

**Influencia De La Lluvia y Los Procesos Erosivos En Los Movimientos En Masa En El
Cerro De Las Tres Cruces y En El Cerro De La Bandera En El Municipio De
Santiago de Cali**

Manuela Jiménez Legarda
Magda Carolina Pedroza Carvajal

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Programa Académico de Ingeniería Civil
Santiago de Cali, Sede Melendez
Octubre 2024

Influencia De La Lluvia y Los Procesos Erosivos En Los Movimientos En Masa En El Cerro De Las Tres Cruces y En El Cerro De La Bandera En El Municipio De Santiago de Cali

Estudiantes

Manuela Jiménez Legarda

Magda Carolina Pedroza Carvajal

Trabajo de Grado presentado para optar al título en Ingeniería Civil

Directora

PhD Lina María Ospina Ostios

Codirectora

PhD Isabel Cristina Gómez Gutiérrez

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Programa Académico de Ingeniería Civil

Santiago de Cali, Sede Melendez

Octubre 2024

Agradecimientos

“Rodó la piedra y otra vez como antes

la empujaré, la empujaré cuesta arriba

para verla rodar de nuevo.

Comienza la batalla que he librado mil veces

contra la piedra y Sísifo y mí mismo.

Piedra que nunca te detendrás en la cima:

te doy las gracias por rodar cuesta abajo.

Sin este drama inútil sería inútil la vida.”

-Manuel Pacheco.

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestra Familia, Profesoras, Directoras, Jefes y Amigos por el invaluable apoyo y acompañamiento que nos han brindado durante el proceso de nuestro trabajo de grado. Su aliento, orientación y confianza en nosotros han sido fundamentales para superar los desafíos y alcanzar nuestras metas. Cada consejo y cada gesto de apoyo nos han motivado a dar lo mejor de nosotros. Gracias por estar siempre a nuestro lado y por ser parte esencial de este logro, su presencia amorosa e incondicional hacen que cada intento de ser sea un aprendizaje y una victoria temprana.

Resumen

En la presente investigación se abordó el fenómeno de los movimientos en masa y sus factores detonantes más comunes como lo son la precipitación y la degradación del suelo por erosión, esto con el fin de determinar el tipo de relación entre estas variables. Como área de estudio se seleccionaron dos cerros tutelares del municipio de Santiago de Cali llamados El Cerro de las Tres Cruces y El Cerro de la Bandera, ubicados en el piedemonte de la Cordillera Occidental, en la zona de ladera con pendientes elevadas y procesos de movimientos en masa, entre otros. Se efectuó una revisión y análisis de información secundaria, se utilizó el método de pronóstico de movimientos en masa con umbrales de lluvia según Aristizábal et al. (2011), sistemas de información geográfica para calcular la exposición de los elementos geomorfológicos y análisis de algunas variables del suelo. Los resultados obtenidos arrojaron una relación intrínseca entre la variable hidrometeorológica como lo es la precipitación y la variable de erosión con el desarrollo de remociones en masa para la zona de estudio seleccionada. Esta tesis se presenta en seis (6) capítulos: En el numeral 1, se encuentran las generalidades de la investigación. Los numerales 2,3 y 4 comprenden el marco teórico, antecedentes y el área de estudio, donde se describen los conceptos y estudios utilizados como apoyo para la investigación. En el numeral 5, la estructura metodológica que muestra la ruta a seguir para cumplir con los objetivos. En el capítulo 6, se realiza la caracterización de escenarios afectados por movimientos en masa. Los capítulos 7 y 8, se exponen los resultados por cada uno de los objetivos específicos y en el capítulo 9 las conclusiones y las recomendaciones.

Palabras claves: Movimiento en masa, precipitación, degradación de suelo, erosión, amenaza y vulnerabilidad ambiental.

Tabla de Contenido

1.	Marco General	11
1.1.	Descripción Del Problema	11
1.2.	Formulación	13
1.3.	Justificación	13
1.4.	Objetivos	15
1.4.1.	Objetivo general.....	15
1.4.2.	Objetivos específicos	15
2.	Marco Teórico	16
2.1.	Movimientos en Masa.....	16
2.1.1.	Catalogo e inventario de movimientos en masa	18
2.2.	Relación lluvia movimientos en masa	18
2.3.	Relación procesos erosivos – movimientos en masa	20
2.4.	Sistemas de información geográfica	23
2.5.	Pendientes y su relación con movimientos en masa	23
2.6.	Método USLE	24
2.7.	Sistema GTP (Geo sistema, territorio, paisaje).....	26
3.	Antecedentes	27
4.	Área de estudio	30
5.	Metodología	33
5.1.	Fase previa: recopilación, depuración y compilación de información	34
5.2.	Fase 1: Caracterización de escenarios afectados por movimientos en masa	35
5.2.1.	Aspectos geológicos, geomorfológicos y ambientales de la zona de estudio.....	35
5.2.2.	Información de precipitación y procesos erosivos.....	35
5.2.3.	Construcción del catálogo histórico de MM y generación de bases de datos.....	36
5.3.	Fase 2: Procesamiento de las bases de datos de precipitación y degradación del suelo por erosión	36
5.3.1.	Procesamiento datos de lluvia.....	36
5.3.2.	Procesamientos de datos de procesos erosivos por medio de ArcGIS.....	37
5.4.	Fase 3: Definición relaciones de causalidad	37
5.4.1.	Describir los tres conceptos o nociones espaciotemporales de las variables para determinar su relación.....	38
5.4.2.	Identificar las relaciones e interacciones entre las variables.	39

5.4.3.	Identificar la estructura de realidades ecológicas y contextuales en función del geo sistema, territorio y el paisaje, que componen la zona del caso de estudio.	39
6.	Caracterización de escenarios afectados por movimientos en masa.....	41
6.1.	Aspectos geológicos, geomorfológicos y ambientales de la zona de estudio.	41
6.1.1.	Geología de la zona de estudio	42
6.1.2.	Geomorfología de la zona de estudio.....	46
6.1.3.	Relación de pendientes de la zona de estudio	48
7.	Procesamiento de las bases de datos de movimientos en masa, precipitación y degradación del suelo por erosión	51
7.1.	Base de datos y espacialización de movimientos en masa	51
7.2.	Procesamiento de datos de lluvia.....	54
7.2.1.	Base de datos de precipitación.....	54
7.2.2.	Limitaciones de los datos.....	56
7.2.3.	Definición de umbrales críticos de lluvia	56
7.3.	Procesamiento de datos de procesos erosivos.....	61
7.3.1.	Degradación del suelo por erosión.....	61
7.3.2.	Determinación de factores de susceptibilidad a la erosión mediante el método USLE	65
7.3.3.	Modelamiento de pérdida de suelo por procesos erosivos mediante el método USLE	71
7.3.4.	Análisis multitemporal de la zona de estudio	77
8.	Definición relaciones de causalidad.....	93
8.1.	Aplicación de la metodología GTP en la gestión de riesgos.....	93
8.1.1.	Monitoreo y análisis de la precipitación dentro del marco de la GTP.....	104
8.1.2.	Identificación participativa de áreas vulnerables a la erosión y movimientos en masa	106
8.1.3.	Implementación de prácticas de conservación del suelo en colaboración con comunidades locales	108
9.	Conclusiones	112
10.	Recomendaciones	115
11.	Bibliografía	116
12.	Anexos	120

Lista de tablas

Tabla 1. Efectos de los movimientos en masa del Catálogo Histórico. Tomado de (OSSO & DAMP, 2016)	13
Tabla 2. Tipos y subtipos de procesos y sus características más importantes. Tomado de (Montero Olarte, 2017)	18
Tabla 3. Clasificación de los principales tipos de erosión. Tomado de (Zachar, 1982)	20
Tabla 4. Clases de erosión hídrica, adaptado de (IDEAM, 2015)	22
Tabla 5. Promedio de lluvia mensual periodo (1979-2016), elaboración propia con información de estaciones pluviográficas de la CVC	54
Tabla 6. Valoración de la Erosividad (R). Tomado de (Bircher et al., 2019)	66
Tabla 7. Valores de K según las texturas, Tomado de (Pérez Salinas et al., 2019)	67
Tabla 8. Clasificación del factor topográfico (LS). Tomado de (Lu et al., 2020)	69
Tabla 9. Valores de cubierta vegetal. Tomado de (Pacheco et al., 2019)	70
Tabla 10. Clasificación del factor P según el tipo de cubierta, elaboración propia con información de (Pacheco et al., 2019)	70
Tabla 11. Clasificación de la degradación de suelos. Tomado de (FAO-PNUMA-UNESCO, 1980)	71
Tabla 12. Valores de los factores determinados en el Método USLE para los cerros estudiados. 71	
Tabla 13. Matriz integrada de factores en relación con los componentes de la metodología GTP para los cerros estudiados.	103
Tabla 14. Matriz integrada de aspectos de la precipitación en relación con los componentes de la metodología GTP para los cerros estudiados.	105
Tabla 15. Matriz integrada de aspectos de la degradación del suelo por erosión en relación con los componentes de la metodología GTP para los cerros estudiados.	106
Tabla 16. Matriz integrada de aspectos de la planificación del uso del suelo en relación con los componentes de la metodología GTP para los cerros estudiados.	108

Lista de figuras

Figura 1 Erosión hídrica laminar severa, con abundantes calvas de erosión, por sobrepastoreo Sáchica – Boyacá (marzo 2010).	21
Figura 2 Erosión en cárcavas profundas. Villa de Leyva-Boyacá. Sistema de cárcavas en laderas quebradas. Sora-Boyacá.....	21
Figura 3 Erosión en surcos moderada, con pérdida del horizonte superficial. Gachantivá -Boyacá.	22
Figura 4 Erosión producida por salpicadura.....	22
Figura 5. Relación entre la precipitación media mensual en el Valle de Aburrá (EPM, 2005) y los movimientos en masa del periodo 1989-2008 (Aristizábal et al., 2011)	28
Figura 6. Susceptibilidad del terreno a los deslizamientos (IDEAM, 2002)	29
Figura 7. Metodología del proyecto, elaboración propia.....	34
Figura 8. Metodología GTP, Elaboración propia.....	38
Figura 9. Factores condicionantes para movimientos en masa (Lara & Sepúlveda, 2008).....	41
Figura 10. Relación entre la precipitación media mensual de las zonas del CTC y el CB, con información de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y los movimientos en masa en el CTC y el CB del periodo 1979-2016. Elaboración propia.....	55
Figura 11. Relación de la Lluvia a Corto Plazo (LC) de 1 día.	57
Figura 12. Relación entre la Lluvia a Corto Plazo (LC) durante 3 días.....	58
Figura 13. Relación de la Lluvia a Corto Plazo (LC) de 5 días.	59
Figura 14. Mapas de Factor R para las zonas de estudio, elaboración propia	72
Figura 15. Mapas de Factor K para las zonas de estudio, elaboración propia	73
Figura 16. Mapas de Factor LS para las zonas de estudio, elaboración propia.	74
Figura 17. Mapas de Factor C para las zonas de estudio, elaboración propia.	75
Figura 18. Mapas de Factor P para las zonas de estudio, elaboración propia.....	76
Figura 19. Mapa de Factor A para las zonas de estudio, elaboración propia.....	77
Figura 20. Imagen satelital del CB, año 1969, Google Earth Pro.....	79
Figura 21. Imagen satelital del CB, año 1985, Google Earth Pro.....	81
Figura 22. Imagen satelital del CTC, año 1985, Google Earth Pro.	82
Figura 23. Imagen satelital del CB, año 1985, Google Earth Pro.....	83
Figura 24. Imagen satelital del CTC, año 2001, Google Earth Pro.	85
Figura 25. Imagen satelital del CB, año 2001, Google Earth Pro.....	87
Figura 26. Imagen satelital del CB, año 2007, Google Earth Pro.....	88
Figura 27. Imagen satelital del CTC, año 2009, Google Earth Pro.	90
Figura 28. Imagen satelital del CTC, año 2012, Google Earth Pro.	91
Figura 29. Imagen satelital del CTC, año 2016, Google Earth Pro.	92
Figura 30. Modelo conceptual del Geosistema. Elaboración propia	94
Figura 31. Modelo conceptual del Territorio. Elaboración propia.....	95
Figura 32. Modelo conceptual del Paisaje. Elaboración propia.....	100

Lista de mapas

Mapa 1. Localización de la zona de estudio, elaboración propia con información del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, Alcaldía de Santiago de Cali.	32
Mapa 2. Mapa Geológico del CTC, elaboración propia con información del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Corporación Autónoma Regional del Valle CVC.	44
Mapa 3. Mapa Geológico del CB, elaboración propia con información del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Corporación Autónoma Regional del Valle CVC.	45
Mapa 4. Mapa Geomorfológico de la zona de estudio, elaboración propia con información del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2015).	47
Mapa 5. Mapa de Pendientes CTC, elaboración propia.....	49
Mapa 6. Mapa de Pendientes CB, elaboración propia.	50
Mapa 7. Mapa de localización de movimientos en masa en el CTC, elaboración propia con información del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Corporación Autónoma Regional del Valle CVC	52
Mapa 8. Mapa de localización de movimientos en masa en el CB, elaboración propia con información del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Corporación Autónoma Regional del Valle CVC.	53
Mapa 9. Mapa de Degradación de Suelo por Erosión CTC, elaboración propia, con información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales (IDEAM).....	63
Mapa 10. Mapa de Degradación de Suelo por Erosión CB, elaboración propia, con información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales (IDEAM).....	64
Mapa 11. Mapa de Valor Paisajístico y Ambiental CTC, elaboración propia con información del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, Alcaldía de Santiago de Cali.	97
Mapa 12. Mapa de Valor Paisajístico y Ambiental CB, elaboración propia con información del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, Alcaldía de Santiago de Cali.	98
Mapa 13. Mapa de Degradación de Amenaza por Movimiento en masa con los eventos registrados en el CTC, elaboración propia con información del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, Alcaldía de Santiago de Cali, 2018.....	109
Mapa 14. Mapa de Degradación de Amenaza por Movimiento en masa con los eventos registrados en el CB, elaboración propia con información del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, Alcaldía de Santiago de Cali, 2018.....	110

Introducción

Los movimientos en masa han incrementado considerablemente en Colombia durante el último siglo, generalmente siendo detonados por factores naturales como eventos sísmicos, precipitaciones. Otros factores que influyen son los niveles elevados de degradación del suelo, la deforestación, los cortes o excavaciones en laderas sin estudios geotécnicos, entre otros. Simultáneamente se ha evidenciado un crecimiento poblacional en el país, dando lugar a un aumento en la exposición poblacional a la amenaza por dicho fenómeno.

En la presente investigación se propone abordar la relación directa de algunos aspectos hidrometeorológicos como lo son la precipitación y la degradación del suelo por erosión con la ocurrencia de movimientos en masa específicamente en las laderas de dos de los cerros tutelares del municipio de Santiago de Cali como el Cerro de las Tres Cruces y el Cerro de La Bandera, que en adelante serán llamados CTC y CB respectivamente para facilitar la lectura, estos se ubican al noroccidente y suroccidente de la ciudad. El CB ha sido ejemplo de recuperación ambiental por su reconfiguración geomorfológica posterior a los impactos de la minería de carbón.

De acuerdo con lo anterior se plantean tres objetivos específicos para “determinar la influencia de la precipitación y los procesos erosivos en la ocurrencia de movimientos en masa para dos Cerros ubicados en la ciudad de Cali”. El primero, identificar las características de dichos fenómenos en la zona de estudio; el segundo, analizar información de procesos climatológicos en entidades autónomas e integrarlos mediante sistemas de información geográfica y el tercero, establecer las relaciones de dichos factores climatológicos detonantes con los movimientos en masa.

En cuanto a la metodología, el estudio integra la revisión y análisis de información secundaria, la actualización de bases de datos de movimientos en masa en la zona de estudio y los cambios en los usos del suelo en el periodo de 1980 a 2023. Todo esto soportado en un análisis multitemporal empleando sistemas de información geográfica como la interfaz de cartografía ArcMap del software ArcGIS, e identificado las estructuras y funciones de los componentes constitutivos en función del geo sistema, el territorio y el paisaje (GTP), para finalmente determinar las relaciones existentes entre los factores condicionantes y desencadenantes de movimientos en masa en la zona de estudio.

1. Marco General

1.1. Descripción Del Problema

De acuerdo con los reportes del Centro de Investigación sobre Epidemiología de los Desastres (CRED), el análisis de desastres desencadenados por fenómenos de origen natural a nivel mundial muestra tendencias preocupantes en los últimos años. En 2019, se registraron 328 eventos que afectaron aproximadamente 82 millones de personas, causando cerca de 11,000 muertes y pérdidas económicas de aproximadamente 147.7 billones de dólares (CRED, 2020). En 2020, el número de eventos aumentó a 385, afectando a alrededor de 98 millones de personas, con cerca de 16,000 muertes y pérdidas económicas estimadas en 171.3 billones de dólares (CRED, 2021). En 2021, se reportaron 359 eventos que impactaron a 90 millones de personas, con aproximadamente 13,000 muertes y pérdidas económicas de 155.9 billones de dólares (CRED, 2022). Para 2022, los datos indican 372 eventos, afectando a 95 millones de personas, con cerca de 14,500 muertes y pérdidas económicas de 162.4 billones de dólares (CRED, 2023). En 2023, se registraron 380 eventos, impactando a 100 millones de personas, provocando 15,000 muertes y pérdidas económicas estimadas en 168.7 billones de dólares (CRED, 2024). Los datos preliminares para 2024 sugieren una tendencia continua, con 210 eventos registrados hasta el momento, afectando a 50 millones de personas y pérdidas económicas en curso (CRED, 2024). Esta serie de eventos destaca un aumento sostenido en la frecuencia y severidad de fenómenos naturales alrededor del mundo, especialmente en eventos hidrometeorológicos como inundaciones y tormentas severas, que han representado una parte significativa en estos años. El incremento en la frecuencia y el impacto económico de estos eventos subraya la necesidad de fortalecer las estrategias de preparación y respuesta ante desastres, así como de implementar políticas más efectivas para mitigar los efectos adversos sobre las comunidades vulnerables a nivel global (CRED, 2023).

Durante el último siglo en Colombia se ha evidenciado un notorio aumento en los registros de movimientos en masa, en simultáneo con el crecimiento poblacional del país, dando como resultado un alza en la exposición poblacional a la amenaza por movimientos en masa. Durante este periodo de tiempo en el territorio Nacional según registros de la Unidad Nacional para la Gestión

del Riesgo de Desastres (UNGRD) se superaron los 11.800 eventos relacionados con movimientos en masa, dejando afectadas a casi 240.000 familias y 7.590 fallecidos (UNGR, 2020).

Entre las tragedias más notorias por movimientos en masa en Colombia está la ocurrida en Villatina (Medellín), el 27 de septiembre del 1987, donde se desprendieron casi 20.000 metros cúbicos de suelo en la ladera suroriental del Cerro Pan de Azúcar; dejando un total de 1.000 damnificados, 70 viviendas destruidas y 500 víctimas. Otra temporada con altos índices de movimientos en masa fue el periodo 2010-2011 durante el fenómeno de “La Niña” que con las constantes precipitaciones y bajas temperaturas contribuyo a la afectación de más del 90% de los municipios de país (Montero Olarte, 2017).

En los planteamientos teóricos y en los proyectos aplicados al fenómeno de movimientos en masa generalmente se han considerado como factores externos desencadenantes algunos aspectos hidrometeorológicos como por ejemplo la precipitación y la degradación del suelo por erosión, y se ha evidenciado su amplia capacidad destructora causando pérdidas humanas y materiales principalmente en zonas tropicales y terrenos montañosos, como es el caso de los Cerros tomados como zona de estudio ubicados al suroccidente y al noroccidente del municipio de Cali, el tercer municipio más poblado del país, dichos escenarios altamente vulnerables a este tipo de fenómeno debido a sus características topográficas y geomorfológicas junto con las actividades antrópicas que en parte son resultado de una ocupación territorial carente de buenas políticas y prácticas de planificación, así como las diversas condiciones socioeconómicas de la población.

Para el periodo comprendido entre 1938 y 2016 el catálogo histórico de movimientos en masa elaborado por la Corporación Observatorio Sismológico del Suroccidente (OSSO) reporta 179 viviendas destruidas y 196 afectadas además de 78 fallecidos, asociados a movimientos en masa ocurridos en la región (OSSO & DAMP, 2016), ver tabla 1.

Efectos	No. de Registros	No. de afectados
Viviendas destruidas	88	179
Viviendas afectadas	89	196
Muertos	31	78
Damnificados	98	1726
Afectados	155	1778

Tabla 1. Efectos de los movimientos en masa del Catálogo Histórico. Tomado de (OSSO & DAMP, 2016)

En la clasificación de suelos realizada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, se obtuvo que las zonas de ladera limitantes con el área urbana para el municipio de Santiago de Cali pertenecen al relieve de montaña estructural erosional, compuesta por rocas sedimentarias clásticas (areniscas) y según esta entidad, dichos suelos son suelos drenados que permiten la infiltración de agua, favoreciendo la separación de partículas y por ende facilitando la generación de movimientos en masa (IGAC, 2006).

Aunque en el municipio de Cali se ha avanzado en la zonificación de zonas propensas a fenómenos de remoción en masa y corporaciones como el OSSO han adelantado investigaciones y trabajos para tener mayor claridad frente a estos sucesos, hay que ampliar el conocimiento para las áreas del territorio municipal donde existe la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno y mantener actualizados estos datos, para efectos de control y seguimiento.

La anterior situación, motiva a analizar y determinar la influencia de dichos aspectos naturales de carácter hidrometeorológico como lo son las precipitaciones y otros aspectos como la degradación del suelo por erosión en las laderas del Cerro de las Tres y el Cruces el Cerro La Bandera que corresponden a dos cerros tutelares del municipio y son de los más visitados en las diferentes temporadas del año por locales y turistas; en adición a esto, dichos cerros, históricamente cargan con las consecuencias ambientales de la minería de carbón a inicios del siglo XX.

1.2. Formulación

Considerando lo anteriormente expuesto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es la relación entre la precipitación y los procesos erosivos que degradan el suelo con la ocurrencia de movimientos en masa en el CTC y el CB del municipio de Cali?

1.3. Justificación

En Colombia la Ley 388 de 1997 es una de las pioneras en la reglamentación de temas tales como la clasificación del territorio, usos del suelo y la prevención de desastres en asentamientos de alto riesgo, dando paso a la generación de los primeros planes de ordenamiento territorial en

donde se incorpora la gestión del riesgo, así como también la zonificación del uso del suelo en función del riesgo por fenómenos naturales (DANE, 1997).

La ocurrencia del fenómeno de “La Niña” y todos los impactos que generó, dieron pie para la expedición de varias normativas alrededor de la gestión riesgo como lo es el Decreto 1807 de 2014; el cual incorpora la realización de mapas de delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza, para los cuales se exigen la realización de estudios básicos y análisis de datos. Este decreto fue actualizado a las nuevas exigencias y requerimientos en la identificación de zonas en condición de riesgo mediante el Decreto 1077 de 2015 (DANE, 2014).

Dentro de las exigencias expuestas por la Ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, se encuentra la elaboración de estudios de amenaza como parte de los elementos estructurales en la formulación de los planes de ordenamiento territorial (DANE, 2012). Debido a las situaciones expuestas anteriormente entidades como el OSSO y el Departamento Administrativo de Planeación Municipal (DAMP), desarrollaron el proyecto de Evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo por Movimientos en Masa en el Municipio de Santiago de Cali. De igual manera la Secretaría de Gestión de Riesgos de Emergencias y Desastres, evalúa como un área de interés por la amenaza y el riesgo de movimientos en masa la franja occidental, comprendida por las Comunas 1,18 y 20 y sectores de las Comunas 2,3 y 19 que conforman lo que se conoce como la zona de ladera de Cali (OSSO & DAMP, 2013).

En las investigaciones realizadas por las entidades previamente mencionadas se muestra que a partir de la década de los años 70 se presentó un incremento en el número de registros de movimientos en masa, esto debido a la disponibilidad de fuentes de información más confiables que permitieron identificar de manera clara estos sucesos y su relación con el progresivo crecimiento urbanístico que se ha dado en Cali hacia el sector de la ladera y al fenómeno de La Niña que trae consigo la prolongación de las lluvias y la saturación de los suelos. Conclusiones como la anterior se pueden obtener gracias al análisis de la información recopilada para la construcción de catálogos e inventarios de movimientos en masa en término de sus factores condicionantes y detonantes (OSSO & DAMP, 2016).

El presente proyecto de investigación pretende ser de interés para instituciones y entidades que realicen actividades y proyectos que involucren documentación de movimientos en masa,

también, para aquellas que requieran la incorporación de gestión del riesgo, tales como Secretaría de Gestión del Riesgo de Emergencias y Desastres, Departamento Administrativo de Planeación Municipal (DAMP), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Servicio Geológico Colombiano (SGC), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA), Empresas Municipales de Cali (EMCALI).

Entender las diferentes alteraciones entre el medio físico y el social, ha impulsado la presente investigación como un fundamento esencial para comprender la vulnerabilidad ambiental poniendo el medio físico como eje central. El cual permite el sustento de la vida y la supervivencia de los habitantes que se encuentran en él. No es lógico que las actividades realizadas por los seres humanos deterioren su propio medio de vida. Es evidente que es mejor prevenir el riesgo en lugar de tener que atender las consecuencias de su materialización.

1.4. Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos con los cuales se abordará la presente investigación.

1.4.1. Objetivo general

Determinar la relación entre la precipitación y los procesos erosivos que degradan el suelo en la ocurrencia de los movimientos en masa en el Cerro de Las Tres Cruces y el Cerro de La Bandera.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar las principales características de los movimientos en masa ocurridos en el Cerro de Las Tres Cruces y Cerro De La Bandera para el periodo comprendido entre 1985 y 2024.
- Analizar la información proveniente de las principales estaciones pluviométricas, procesos erosivos y cambios en el uso del suelo de la zona de interés, mediante el análisis de imágenes y el uso de un sistema de información geográfica.
- Establecer las relaciones de causalidad lluvia - procesos erosivos y movimientos en masa para el Cerro de Las Tres Cruces y Cerro de La Bandera.

2. Marco Teórico

El marco teórico que se presenta a continuación permite conocer definiciones y conceptos más importantes para el entendimiento del desarrollo de este proyecto. Se iniciará con la definición de movimientos en masa y la clasificación de estos. Posteriormente, se describirá en que consiste el catálogo e inventario de Movimientos en Masa y su construcción, así como también se ilustra acerca de la Relación Lluvia-Movimientos en Masa y Relación Procesos Erosivos – Movimientos en Masa y los términos básicos asociados a estas. Finalmente se definen los Sistemas de Información Geográfica y Geo sistema, Territorio y paisaje (GTP) así como también el método USLE y su utilidad en el desarrollo de este trabajo

2.1. Movimientos en Masa

Los movimientos en masa son todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras debido a la acción de la gravedad (Cruden, 1991). Son el resultado de una disminución paulatina de la resistencia de los geomateriales de las vertientes, ya sea por procesos naturales como la meteorización, y también por la acción humanas (Costa & Baker, 1981). Aunque los movimientos en masa puedan tener diferentes factores causales sólo podrán tener un detonante (Wieczorek, 1996). Dichos detonantes son factores externos, tales como la precipitación o los sismos (WangG & Sassa, 2003).

En la literatura científica hay muchas clasificaciones para los movimientos en masa. Estas clasificaciones varían según sus autores, países de origen o perfil profesionales de quienes estudian el tema (Montero Olarte, 2017). Sin embargo, la mayoría de estas clasificaciones se basan en el tipo de materiales, mecanismos de movimiento, grado de deformación de material y el grado de saturación. Otros consideran factores como la pendiente, la edad, ubicación y actividad antrópica.

Las clasificaciones de movimientos en masa más ampliamente aceptadas hoy en día son las de Varnes y Hutchinson (PMA, 2007). Varnes emplea el tipo de movimiento en masa como criterio principal y el tipo de material en segundo lugar, dividiendo los movimientos en masa en cinco (5) tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos propagaciones y flujos y los materiales en rocas y suelos, presentando varias posibles combinaciones de tipo de movimiento y material. Hutchinson

por su parte centró su trabajo en interpretar los procesos por sus rasgos geológicos y geomorfológicos reconociendo ocho (8) movimientos en las laderas: rebote, creep, hundimientos profundos de montañas, deslizamientos, movimientos de detritos de tipo flujo, volcamientos, caídas y movimientos complejos (Montero Olarte, 2017).

El Servicio Geológico Colombiano presenta en su Clasificación de Movimientos en Masa y su Distribución en Terrenos Geológicos de Colombia una recopilación de los tipos de movimientos en masa que ocurren más frecuentemente en el territorio colombiano, destacando los factores y causas más comunes que los producen estos son: caídas y rodamientos, volcamientos, deslizamientos, flujos y reptación (Montero Olarte, 2017), ver Tabla 2.

