y Evolución del Relieve en el Departamento de Antioquia, pp 19- 181 Callejas & A. Idárraga (eds.). *Flora de Antioquia: catálogo de las plantas vasculares. vol. I. Introducción*. Programa Expedición Antioquia2013. Series Biodiversidad y Recursos Naturales. Universidad de Antioquia, Missouri Botanical Garden & Oficina de planeación departamental de la gobernación de Antioquia. Editorial D´Vinni, Bogotá, Colombia.
- Atkinson, P. M., & Massari, R. (1998). Generalized linear modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy. *Computers & Geosciences*, 24(4), 373–385.
- Atkinson, P., Jiskoot, H., Massari, R., & Murray, T. (1998). Generalized linear modelling in geomorphology. *Earth surface processes and landforms*, 23(13), 1185-1195.
- Campos Aranda, D. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis de Potosí: Editorial Universitaria Potosina
- Case, J.E., Duran, S., López, R.A. & More, W.R., 1971. “Tectonics investigations in Western Colombia and eastern Panama”. *Geological Society America Bulletin*. Vol. 82, p. 2895- 2903.
- Consorcio INTEGRAL. 2007. Estudio de impacto ambiental -EIA-: Complementación de la factibilidad técnica, económica y ambiental, Hidroeléctrica Ituango. Medellín.
- DANE. 2018. Censo Nacional de Población y Vivienda.
- Delgadillo, A. & Páez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo. En C. Ferrer & M. Duarte (Eds.). (2008). *Plan de desarrollo urbano del Municipio Antonio Pinto Salinas, bajo el enfoque de gestión del riesgo. Caracterización del riesgo de la cuenca del valle Mocoties*. Mérida: FUNDAPRIS.
- Dotterweich, M., Rodzik, J., Zglobicki, W., Schmitt, A., Schmidtchen, G., Bork, H., 2012. High resolution gully erosion and sedimentation processes, and land use changes since the Bronze Age and future trajectories in the Kazimierz Dolny area (Nałęczów Plateau, SE-Poland), *CATENA* 95, 50-62. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.03.001>.
- Dotterweich, M., Stankoviansky, M., Minár, J., Koco, S., Papčo, P., 2013. Human induced soil erosion and gully system development in the Late Holocene and future

- perspectives on landscape evolution: The Myjava Hill Land, Slovakia, *Geomorphology*, 201, 227-245, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.06.023>.
- Fuentes Junco, J. J. A. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro. México: Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Instituto Nacional de Ecología (INE).
- Gaspari, F. J, Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G.; Delgado, M. I. & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Revista Electrónica del Comité de Medio Ambiente. AUGMDOMUS*, 4, 143-158. Recuperado de: <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/download/476/505/>
- Gómez-Mercado, C. A., & Montoya-Vélez, L. P. 2014. Factores sociales, demográficos, familiares y económicos relacionados con el embarazo en adolescentes, área urbana, Briceño, 2012. *Revista de salud pública*, 16, 393-407.
- González H., 1974. “Rocas Verdes y complejos polimetamórficos del Sur de Antioquia y Norte de Caldas”. Opúsculo guía de Excursión. Simposio sobre ofiolitas. Facultad de Minas. Medellín
- Gravelius, H. (1914). *Grundrifi der gesamten Geweisserkunde. Compendium of Hydrology*. Berlín: Goschen.
- Grosse E., 1926. “Estudio geológico del terciario carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia entre el río Arma y Sacaojal”. Dietrich Reimer. Alemania. 374pp.
- IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA. 2008. Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena. Bogotá, D.C., 200p. + 164 hojas cartográficas.
- Hanley, J.A. and McNeil, B.J. 1982. The meaning and use of the area under a receive operating characteristic (ROC) CURVE. *Radiology*, 143(1), pp. 29-36.
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions*, 13(1), 350 - 361.

- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*. (56), 275 - 370.
- IGAC. 2007. Estudio general de suelos y zonificación de tierras, departamento de Antioquia.
- Li, Y., Poesen, J., Valentin, C., 2004. *Gully Erosion Under Global Change*. Sichuan S&T Press.
- Luffman, I., Nandi, A., Spiegel, T., 2015. Gully morphology, hillslope erosion, and precipitation characteristics in the Appalachian Valley and Ridge province, southeastern USA, *CATENA*, 133, 221-232, ISSN 0341-8162, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.015>.
- Makanzu Imwangana, F., 2014. Etude de l'érosion ravinante à Kinshasa: Dynamisme Pluvio-Morphogénique et Développement d'un Outil de Prévision (Study on Gully Erosion in Kinshasa: Rainfall-formation Dynamics of and prevention strategies). PhD. Thesis Université de Kinshasa, Faculté des Sciences, Kinshasa, D.R. Congo, p. 208.
- Meissner, P.D., Flusch, E.R., Stibane, F., & Berg, E., 1976. "Dinamics of the active boundary in southwest Colombia according to recent geophysical measurements". *Tectonophysics*. Vol. 35, No. 1-3, p. 113-136.
- Morgan, R. P. C., 2005. *Soil Erosion and Conservation*, third ed, Blackwell 314 pp. Poesen, J. Nachtegaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 91, 91-133.
- Ortiz Vera, O. (2004). Evaluación hidrológica. *Hidrored*, (1), 1-7
- Regmi, N. R., Giardino, J. R., & Vitek, J. D. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115(1-2), 172-187.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2015. MEMORIA TÉCNICA EXPLICATIVA DEL MAPA GEOMORFOLÓGICO ANALÍTICO APLICADO A LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100000 PLANCHA 115- TOLEDO, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2015. MEMORIA TÉCNICA EXPLICATIVA DEL MAPA GEOMORFOLÓGICO ANALÍTICO APLICADO A LA ZONIFICACIÓN

DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100000 PLANCHA
116 - YARUMAL, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA.

- Strahler, A. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. En Chow, V. (Ed). (1964). Handbook of applied Hydrology (439-476). New York: Mc Graw-Hill.
- Torri, D., Poesen, J., 2014. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. Earth Sci. Rev. 130, 73–85.
- Toussaint J. F. & Restrepo J.J. 1973. “Obducción cretácea en el occidente colombiano”. Publicaciones especiales de geología N° 3. Centro de publicaciones UN. Medellín 26p.