Tipo	Mecanismo	Material desplazado	Subtipo
Caídas:	Desprendimiento de material que se desplaza por el aire, brinca o rueda.	Roca y Suelos	• Caída de rocas y suelos • Rodamiento de bloques • Torrentes de bloques
Volcamientos:	Masas que rotan en un punto sin desprenderse.	Roca y detritos	• Único o múltiple de conjunto de bloques de roca. • De bloques individuales liberados por tensión. • De detritos.
Deslizamientos:	La masa se desplaza sobre una superficie de falla por cortante sin desintegrarse apreciablemente	Roca y Suelos	• Rotacional (hundimiento) • Rotacional regresivo múltiple • Traslacional planar • Traslacional en cuña compuesto
Flujo, avalanchas y deslizamientos por flujo:	La masa se mueve grandes distancias la mayor parte del trayecto en forma viscosa	Roca, detritos, tierras, lodos, turba.	• Flujos de detritos (lahares y avenidas torrenciales) • Flujos de tierras • Flujos de lodo • Avalanchas de detritos • Deslizamiento por flujos de material granular-licuación • Deslizamiento por flujo de arcilla sensitiva

Creep (Reptación):	La masa se deforma muy lentamente sin fallar	Roca, Suelos, talud	• Creep superficial • Creep profundo • Soliflucción y geliflucción (flujo)
-------------------------------	--	---------------------	--

Tabla 2. Tipos y subtipos de procesos y sus características más importantes. Tomado de (Montero Olarte, 2017)

2.1.1. Catalogo e inventario de movimientos en masa

Existen muchos tipos de datos y/o información que puede usarse para estudios relacionados con los movimientos en masa. Sin embargo, uno de los más importantes es el inventario de movimientos en masa porque brinda información como localización, tipo de movimiento, mecanismos de falla y el detonante (Van Westen et al., 2008). Debe hacerse para que se entienda la ocurrencia de los movimientos en masa y sus características esenciales. Resulta ser una buena herramienta para informar a autoridades pertinentes de manera documentada, los elementos de riesgo que se pueden impactar, tales como vidas humanas, mercado de tierras, telecomunicaciones entre otras, así como también logra hacer evidencia la gestión de un territorio ante este tipo de eventos (INGEOMINAS, 2001).

Para construir el catálogo e inventario de movimientos en masa se requiere compilar la información que se obtiene de varias fuentes como medios de comunicación y habitantes, interpretación de imágenes de sensores remotos, levantamientos de campo e información secundaria. Estas fuentes de información suministran diferentes datos, niveles de precisión y confiabilidad asociados a estas, por lo que debe analizarse con cuidado y cumplir con unos requerimientos según el caso. En algunas investigaciones en las que se ha hecho uso de estos catálogos e inventarios de movimientos en masa emplean ciertos criterios para disminuir las limitaciones que traigan consigo los datos usados, por ejemplo en realizaron una depuración de base de datos con base en 4 criterios uno de ellos fue solo incluir eventos de movimientos en masa ocurridos entre los años 1989 y 2008 debido a que en este periodo de tiempo se contaba con más datos por el aumento de las fuentes de información (Aristizábal et al., 2011).

2.2. Relación lluvia movimientos en masa

El estudio de las precipitaciones como un factor desencadenante de los movimientos en masa ha sido amplio y especializado. Varios autores han desarrollado investigaciones al respecto mundialmente y con diferentes perspectivas desde finales del siglo XX (Portilla Gamboa, 2014).

Uno de los tópicos de mayor enfoque por parte de los investigadores ha sido la búsqueda de umbrales que debe alcanzar un factor detonante como la lluvia para que se genere un movimiento en masa (Rodríguez Castiblanco, 2017). Para este fin se han empleado métodos heurísticos, relacionados directamente con el concepto y estudio del fenómeno por parte expertos o métodos determinísticos o estadísticos. Adicionalmente también hay avances en estudios sobre las precipitaciones de mayor influencia para accionar movimientos en masa, si la lluvia a largo o corto plazo y con esto también la definición de índices de susceptibilidad ante eventos de remoción en masa, implementación de sistemas de alerta temprana para momentos en los que la lluvia diaria acumulada alcanza un determinado valor (Mayorga Márquez, 2003)

La evaluación de las precipitaciones como un factor detonante de los movimientos en masa consiste en su mayoría en determinar parámetros de intensidad y duración (Mayorga Márquez, 2003). Se consideran 2 tipos de efectos principales de precipitación: el efecto acumulado de la lluvia o precipitación a largo plazo y el efecto inmediato de la lluvia o precipitación a corto plazo que se presenta justo antes de la ocurrencia del evento. En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2002) emplea definiciones específicas para evaluar la lluvia en diferentes plazos: de largo plazo (de 1 a 180 días antes del evento) y de corto plazo (de 1 a 24 horas antes del evento). Este enfoque permite la implementación de un modelo en tiempo real para el pronóstico de amenazas por movimientos en masa desencadenados por lluvias. A nivel global, los umbrales críticos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa han sido ampliamente incorporados en los principales sistemas de alerta temprana. No obstante, en Colombia, y particularmente en el valle de Aburrá, la investigación sobre la influencia de la lluvia como factor desencadenante de estos eventos ha sido limitada. Según Aristizábal, Gamboa y Leoz (2010), solo a partir de 2008, tras los estudios de Moreno et al. (2006), se comenzaron a incorporar estos umbrales críticos en el Sistema de Alerta Temprana (SIATA). Esta incorporación representa un avance significativo en el desarrollo de sistemas locales de alerta temprana, alineándose con las prácticas internacionales en la gestión de riesgos por movimientos en masa.

El efecto de la lluvia sobre un movimiento en masa varía según las condiciones locales de donde se originó. Si se establece que el factor causante de un evento de remoción en masa es la lluvia, las lluvias precedentes relacionadas con la humedad y el nivel freático con el que cuenta la

zona de estudio son de gran importancia al determinar la intensidad y duración de lluvia necesaria para determinar el desencadenamiento de un movimiento en masa (Mayorga Márquez, 2003).

2.3. Relación procesos erosivos – movimientos en masa

La erosión del suelo es el proceso de remoción, arranque y transporte de los elementos que componen la capa más superficial del suelo (Alonso et al., 2011).

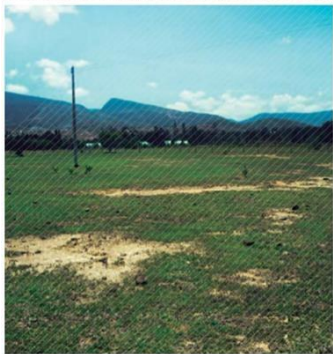
La erosión natural o geológica es aquella que se genera debido a la actuación de agentes o factores naturales como lo son el deshielo, el viento, el agua, entre otros sobre las primeras capas del suelo o roca. Por otra parte, cuando se alteran procesos naturales por acción del hombre con actividades como el laboreo en el sentido de la pendiente, cultivos, compactación del terreno, deforestación, quemas y minería estamos hablando de una erosión acelerada o erosión antrópica (Rodríguez Castiblanco, 2017).

Zachar (1982), plantea una terminología de clasificación para los principales tipos de erosión por agentes activos, siendo el agua y el viento unos de los más importantes, estos tipos de erosiones afectan grandes territorios y son considerables en temas de la economía de la tierra. La tabla 3 presenta esa clasificación (Zachar, 1982).

Factor	Tipo de Erosión
1. Agua	Hídrica
1.1 Lluvia	Pluvial
1.2 Flujo superficial	Laminar
1.3 Flujo concentrado	Lineal
1.4 Río	Fluvial
1.5 Lagos, reservas de agua	Lacustre
2. Glaciar	Glacial
3. Nieve	Nival
4. Viento	Eólica
5. Tierra	Soligénica
6. Organismos	Organogénica
6.1 Plantas	Fitogénica
6.2 Animales	Zoogénica
6.3 Hombre	Antropogénica

Tabla 3. Clasificación de los principales tipos de erosión. Tomado de (Zachar, 1982)

Debido a la acción del agua en sus diferentes manifestaciones (precipitaciones, flujos subterráneos, escurrimiento superficial, etc.) se genera un proceso de pérdida de la capa superficial del suelo por disgregación y transporte de las partículas. En la tabla 4 se presentan las principales clases de erosión hídrica.

Clase de Erosión Hídrica	
Erosión laminar o surquillos	La erosión laminar es la remoción uniforme de una fina capa de suelo, generalmente causada por la acción del agua superficial que fluye de manera dispersa. A diferencia de otros tipos de erosión, como la erosión en surcos, la erosión laminar no forma canales visibles en la superficie, lo que la hace menos perceptible, especialmente en sus etapas iniciales. Por ello, se le llama "calvas de erosión," ya que puede pasar desapercibida hasta que el suelo ha sido significativamente afectado.  Figura 1 Erosión hídrica laminar severa, con abundantes calvas de erosión, por sobrepastoreo Sáchica – Boyacá (marzo 2010).
Cárcavas	El agua que arrastra y corta el suelo a lo largo de una línea de flujo causa erosión en cárcavas. En los surcos del arado, en los senderos creados por los animales, en las grietas causadas por las llantas de los vehículos, entre las hileras de plantas de cultivo, y por debajo de rupturas de terrazas creadas por el ser humano, se forman cárcavas.  Figura 2 Erosión en cárcavas profundas. Villa de Leyva-Boyacá. Sistema de cárcavas en laderas quebradas. Sora-Boyacá.

Surcos

Un surco es un canal o depresión lineal en el suelo que expulsa agua después de las precipitaciones. En su mayor parte, las series de líneas paralelas componen los surcos que se alinean de forma perpendicular a la pendiente.



Figura 3 Erosión en surcos moderada, con pérdida del horizonte superficial. Gachantivá -Boyacá.

Salpicadura

La erosión producida por las gotas de lluvia ocurre cuando el impacto de las gotas golpea el suelo desnudo a alta velocidad, fragmentando los gránulos y agregados del suelo. Esta acción, conocida como salpicadura, desprende partículas del suelo, aunque las mueve solo a distancias cortas. Sin embargo, el flujo superficial ligero transporta estas partículas a mayores distancias, exacerbando la erosión y contribuyendo a la pérdida de suelo.



Figura 4 Erosión producida por salpicadura.

Tabla 4. Clases de erosión hídrica, adaptado de (IDEAM, 2015).

La erosión antrópica resulta de diversas prácticas que afectan el deterioro y desgaste del suelo. Entre estas actividades se encuentran la agricultura intensiva, la tala de bosques, la construcción de infraestructura como canales y carreteras, la expansión urbana, la ganadería intensiva y la minería, entre otras (Editorial Etecé, 2023)

Todos esos cambios del uso del suelo presentan gran influencia en la estabilidad de las laderas, el aumento de la dinámica poblacional en los territorios genera un alza en la iniciación y la reactivación de movimientos en masa (Rodríguez Castiblanco, 2017).

La deforestación se considera uno de los causantes de los procesos de erosión de los suelos al remover la cubierta vegetal de la capa superficial del suelo se pierde la protección contra los agentes erosivos, en particular la agresividad de las lluvias y la escorrentía, por ende, se evidencia la ocurrencia de movimientos en masa sucesivos a la pérdida o remoción de la vegetación (Rodríguez Castiblanco, 2017).

2.4. Sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas informáticas, que nos permite gestionar y analizar la información georreferenciada, para así contribuir en la solución de problemáticas territoriales y medio ambientales (Santos Preciado, 2004). Mediante un SIG es posible combinar información gráfica, como mapas, y alfanumérica, tales como datos estadísticos, valores asignados, etc., para tener como resultado una información derivada del espacio.

Los SIG están siendo utilizados como una herramienta para complementar los análisis sobre el medio ambiente, en particular como se dijo anteriormente para detectar los impactos medioambientales relacionados con problemas de usos del suelo, deforestación entre otros. Su aplicación nos da la posibilidad de cuantificar, medir y visualizar áreas y problemáticas ambientales significantes y su proceso evolutivo a través del tiempo (Flórez-Yepes et al., 2017).

En los últimos años se han desarrollado muchas técnicas para el estudio de zonas que presentan mayor probabilidad de presentar eventos de remoción en masa y los sistemas de información geográfica han mostrado ser una herramienta de gran apoyo para estas técnicas, ya que permite analizar las áreas de terreno inestables por medio de su sistema de superposición de capas, donde cada una de estas representa diferente información relacionada, como pendiente o cobertura vegetal (Garciano, 2015).

Uno de los SIG más empleados es ArcGIS Desktop (ArcGIS), el cual es el principal componente de la suite de aplicaciones de ArcGIS Ergis, este sistema nos permite, recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.

2.5. Pendientes y su relación con movimientos en masa

La pendiente es una medida fundamental en geomorfología y describe la inclinación de una superficie respecto a un plano horizontal. Este parámetro, generalmente expresado en grados o porcentaje, es crucial para entender procesos geológicos y ambientales, como la erosión, la estabilidad de taludes y el flujo de agua superficial (Evans, 1972; Burrough, 1986). El análisis de pendientes es una herramienta esencial en la planificación de infraestructuras y la gestión del uso del suelo (McKean & Roering, 2004).

Los mapas de pendientes representan gráficamente la variabilidad de la inclinación del terreno. Estos mapas son esenciales en la identificación de áreas susceptibles a deslizamientos de

tierra, la planificación de proyectos de construcción y la gestión de recursos naturales. Además, desempeñan un papel crucial en estudios hidrológicos, dado que la pendiente influye directamente en la velocidad y el volumen de la escorrentía superficial (Moore et al., 1991).

2.6. Método USLE

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es un enfoque cuantitativo para estimar la erosión del suelo causada por la lluvia. Se basa en el análisis de cómo el suelo reacciona a la precipitación, considerando factores como el clima, la susceptibilidad del suelo a la erosión y otros elementos ambientales. La USLE asigna importancia a seis factores clave que influyen en el proceso erosivo, tratándolos como variables independientes (Rutebuka et al., 2020).

La USLE se expresa, en el sistema métrico internacional, como:

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

Donde:

A, es la pérdida de suelo en t/ha. año.

R, es el factor erosividad de la lluvia en MJmm/a. año.

K, es el factor erosionabilidad el suelo en (t/ha) / (Mj.mm/ha.h)

L, es el factor longitud del terreno (adimensional).

S, es el factor pendiente del terreno (adimensional).

C, es el factor cobertura y manejo de la vegetación (adimensional).

P, es el factor prácticas de conservación (adimensional).

Factor R o Factor de erosividad de la lluvia: Este parámetro indica la capacidad de la lluvia para causar erosión. Se determina considerando la energía cinética de la precipitación, que es la fuerza necesaria para desintegrar el suelo en partículas individuales que luego son arrastradas por la salpicadura o el flujo superficial. Al igual que otras variables climáticas locales (como la cantidad de lluvia), el valor del factor R se obtiene a partir de datos mensuales y anuales de precipitación, utilizando el Índice Modificado de Fournier (IMF) según la metodología propuesta por Rutebuka et al. (2020).

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

Factor K O Factor De Erosionabilidad Del Suelo: El factor de erosión del suelo, conocido como factor K, representa la vulnerabilidad del suelo a la erosión y está determinado por características edáficas como la textura, estructura, estabilidad de los agregados y presencia de piedras en la superficie. El valor de K en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) se determina mediante mediciones directas en el campo durante un año, observando las pérdidas de suelo causadas por la lluvia en condiciones normalizadas para las parcelas específicas de la USLE.

Factor LS o Factor Topográfico: El factor LS, que combina la longitud y la inclinación de una pendiente, refleja el efecto combinado de estos dos elementos en la pérdida de suelo. El factor de longitud de la pendiente muestra cómo varía la pérdida de suelo a lo largo de una pendiente particular en comparación con una pendiente estándar, mientras que el factor de magnitud de la pendiente indica la pérdida de suelo en una superficie con una inclinación específica frente a una pendiente estándar utilizada para estimar estas pérdidas (Castro et al., 2022).

El Factor C Cobertura Y Manejo De La Vegetación: Referido a la protección de la cobertura vegetal al suelo cuando intercepta las gotas de lluvia amortiguando su energía de impacto disminuyendo el efecto erosivo, se determina a partir del mapa temático de cobertura, determinándose los valores de C en el mapa (Portuguez M., 2015).

La determinación de C se hace a partir de valores tabulados según se trate de cultivos agrícolas o vegetación forestal. Wischmeier & Smith (1978), publicaron numerosas tablas del factor C por tipos de cultivos, etapa de desarrollo y sistemas de manejo. Así como también una tabla para vegetación de gramínea-arbustal y otra para bosque (Barrios, 1995).

Dissmeyer & Foster (1983), presentan un procedimiento paramétrico para estimar el factor C en tierras forestales basado en subfactores como: porcentaje de suelo desnudo, porcentaje de suelo desnudo con matriz densa de raíces finas, cobertura y altura del dosel y contenido de materia orgánica.

Factor P Prácticas De Conservación: El valor del factor P refleja el efecto de las prácticas de conservación del suelo que modifican la topografía, como las curvas a nivel, los cultivos en

fajas o las terrazas. Según Wischmeier & Smith (1978), se determinaron los valores más comunes de P basados en estas prácticas y la pendiente. Además, (Núñez & Solís, 2001) presentó una actualización de estos valores realizada por Mitchell & Burbenzer (1984). Para calcular el valor de P, es necesario conocer el porcentaje de pendiente del suelo en estudio y el tipo de práctica de conservación aplicada.

2.7. Sistema GTP (Geo sistema, territorio, paisaje)

El concepto GTP (Geo sistema, Territorio, Paisaje) para la investigación analítica del caso de estudio, busca direccionar el desarrollo de la metodología, hacia un ámbito en el que se pretende conectar el sistema biofísico, con el territorio y los diferentes eventos naturales; es decir, que aplica un orden geográfico, para controlar la diversidad y la interactividad de los sistemas medioambientales con sus efectos de cambios en el suelo. El estudiar el sistema biofísico, con el territorio y los diferentes eventos naturales, de acuerdo al tiempo y espacio permite sobrepasar las limitaciones cronológicas, identificación y cuantificación de procesos erosivos futuros, obteniendo indicadores que puedan prevenir cambio en las características de los suelos de las áreas a intervenir en diferentes procesos del uso de los mismos, ayudando además a buscar una serie de medidas positivas en el uso del suelo y a su vez de sostenibilidad y preservación del recurso natural. Entender las interacciones entre los actores de un sistema, permite comprender las implicaciones de estas, la relación entre lo natural y sus diferentes procesos biofísicos, permite generar reglas para mediar las interacciones naturales y de los agentes con el entorno de sus ciclos. La relación entre el entorno biótico, el esquema de sus efectos de erosión y movimientos en masa, como lo es para este caso de estudio, obteniendo indicadores de las tres (3) variables que se relacionaran en el modelo metodológico el sistema GTP.

La aproximación al paisaje, en este caso cambio del paisaje por efectos producidos por la erosión surge del geo sistema (en lo biofísico) la precipitación medida en la zona de estudio del CTC y el CB ubicados en la ciudad de Cali, y cambio en el territorio (diferentes movimientos en masa presionados por los diferentes factores que afectan el suelo). La información y el conocimiento contextual permiten una mayor referencia para el acercamiento desde los cambios del suelo, al cambio en el paisaje ejercido por las otras dos (2) variables que intervienen en el sistema del caso de estudio, como se pretende desarrollar en la metodología.

El sistema GTP (Geo sistema, Territorio, Paisaje) es la propuesta teórica y metodológica fundada en 3 conceptos espaciotemporales: geo sistema, territorio, paisaje (GTP); es un intento de orden geográfico, físico, biofísico y de los diferentes efectos en los cambios del suelo para determinar a la vez, la diversidad y la interactividad de todos los subsistemas que interactúan en el caso de estudio en la evolución, que se han presentado en un determinado tiempo de las mediciones de estas tres variables, concluyendo como se puede relacionar el cambio del suelo con la intervención de las mismas (Bertrand & Georges, 2006).

3. Antecedentes

Tanto a nivel nacional como internacional existen una amplia variedad de artículos publicados con relación a los movimientos en masa y sus factores detonantes, un ejemplo de ello es la investigación “Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia” desarrollada por Aristizábal et al. (2011) definieron mediante la construcción de una base de datos de movimientos en masa y del uso de una base de datos de precipitaciones umbrales críticos de lluvia por métodos empíricos y su relación con movimientos en masa, obteniendo que el mayor condicionante para la ocurrencia de los eventos dentro del Valle de Aburrá es la lluvia acumulada antecedente LAA o lluvia largo plazo, en la figura 5 se muestra la relación entre la precipitación media mensual y los movimientos en masa encontrada por los autores, se observa que los meses donde se presenta mayor precipitación tienen una relación directamente proporcional con la cantidad de movimientos en masa registrados, sin embargo, los autores recomiendan más investigaciones y un trabajo de campo para la verificación de dichos resultados debido a las limitaciones propias al método empírico usado.

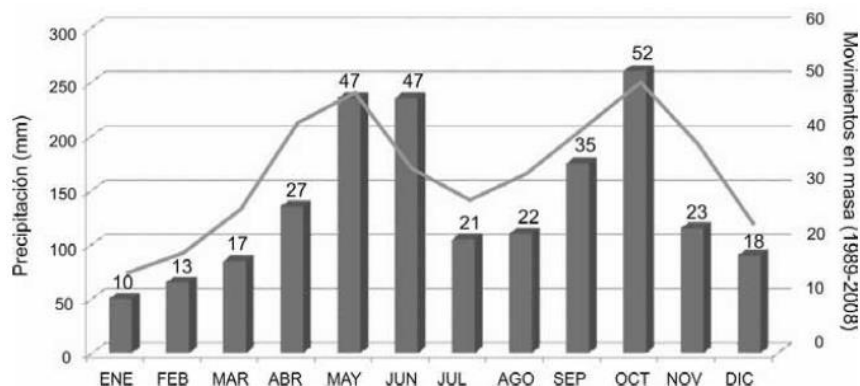


Figura 5. Relación entre la precipitación media mensual en el Valle de Aburrá (EPM, 2005) y los movimientos en masa del periodo 1989-2008 (Aristizábal et al., 2011)

En 2002 el IDEAM implementó el desarrollo de un modelo para el pronóstico en tiempo real de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia en Colombia, teniendo en cuenta que en épocas de variabilidad climática se incrementa la frecuencia e intensidad de los deslizamientos. Además de que las causas de eventos como deslizamientos, avalanchas, entre otros son en un 96% meteorológicas, de estas 56% son por lluvias prolongadas o persistentes y el 37% por lluvias intensas de corta duración, haciendo clara la relación lluvia – deslizamiento. Donde finalmente establecieron los porcentajes de susceptibilidad del terreno a deslizamientos para el territorio nacional como se puede observar en la figura 6, proponiendo para Colombia el modelo de lluvia crítica para deslizamientos y generando mapas instantáneos de permiten la especialización del pronóstico de la amenaza por deslizamientos, adicionalmente sugieren que el modelo permitirá avanzar en el proceso de implementación de la cultura de prevención de desastres y que deberá ser usado como una herramienta de pronóstico de orden nacional (IDEAM, 2002)

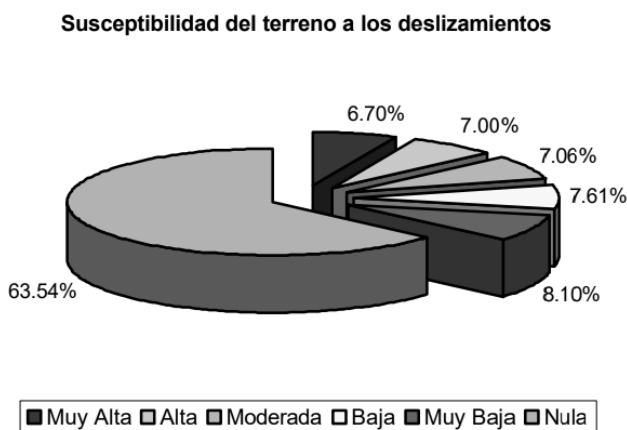


Figura 6. Susceptibilidad del terreno a los deslizamientos (IDEAM, 2002)

De igual manera también se encuentran investigaciones centradas en el cambio de la cobertura vegetal y el impacto ambiental generado por las diferentes actividades que se desarrollan en las zonas de estudio como minería o producción agropecuaria como Flórez-Yepes et al. (2017) donde hicieron uso de fotografías aéreas de Google Earth y cartografía enfocándose en 3 periodos de tiempo anuales y así poder establecer la influencia de la minería en la zona de Maltería, Manizales. Al terminar su estudio concluyen que usar la metodología de análisis multitemporal facilita incorporar los elementos de una zona de estudio a nivel ambiental y establecer una relación entre los cambios presentados en estos y los factores externos que los generan. También presentan esta metodología como una buena herramienta para la planificación del territorio en pro de encontrar soluciones a problemas presentados de una manera más ordenada y efectiva.

El uso de Sistemas de Información Geográfica y de metodología como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (modelo USLE) permiten hacer estimaciones de la pérdida de los suelos por la erosión hídrica, el estudio realizado por Portuguez M. (2015) demuestra el potencial de los SIG mediante una aplicación práctica para investigar la erosión en la parte alta de la cuenca del río Sigüas en Arequipa. Se empleó el modelo USLE para calcular las tasas de pérdida de suelo y crear un mapa que identifica las áreas más susceptibles a la erosión.

También Honorato et al. (2001), en su investigación evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y IX Región de Chile se buscó evaluar la precisión de las predicciones de erosión hídrica del modelo USLE en 42 situaciones agroecológicas en 6 localidades de Chile, entre la IV y IX Región. Se compararon las estimaciones de erosión del modelo con mediciones reales obtenidas en parcelas experimentales por distintos investigadores,

considerando un rango de precipitación de 100 a 1800 mm. El modelo demostró ser efectivo en predecir la erosión en localidades con una erosión significativa ($>2,5$ t/ha año) y prácticas de manejo que favorecían la erosión, como suelo desnudo y labranza tradicional. En estos casos, los valores estimados por el modelo no superaron el 50% de la erosión observada, con una probabilidad del 0,05.

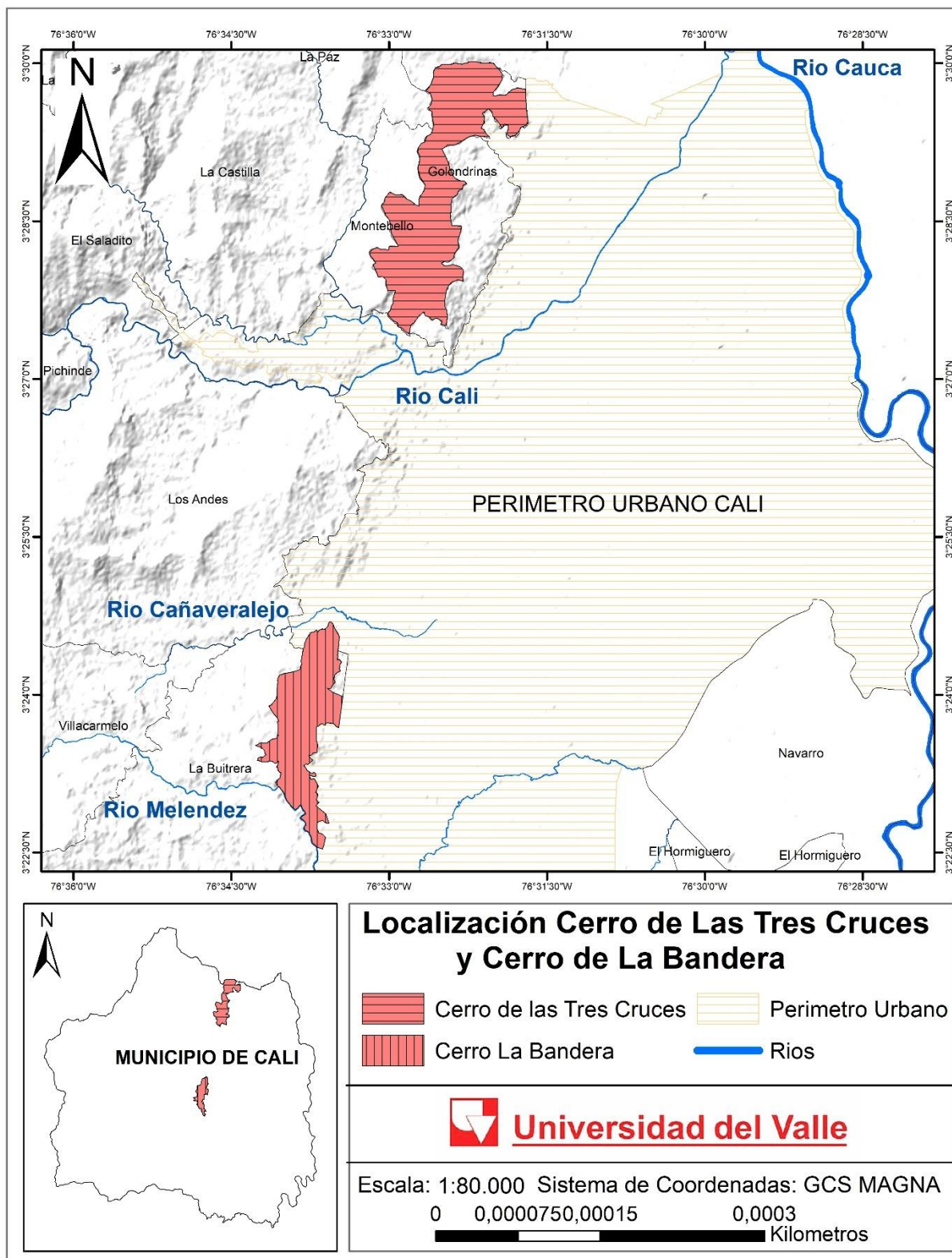
4. Área de estudio

El municipio de Santiago de Cali cuenta con una superficie total de 561.7 km^2 , de los cuales, 119.2 km^2 corresponden a la zona urbana, una temperatura de 25.5°C , una precipitación anual (mm) de 752.0 y una humedad relativa media anual (%) de 66.6 (OSSO & DAMP, 2016). Dentro de esta ciudad se encuentra ubicada el área de estudio, específicamente el CTC al noroccidente de la ciudad y el CB al suroccidente.

El CTC es un Cerro tutelar ubicado en el corregimiento de Montebello en el área rural del municipio. Está ubicado al noroccidente de la ciudad y tiene 1480 m s. n. m. En su cima se encuentran el monumento de las Tres Cruces, una estación de policía y varias antenas de telecomunicaciones. cubre el 0,80 % del área total del municipio de Santiago de Cali con 491,92 hectáreas (DAPM, 2008). Por otra parte, el CB Es otro de los cerros tutelares de la ciudad, ubicado en el corregimiento de La Buitrera entre las cuencas de los ríos Cañaveralejo y Meléndez, tiene influencia en las Comunas 18 y 19, comprende una extensión de 276,4 hectáreas (POT, 2014)

En las zonas de Cali se presentan problemas de erosión y deslizamiento, además de un significativo riesgo sísmico. Este riesgo se debe a la ubicación en una región interplaca (microplaca) y a la interacción de las placas Nazca, Sudamericana y Caribe (DAMP, 1994). La microzonificación sísmica muestra que, aunque el riesgo varía según la localidad, toda la ciudad se encuentra en una zona de alto riesgo sísmico debido a múltiples fuentes sísmicas que afectan a Cali.

Para llevar a cabo el estudio se seleccionaron los sectores anteriormente nombrados como se presenta en el Mapa 1. Según información secundaria recolectada, dichos sectores presentan problemas relacionados con sus condiciones topográficas y geomorfológicas que pueden ser impactadas con factores externos como la precipitación o la degradación de su suelo por procesos de carácter erosivo lo cual crea el escenario propicio para la ocurrencia de un movimiento en masa.



Mapa 1. Localización de la zona de estudio, elaboración propia con información del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, Alcaldía de Santiago de Cali.

5. Metodología

El presente trabajo constituye una investigación analítica con el objetivo de determinar la relación entre las variables implicadas en la ocurrencia de movimientos en masa. Las principales variables de interés en esta investigación incluyen los movimientos en masa, las precipitaciones y los procesos erosivos. El desarrollo de la investigación se estructuró en tres fases principales, cada una diseñada para cumplir objetivos específicos del estudio, y se inició con una fase preliminar enfocada en la recopilación, depuración y compilación de la información necesaria.

Para proporcionar una visión clara de la metodología utilizada, a continuación, en la Figura 7, se presenta una esquematización detallada del enfoque del proyecto. Esta figura ilustra la estructura general del trabajo, que incluye tanto la fase previa como las fases de desarrollo del proyecto, y se describe de la siguiente manera:

Fase Previa: Esta fase inicial está dedicada a la recopilación exhaustiva de datos relevantes, así como a la depuración y compilación de la información. Este proceso es crucial para asegurar que los datos utilizados en las siguientes fases sean precisos y estén bien organizados.

Fase 1: En esta fase se lleva a cabo la caracterización de los escenarios en los que se han registrado movimientos en masa. Se analizan las condiciones y características de estos eventos para establecer un marco de referencia sólido para la investigación.

Fase 2: Esta fase se enfoca en el procesamiento de los datos recopilados, específicamente en relación con las variables implicadas en la investigación. Aquí se realiza un análisis detallado de las precipitaciones y los procesos erosivos, con el fin de identificar patrones y correlaciones significativas.

Fase 3: En la fase final, se define la relación causal entre las variables investigadas y la ocurrencia de movimientos en masa. Esta fase integra los hallazgos de las fases anteriores para establecer conexiones directas y causales, proporcionando una comprensión integral de los factores que desencadenan estos eventos.

Cada una de estas fases está compuesta por una serie de actividades específicas que se implementarán para llevar a cabo el análisis detallado de los resultados como se ilustra en la Figura 7, mostrando cómo se conectan y se integran en el marco metodológico del proyecto.

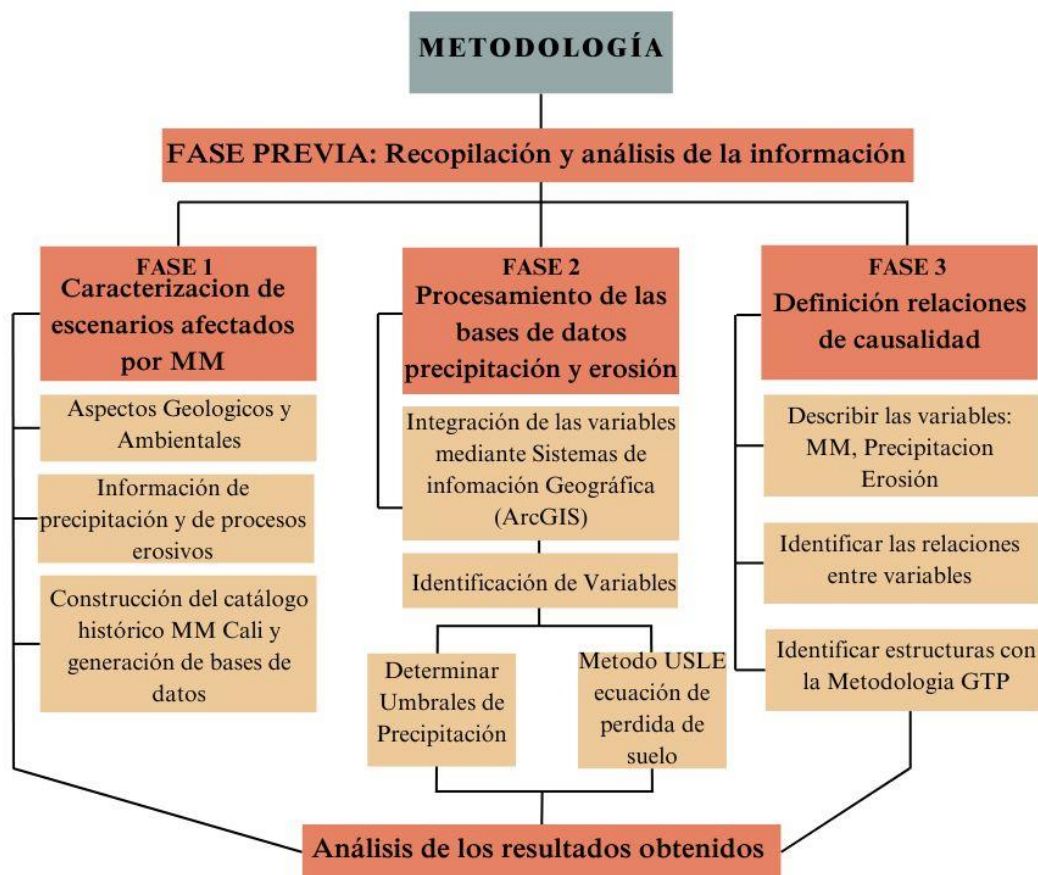


Figura 7. Metodología del proyecto, elaboración propia.

5.1. Fase previa: recopilación, depuración y compilación de información

Esta fase corresponde a la recolección y el análisis de toda la información relacionada con el estudio con el soporte de las entidades del municipio de Santiago de Cali como por ejemplo, La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), la Dirección Municipal para la Gestión del Riesgo de Emergencias y Desastres (DGRD), el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA), el Departamento Administrativo de Planeación Municipal (DAPM), la Universidad del Valle, y todas las entidades y fuentes de información que se consideren relevantes y que posibiliten la aclaración de nuestro problema de investigación. Con esta recopilación de información relevante se permite determinar la relación entre las variables hidro climatológicas como lo son la precipitación y la degradación del suelo por erosión con la remoción en masa en dos zonas específicas abarcando todas las condiciones que propician la ocurrencia de estos eventos.

Se llevó a cabo una consulta exhaustiva sobre la ocurrencia de movimientos en masa en la zona de estudio, recurriendo a las principales entidades responsables de la gestión del riesgo y la zonificación de amenazas. Entre estas entidades se incluyeron la plataforma SIMMA del Servicio Geológico Colombiano, el inventario del IDEAM, y los medios de comunicación locales como el Diario El País, El Tiempo y ADN. Además, se solicitó un recopilado histórico de eventos de movimientos en masa a la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres y a la Dirección de Gestión del Medio Ambiente del municipio de Cali; igualmente se revisó la bibliografía existente referente al tema (estudios previos, tesis, informes, etc.). De la misma forma se realizó la revisión de bibliografía referente al comportamiento de los agentes hidro climatológicos en el sector de estudio. Igualmente se acudió a referentes, tanto en el ámbito local como nacional en cuanto al grado de degradación del suelo por agentes erosivos. Una vez recopilada la mayor cantidad de información posible se inicia el proceso de depuración de los datos, lo que implica la eliminación de datos que no tengan una referencia concreta o que simplemente no son relevantes para cumplir los objetivos de la investigación en curso

5.2. Fase 1: Caracterización de escenarios afectados por movimientos en masa

5.2.1. Aspectos geológicos, geomorfológicos y ambientales de la zona de estudio

Se utilizó información primaria y secundaria, presente en registros históricos de entidades municipales y departamentales como la CVC, el DAGMA y el SGC, además de hacer uso de los datos abiertos del IGAC y memorias explicativas de mapas de geomorfología enfocada en movimientos en masa y mapas geológicos.

Como una variable muy importante del estudio se generó una identificación de factores condicionantes los cuales representan la base que determina la vulnerabilidad de un sector a sufrir movimientos relacionados a la remoción en masa, dentro de estos factores se encuentran la geología, la geomorfología, la hidrología y el uso del suelo.

5.2.2. Información de precipitación y procesos erosivos

Adicionalmente se identificaron los factores principales desencadenantes de movimientos en masa naturales y antrópicos como las variables hidrometeorológicas (precipitaciones), y los antrópicos representados por la actividad minera que se presentaba en la historicidad de las zonas de estudio, se realizó la búsqueda de variables hidro climatológicas para las fechas en las que se tuviera registro de ocurrencia de movimiento en masa desde fuentes certificadas como el IDEAM

y se realizó una evaluación individual de cada uno de los eventos ocurridos con los factores detonantes que correspondan a la precipitación. En cuanto a la obtención de información sobre el grado de erosión de suelo, se tomó información de datos abiertos del IGAC y de la CVC para posteriormente relacionar e integrar la información obtenida en el catálogo con la información sobre la degradación del suelo por erosión que sea obtenida.

5.2.3. Construcción del catálogo histórico de MM y generación de bases de datos

Posteriormente, se realizó la construcción de un catálogo de movimientos en masa ocurridos en los sectores correspondientes al CTC y el CB. Con esta actividad se pretendía realizar la zonificación en particular para cada uno de los cerros, investigar sobre la causa que promovió el escenario de riesgo y el factor desencadenante de dicho evento.

Finalmente se realiza una integración de toda la información con el fin de visualizar los factores anteriormente nombrados y evidenciar su relación con la ocurrencia de movimientos en masa por medio de softwares de sistemas de información geográfica, en este caso ArcGIS en la interfaz ArcMap y se elabora la cartografía correspondiente siguiendo los lineamientos del Servicio Geológico Colombiano.

5.3. Fase 2: Procesamiento de las bases de datos de precipitación y degradación del suelo por erosión

5.3.1. Procesamiento datos de lluvia

Según Aristizábal et al. (2011), tras la georreferenciación de los movimientos en masa y de las estaciones pluviométricas, se deben considerar dos conceptos clave: la lluvia de corto plazo (LC) y la lluvia de largo plazo (LL). La lluvia de corto plazo será la cantidad de lluvia que cayó los días previos al movimiento en masa, evaluada en 1, 3, 5 y 7 días y la lluvia de largo plazo hará referencia a la cantidad de lluvia que cayó los días antes a los días evaluados en la lluvia acumulada o de corto plazo, que serán para este caso 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días. La cantidad de lluvia será medida en milímetros. Con estos datos se busca comparar la lluvia de corto plazo para los días determinados, con la lluvia de largo plazo en función de su cantidad en milímetros para cada uno de los movimientos en masa seleccionado. Al igual que Aristizábal et al. (2011), se llevará a cabo un análisis visual mediante la elaboración de gráficas en Microsoft Excel. Estas gráficas mostrarán los patrones de dispersión de los movimientos en masa y permitirán visualizar el

comportamiento de los deslizamientos en relación con las precipitaciones. Adicionalmente se crearon gráficas que permitieron relacionar la precipitación media anual con la cantidad de movimientos en masa para el periodo de estudio. Esta metodología de trabajo será ajustada según se den las necesidades de la investigación “Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia” (Aristizábal et al., 2011).

5.3.2. Procesamientos de datos de procesos erosivos por medio de ArcGIS

Tras la recopilación de imágenes aéreas, satelitales y cartografía disponible para la zona de estudio, se determinaron con mayor precisión las fechas que se utilizarían en el análisis multitemporal, con énfasis en el período comprendido entre 1980 y 2023. Este proceso se complementó con documentación de referencia para filtrar mejor la información. El software ArcGIS procesará los datos espaciales relacionados con procesos erosivos. Se inició con la georreferenciación la cartografía disponible, es necesario que esta se encuentre en el datum MAGNA-SIRGAS, por ende, si los mapas obtenidos son anteriores a la fecha que entró en vigor este sistema de referencia se debe proyectar para actualizarlo a este. Cada imagen fue georreferenciada contando como base la cartografía anterior, se tomaron como mínimo de 10 a 12 puntos de control alrededor del terreno de estudio. Mediante el método USLE, se pudieron establecer los factores determinantes de la pérdida de suelo por erosión, lo cual nos generó una capa para cada cerro donde se muestra el nivel de erosión de cada área específica.

Posteriormente, se inició el proceso de identificación del área de estudio, áreas de terrenos erosionados, áreas de actividad antrópica y digitalización de estas. Para el adecuado manejo de la información, se crearon nuevos campos para cada ítem, así se obtuvieron, para cada evidencia de erosión, nombre de la ladera, la fecha de la imagen con la que se digitalizó, a que área corresponde y el cálculo de su área. Permitiendo realizar finalmente el análisis multitemporal de la zona de estudio.

5.4. Fase 3: Definición relaciones de causalidad

Para el desarrollo de la fase 3 se implementará la metodología sistema GTP: Geo Sistema, Territorio y Paisaje, que se realizará progresivamente en tres (3) actividades.

5.4.1. Describir los tres conceptos o nociones espaciotemporales de las variables para determinar su relación.

Para implementar la metodología del sistema GTP (Geosistema, Paisaje y Territorio), se definen con mayor precisión las variables a investigar. En este contexto, el geosistema se refiere a la entrada biofísica, que incluye las precipitaciones y el grado de antropización. El territorio se analiza e integra en su transformación debido a los movimientos en masa, específicamente el desplazamiento del suelo. Por su parte, el paisaje se considera como la entrada de procesos erosivos que afectan el sistema en su conjunto. A continuación, en la Figura 8, se observa la esquematización de la metodología GTP, que ilustra cada uno de los componentes que deben ser analizados para cada factor.

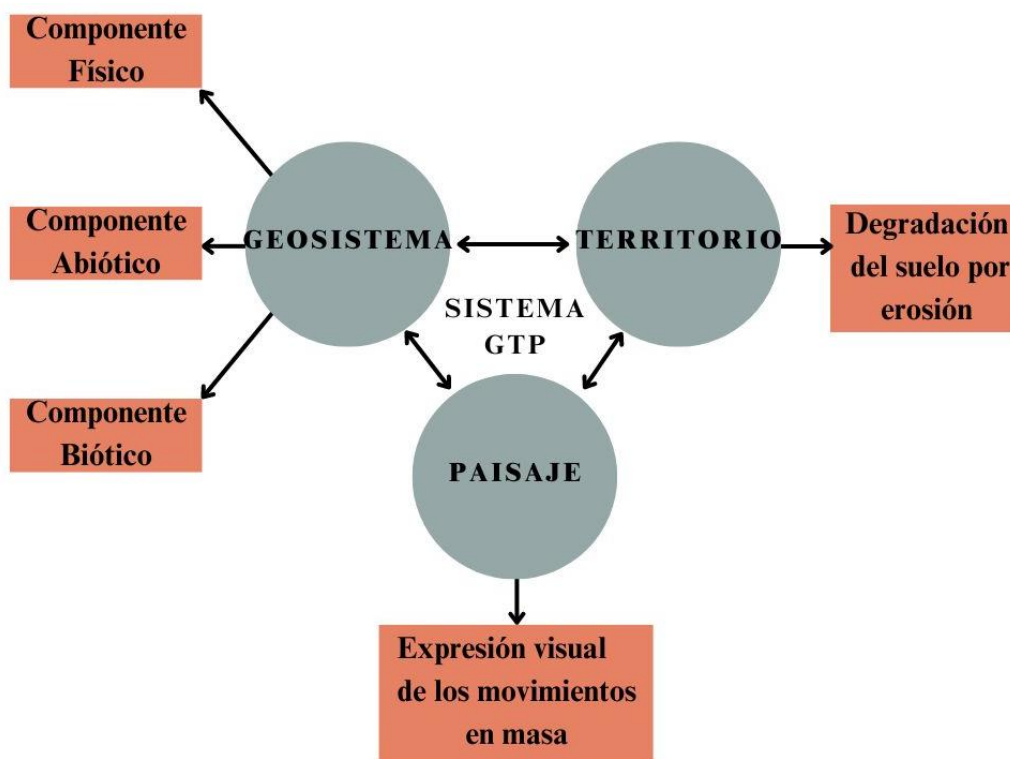


Figura 8. Metodología GTP, Elaboración propia

Dicha metodología se construyó buscando establecer la relación entre las variables de: precipitación, movimientos en masa y procesos erosivos, buscando reconocer los elementos biofísicos y su dinámica mediante la identificación de la “causalidad y distribución geográfica de las amenazas naturales inherentes a la dinámica de los procesos morfodinámicos que funcionan en los relieves y modelos del territorio nacional donde se encuentra la zona de estudio que son el CTC y el CB ubicados en la ciudad de Cali.

5.4.2. Identificar las relaciones e interacciones entre las variables.

Al identificar las relaciones e interacciones entre los diferentes componentes constitutivos del sistema objeto de estudio se parte de la hipótesis que la modificación que las variables está relacionada con el sistema biofísico, movimientos en masa y procesos erosivos y que los instrumentos de planificación y las zonas donde se encuentran los cerros seleccionados, no están configurados de manera adecuada para responder a las modificaciones e impactos de estos cambios futuros por diferentes eventos naturales que puedan existir y así ejercer un cambio en el suelo.

En el desarrollo de la metodología las determinantes físicas y biofísicas de la zona de estudio se identifican como componentes espaciotemporales, las cuales describen el geosistema, territorio y paisaje y establecen sus relaciones, interacciones y funciones que comprenden el sistema GTP en el CTC y CB.

Para la identificación de los componentes del geosistema y territorio de debe considerar la disponibilidad de información regional y una información de cobertura nacional que sea suministrada por entidades oficiales en la materia, como los institutos de investigación del Sistema Nacional Ambiental (SINA), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), entre otros. Se analizó el paisaje como herramienta y puente teórico-metodológico para interpretar las otras dos variables territorio y el geosistema, buscando una aplicabilidad directa en el cambio del suelo, definiendo un área de influencia directa e indirecta, para realizar actividades específicas en la zona de estudio. El área de influencia se debe delimitar y definir con base en una identificación de los impactos que puedan generarse durante la construcción y ejecución del proyecto.

Para la zona de estudio, los medios abióticos y bióticos se deben cuantificar en unidades fisiográficas naturales y ecosistémicas, para comprender las dinámicas que transforman los paisajes, por lo que se requiere de la combinación entre las realidades ecológica y contextual (espacio percibido).

5.4.3. Identificar la estructura de realidades ecológicas y contextuales en función del geo sistema, territorio y el paisaje, que componen la zona del caso de estudio.

Uno de los objetivos esta actividad es identificar los cambios en el paisaje (procesos erosivos) a través de la identificación y análisis de los procesos que se desatan alrededor de ciertos eventos y cuyas causas y consecuencias afectan el suelo. Estos eventos ocurridos en la realidad ecológica y contextual del sistema a estudiar sirven para conocer más ampliamente la dinámica en

el tiempo de las 3 variables seleccionadas. En estudio, se seleccionan los eventos considerados detonantes en la transformación del suelo, los eventos que ocasionan cambios en las tres variables a relacionar, pueden ser, por ejemplo, políticas ambientales o urbanísticas, delimitación de áreas de manejo, políticas económicas, procesos de migración, dinámicas de conflicto, nuevas infraestructuras o redes de comunicación, condiciones de la realidad ecológica. (Ej. sequías, inundaciones, deslizamientos, terremotos), otras percepciones del espacio o nuevas territorialidades (Bertrand, 2006). Por lo anterior, al establecer los eventos que transforman el suelo de la zona de estudio y tener los datos cuantificables de estos se establece la relación de las tres variables: Movimientos en masa, geosistema y procesos erosivos se puede concluir el objeto del caso de estudio que es: “Determinar la relación entre la lluvia y los procesos erosivos en la ocurrencia de los movimientos en masa en el CTC y CB”.

6. Caracterización de escenarios afectados por movimientos en masa

Los taludes se consideran estructuras estables si se mantienen sus condiciones de equilibrio. Sin embargo, los efectos causados por la erosión o las propiedades internas, estructurales y morfológicas del talud ocasionan cambios en estas condiciones. Esto hace necesario detallar los procesos que conllevan la ocurrencia de movimientos en masa generados por degradación de su suelo por factores erosivos y así mismo determinar los procesos que intervienen como factores detonantes para su conocimiento y posterior intervención.

6.1. Aspectos geológicos, geomorfológicos y ambientales de la zona de estudio.

Los movimientos en masa pueden ser causados por diversos agentes. Estos no necesariamente ocurren de manera independiente, ya que hay eventos en los que se puede encontrar dos o más tipos presentes en la zona. En la figura 9 se presentan los factores condicionantes relevantes para cada tipo de movimiento en masa.

Tipo de remoción en masa Factores Condicionantes	Caidas	Deslizamientos	Toppling	Flujos	Extensiones Laterales
Geología y Geotecnia	X	X	X	X	X
Geomorfología	X	X	X	X	X
Hidrología e Hidrogeología	X	X	X	X	X
Vegetación y Clima		X		X	X
Actividad Antrópica	X	X	X	X	

Figura 9. Factores condicionantes para movimientos en masa (Lara & Sepúlveda, 2008)

Es fundamental reconocer e identificar las posibles variables que favorecen la ocurrencia de movimientos en masa en terrenos ya sean contruidos por el hombre como un talud o de manera natural, lo que se conoce como ladera. Estos factores inherentes al terreno constituyen la causa real de los movimientos (Krynine,1980). Los factores previamente discutidos son los que intervienen de manera progresiva en el tiempo y los cuales promueven la inestabilidad. Por su parte los movimientos en masa de tipo natural están ligados a la infiltración y saturación del suelo por agua a partir de fuertes precipitaciones o muy continuas o por la acción de la actividad sísmica, lo que genera la caída y desplazamiento de material. En cuanto a los movimientos en masa

relacionados a actividades antrópicas, se vinculan directamente con procesos de deforestación para la realización de actividades como la explotación minera, la urbanización y la agricultura.

La descripción de los aspectos condicionantes en la zona de estudio para esta investigación se realizó con base en estudios generados por las diversas entidades del Valle del Cauca como lo son la Corporación Autónoma Regional del Valle (CVC), posibilitando la descarga de esta información por medio del geovisor y de los enlaces proporcionados en los datos abiertos. También se utilizó información del Servicio Geológico Colombiano, en especial de las memorias explicativas de los mapas Geológicos y Geomorfológicos del Valle del Cauca.

6.1.1. Geología de la zona de estudio

Tanto el CTC como el CB comparten las mismas unidades geológicas por encontrarse sobre el área de influencia de dos formaciones principales, la Formación Guachinte (TOg), perteneciente al Grupo Cauca y la Formación Volcánica (Kv). Desde el punto de vista litoestratigráfico, la Formación Guachinte se divide en tres miembros. El miembro basal está compuesto por bancos muy gruesos de areniscas cuarzosas de color blanco grisáceo, que varían de grano fino a conglomeráticas, intercaladas con bancos de limolitas grises oscuras de espesor medio a grueso y lentes delgados de conglomerados. El miembro Los Chorros está formado por una secuencia repetitiva de ciclotemas, generalmente con un espesor menor a 4 metros, que disminuyen en tamaño de grano de la base hacia la cima, pasando de areniscas de grano grueso y medio a limolitas, lodolitas y shales. Hacia arriba, el contenido de carbón aumenta, con las secuencias normalmente cubiertas por mantos de carbón, que son duros y bituminosos, pero con alto contenido de volátiles. Las estructuras comunes en estas rocas incluyen estratificación cruzada, laminación flaser y gradación, además de rellenos de canal que forman horizontes conglomeráticos con un espesor variable de 2 a 4 metros, compuestos por guijarros sub-angulares a subredondeados de cuarzo y, menos frecuentemente, de chert y fragmentos de felsita, soportados en una matriz arenosa de granos de cuarzo. En cuanto a la Formación Volcánica (Kv), la estructura y estratigrafía detallada de esta unidad no están bien establecidas debido al desarrollo de regolitos gruesos y la presencia de fallas regionales principales, la estructura y estratigrafía detallada de la unidad no están bien establecidas; Sin embargo, las evidencias disponibles indican que la dirección de los flujos lávicos es aproximadamente paralela a la dirección principal de elongación de las escamas imbricadas que buzcan en general, hacia el este (INGEOMINAS, 2001). Litológicamente se constituye por basaltos

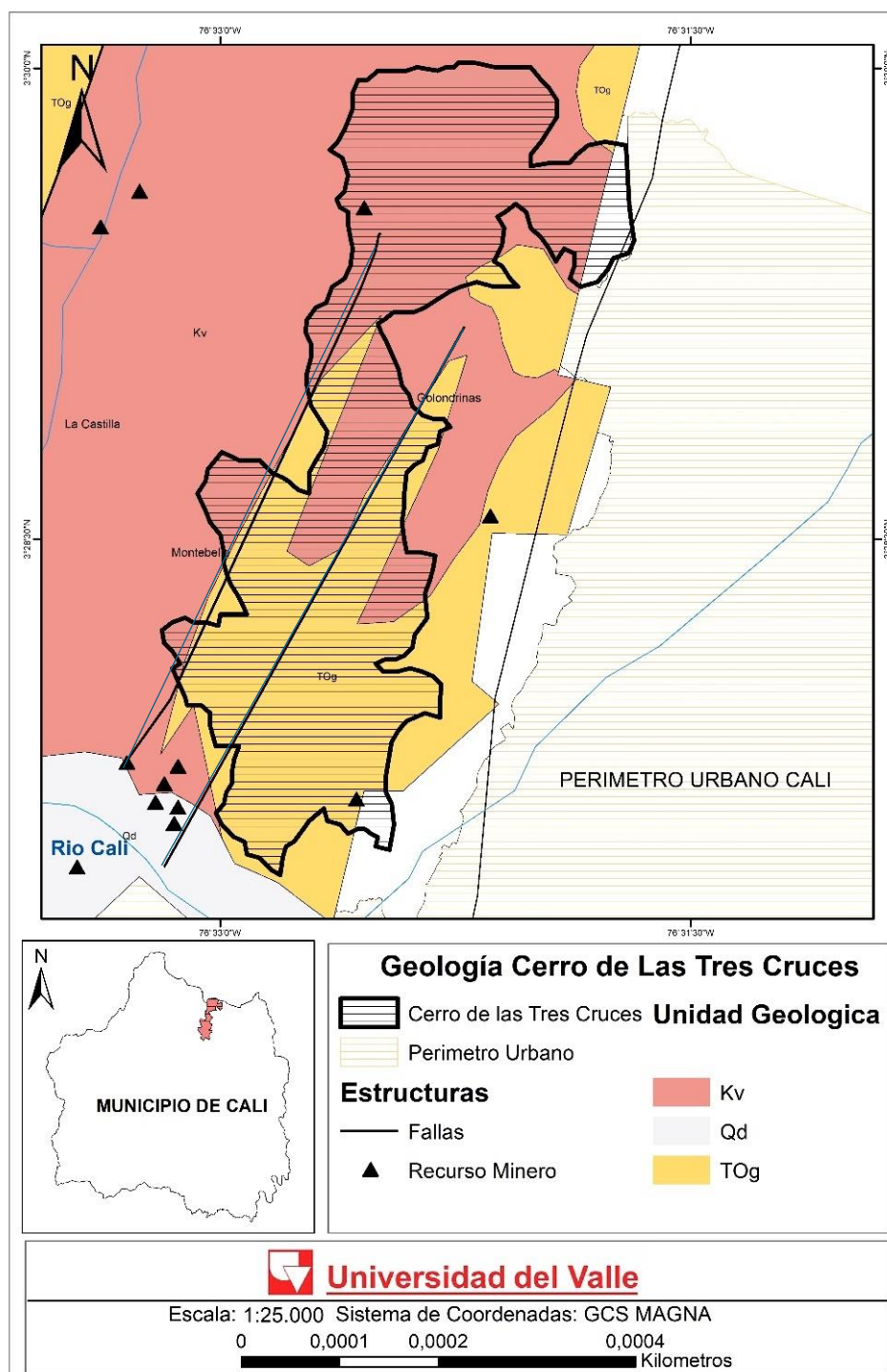
toleíticos intruidos por diques gabroides y silos doleríticos. También se presentan intercalaciones de niveles delgados de rocas sedimentarias conformadas por limolitas silíceas, lodolitas y cherts; en algunos sectores estas rocas se encuentran intensamente mezcladas con los basaltos, conformando “zonas de melange”. (CVC, 2017).

La formación superficial está conformada por un lleno antrópico infrayacido por suelos residuales de la Formación Guachinte (TOg) y por rocas trabadas de la Formación Volcanicas (Kv), fracturada, producto de la dinámica constructiva, según el desarrollo incompleto de la zona, por una carente inclusión urbanística. En la zona también se encuentran depósitos cuaternarios como se observa en los mapas 2 y 3. Estos son materiales no consolidados que cubren las unidades de roca subyacentes e incluyen flujos de escombros (Qfe), depósitos aluviales del río Cauca (Qal), abanicos aluviales (Qab), depósitos aluviales activos (Qal), depósitos coluviales (Qco), depósitos antrópicos de escombros de construcción (Qac) y depósitos antrópicos de estériles de minería (Qam).

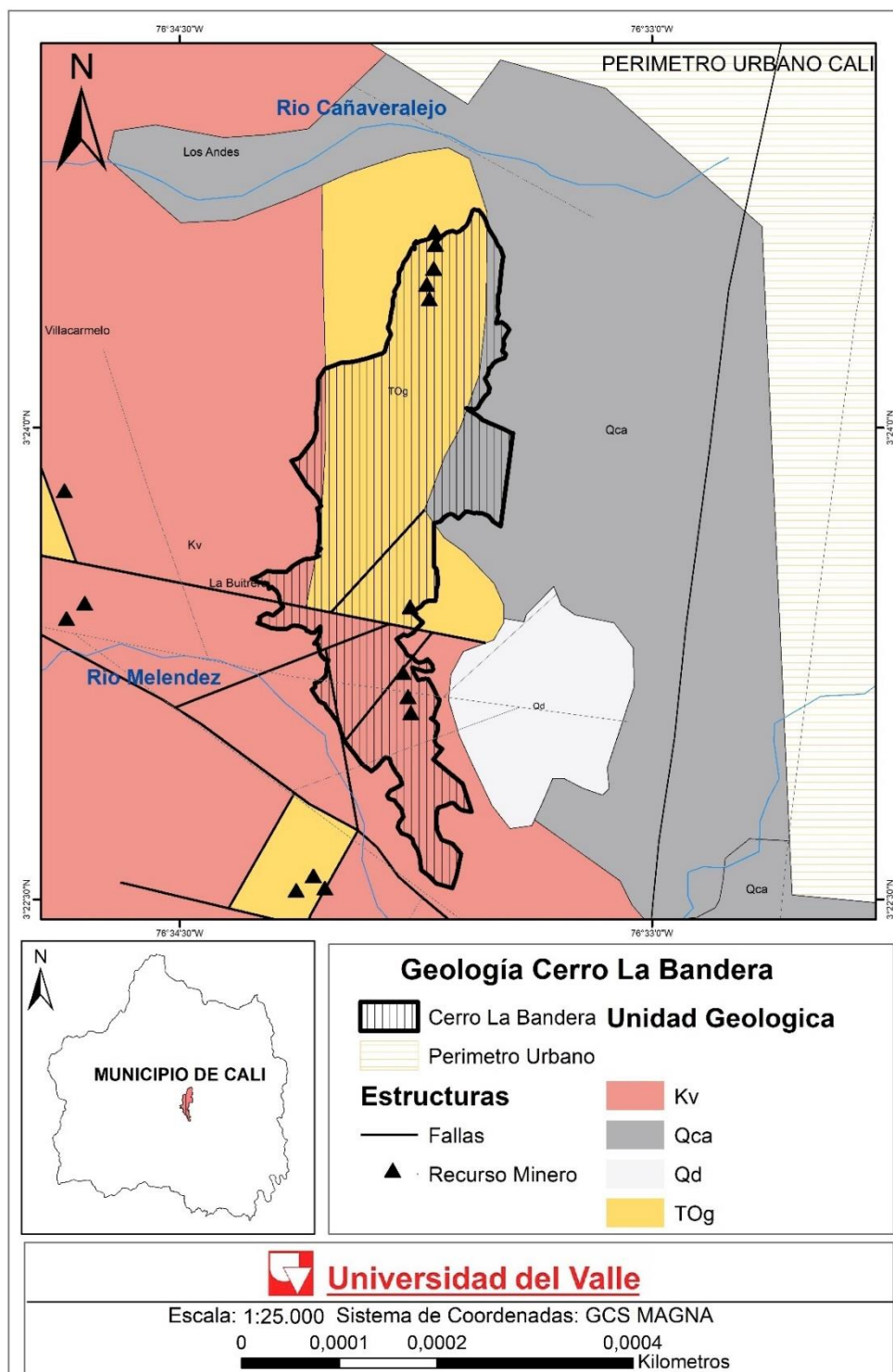
Históricamente, ambos cerros han tenido una recuperación post explotación minera de Carbón, que constituye uno de los principales productos mineros del departamento y se presenta en las rocas sedimentarias paleógenas del Grupo Cauca. En particular, la Formaciones Guachinte contienen niveles importantes de carbón que son explotados en Jamundí y Cali (Grosse, 1935). El espesor de los mantos de carbón varía entre 0.5 a 2.0 m alcanzando localmente 3.7 m. Los carbones son duros y bituminosos, pero con alto contenido de volátiles. De acuerdo con Durán et al. (1981) los carbones de la Formación Guachinte contienen 8.5% de cenizas, 0.7% de azufre y aproximadamente 40% de volátiles. El caso particular del CB, este fue un sitio de explotación minera desde 1917, inicialmente para la extracción de carbón destinado a Ferrocarriles Nacionales y posteriormente para la planta térmica de Anchicayá. Tras el cese de operaciones de esta última en 1970, el Cerro se convirtió en un lugar de explotación minera ilegal, caracterizada por una intervención indiscriminada que ha resultado en la generación de significativos pasivos ambientales. Entre estos se incluyen grandes volúmenes de material estéril, suelos severamente degradados y una extensa red de túneles internos que comprometen la estabilidad estructural del cerro (Duque & Garcia, 2017).

A continuación, se presentan los mapas 2 y 3, que muestran la geología del CTC y el CB. Estos mapas proporcionan una visión detallada de las unidades geológicas presentes en la zona,

facilitando una comprensión integral de la distribución y características de los diferentes materiales geológicos en el área de estudio.



Mapa 2. Mapa Geológico del CTC, elaboración propia con información del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Corporación Autónoma Regional del Valle CVC.



Mapa 3. Mapa Geológico del CB, elaboración propia con información del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Corporación Autónoma Regional del Valle CVC.

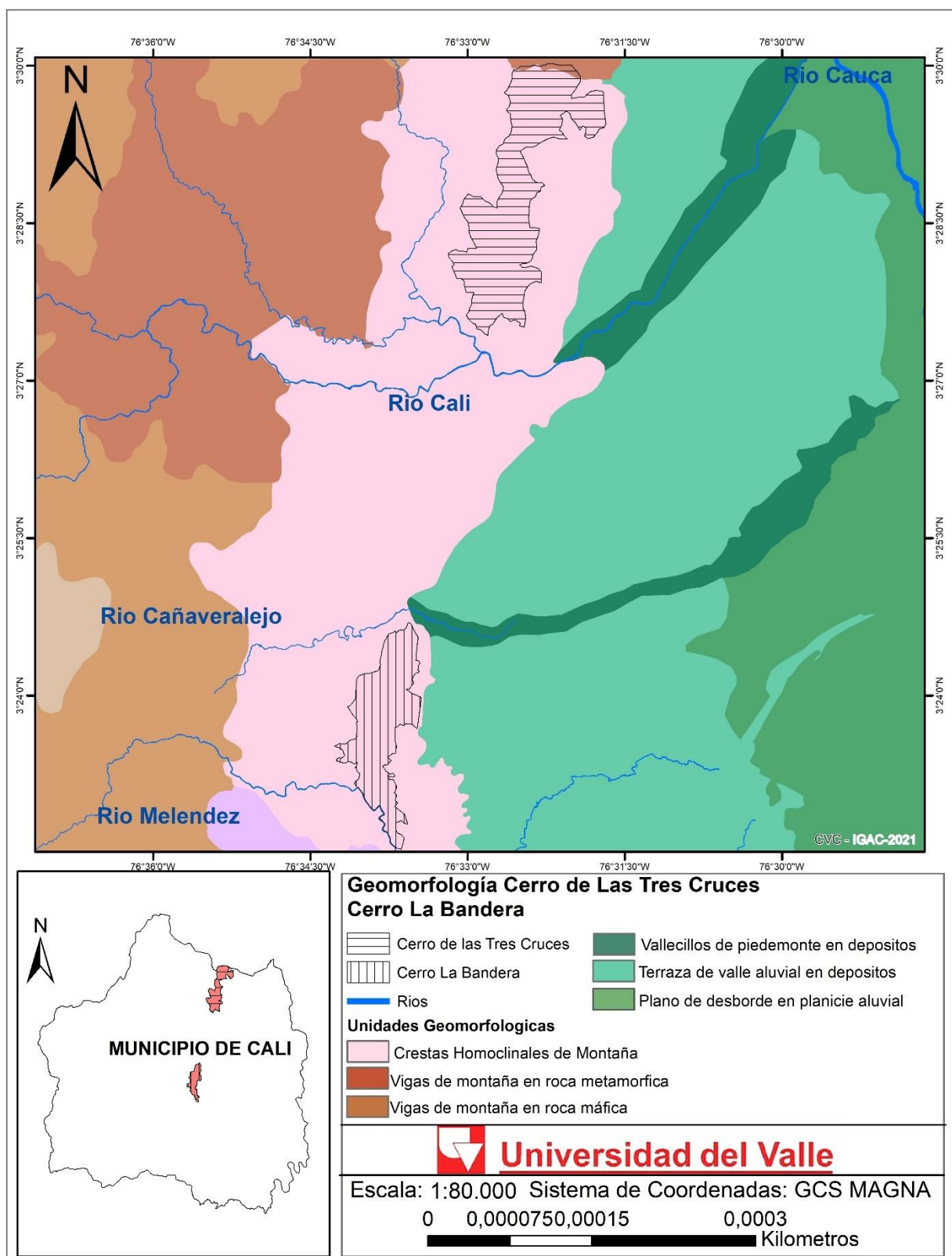
6.1.2. Geomorfología de la zona de estudio

De acuerdo a la memoria explicativa del mapa geomorfológico departamental del Valle del Cauca, SGC (2013), los cerros que comprenden la zona de estudio comparten la misma unidad geomorfológica como se observa en el mapa 4, denominada crestas homoclinales de montaña, la cual se conforma superficialmente de dos geoformas claramente diferenciables: laderas de pendientes largas y escarpadas con filos semiredondeados, generadas por rocas ígneas básicas y laderas escarpadas cortas con filos agudos alineados en dirección predominante N-E, formadas por rocas sedimentarias. Se caracterizan por evidenciar prominencias topográficas simétricas o ligeramente simétricas, elongadas y de morfología montañosa a colinada de cimas agudas, definidas por una secuencia de estratos apilados e inclinados ($> 35^\circ$) en una misma dirección. Generalmente son producto del desarrollo o erosión de un solo flanco de una estructura geológica.

Debido a la disposición de las unidades y los procesos de fallamiento a lo largo de esta área, los movimientos en masa tipo **deslizamiento y caída** son recurrentes llegándose a concentrar varios de estos en una sola unidad (Rodríguez Castiblanco, 2017)

La unidad que contiene la zona de estudio corresponde a un ambiente de origen estructural donde se encuentran las geoformas que se originan por procesos relacionados con la dinámica interna de la tierra, asociados principalmente al plegamiento y el fallamiento de las rocas, cuya expresión morfológica es definida por la tendencia y la variación en la resistencia de las unidades.

A continuación, se presenta el mapa 4, el cual ilustra la geomorfología de la zona de estudio proporcionando una representación detallada de las formas del relieve y los procesos geomorfológicos presentes en el área, ofreciendo una visión clara de las características morfológicas y la dinámica del paisaje en la región analizada.



Mapa 4. Mapa Geomorfológico de la zona de estudio, elaboración propia con información del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2015).

6.1.3. Relación de pendientes de la zona de estudio

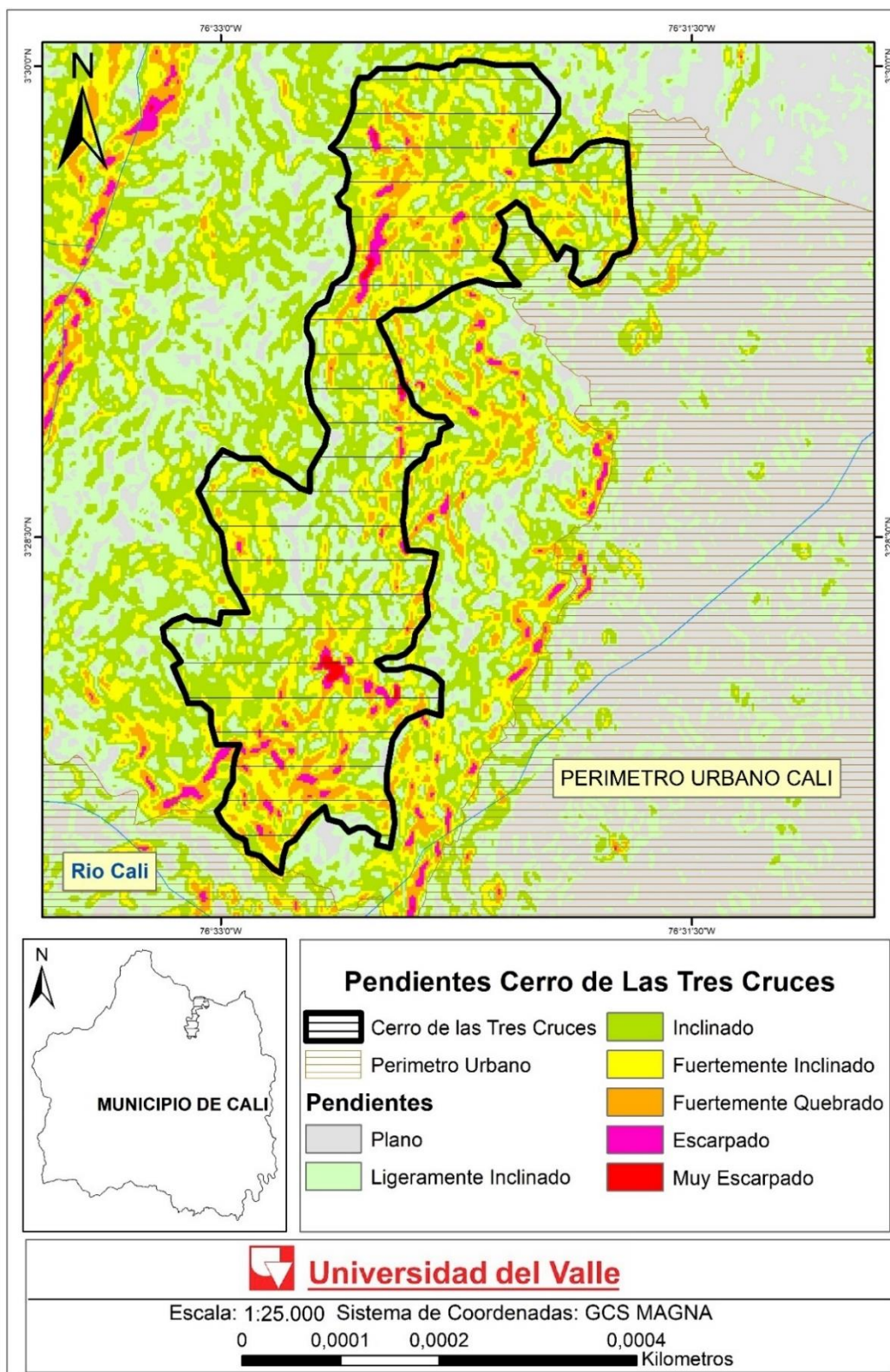
Se realizó la búsqueda de una imagen Ráster por medio de la plataforma ASF Data Search Vertex que tuviera entre sus características una buena resolución y que cubriera la zona de estudio; se obtuvo una imagen satelital de un conjunto de datos ALOS PALSAR y se integró a la interfaz ArcMap para posteriormente generar una capa de pendientes en el cual se pudiera diferenciar el gradiente entre dos formas de relieve.

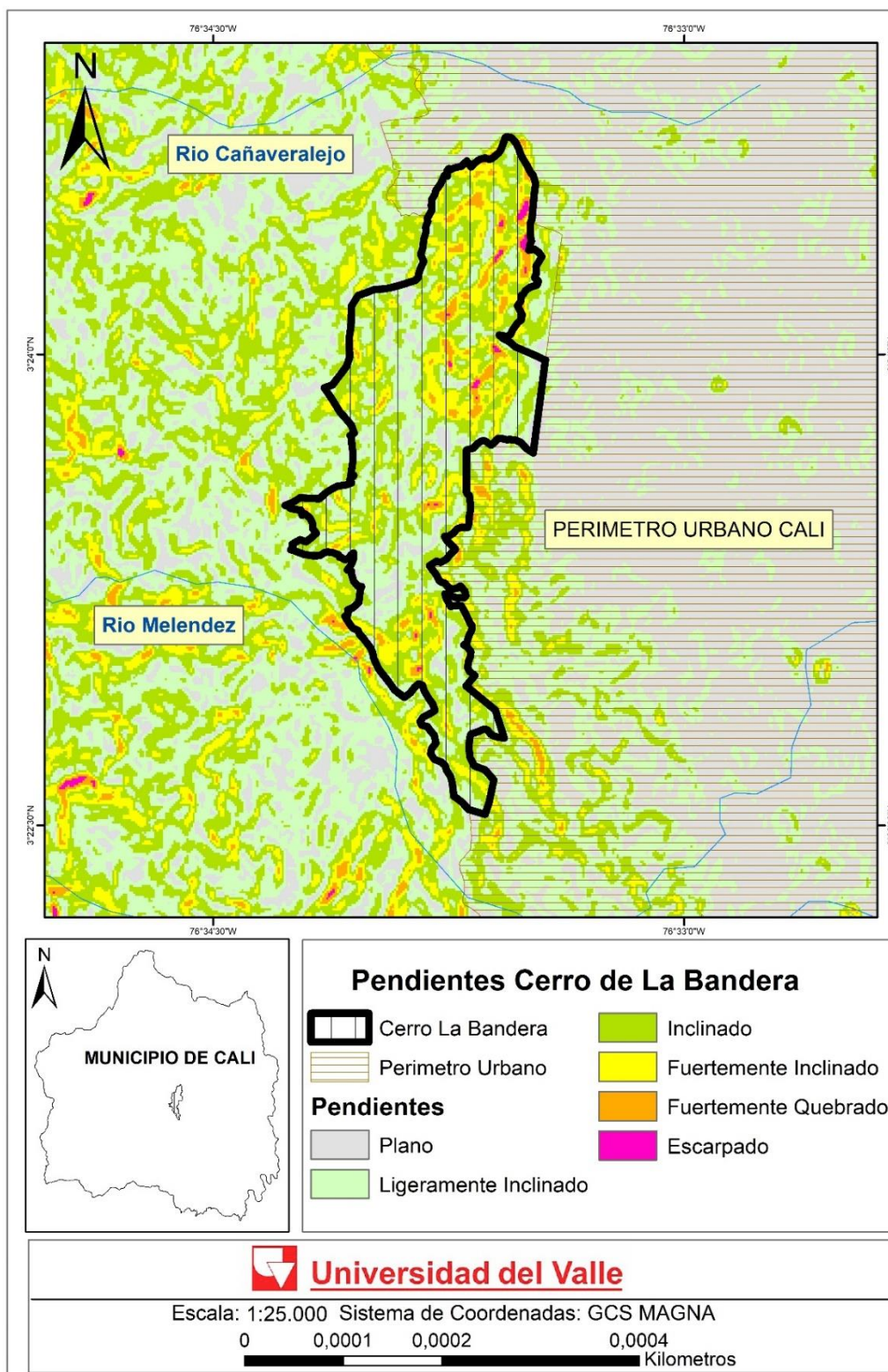
Tanto en el CTC como en el CB, se evidencian zonas de pendientes largas y escarpadas con filos semiredondeados, pendientes cortas con filos agudos alineados en dirección predominante N-E y presencia de zonas críticas con pendientes muy escarpadas ($>75\%$).

Siguiendo los lineamientos del Servicio Geológico Colombiano (SGC), las pendientes se reclasificaron en categorías descriptivas, basadas en los rangos numéricos obtenidos en el análisis de ArcGIS. Los valores de pendiente se clasificaron de la siguiente manera:

- Plano (0 - 6.62): Representa áreas con muy baja inclinación, generalmente seguras para la construcción y sin riesgo significativo de deslizamientos.
- Ligeramente Inclinado (6.62 - 14.24): Áreas con inclinación moderada, que pueden requerir precauciones adicionales en términos de diseño y construcción.
- Inclinado (14.24 - 21.86): Zonas con pendientes significativas que pueden representar un mayor riesgo de erosión y escorrentía.
- Fuertemente Inclinado (21.86 - 29.15): Áreas con pendientes pronunciadas, donde las medidas de estabilización del terreno son importantes.
- Fuertemente Quebrado (29.15 - 36.76): Terrenos con pendientes muy pronunciadas, que pueden presentar riesgos elevados de deslizamientos y erosión.
- Escarpado (36.76 - 47.03): Zonas con pendientes extremas, generalmente no recomendadas para construcciones.
- Muy Escarpado (47.03 - 84.46): Pendientes casi verticales o muy inclinadas, con altos riesgos de inestabilidad.

A continuación, se presentan los mapas 5 y 6 que detallan las pendientes, es decir, la inclinación del terreno en la zona de estudio. La información contenida en estos mapas es crucial para la comprensión de los procesos de erosión, la planificación del uso del suelo y la gestión de riesgos geotécnicos en la región analizada.





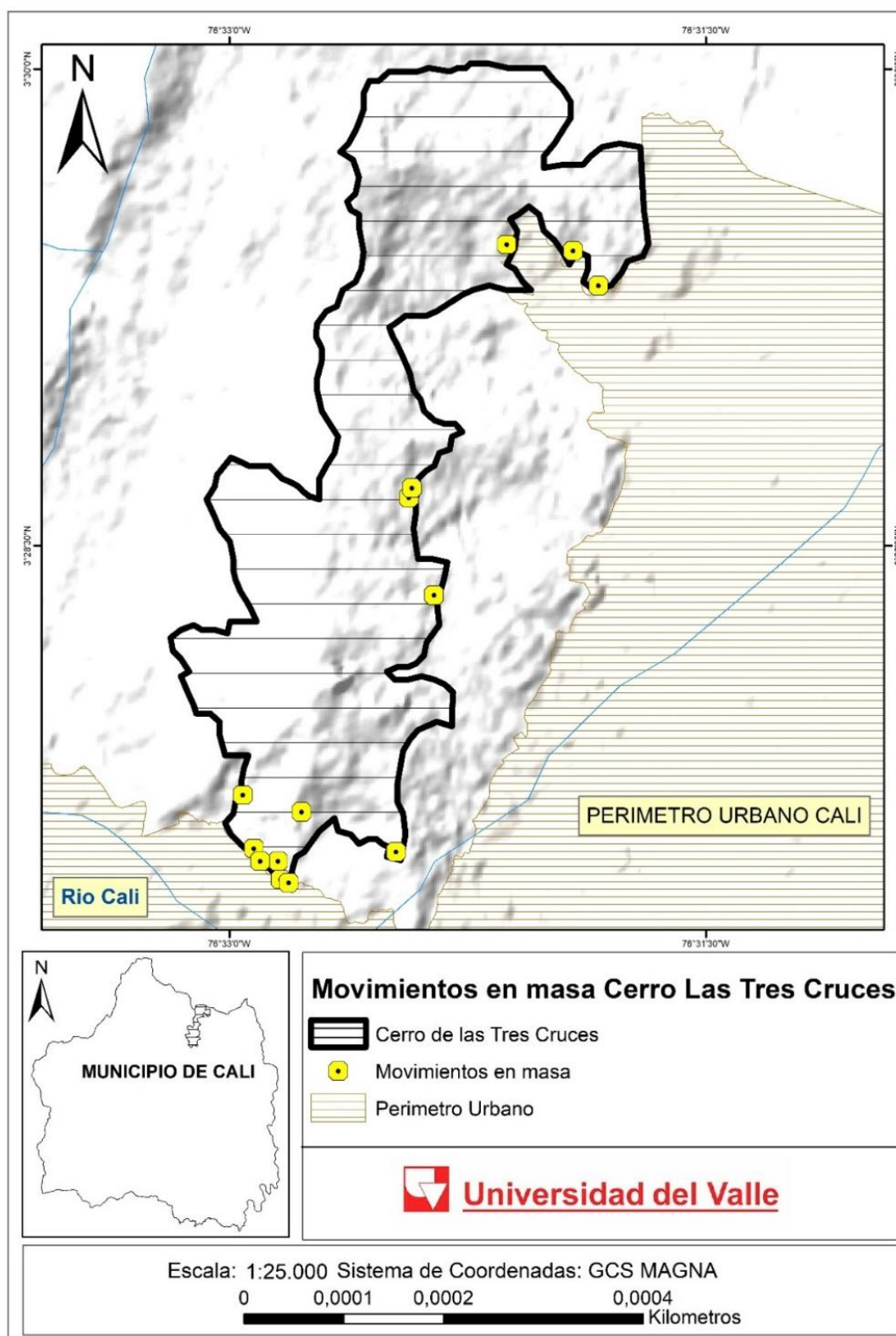
Mapa 6. Mapa de Pendientes CB, elaboración propia.

7. Procesamiento de las bases de datos de movimientos en masa, precipitación y degradación del suelo por erosión

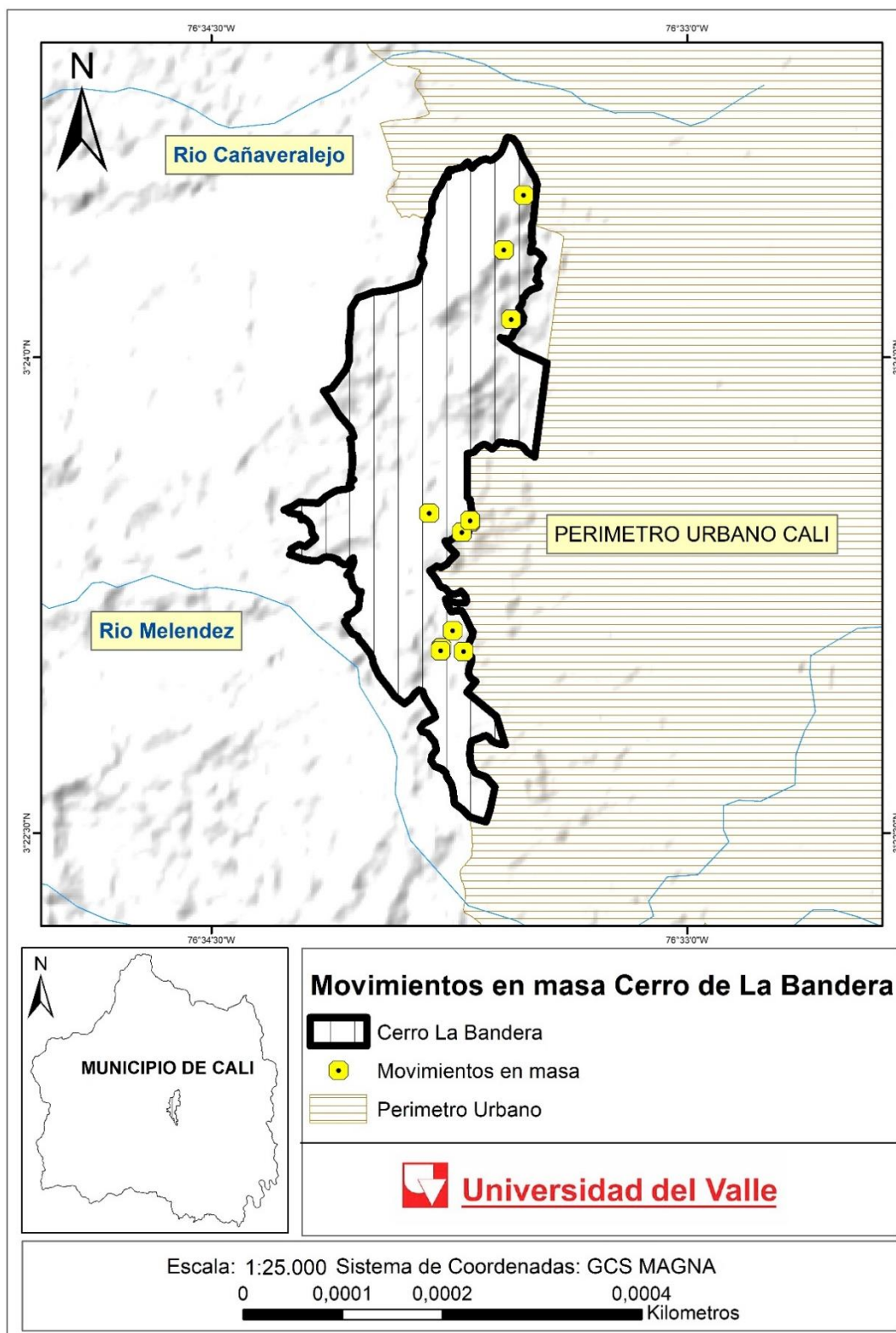
En este apartado, se explora el procesamiento de las bases de datos relacionadas con los movimientos en masa, la precipitación y la degradación del suelo por erosión, y su relevancia para la especialización en movimientos en masa. Esta información es fundamental para comprender mejor la dinámica de la precipitación y los procesos erosivos y su relación con la ocurrencia de movimientos en masa.

7.1. Base de datos y espacialización de movimientos en masa

Este segmento aborda la creación y el análisis de una base de datos especializada en movimientos en masa, con el objetivo de evaluar y comprender estos eventos en detalle que se puede apreciar en el Anexo A. La importancia de contar con una base de datos detallada se refleja en la capacidad para identificar áreas de riesgo, estudiar la frecuencia y magnitud de los movimientos de tierra, y desarrollar estrategias de mitigación. Los mapas 7 y 8 ilustran la ubicación espacial de los 26 movimientos en masa registrados en ambos cerros, proporcionando una visión clara de su distribución y facilitando un análisis más preciso de los patrones y factores asociados a estos fenómenos.



Mapa 7. Mapa de localización de movimientos en masa en el CTC, elaboración propia con información del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Corporación Autónoma Regional del Valle CVC



Mapa 8. Mapa de localización de movimientos en masa en el CB, elaboración propia con información del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Corporación Autónoma Regional del Valle CVC.

7.2. Procesamiento de datos de lluvia

7.2.1. Base de datos de precipitación

Se llevó a cabo un análisis de los niveles críticos de precipitación para prever la amenaza de movimientos en masa en el CTC y el CB. Este análisis se basó en un método empírico según Aristizabal et al. (2011) que consistió en recopilar una base de datos de movimientos en masa y utilizar una base de datos de precipitación con registros cada 15 minutos. Para cada evento de movimiento en masa, se asignó un conjunto de datos de precipitación histórica correspondiente a la estación de lluvia que abarcaba el área cercana al lugar del evento. Luego, se calcularon tanto la precipitación acumulada en períodos de 1, 3 y 5 días como la precipitación acumulada en los días previos al evento (5, 10, 15, 30, 60 y 90 días) para cada movimiento en masa, dichos datos se aprecian con mayor claridad en el Anexo C.

La distribución anual de los movimientos en masa refleja las mismas tendencias señaladas por Echeverri & Valencia (2004); Moreno et al. (2006); y Aristizábal & Gómez (2007). Estas tendencias indican que los dos períodos de lluvias anuales en la región, que abarcan los trimestres de marzo-abril-mayo (MAM) y septiembre-octubre-noviembre (SON), influyen directamente en la frecuencia promedio de movimientos en masa por mes. La figura 10 representa visualmente esta distribución a lo largo del año para los movimientos en masa analizados, y coincide con el patrón bimodal de los períodos de lluvias en la región de Cali para el periodo de tiempo comprendido entre 1979 a 2016 como se establece en la tabla 5 presentada a continuación.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
AGUACATAL	62.6	62.9	89.4	175.4	156.9	90.6	71.4	66.2	113.4	119.0	145.8	71.4
CAÑAVERALEJO PG	123.5	108.2	123.8	196.5	206.3	81.4	56.6	56.6	125.8	169.5	201.4	116.5
BRASILIA	93.5	97.6	106.5	197.6	196.1	105.1	74.6	62.2	117.2	120.4	151.7	84.7
COLEGIO SAN JUAN	93.9	70.3	98.9	146.6	128.6	63.0	38.6	41.5	82.3	120.6	156.4	84.1
GUACHAZAMBOLO	71.0	59.5	82.8	113.4	115.6	50.7	39.4	58.6	84.2	105.9	131.6	64.8
PLANTA RIO CAUCA	71.1	72.4	94.6	138.1	152.0	48.3	36.4	58.9	88.8	99.1	128.9	71.9
LAS BRISAS	129.4	133.1	178.9	267.1	251.4	125.0	91.9	66.9	177.7	228.3	241.6	169.7
LA FONDA CANTA CLARO	152.9	137.9	165.6	247.7	240.9	117.4	73.9	63.9	162.9	192.9	245.3	155.3
LA LADRILLERA	128.3	131.6	144.4	224.6	214.7	114.6	43.1	60.9	199.6	173.1	226.6	74.6
PROMEDIO	102.9	97.1	120.5	189.7	184.7	88.4	58.4	59.5	128.0	147.7	181.0	99.2

Tabla 5. Promedio de lluvia mensual periodo (1979-2016), elaboración propia con información de estaciones pluviográficas de la CVC

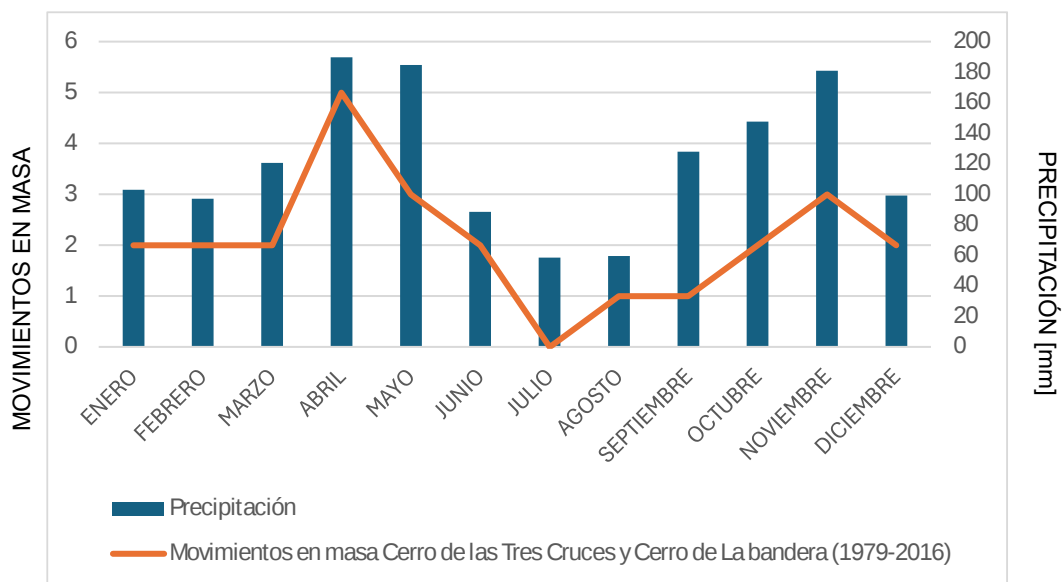


Figura 10. Relación entre la precipitación media mensual de las zonas del CTC y el CB, con información de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y los movimientos en masa en el CTC y el CB del periodo 1979-2016. Elaboración propia.

En ese contexto, se construyó una base de datos de movimientos en masa detonados por lluvia ocurridos en el CTC y CB, a partir de bases proporcionados por publicaciones de Diarios de la época, la interfaz SIMMA y la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres de la ciudad de Cali, donde se registran eventos reportados por diferentes medios e instituciones a partir del año 1934-2016. Dicha base de datos se depuró usando cuatro criterios: eventos ocurridos entre los años 1979 y 2016, ya que dicho periodo presenta más información sobre eventos ocurridos en la zona objeto de estudio, eventos en los cuales aparece como causa asociada la precipitación, eventos con información espacial precisa que permita localizarlos geoespacialmente a nivel de manzana o precisión de 100 m, y eventos con información temporal precisa de la fecha de su ocurrencia. Finalmente se obtuvo una base de datos de 26 movimientos en masa. Estos movimientos fueron georreferenciados utilizando el software ArcMap de la interfaz ArcGIS mostrando la concentración de estos movimientos en masa, delineando las áreas de influencia asociadas a cada estación de lluvia.

Se generaron series de precipitación histórica, como se puede observar en el Anexo B utilizando los registros recopilados de la red hidrometeorológica de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), que incluye datos de 9 estaciones de seguimiento distribuidas a lo largo de los sectores del CTC y el CB, Aguacatal, Cañaveralejo PG, Brasília, Colegio San Juan, Guachazambolo, Planta Río Cauca, Las Brisas, La Fonda Canta Claro y La Ladrillera. Cada

estación proporciona registros de precipitación con información detallada sobre el año, mes y día de las mediciones.

7.2.2. Limitaciones de los datos

Para la construcción de la base de datos se tuvieron algunas limitantes como por ejemplo la exclusión de algunas estaciones de monitoreo de lluvias ubicadas en las proximidades de los cerros debido a la falta de registros entre los años 1979 y 2016 (IDEAS, El Descanso, Montebello). Además, se eliminó un evento de movimiento en masa que tuvo lugar en 1979 debido a la ausencia de información completa en cualquiera de las estaciones disponibles, adicionalmente la evaluación de la lluvia acumulada para cada evento de movimiento en masa se considera una aproximación, ya que no necesariamente refleja la cantidad exacta de lluvia que desencadenó el evento. Esta evaluación se basa en la precipitación registrada por el sensor de lluvia en el punto de ubicación, y no necesariamente en el lugar exacto donde ocurrió el movimiento en masa.

Por otra parte, los umbrales críticos de lluvia fueron determinados visualmente a partir de los patrones de dispersión observados en los movimientos en masa, considerando diversas combinaciones de lluvia acumulada y lluvia antecedente. Este enfoque permitió establecer la relación entre la ocurrencia de los eventos y la cantidad de lluvia previa.

Es importante destacar como limitación que este análisis únicamente considera los días en los cuales se registraron movimientos en masa. No se tienen en cuenta aquellos días en los cuales se superaron los umbrales críticos, pero no se produjeron movimientos en masa.

7.2.3. Definición de umbrales críticos de lluvia

Las figuras 11, 12 y 13 muestran las distintas combinaciones de lluvia a corto plazo durante 1, 3 y 5 días en comparación con la lluvia a largo plazo, durante 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días, evaluadas para cada uno de los 26 movimientos en masa. La lluvia a corto plazo (LC), representa la cantidad de lluvia registrada en los días inmediatamente anteriores al evento, incluyendo las 24 horas del día en que ocurrió. Por otro lado, la lluvia a largo plazo (LL), corresponde a la cantidad de lluvia registrada en los días previos al período considerado para la lluvia a corto plazo (LC).

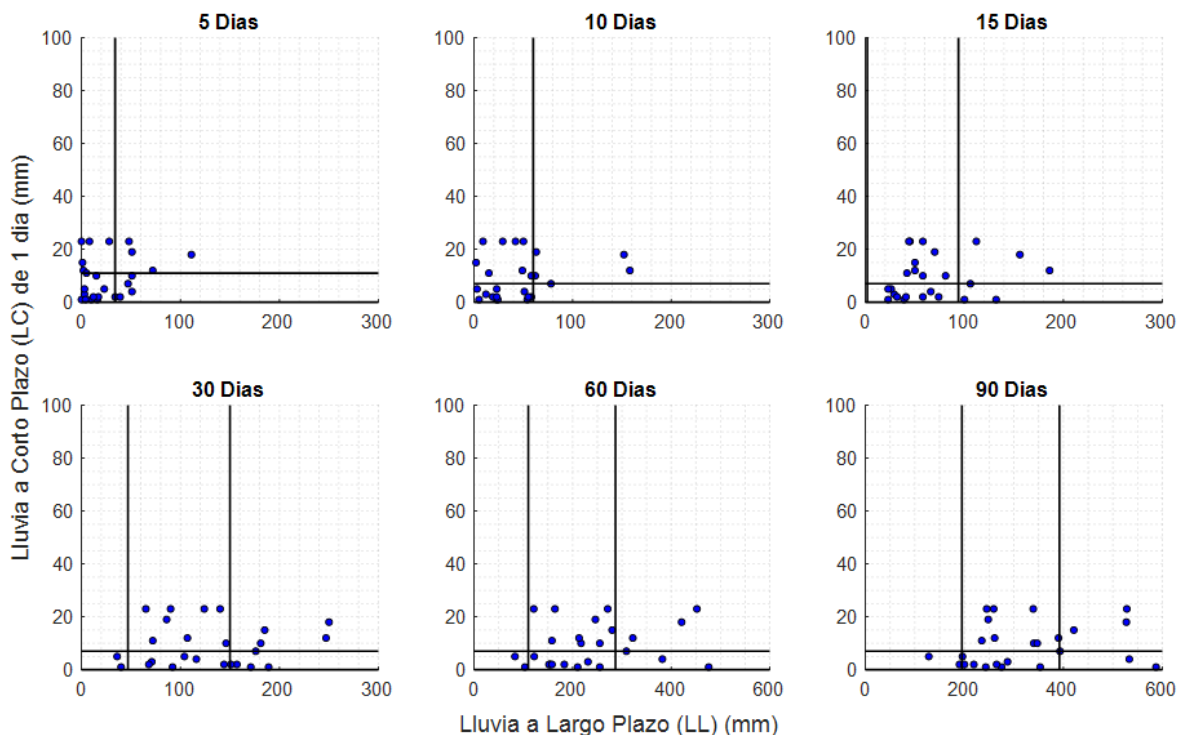


Figura 11. Relación de la Lluvia a Corto Plazo (LC) de 1 día con la Lluvia a Largo Plazo (LL) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días a la Lluvia a Corto Plazo (LC) de 1 día. La línea horizontal representa el máximo de (LC) y las líneas verticales indican los umbrales máximos y mínimos de lluvia en (LL) ajustados visualmente, a partir de los cuales se presenta el mayor número de movimientos en masa o hasta el cual ya se han presentado la mayor parte de movimientos en masa.

La lluvia a corto plazo (LC) de 1 día muestra un umbral máximo de 7 mm para todas las combinaciones de lluvia a largo plazo (LL), como se ilustra en figura 11. Por otro lado, la LL exhibe un umbral máximo que se incrementa progresivamente, comenzando en 25 mm para la LL de 5 días y alcanzando los 295 mm para la LL de 90 días. A partir de la LL de 15 días, se distingue un umbral mínimo de alrededor de 20 mm, por debajo del cual se observa un bajo número de movimientos en masa. Este umbral se eleva a 95 mm para la LL de 60 días, lo que resulta en una disminución en el porcentaje de eventos dentro de los umbrales, aunque el número de casos que ocurren por debajo del umbral mínimo sigue siendo muy bajo. Este escenario representa la peor situación para el pronóstico, ya que corresponde a eventos que ocurren sin alcanzar el umbral de lluvia crítica. Para la LL de 90 días, se identifica un umbral mínimo de 180 mm.

Según los porcentajes de movimientos en masa dentro de los umbrales establecidos de lluvia, se sugiere que las combinaciones de precipitación que incorporan la Lluvia a largo plazo (LL) de 30 días son las más representativas de dichos umbrales, ya que se mantienen variando dentro de los mismos rangos independientemente del número de días de LC considerados.

Los resultados muestran un umbral crítico mínimo en (LC) de 3 días, a partir del cual se observa el mayor porcentaje de movimientos en masa desencadenados por la lluvia: aproximadamente 55 mm para 30 días de LL, 120 mm para 60 días de LL y 190 mm para 90 días de LL.

Debido a la menor dispersión entre las diversas combinaciones de la Lluvia a corto plazo (LC) de 3 días y a la clara identificación de un umbral crítico mínimo de lluvia, se destaca la combinación de 3 días de (LC) con 90 días de Lluvia a Largo plazo (LL) (3 contra 90) como la que mejor indica las condiciones favorables para la ocurrencia de movimientos en masa desencadenados por lluvia en el CTC y el CB. Al analizar esta combinación en detalle, se observa que el 7.5% de los eventos registrados ocurrieron con menos de 4 mm en los 90 días anteriores, solo el 4% de los eventos ocurrieron con más de 392 mm de lluvia antecedente y el 88% de los eventos se reportaron con lluvias acumuladas superiores a 190 mm.

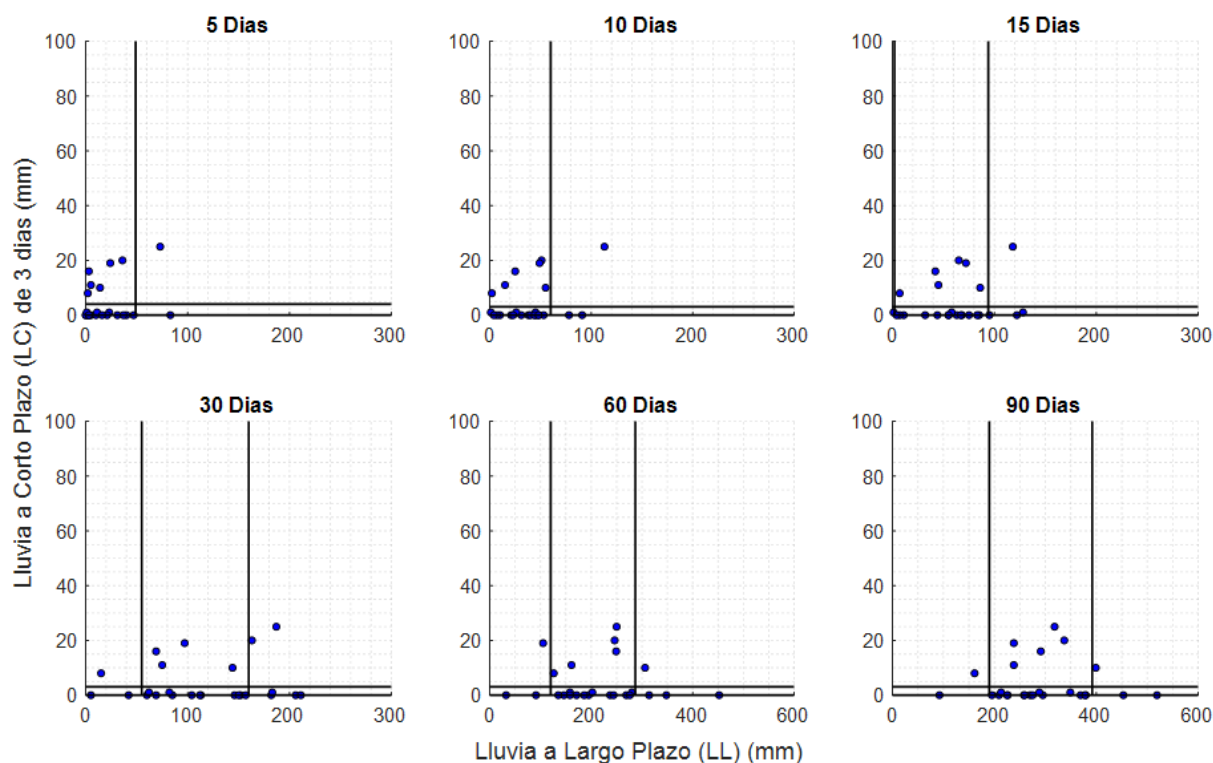


Figura 12. Relación entre la Lluvia a Corto Plazo (LC) durante 3 días y la Lluvia a Largo Plazo (LL) durante 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días en la zona de estudio. La línea horizontal indica el valor máximo de la Lluvia a Corto Plazo (LC). Las líneas verticales representan los umbrales máximos y mínimos respectivamente de precipitación (LL) ajustados visualmente. Estos umbrales señalan el punto a partir del cual se registra el mayor número de movimientos en masa, o hasta donde se ha observado la mayoría de los eventos de este tipo.

Para la lluvia a corto plazo (LC) de 5 días, se observa un umbral máximo de precipitación de 13 mm. A partir de la lluvia a largo plazo (LL) de 15 días, se establece un umbral mínimo en torno a los 40 mm, el cual se hace más evidente para los 30 y 60 días, donde se incrementa a 80 y 130 mm respectivamente, y finalmente a 220 mm para la LL de 90 días. Sin embargo, en este último caso, se observa una ligera ampliación en la dispersión, lo que resulta en una reducción en el porcentaje de eventos dentro de los umbrales.

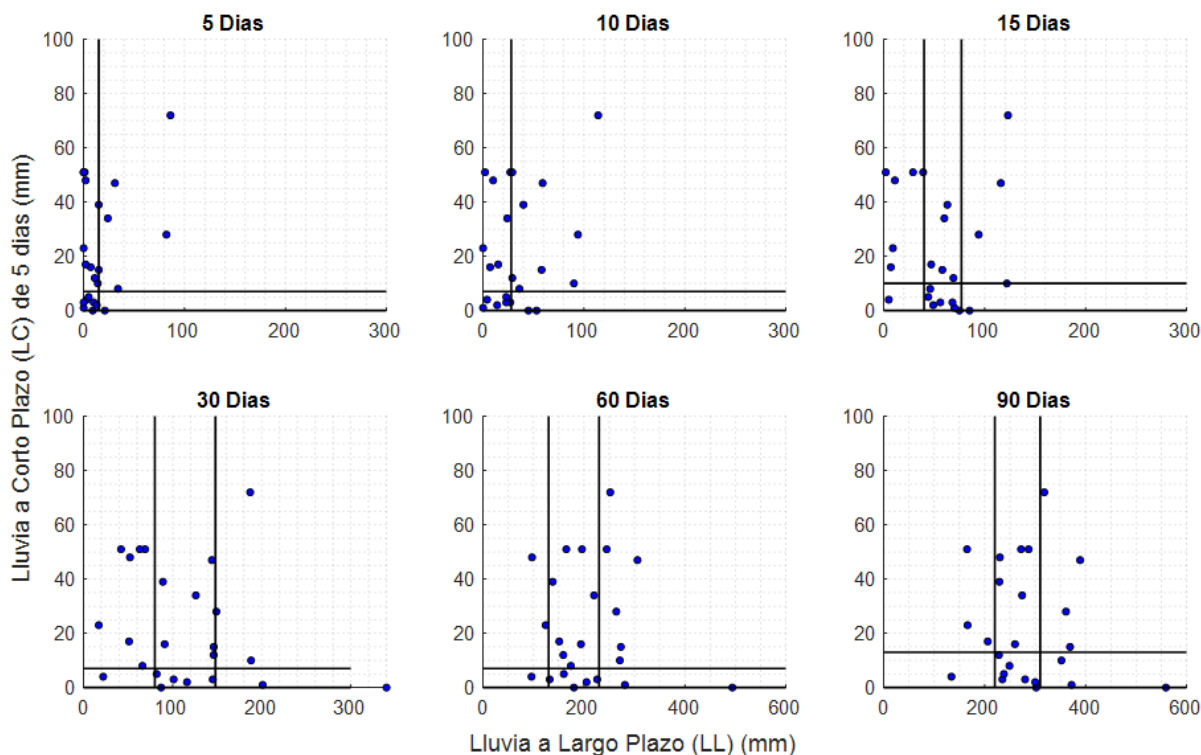


Figura 13. Relación de la Lluvia a Corto Plazo (LC) de 5 días con la Lluvia a Largo Plazo (LL) de períodos de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días. Las líneas negras indican los niveles críticos de lluvia, ajustados visualmente, que señalan el punto donde ocurren la mayoría de los movimientos en masa o donde ya han ocurrido la mayoría de estos eventos.

Por otro lado, la lluvia de corto plazo (LC) de 5 días muestra los menores porcentajes de movimientos en masa dentro de estos mismos umbrales, lo que se traduce en las mayores dispersiones observadas.

Para la aplicación efectiva de umbrales de lluvia empíricos, es crucial no solo identificar los umbrales específicos para cada región según sus condiciones locales, sino también combinarlos con un detallado análisis cartográfico de las condiciones de amenaza y vulnerabilidad de la región

en cuestión. Esta integración permitiría tomar medidas preventivas y de mitigación con anticipación para minimizar los impactos de los movimientos en masa.

Cómo se pueden observar en las figuras 11, 12 y 13, los resultados obtenidos indican que la lluvia antecedente de los días previos al evento permite establecer umbrales máximos de precipitación; mientras tanto, los umbrales mínimos solo se distinguen cuando se consideran combinaciones de LL superiores a 30 días y estos permanecen constantes para cualquier combinación de LC. Los umbrales máximos tienen una utilidad limitada para los sistemas de alerta temprana, ya que solo indican el umbral por debajo del cual ya ha ocurrido la gran mayoría de movimientos en masa. Por el contrario, los umbrales mínimos son críticos para los sistemas de alerta temprana, ya que indican la cantidad de lluvia por encima de la cual aumentan drásticamente las probabilidades de ocurrencia de movimientos en masa (Aristizábal et al, 2011). Por lo tanto, se convierten en herramientas fundamentales cuando se monitorea continuamente la precipitación en una región específica, ya que señalan la necesidad de emitir alertas cuando se superan estos umbrales debido a la inminente ocurrencia de movimientos en masa.

El hecho de que no se logren diferenciar umbrales de lluvia mínimos para la LC y que se produzcan movimientos en masa incluso con valores de LC cercanos a cero milímetros (0 mm) aparentemente indica una mayor influencia de la LL. Es decir, la lluvia de los días inmediatamente previos a la ocurrencia de un movimiento en masa parece no ser determinante en la ocurrencia de los eventos en el CTC y el CB. El elemento fundamental en la ocurrencia de los movimientos en masa parece estar controlado por la lluvia estacional, es decir, la cantidad de lluvia que ha caído en el mes anterior (30 días de LL), los dos meses anteriores (60 días de LL) y los tres meses anteriores (90 días de LL). Un aspecto que podría responder a estas observaciones es que los movimientos en masa utilizados para el presente análisis provienen de una base de datos histórica, alimentada principalmente por informes de periódicos locales y nacionales, en la cual es probable que predominen los eventos de gran volumen y mayores afectaciones.

Es importante destacar que tanto los valores de Lluvia a Corto plazo (LC) como de Lluvia a Largo plazo (LL) se calculan según las series de lluvia correspondientes a los días previos a cada evento analizado. Por lo tanto, ambos valores podrían tener o no umbrales mínimos cercanos a cero.

La distribución de precipitación media mensual mostrada en el histograma de la figura 10 no guarda relación alguna con el cálculo de LL. Es decir, los valores de lluvia del mes calendario anterior a la ocurrencia del evento no se consideran en el cálculo de los 30 días de LL; en su lugar, se toma la suma aritmética de los treinta días anteriores. Esta aclaración es relevante porque, si se considerara la lluvia ya acumulada del mes calendario anterior en el cálculo de la LL, el inicio de las series no comenzaría en cero y, por lo tanto, cualquier valor acumulado de uno o más meses tendría un valor acumulado mayor que cero. Esto sesgaría el umbral mínimo de LL por los valores de lluvia acumulados en los meses calendario anteriores.

Los umbrales máximos de Lluvia a Corto plazo (LC), para todas las combinaciones de lluvia a largo plazo, aparentemente sugieren una influencia limitada de la lluvia inmediatamente anterior al evento. La combinación de 1 día de LC y 5 días de Lluvia Acumulada a Largo plazo (LL) (ver figura 12) debería reflejar la influencia de la LC, dado que se consideran pocos días de lluvia antecedente. Sin embargo, no se observan puntos en la esquina superior izquierda de la gráfica con registros muy altos de LC para 1 día, lo que indicaría una fuerte influencia de la LC o de la cantidad de lluvia que cae en un solo evento.

7.3. Procesamiento de datos de procesos erosivos

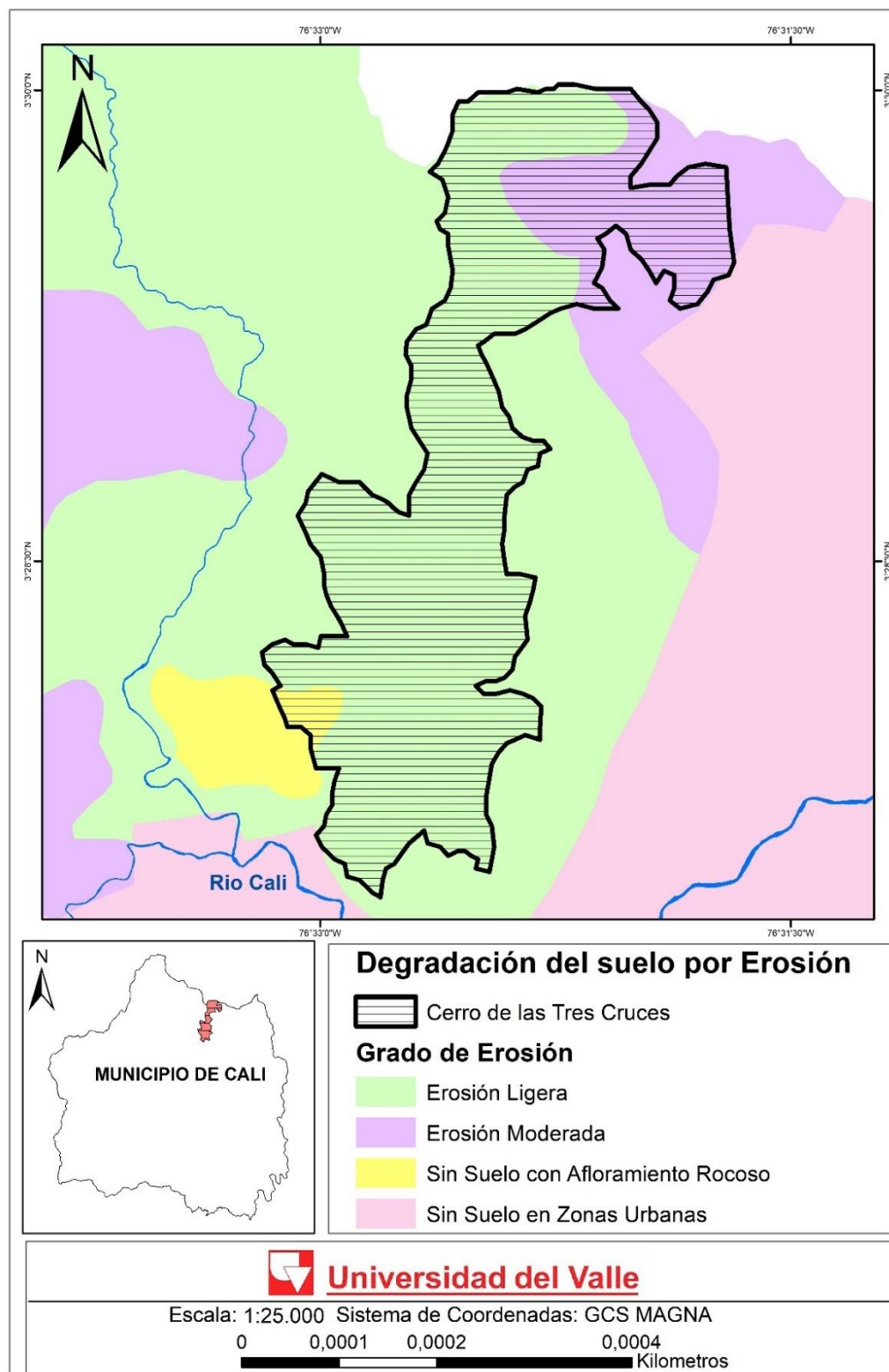
7.3.1. Degradación del suelo por erosión

La erosión de los suelos se define como la pérdida físico-mecánica del suelo, con afectación en sus funciones y servicios ecosistémicos, que produce entre otras, la reducción de la capacidad productiva de los mismos (Lal, 2001). La erosión es un proceso natural; sin embargo, esta se califica como degradación cuando se presentan actividades antrópicas no sostenibles que aceleran, intensifican y magnifican el proceso. Para el caso de la zona de estudio, tanto el CTC como el CB han sufrido impactos por la actividad de explotación minera de carbón.

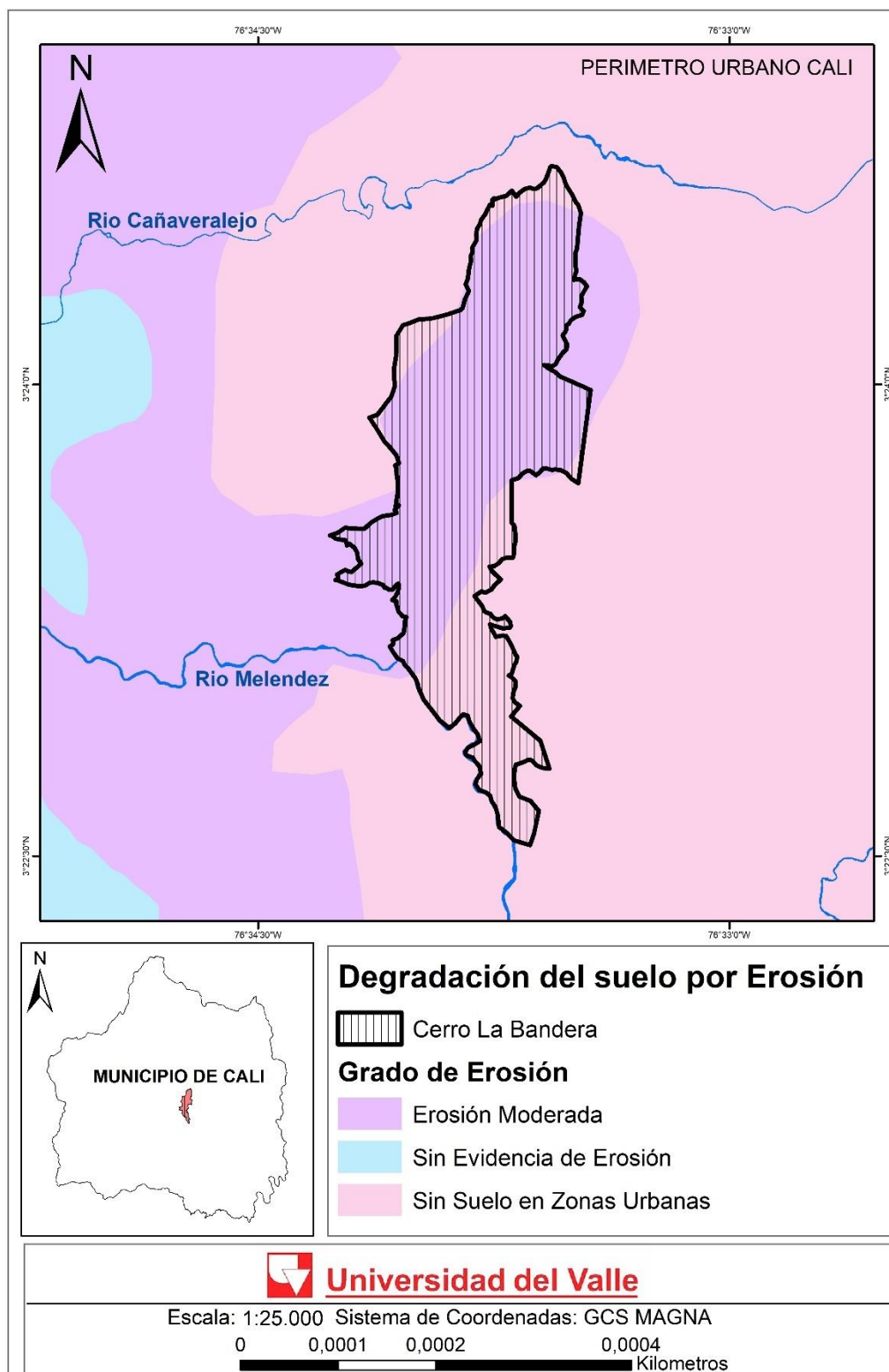
En términos generales, hay dos principales tipos de erosión: hídrica y eólica. La erosión hídrica ocurre cuando el agua, ya sea de lluvia, ríos o mares, actúa sobre áreas de ladera desprovistas de vegetación. En estos casos, las gotas de lluvia o el riego, junto con la fuerza de la gravedad, arrastran las partículas del suelo, formando zanjas o cárcavas, y en ocasiones provocando movimientos en masa que trasladan grandes volúmenes de tierra. Por otro lado, la erosión eólica es provocada por el viento, que levanta y transporta partículas del suelo, generando acumulaciones como dunas o médanos y causando torbellinos de polvo (SEMARNAT, 2003). La

degradación de suelos por erosión igualmente está asociada a la pérdida de estabilidad de las laderas y taludes, lo cual agrava o desencadena algunas amenazas como los movimientos en masa y los flujos torrenciales. El grado de erosión se ha clasificado de acuerdo con la intensidad del proceso en términos de severidad y a la magnitud o superficie afectada por el mismo, en cinco categorías: sin evidencia (no hay evidencia de degradación por erosión), ligera, moderada, severa y muy severa (IDEAM, 2016).

En el Caso del CTC, se realizó el traslape del polígono de estudio con la capa de degradación de suelo por erosión como se observa en el mapa 9 donde se evidencia que la mayoría del cerro presenta un nivel de erosión de tipo ligera, mientras que en menor medida presenta un área afectada por la erosión en un grado moderado. En cuanto al CB, se evidencia afectación en la mayoría del área total por la erosión moderada mientras que en menor medida se observa que no hay suelo ya son áreas que comprenden el urbanismo como se observa en el mapa 10.



Mapa 9. Mapa de Degradación de Suelo por Erosión CTC, elaboración propia, con información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales (IDEAM).



Mapa 10. Mapa de Degradación de Suelo por Erosión CB, elaboración propia, con información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales (IDEAM).

La histórica ocurrencia de eventos en la zona de estudio revela que los límites de los dos cerros bajo investigación se distinguen por exhibir una mayor cantidad de áreas con desarrollo incompleto y condiciones topográficas difíciles. Lo que hace estas zonas muy propensas a sufrir los impactos de los movimientos en masa.

7.3.2. Determinación de factores de susceptibilidad a la erosión mediante el método USLE

Considerando la relevancia de los procesos erosivos en el CTC y el CB en la ciudad de Cali, este estudio tiene como uno de sus objetivos mapear las áreas más susceptibles a la erosión, tomando en cuenta factores físicos como pendientes, precipitación pluvial, cobertura vegetal, geología, geomorfología y uso del suelo. Se busca establecer una correlación entre estas áreas y el inventario de movimientos en masa recopilado desde 1979 hasta 2016. Para ello, se emplearon sistemas de información geográfica (SIG) utilizando el software ArcGIS y sus extensiones, como Hydrology, Map Algebra, Reclass, Classification, entre otros.

7.3.2.1. Factor R (Erosividad de la lluvia):

Se evaluó considerando los promedios mensuales de precipitación de estaciones meteorológicas relevantes en la zona de estudio como se muestra de forma resumida en la tabla 5 y con mayor detalle en el Anexo D, durante un periodo de 32 años (1984-2016), proporcionados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Utilizando estos datos, se generaron archivos Raster de precipitación para cada mes, con una resolución de celda de 12 metros, mediante interpolación utilizando el método de Spline en la extensión Spatial Analyst. Posteriormente, se calculó la precipitación media anual combinando los archivos raster mensuales a través de la herramienta de Álgebra de Mapas (Raster Calculator).

Con base en los datos mensuales y anuales de precipitación, se derivó el Índice Modificado de Fournier (IMF) (ecuación 2), utilizando la metodología propuesta por Rutebuka et al. (2020)

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

Donde:

Pi^2 : precipitación media mensual (mm)

Pt : precipitación media anual (mm)

Luego, se determinó la erosividad (R) mediante la ecuación 3 (Rutebuka et al., 2020).

$$R = 2.56 * IMF1.065 \quad (3)$$

Los valores de erosividad fueron clasificados según Bircher et al. (2019) y se presentan en la tabla 6

Factor R	Grado
0-50	Ligero
50-500	Moderado
500-1000	Alto
>1000	Muy Alto

Tabla 6. Valoración de la Erosividad (R). Tomado de (Bircher et al., 2019)

7.3.2.2. Factor K (Erodabilidad del suelo):

Refleja la predisposición del suelo a desintegrarse debido al impacto de las gotas de lluvia. Se calculó utilizando los datos de la capa de suelos del Valle del Cauca (IGAC, 2009), aplicando la relación propuesta por Zhang et al. (2019) mediante la ecuación 4.

$$K_{USLE} = 0.1317 * f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand} \quad (4)$$

Donde:

f_{csand} : valor K para suelos con alto contenido de arena gruesa

f_{cl-si} : valor K para suelos con altas proporciones de arcilla – limo

f_{orgc} : valor K para suelos con alto contenido de materia orgánica

f_{hisand} : valor K para suelos con alto contenido de arena

Cada uno de estos parámetros se determinó de la siguiente manera (ecuaciones 5 a 8)

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 * \exp \left[-0.256 * m_s * \left(1 - \frac{m_{slit}}{100} \right) \right] \right) \quad (5)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{slit}}{m_c + m_{slit}} \right)^3 \quad (6)$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.25 * OrgC}{orgC + \exp \exp [3.72 - 2.95 * orgC]} \right) \quad (7)$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.7 - \left(1 - \frac{m_2}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_2}{100} \right) + \exp \left[-5.51 + 22.9 * \left(1 - \frac{m_2}{100} \right) \right]} \right) \quad (8)$$

Donde:

m_s : es el contenido [%] de la fracción de arena (0,05-2,00 mm de diámetro)

m_{slit} : el contenido [%] de la fracción de limo (0,002-0,05 mm de diámetro)

m_c : el contenido [%] de la fracción de arcilla (<0,002 mm de diámetro)

$orgC$: Contenido [%] de carbono orgánico

Posteriormente, los valores de erodabilidad (K) hallados fueron clasificados siguiendo la metodología de Pérez Salinas et al. (2019). Los resultados se aprecian en la tabla 7.

Textura	K	Grado	Motivo
Finas (alto contenido de arcilla)	0.05 - 0.15	Bajo	Resistencia al desprendimiento
Gruesas (arenosos)	0.15 – 0.2	Bajo	Escaso escurrimiento
Medias (francos)	0.25 – 0.45	Moderado	Moderada susceptibilidad al escurrimiento
Limosas (Alto contenido de limo)	0.45 – 0.65	Alto	Susceptibilidad a la erosión (encostramiento y alto escurrimiento)

Tabla 7. Valores de K según las texturas, Tomado de (Pérez Salinas et al., 2019)

7.3.2.3. *Parámetro LS (Longitud y pendiente del terreno)*

Este factor está integrado por el desnivel del terreno (S) y su longitud (L). Para este propósito, se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM) con imágenes de radar del satélite ALOS PALSAR (2006-2011), con una resolución espacial de 12,5 metros. Se llevó a cabo un proceso de re-muestreo para estandarizar las magnitudes espaciales del raster con los otros factores, lo que permitió realizar cálculos adicionales utilizando la herramienta de álgebra de mapas (Raster calculator).

Para determinar el *Factor L*, se procedió aplicando un relleno al Modelo Digital de Elevación (DEM) para evitar áreas vacías en el raster, utilizando la herramienta "Fill". Luego, se calculó la pendiente (β) (ecuación 9) mediante la herramienta Slope, la cual generó un mapa de pendientes.

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m + D^{m+2} * (22.13)^m} \quad (9)$$

Donde:

A : acumulación del flujo a nivel del píxel

D : es el tamaño del píxel (12,5 m)

X : es el coeficiente de forma (1 para sistemas pixelados)

Teniendo en cuenta la ecuación planteada por Bircher et al. (2019) (ecuación 10)

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (10)$$

Donde:

λ : es la longitud de la pendiente, en metros

m : es el exponente influenciado por la longitud y grado de la pendiente, y 22,13 es la longitud de una parcela unitaria

El *exponente* m se calculó mediante la ecuación 11

$$m = \frac{F}{(1 + F)} \quad (11)$$

El valor del *Factor* F se determinó con la ecuación 12

$$F = \frac{\sin \sin \beta / 0.00896}{3(\sin \sin \beta)^{0.8} + 0.56} \quad (12)$$

Donde:

β : es el ángulo de la pendiente que deberá ser transformado de grados a radianes (1 grado sexagesimal = 0,01745).

El *Factor* S se determinó aplicando las relaciones de Kinnell & Yu (2020) con las ecuaciones 13 y 14.

$$\tan \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 S_{(i,j)} = [10.8 \sin \sin \beta_{(i,j)} + 0.03] \quad (13)$$

$$\tan \tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09 S_{(i,j)} = [16.8 \sin \sin \beta_{(i,j)} + 0.05] \quad (14)$$

Donde:

S : factor de inclinación de la pendiente

β : es el ángulo de la pendiente que fue transformado de grados a radianes (1 grado sexagesimal = 0,01745).

Los valores del *Factor LS* obtenidos fueron clasificados según Lu et al. (2020), tal como se aprecia en la tabla 8.

Clase	Valor	Clasificación del factor LS
1	<1.5	Muy bajo
2	1.6 – 3	Bajo
3	3 – 5	Moderado
4	5.7 – 7	Alto
5	>7	Muy alto

Tabla 8. Clasificación del factor topográfico (LS). Tomado de (Lu et al., 2020)

7.3.2.4. El factor C (Coberturas)

Se obtuvo utilizando un mapa de cobertura terrestre en formato shapefile (.shp) proporcionado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).

Los índices del *Factor C* para cada cobertura se valoraron siguiendo la metodología propuesta Pacheco et al. (2019), tal como se aprecia en la tabla 9.

Tipo de cubierta	Factor C
Afloramientos rocosos	0.25
Arbustos	0.25
Bosque de galería y/o ripario	0.09
Bosque denso	0.001
Herbazal	0.01
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0.001
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0.003
Mosaico de pastos con espacios naturales	0.003
Mosaico de pastos y cultivos	0.003
Mosaico de cultivos	0.25
Pastos enmalezados o enrastrados	0.6
Pastos limpios	0.01
Red vial, ferroviarias y terrenos asociados	0.001
Ríos (50m)	0.001
Tejido urbano continuo	0.001

Tierras desnudas o degradadas	1
Zonas glaciares y nivales	0.25

Tabla 9. Valores de cubierta vegetal. Tomado de (Pacheco et al., 2019).

7.3.2.5. *El factor P (Conservación del suelo)*

Denota la disminución en las pérdidas de suelo al emplear técnicas de conservación, en contraste con las que se producirían sin su aplicación. Los valores para P (ver tabla 10) se calcularon siguiendo la metodología propuesta por (Pacheco et al., 2019).

Clases de cobertura	Cobertura de los Cerros CTC y CB	Factor P
Tierra agrícola	Herbazal, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales mosaico de pastos y cultivos, mosaico de cultivos, arbustos	1
Terreno edificable/ Tierra baldía	Pastos enmalezados o enrastrados, pastos limpios, red vial, ferroviarias y terrenos asociados, tejido urbano continuo, tierras desnudas o degradadas, afloramientos rocosos, zonas glaciares o nivales	1
Área arbolada	Bosque de galería y/o ripario, Bosque denso	1
Cuerpos de agua	Ríos, lagunas, lagos y ciénagas naturales	0

Tabla 10. Clasificación del factor P según el tipo de cubierta, elaboración propia con información de (Pacheco et al., 2019).

7.3.2.6. *Factor A (Pérdida de suelo):*

Se determinó calculando la erosión hídrica del suelo mediante la multiplicación de las capas de información rasterizadas, utilizando la ecuación 1 ajustada para el departamento del Cauca. Los valores de pérdida de suelo se categorizaron (ver tabla 11) siguiendo la metodología de la FAO-PNUMA-UNESCO (1980), de acuerdo estos criterios

Pérdida de suelos (t/ha/año)	Nivel de degradación
<10	Ninguna o ligera
10 – 50	Moderada
50 – 100	Acusada
100 – 200	Alta
>200	Muy alta

Tabla 11. Clasificación de la degradación de suelos. Tomado de (FAO-PNUMA-UNESCO, 1980)

7.3.3. Modelamiento de pérdida de suelo por procesos erosivos mediante el método USLE

El análisis detallado de los distintos componentes de la erosión permitió la identificación precisa de las pérdidas de suelo que están teniendo lugar en los dos cerros. A continuación, se procede a realizar un análisis exhaustivo y una discusión individual de cada variable involucrada. Los resultados obtenidos para cada variable son presentados en la tabla 12.

Método USLE						
Zona	R	K	LS	C	P	A
CTC	43.22-104.38	0,07-0.78	0-38.03	0.1-0.6	0-1	0-613.803
CB	105.32-129.86	0.07-0,46	0-25.55	0.1-0.6	0-1	0-594.089

Tabla 12. Valores de los factores determinados en el Método USLE para los cerros estudiados.

7.3.3.1. Erodabilidad R

Considerando la clasificación en la zona del CTC, se observa que el 36% del área total del polígono exhibió una alta erosividad ante las lluvias, como se evidencia en la sección A de figura 14. Esta condición está asociada con precipitaciones promedio anuales entre 950 mm y 1552 mm, donde las lluvias ejercen un considerable poder erosivo sobre el suelo. En contraste, el 58% del área presenta un nivel de erosividad moderado, mientras que solo el 6% exhibe un nivel ligero de erosividad.

En cuanto a la zona del CB, se detectó un grado de erosividad alto en el 24% de la superficie, como se evidencia en la sección B de la figura 14, mientras que el 76% restante muestra un nivel moderado de erosividad. Estos valores están relacionados con precipitaciones entre 1377 mm y 1910 mm.

El factor R generado produjo grados de erosividad ligera, moderada, alta y muy alta para los promedios de precipitación anuales de 32 años (1984–2016). Este enfoque difiere del estudio realizado por (Prado Hernández et al., 2017), que únicamente consideró las tormentas con escurrimientos, obteniendo valores de $1154,9 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

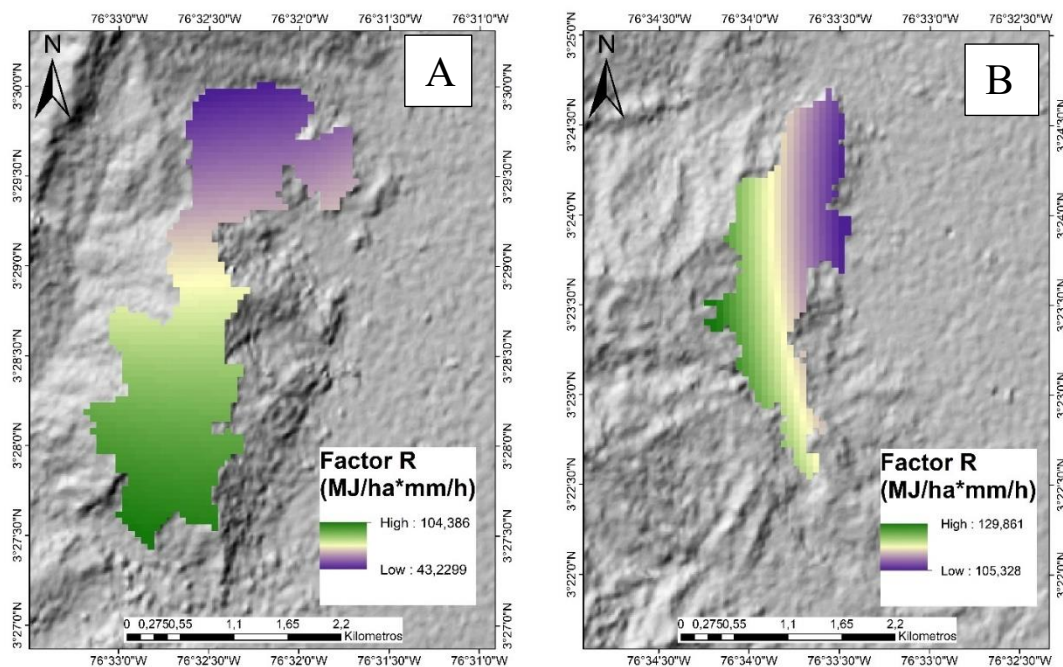


Figura 14. Mapas de Factor R para las zonas de estudio, elaboración propia

Se observa que el resultado muestra una intensificación notable de la variable de erodabilidad R hacia el suroccidente, mientras que es considerablemente menor en la dirección noreste.

7.3.3.2. Erodabilidad K

Considerando que los valores de este factor están asociados con las texturas que van desde medias a muy finas de los tipos de suelo presentes en la zona de estudio, en términos de sus contenidos de arena, limo, arcilla y carbono orgánico, según la clasificación del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2016), tanto el CTC como el CB exhibieron un grado de erodabilidad que varía de moderado a severo, como se evidencia en la figura 15. Esto sugiere una resistencia inadecuada al desprendimiento del suelo.

En ambas zonas, los suelos consisten principalmente en entisoles, junto con andisoles, oxisoles, molisoles y ultisoles, que se caracterizan por tener una evolución limitada de su material

parental, a excepción de los ultisoles. En términos generales, estos suelos se han desarrollado a partir de materiales orgánicos con un estado de evolución que va desde poco a moderado, según el IGAC (2009).

Los resultados obtenidos permitieron clasificar la erodabilidad del suelo de manera general como moderada ($0,07$ a $0,78$ (Ton/ha) / (ha/MJ*ha/mm)).

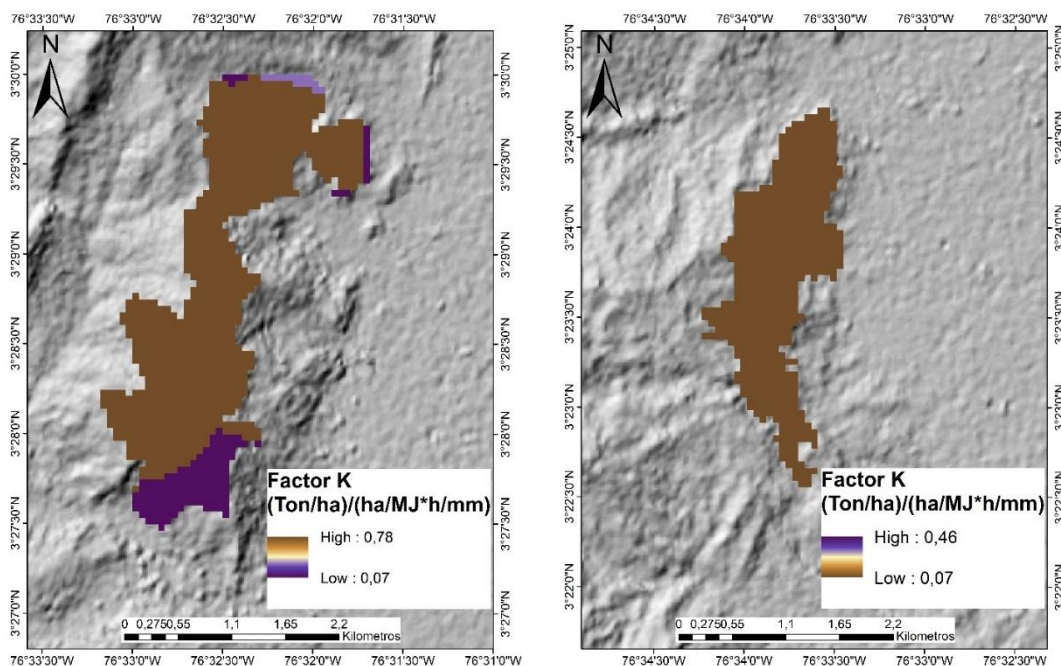


Figura 15. Mapas de Factor K para las zonas de estudio, elaboración propia

Cabe destacar que el rango más alto se obtuvo para el CTC, lo que podría indicar que el terreno de este cerro tiene una mayor probabilidad de ser erosionado debido a sus características inherentes del suelo.

7.3.3.3. Factor topográfico LS

Los valores del factor topográfico (LS) muestran un grado alto y muy alto en el 56% del área del CTC y en el 39% del área del CB, como se evidencia en la figura 16. Este fenómeno está relacionado con la presencia de pendientes escarpadas (de 50 a 75 %) y fuertemente escarpadas (más del 75 %), como se aprecia en los mapas 5 y 6 que denotan las pendientes de la zona de estudio.

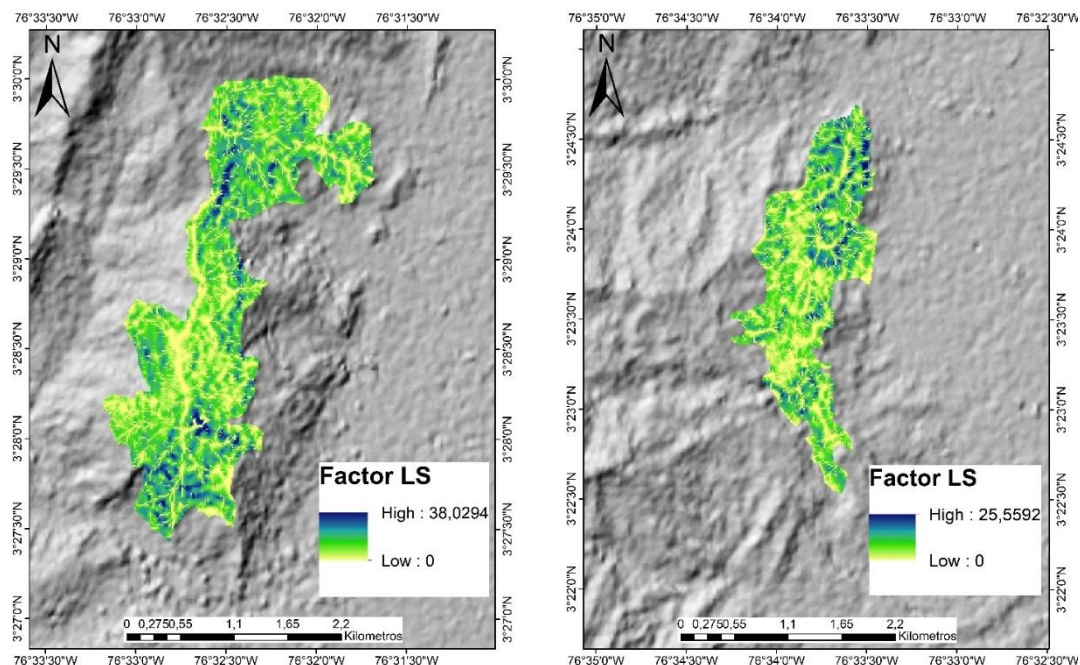


Figura 16. Mapas de Factor LS para las zonas de estudio, elaboración propia.

Cabe señalar que el CTC presenta un rango más alto del factor LS, lo que sugiere que sus pendientes son más pronunciadas y las longitudes de sus laderas son más extensas en comparación con las del CB.

7.3.3.4. Factor de coberturas vegetales C

Los valores para el factor de cobertura vegetal (C) en todas las áreas estudiadas variaron entre 0.1 y 0.6. Según (Pacheco et al., 2019). Estos valores indican la influencia de las coberturas vegetales en la pérdida de suelo, donde 1 representa coberturas con una mayor relación con la pérdida de suelo y viceversa. En ambas zonas de estudio, las coberturas vegetales predominantes incluyeron herbazales, pastos limpios, bosques secos tropicales de galería y/o ribereños, cultivos de caña, pastos con malezas o rastrojos, y cultivos transitorios (IGAC, 2016)

Los valores más altos de C representan coberturas asociadas con procesos de erosión debido a su falta de anclaje al suelo, como se observa en la figura 17, específicamente en las áreas que presentan coloración verde. Dentro de estas coberturas se incluyen pastos con malezas o rastrojos, pastos limpios, arbustos y cultivos transitorios.

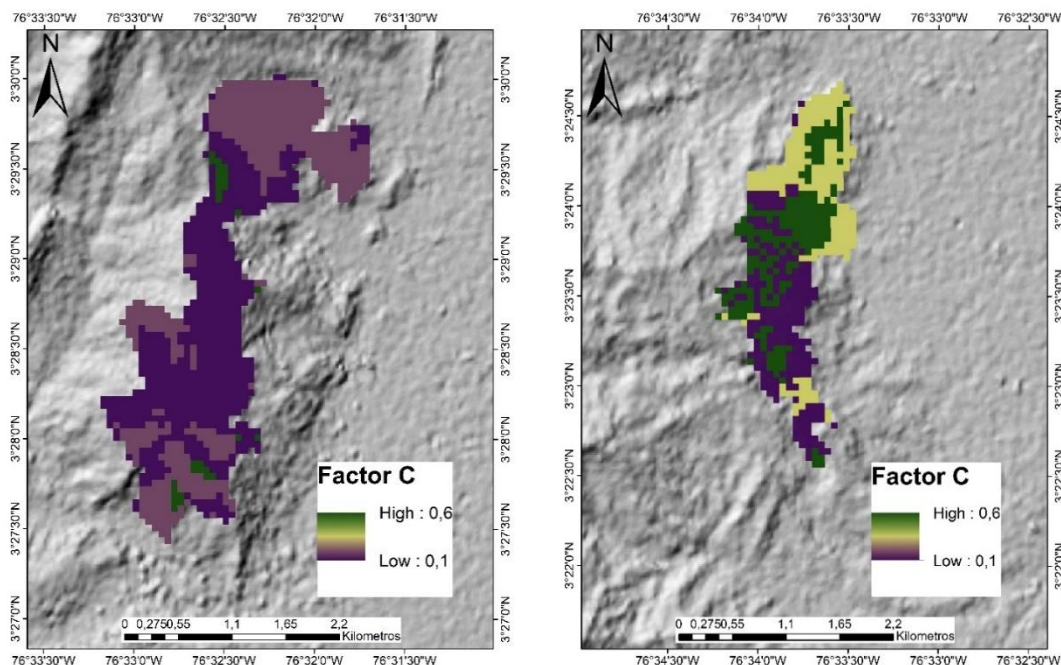


Figura 17. Mapas de Factor C para las zonas de estudio, elaboración propia.

7.3.3.5. *Factor de prácticas P*

En las zonas estudiadas, los valores de este factor se establecieron como una constante 1. Según Martínez-Mena et al. (2020), estas prácticas miden la pérdida de suelo ante la aplicación de un determinado control de erosión, donde los valores más cercanos a 1 representan la ausencia de prácticas de control, mientras que los valores más cercanos a 0 están asociados con prácticas de control que incluyen la cobertura del suelo. Tanto en el CTC como en el CB, se utiliza la constante 1, como se observa en la figura 18, debido a que la mayoría de la superficie de ambos cerros se caracteriza por presentar zonas con pastos con malezas o rastrojos, pastos limpios, y áreas urbanas continuas y discontinuas, que no representan una práctica efectiva de conservación.

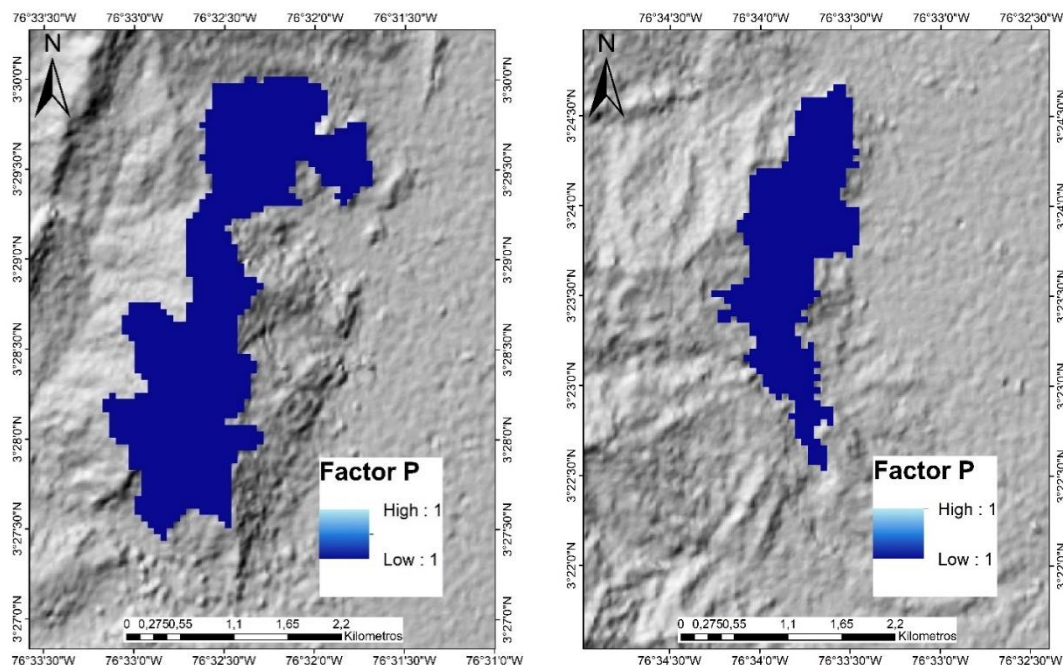


Figura 18. Mapas de Factor P para las zonas de estudio, elaboración propia

7.3.3.6. *Perdida Media Anual de Suelo A*

En el CTC, la pérdida media anual de suelo se clasificó de la siguiente manera: el 68% de la zona experimentó una erosión moderada, con pérdidas de entre 10 y 50 toneladas por hectárea al año. El 17% presentó una erosión ligera, mientras que solo el 7% mostró ausencia de erosión y el 8% restante experimentó erosión severa, como se observa en la sección A de la figura 19.

En el CB, la pérdida media anual de suelo se clasificó de la siguiente manera: el 73% de la zona experimentó una erosión moderada, con pérdidas de entre 10 y 50 toneladas por hectárea al año. El 11% presentó una erosión severa, mientras que el 10% mostró ausencia de erosión y el 6% restante experimentó erosión ligera, como se observa en la sección B de la figura 19.

La representación espacial de los procesos de erosión en los dos cerros tutelares se presenta en la figura 19, que ilustra el grado de impacto en los suelos debido a la degradación y pérdida de suelo por erosión.

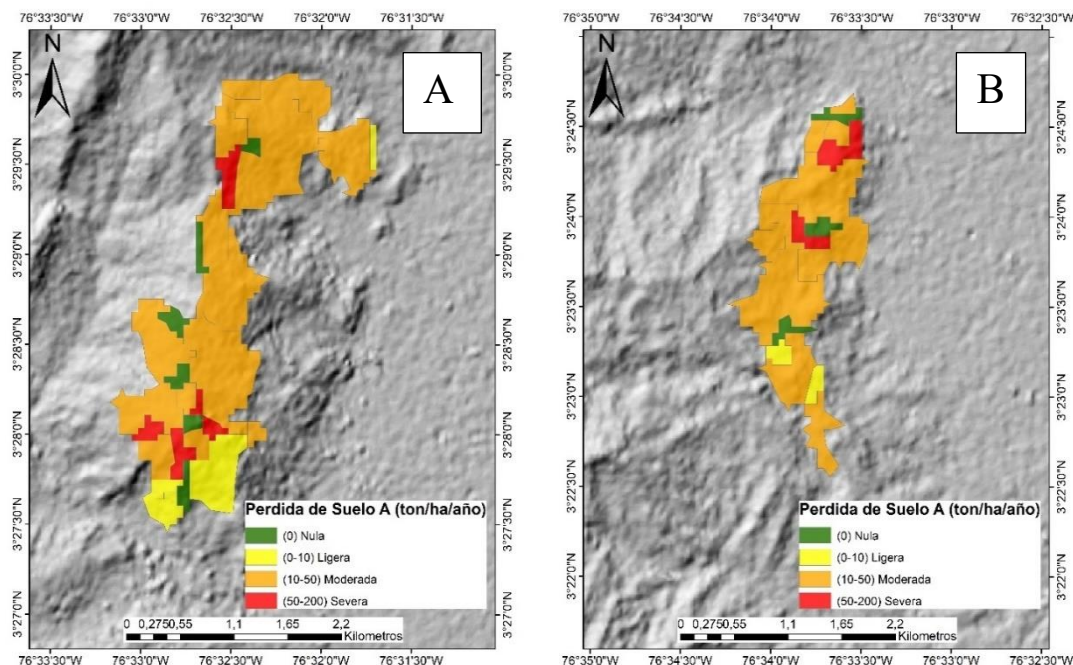


Figura 19. Mapa de Factor A para las zonas de estudio, elaboración propia

7.3.4. Análisis multitemporal de la zona de estudio

El análisis multitemporal es fundamental para observar la evolución del suelo en la zona de estudio por varias razones clave. Permite identificar cambios significativos en la cobertura vegetal, la morfología del terreno y la distribución del suelo a lo largo del tiempo, incluyendo la pérdida gradual de la vegetación, la erosión de suelos superficiales y los procesos de acumulación o desplazamiento de sedimentos, todos los cuales afectan la estabilidad del terreno. Además, al analizar imágenes y datos de diferentes períodos temporales, es posible detectar tendencias a largo plazo en la degradación del suelo y la intensificación de los procesos erosivos (Achicanoy et al., 2018).

Esto proporciona una perspectiva histórica que ayuda a comprender cómo y por qué han cambiado las condiciones del terreno y cuáles podrían ser las proyecciones futuras si las tendencias continúan.

Asimismo, un análisis multitemporal puede revelar los impactos de eventos climáticos extremos, como tormentas intensas o períodos prolongados de lluvias, en la estabilidad del suelo. Estos eventos pueden acelerar los procesos erosivos y desencadenar movimientos en masa, y el análisis multitemporal permite estudiar cómo estos eventos afectan la evolución del paisaje. En

términos de planificación y gestión del territorio, la información obtenida a partir del análisis multitemporal es crucial. Ayuda a identificar áreas vulnerables a la erosión y a los movimientos en masa, permitiendo implementar medidas de mitigación adecuadas como la reforestación, la construcción de estructuras de contención o la zonificación restrictiva para evitar el desarrollo en áreas de alto riesgo.

Este contexto es fundamental para entender la importancia del estudio de ortofotos históricas obtenidas con Google Earth Pro, las cuales evidencian la evolución del CTC y CB en términos de erosión del suelo y pérdida de cobertura vegetal. Este fenómeno ha sido identificado como una causa significativa de los movimientos en masa observados entre 1979 y 2016 en los Cerros de las Tres Cruces y CB. Mediante el método USLE (Universal Soil Loss Equation), utilizado para medir la pérdida de suelo, se observó que ambos cerros presentan un significativo porcentaje de su área con erosión moderada a alta.

Entre los años 1979 y 2016, se lograron recolectar datos de 26 eventos de movimientos en masa atribuidos a esta degradación del suelo. Estos eventos han sido detonados principalmente por eventos de lluvias intensas, exacerbados por la pérdida de cobertura vegetal y la erosión del suelo en los cerros. La imagen satelital más antigua disponible para realizar el análisis multitemporal data del año 1969. Aunque esta imagen no cuenta con la suficiente resolución para un análisis detallado, permite observar que la mayoría de la zona de estudio conserva una buena cobertura vegetal en esa época a excepción del flanco este, en donde se generaron la mayoría de los movimientos en masa. Sin embargo, al superponer el primer evento de movimiento en masa registrado el 19 de enero de 1979, es decir, 10 años después de la imagen, y el segundo evento registrado el 16 de febrero de 1984, es decir, 15 años después de la imagen, se observa una notable reducción en la cobertura vegetal en ambas áreas específicas, como se puede apreciar en la figura 20.

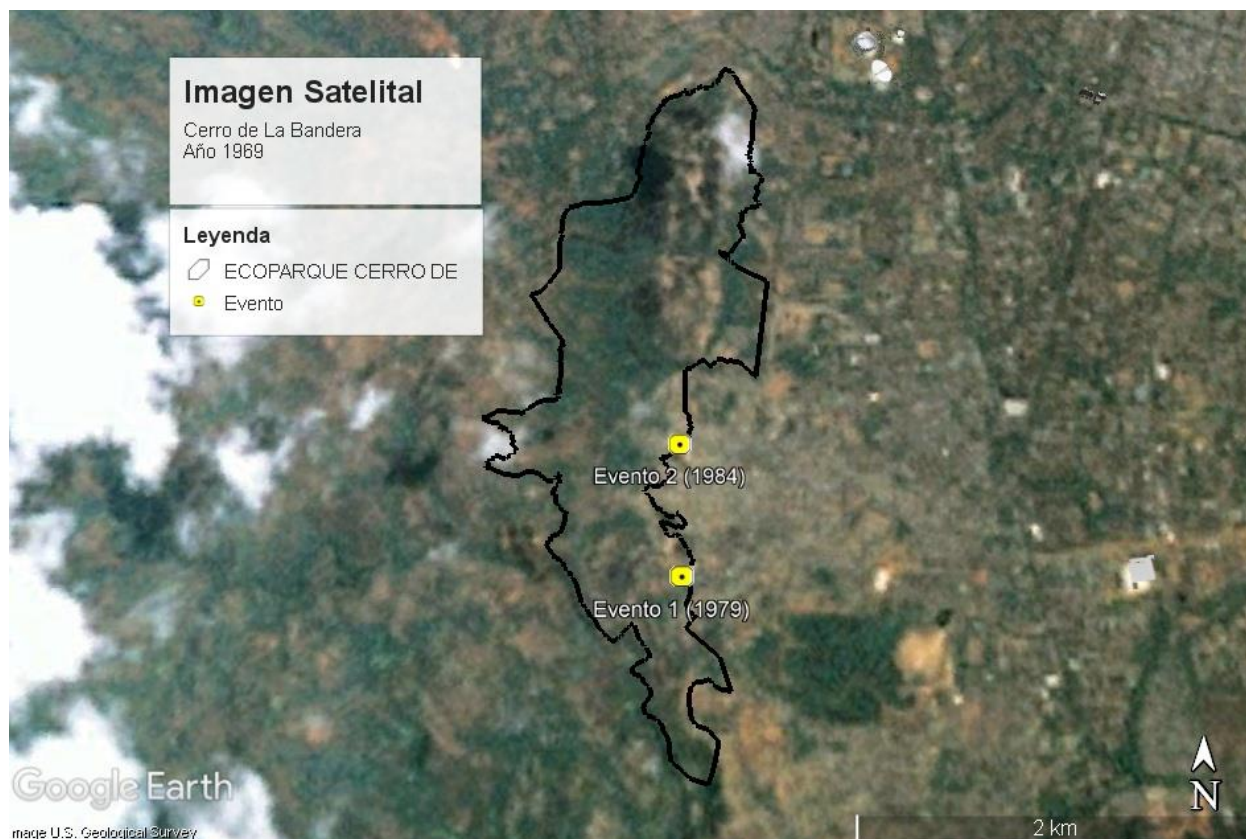


Figura 20. Imagen satelital del CB, año 1969, Google Earth Pro.

Además, al revisar los registros geológicos históricos y superponer la capa de recursos mineros, se evidencia la actividad minera en las proximidades de ambos lugares donde ocurrieron los dos movimientos en masa. Esto confirma la observación encontrada en las fuentes bibliográficas consultadas, las cuales especifican que para ambos eventos se produjeron movimientos en masa de tipo deslizamiento en minas de carbón.

La influencia de la minería en la degradación del suelo en este contexto puede explicarse por varios factores interrelacionados. Primero, la actividad minera de carbón implica la remoción de la capa vegetal y la alteración significativa de la topografía natural, lo que expone el suelo a procesos erosivos acelerados. La extracción del carbón también debilita la estructura del suelo y reduce su capacidad de retención de agua, aumentando la susceptibilidad a movimientos en masa durante eventos de lluvias intensas.

Además, las operaciones mineras frecuentemente generan cambios en el flujo de aguas subterráneas y superficiales, lo cual puede alterar el equilibrio hidrológico local y predisponer a la aparición de movimientos en masa. La presencia de excavaciones mineras cercanas puede

modificar la estabilidad del terreno y crear zonas propensas a la erosión y el colapso, especialmente cuando las prácticas de restauración ambiental no son adecuadamente implementadas, como era común en esos periodos de tiempo específicos (Longley et al., 2015).

En consecuencia, la combinación de la pérdida de cobertura vegetal debido a la actividad minera y las condiciones climáticas adversas contribuyó significativamente en la ocurrencia de estos movimientos en masa registrados en el CB en enero de 1979 y febrero de 1984. Este ejemplo subraya la importancia de considerar los impactos potenciales de la actividad humana, como la minería, en la dinámica del suelo y la susceptibilidad a fenómenos naturales como los movimientos en masa.

La erosión gradualmente descompuso y eliminó la capa superficial del suelo en estas áreas del CB, reduciendo su cohesión y estabilidad. Este proceso debilitó significativamente la capacidad del terreno para sostener la vegetación y otras capas superiores, aumentando así su propensión a sufrir deslizamientos y colapsos. Además, la erosión eliminó la cobertura vegetal que actúa como una barrera natural, incrementando la vulnerabilidad del suelo a la erosión hídrica y eólica, exacerbando los procesos de inestabilidad del terreno en los cerros mencionados.

La formación de surcos y canales debido a la erosión facilitó la concentración del flujo de agua de lluvia, que, para el evento de 1984, aunque la precipitación detonante fue muy baja (1 mm), pero acumuló un total de 587 mm en los tres meses anteriores. Esto muy probablemente saturó el suelo y pudo generar presiones internas que eventualmente desencadenaron el movimiento en masa, caracterizado por un flujo de lodos en laderas con pendientes inclinadas a fuertemente inclinadas, y por su litología característica de la Formación Guachinté.

La imagen posterior encontrada para el análisis multitemporal data del año 1985, al igual que la imagen de 1969, carece de la suficiente resolución debido a su antigüedad, lo que limita un análisis detallado. No obstante, al igual que en los eventos anteriores, se localiza en la zona de extracción minera de carbón, lo cual sugiere una relación entre este evento 3 y el evento 1 de 1979, ambos caracterizados por una escasa cobertura vegetal. Desde el punto de vista litológico, esta área del CB que incluye los eventos 1 y 3 corresponde a la Formación Volcánica (Kv), la cual ha desarrollado regolitos espesos, capas superficiales de material rocoso alterado por procesos físicos y químicos. Este sector está fuertemente influenciado por fallas regionales que intensifican la degradación del suelo y aumentan su vulnerabilidad a la erosión.

Para el evento de 1984, se registró una precipitación detonante de 23 mm y una acumulación de 259 mm en tres meses, lo que sugiere que más que la saturación acumulada a largo plazo del suelo, el principal factor desencadenante fue la intensidad de la lluvia ese mismo día, y como causas principales se recalca la actividad minera y en especial las características estructurales que rigen esta área en particular.

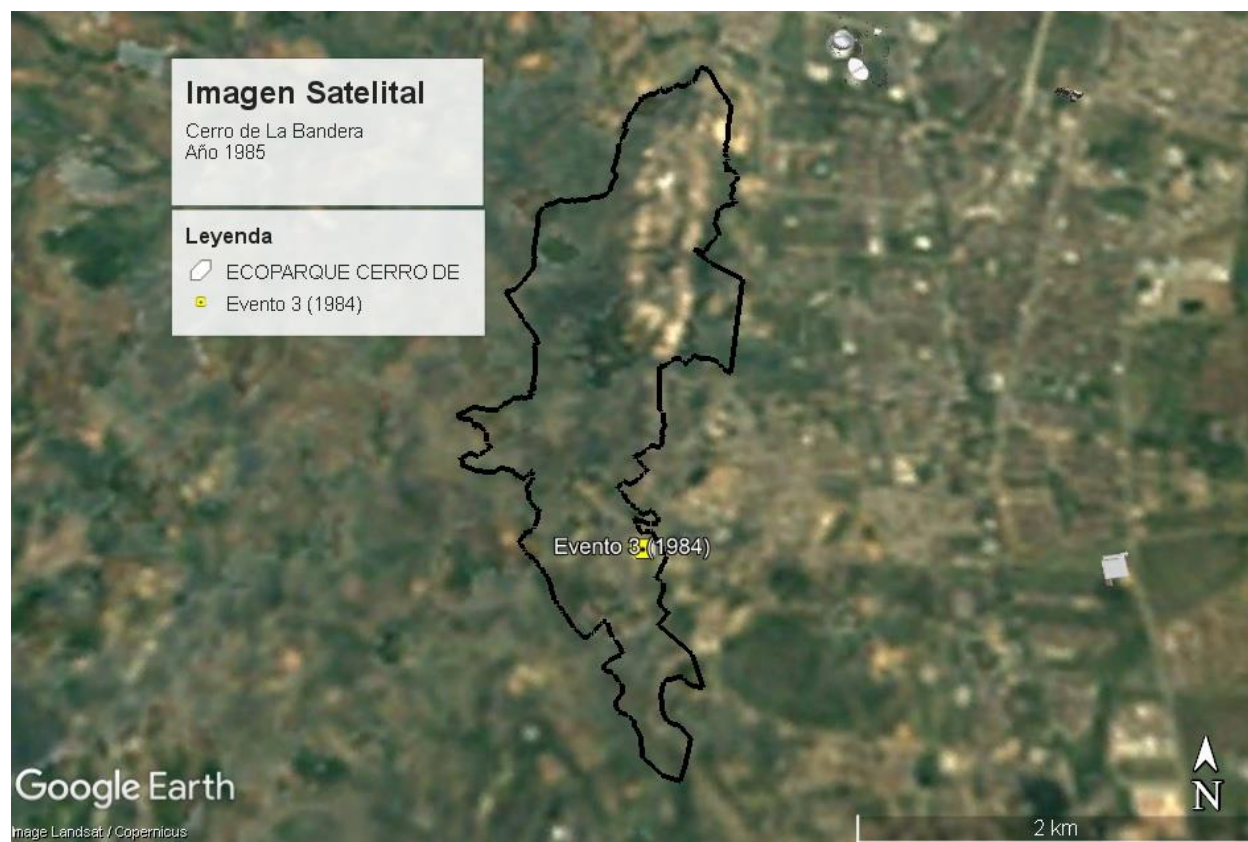


Figura 21. Imagen satelital del CB, año 1985, Google Earth Pro

Para el evento 4 registrado el 31 de mayo de 1987, se utilizó la imagen satelital del año 1985 por ser la más cercana al evento. Es importante señalar la baja resolución de esta imagen debido a su antigüedad, pero aun así permite observar que la mayoría del área del CTC presenta una alta densidad de cobertura vegetal, con excepción del área donde se ubica el evento 4, la cual muestra una coloración marrón clara que indica escasez de vegetación.

En cuanto a la pérdida de suelo por erosión, se observa que el punto donde ocurrió el evento 4 se encuentra en un área de erosión ligera de acuerdo con el mapa de pérdida de suelo por erosión que se ilustra en la figura 22 y la cartografía de degradación de suelo por erosión obtenida del IDEAM, que se observa en los mapas 9 y 10. Sin embargo, al analizar este punto con la cartografía

geológica, se puede inferir que estructuralmente se encuentra en la zona de influencia de una gran falla definida NE-SW, la cual contribuye sistemáticamente a la degradación del suelo y su posterior erosión. Desde el punto de vista litológico, el evento de movimiento en masa 4 se ubica en la unidad geológica correspondiente a la Formación Guachinté.

Es relevante destacar que este punto presenta pendientes que van desde fuertemente quebradas hasta escarpadas, lo cual aumentó significativamente la probabilidad de ocurrencia del movimiento en masa, debido a la mayor inclinación del terreno y a la mayor influencia de la precipitación. Aunque el día exacto del evento se registró una precipitación de 3 mm, la acumulación en los tres meses anteriores fue de 287 mm, lo que para este tipo de litología resultó en la sobresaturación del suelo y posteriormente provocó un movimiento en masa de tipo flujo de lodos.

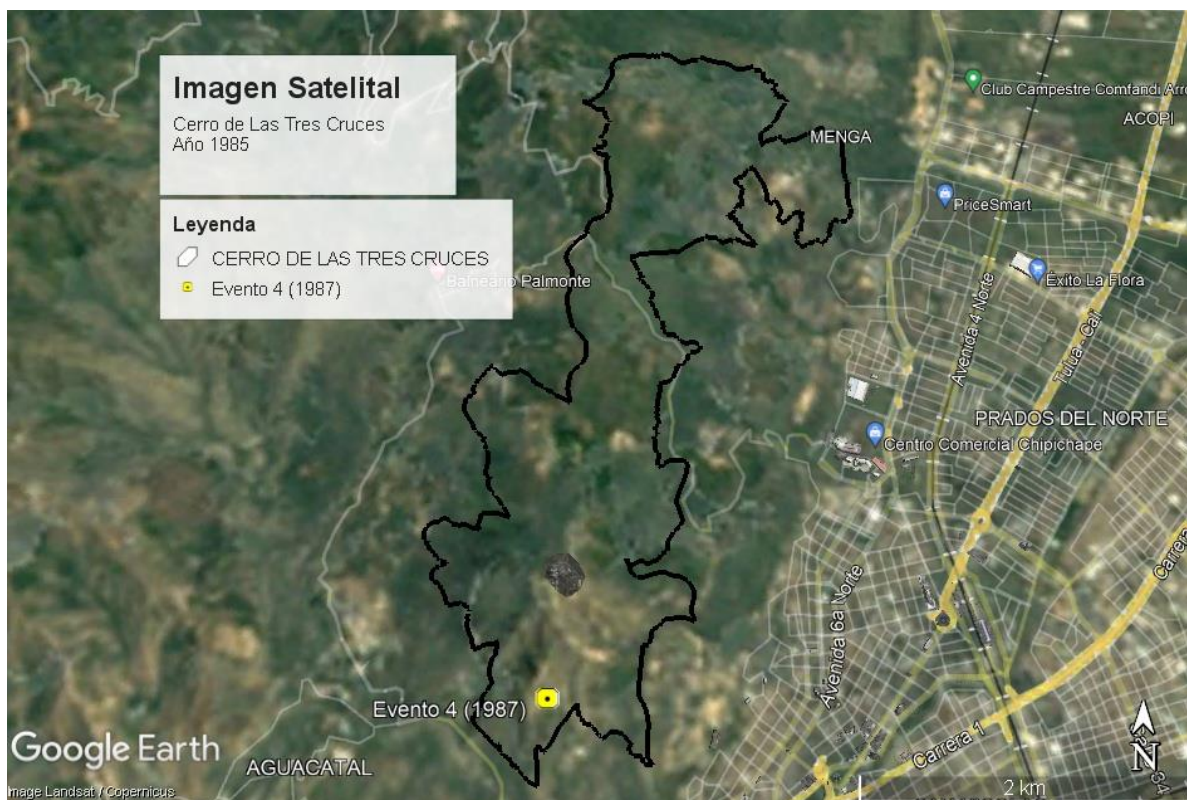


Figura 22. Imagen satelital del CTC, año 1985, Google Earth Pro.

Los eventos 5 y 6, registrados el 21 de noviembre de 1987 y el 23 de mayo de 1993 respectivamente, fueron analizados utilizando una imagen satelital del año 1985 del CB, la más cercana disponible a ambas fechas. Debido a su baja resolución, esta imagen no permite un análisis detallado de la erosión en el área. Sin embargo, se puede inferir que ambos eventos están

relacionados entre sí por su ubicación espacial, y también están vinculados al evento 2 debido a similitudes geológicas tanto estructurales como litológicas, así como la presencia de actividad minera.

Aunque estos eventos ocurrieron en diferentes fechas, es reconocido que los movimientos en masa tienden a repetirse en áreas donde han ocurrido anteriormente debido a la inestabilidad del terreno. Esta recurrencia puede atribuirse a varios factores, como la presencia de debilidades geológicas persistentes, cambios en la estructura del suelo debido a eventos pasados, o perturbaciones causadas por actividades humanas como la minería. Estos elementos contribuyen al incremento de la vulnerabilidad del área a fenómenos de este tipo (GEMMA, 2007)

Además, aunque la resolución limitada de la imagen no permite un análisis exhaustivo, es evidente que durante este periodo de tiempo se observa una expansión urbana considerable desde la Comuna 18 hacia el CB. Esta actividad antropogénica también está relacionada con la ocurrencia de movimientos en masa, ya que la urbanización puede alterar el equilibrio natural del terreno, modificar la escorrentía superficial y afectar la estabilidad de las pendientes, exacerbando así los riesgos de erosión y movimientos en masa.

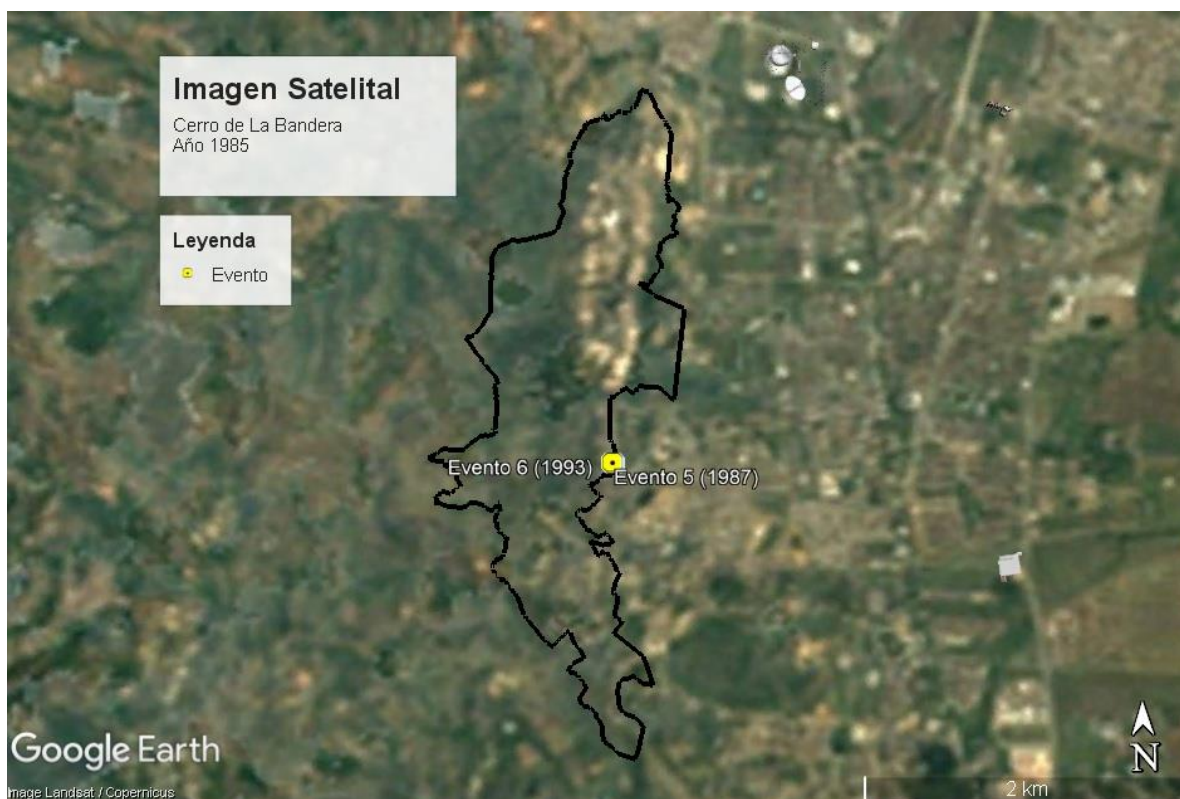


Figura 23. Imagen satelital del CB, año 1985, Google Earth Pro.

Para los eventos de movimientos en masa 7, 10, 13 y 14 ocurridos el 14 de abril de 1997, 16 de abril de 2000, 30 de octubre de 2001 y 11 de junio de 2001 respectivamente, se utilizó una imagen satelital del año 2001 debido a su proximidad con estas fechas. Para los eventos 7, 13 y 14, localizados en la parte nororiental del CTC según se observa en la figura 24, se identificaron condiciones geológicas correspondientes a la Formación Volcánica (Kv). La cartografía geológica reveló la ausencia de características estructurales significativas como fallas definidas o la presencia de recursos mineros en esta área.

En términos de pendientes, este sector del CTC donde ocurrieron estos eventos presenta gradientes que van desde ligeramente inclinados hasta fuertemente inclinados, como aprecia en el mapa 5. La imagen satelital disponible, que cuenta con una mejor resolución que las anteriores, muestra claramente que la expansión urbana ha sido una de las principales causas de la degradación del suelo en esta zona. Tanto los resultados del método USLE como la cartografía obtenida del IDEAM indican que este sector experimenta niveles de erosión moderada a alta.

Además, para cada uno de estos puntos se observó que las precipitaciones registradas el día exacto en que ocurrieron los eventos fueron superiores a 23 mm, y la acumulación de precipitación en los tres meses previos fue superior a 533 mm. Estas condiciones llevaron a la saturación del suelo y, como consecuencia, a la ocurrencia de movimientos en masa en forma de deslizamientos.

En cuanto al evento 10 del 16 de abril del 2000, se identifican características geológicas correspondientes a la Formación Guachinté. Además, el área donde ocurrió este evento está notablemente influenciada por una gran falla definida de orientación NE/SW. Es probable que, en parte, la actividad de la falla tenga una influencia en la resistencia de los materiales que son atravesados por esta y, por ende, que las condiciones de inestabilidad aumenten.

Adicionalmente, se observa la proximidad de una vía municipal en las cercanías del punto del evento. Es razonable inferir que la construcción de esta vía pudo haber sido un factor contribuyente a la degradación del terreno y, por consiguiente, a su inestabilidad. La actividad de construcción de infraestructuras como carreteras puede alterar la geomorfología natural del terreno, modificar los patrones de drenaje y aumentar la exposición del suelo a la erosión, lo cual incrementa el riesgo de movimientos en masa como el registrado en esta fecha.

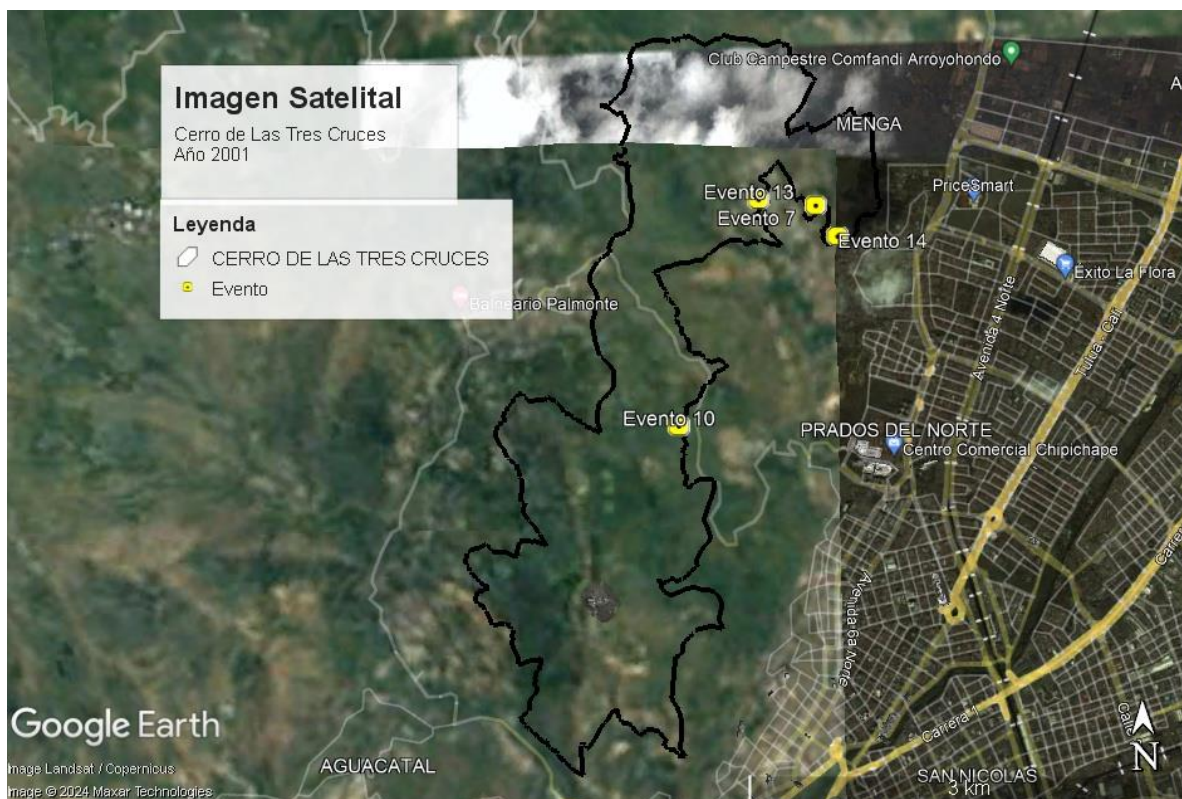


Figura 24. Imagen satelital del CTC, año 2001, Google Earth Pro.

Para los eventos 8, 9, 11, 12 y 15 ocurridos el 5 de mayo de 1998, 4 de junio de 2000, 22 de noviembre de 2000, 13 de diciembre de 2000 y 17 de diciembre de 2001 respectivamente, se empleó la imagen satelital del CB del año 2001 debido a su mayor resolución en comparación con las imágenes anteriores y su cercanía con estas fechas. Los eventos 8 y 11 comparten características geológicas y estructurales similares a los eventos mencionados previamente (2, 5 y 6), ya que se localizan en el mismo sector del área Este del CB y pertenecen a la misma unidad geológica bajo el régimen del sistema de fallas.

Durante este período de tiempo, la imagen satelital revela una expansión urbana significativa en la zona. Este proceso de urbanización implica la construcción de infraestructuras como carreteras, viviendas y otras edificaciones. La urbanización altera drásticamente la geomorfología natural del terreno al remover la cobertura vegetal, compactar el suelo y modificar los patrones de drenaje natural. Estos cambios aumentan la susceptibilidad del terreno a la erosión y la inestabilidad, creando condiciones propicias para la ocurrencia de movimientos en masa.

Además de los factores geológicos y estructurales inherentes al área, la expansión urbana agrega presión adicional sobre el terreno al aumentar la carga hidráulica debido a la impermeabilización de superficies, lo que puede intensificar los efectos de las precipitaciones al reducir la capacidad de infiltración del suelo. Esto puede llevar a la saturación del suelo y eventualmente desencadenar movimientos en masa, como los registrados en las fechas mencionadas.

Por otra parte, los eventos 9 y 15 presentan características similares al evento 3, ya que se localizan en el área suroriental del CB, una zona afectada por la extracción minera y una incipiente expansión urbana, evidenciada por imágenes satelitales. A pesar de que el evento 3 ocurrió en 1985 y los eventos 9 y 15 en 2000 y 2001 respectivamente, las condiciones del terreno y la larga historia de actividad minera, junto con la mencionada expansión urbana, predisponen a la recurrencia de movimientos en masa en esta región.

Estos eventos tienden a repetirse debido a varios factores. Primero, la actividad de extracción minera ha modificado significativamente la estructura y estabilidad del suelo, haciéndolo más susceptible a deslizamientos. Segundo, la expansión urbana introduce cambios adicionales en el uso del suelo y en la cobertura vegetal, alterando los patrones naturales de drenaje y aumentando la exposición a procesos erosivos. Finalmente, las precipitaciones son un factor detonante crucial. Las lluvias intensas, como las registradas con más de 10 mm en un día y acumulados de 353 mm en tres meses, causan la saturación del suelo a largo plazo, lo que conduce a su degradación y aumenta el riesgo de movimientos en masa.

El evento 12, registrado el 4 de junio de 2000, aparece en la imagen satelital bajo la sombra de una nube, pero al acercar la imagen se distingue claramente que ocurrió en el margen de una vía no pavimentada hasta ese año. Desde el punto de vista litológico, se encuentra en la unidad Qca de acuerdo con el mapa 4 que refleja la geología del CB, tomando información del (SGC) ese tipo de depósito no es estable y aunque estructuralmente no muestra zonas de falla definidas, es probable que se produzcan movimientos en masa. No obstante, la zona presenta pendientes que van desde fuertemente inclinadas hasta fuertemente quebradas como se evidencia en el mapa 6, lo que implica una mayor probabilidad de desprendimiento de material. Por otra parte, según el método USLE y la cartografía de degradación del suelo por erosión del IDEAM, este punto se

califica dentro del rango de erosión moderada, lo que podría inferir que la inestabilidad del terreno sea por características netamente litológicas.

En el año mencionado, se comienza a observar en la imagen satelital la expansión de la Comuna 19 en dirección al CB, lo cual podría tener implicaciones significativas en términos de cambios en el uso del suelo y la estabilidad del terreno.

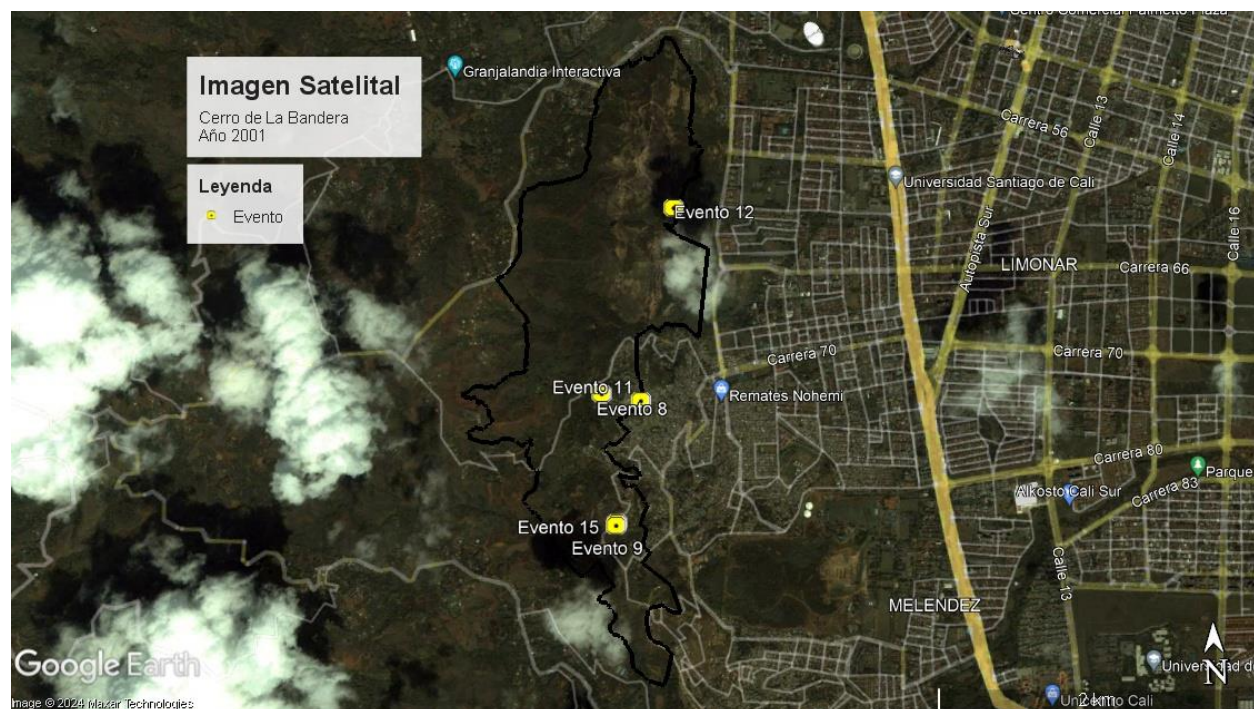


Figura 25. Imagen satelital del CB, año 2001, Google Earth Pro

Para los eventos 17 y 18, ocurridos el 9 de abril de 2004 y el 28 de abril de 2005 respectivamente, se utilizó una imagen satelital del CB del año 2007, cercana a esas fechas. Esta imagen posee una resolución óptima que permite observar claramente que ambos puntos han sido fuertemente influenciados por la construcción de infraestructura vial. Esta actividad modifica significativamente el terreno y puede conducir a la inestabilidad, especialmente considerando las pendientes que van desde fuertemente quebradas hasta escarpadas en ambos sitios, lo cual crea condiciones propicias para los movimientos en masa.

Además, tanto el evento 17 como el 18 ocurren sobre la Formación Guachinté, una unidad geológica que, aunque no muestra rasgos estructurales definidos, presenta para este sector actividad minera específicamente al norte del CB. Aunque estos eventos tienen un año de diferencia y están separados por aproximadamente 335 metros, la influencia de la precipitación

fue fundamental para su ocurrencia. Ambos eventos ocurrieron en el mes de abril, un periodo conocido por sus lluvias abundantes, y las condiciones del suelo, junto con la sobresaturación causada por las precipitaciones a largo plazo (acumuladas en tres meses), predisponen el terreno para estos movimientos en masa.

En resumen, la combinación de la actividad de construcción vial, las características geológicas de la Formación Guachinté y la influencia de las precipitaciones son los factores clave que explican la ocurrencia de movimientos en masa en los eventos 17 y 18 en la zona del CB.

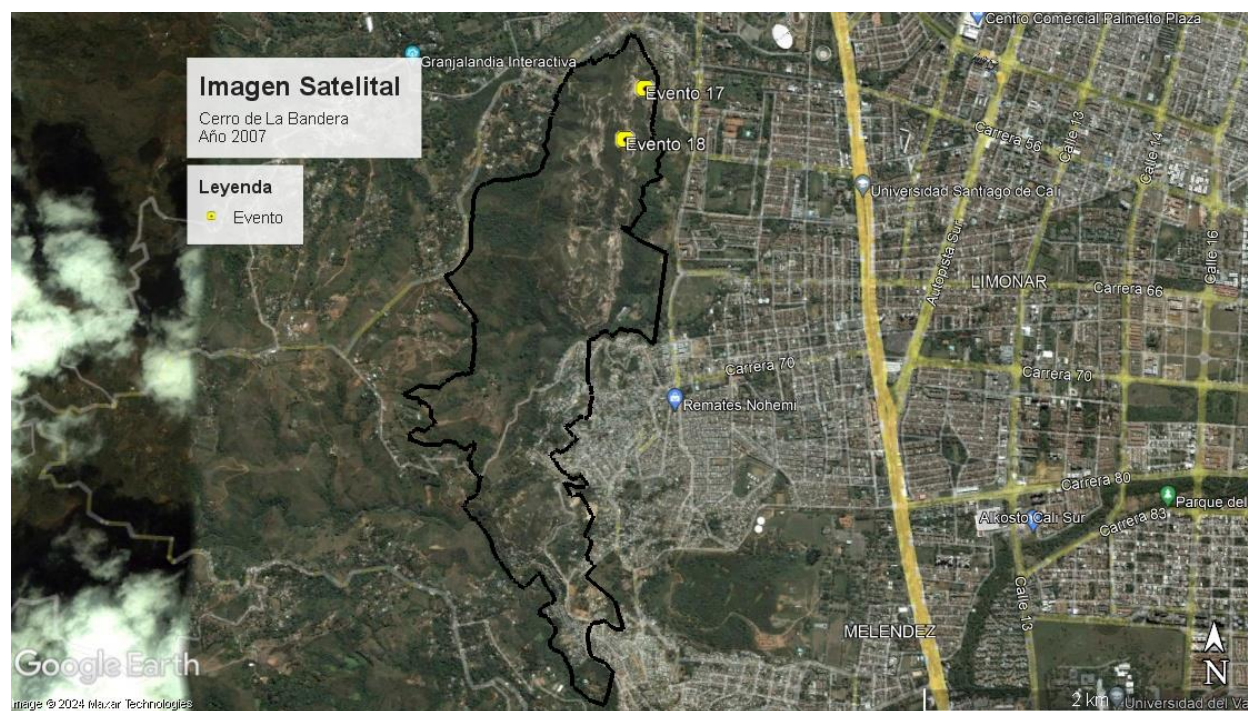


Figura 26. Imagen satelital del CB, año 2007, Google Earth Pro.

Para los eventos 16, 19, 20 y 21, ocurridos el 15 de enero de 2004, 3 de febrero de 2005, 12 de octubre de 2007 y 30 de marzo de 2007 respectivamente, se empleó la imagen satelital del CB de 2009, como se observa en la figura 27, la cual coincidía más cercanamente con las fechas de los eventos. Esta imagen tiene una excelente resolución que permite observar detalles morfológicos significativos. En particular, para el evento 16, aún se puede observar una capa vegetal no recuperada, evidenciada por áreas de color marrón claro con cicatrices del movimiento. En cambio, para los otros eventos, se nota que la cobertura vegetal ha comenzado a regenerarse.

Se observa que los eventos 16, 20 y 21 están más cercanos a zonas de expansión urbana para el año de la imagen satelital, lo cual podría haber contribuido a la desestabilización del terreno

debido a los diversos procesos asociados con la urbanización. En contraste, el evento 19 está asociado más directamente con la construcción de infraestructura vial, al encontrarse en las cercanías de una vía municipal.

Desde el punto de vista litológico, los eventos 16, 20 y 21 se sitúan en la misma unidad geológica correspondiente a la Formación Guachinté. Estructuralmente, estos eventos están influenciados por un sistema de dos fallas definidas que se extienden en dirección NE/SW en esta área. Estas características estructurales condicionan el terreno a la inestabilidad, acentuando las pendientes que van desde inclinadas hasta escarpadas, lo cual creó condiciones propicias para la ocurrencia de estos movimientos en masa.

Por otro lado, el evento 19 ocurre sobre la unidad geológica de la Formación Volcánica Kv, la cual está influenciada por una falla definida NE/SW que marca el contacto con la Formación Guachinté, como se observa en el mapa 2, el cual representa la geología del CTC. Esta configuración geológica también contribuye a la inestabilidad del terreno en esa zona.

En resumen, los eventos 16, 19, 20 y 21 muestran diferentes contextos y causas probablemente asociadas con la urbanización, la infraestructura vial y las características geológicas y estructurales del terreno, todos los cuales contribuyeron a la predisposición del área a experimentar movimientos en masa.

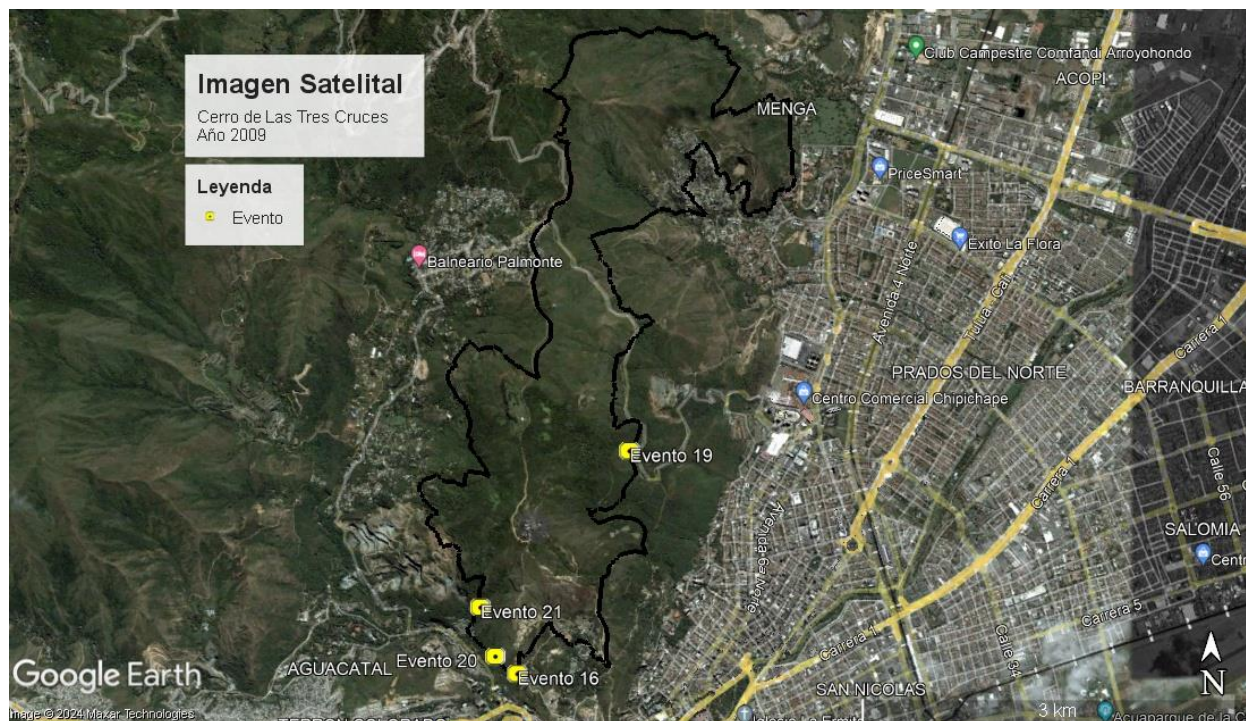


Figura 27. Imagen satelital del CTC, año 2009, Google Earth Pro.

Para los eventos 22, 23, 24 y 25, ocurridos el 10 de noviembre de 2010, 31 de agosto de 2011, 8 de abril de 2011 y 17 de diciembre de 2011 respectivamente, se empleó una imagen satelital del CTC del año 2011, la cual coincidía mejor con los años en que ocurrieron estos eventos de movimiento en masa. En esta imagen se puede observar con alta resolución la pérdida considerable de cobertura vegetal en comparación con la imagen satelital del 2009 para la mayoría del área de Cerro, además se presenta una expansión urbana considerable desde la Comuna 2 hacia el interior del área del CTC, lo cual probablemente haya contribuido a la inestabilidad de los terrenos donde ocurrieron estos movimientos, especialmente para los eventos 22, 23 y 24. En contraste, el evento 25 parece estar más asociado con la construcción de infraestructura vial.

En la imagen satelital se pueden visualizar claramente las pendientes del terreno, confirmadas mediante cartografía con modelos de elevación digital terrestre (DEM), las cuales van desde fuertemente inclinadas hasta escarpadas, favoreciendo el deslizamiento de material.

Desde el punto de vista litológico, los cuatro eventos ocurren sobre la unidad geológica de la Formación Guachinté y probablemente están influenciados por el sistema de fallas NE/SW. Los eventos ubicados más al sur del CTC están asociados con la actividad minera.

La combinación de estos factores creó las condiciones propicias para la ocurrencia de estos cuatro eventos, los cuales fueron detonados principalmente por las precipitaciones del día exacto en que ocurrió cada evento, así como por la saturación del suelo debido a las precipitaciones acumuladas a largo plazo.

En resumen, los eventos 22, 23, 24 y 25 muestran una clara interacción entre la expansión urbana, la infraestructura vial, las características geológicas y estructurales del terreno, y los efectos de las precipitaciones, los cuales contribuyeron significativamente a la predisposición del área a sufrir dichos movimientos en masa.

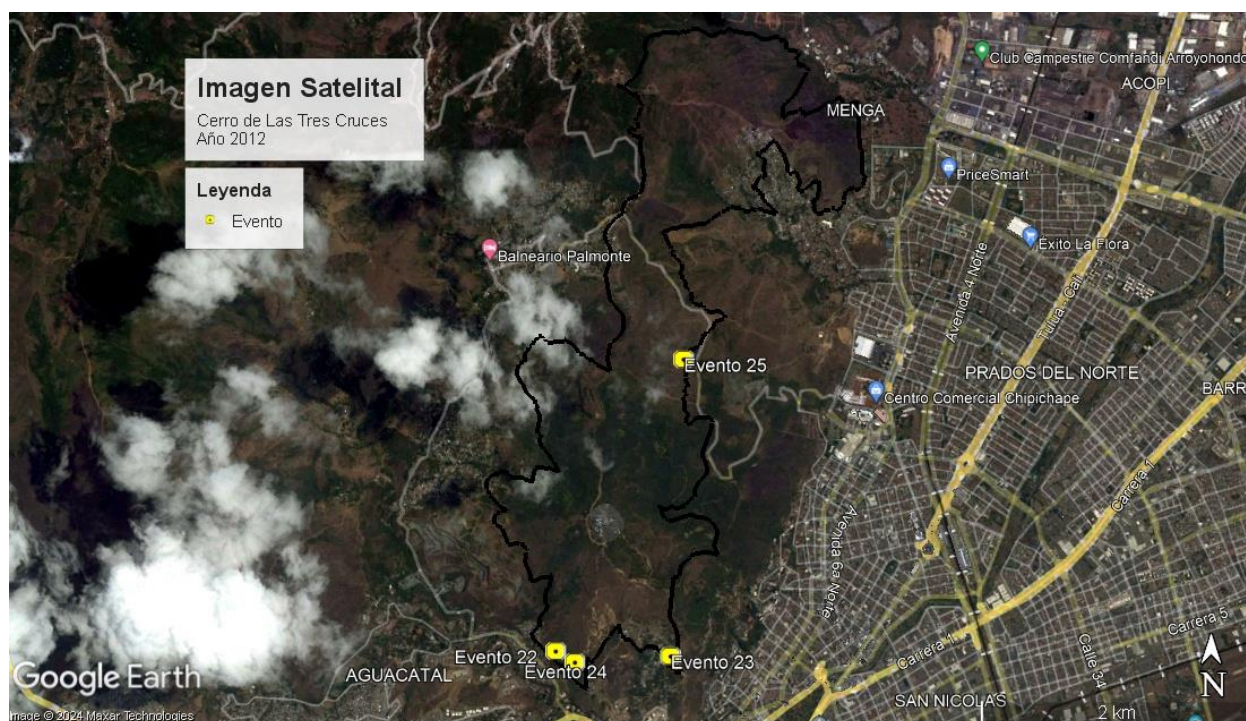


Figura 28. Imagen satelital del CTC, año 2012, Google Earth Pro.

Para el evento 26, registrado el 29 de septiembre de 2016, se utilizó una imagen satelital del CTC del año 2016, caracterizada por una alta resolución que permite identificar claramente la influencia de la urbanización en el área, similar a los puntos al norte del Cerro que fueron analizados en la imagen de 2009. En la imagen se observa aún la posible cicatriz del deslizamiento, indicando que este evento probablemente afectó las viviendas cercanas además de un poco densidad de cobertura vegetal en el área circundante a dicho evento.

Este movimiento en masa se desarrolló en pendientes que van desde fuertemente inclinadas hasta fuertemente quebradas. Litológicamente, el evento ocurrió sobre la unidad geológica de la

Formación Guachinté. Se puede inferir que, además de las condiciones naturales de la zona, la inestabilidad en este punto está más asociada a la degradación del suelo provocada por factores antropogénicos relacionados con la urbanización, los cuales propiciaron la inestabilidad y la posterior erosión del suelo. El movimiento en masa fue desencadenado por las precipitaciones, particularmente las acumuladas en el terreno a largo plazo, que superaron los 200 mm para este evento en particular.

En resumen, el evento 26 ilustra cómo la combinación de la urbanización, las condiciones naturales del terreno y las precipitaciones puede predisponer a la zona a sufrir movimientos en masa significativos.



Figura 29. Imagen satelital del CTC, año 2016, Google Earth Pro.

8. Definición relaciones de causalidad

Al definir las relaciones de causalidad que intervienen en el entorno de los Cerros tutelares de Las Tres Cruces y de La Bandera, se busca comprender cómo las variables de precipitación y de degradación del suelo, especialmente a través de la erosión, pueden desencadenar movimientos en masa. Para este trabajo de investigación, se aplicó la metodología GTP, la cual facilita una visión holística, que considera tanto los procesos naturales como las intervenciones humanas en el territorio. Esto es esencial para anticipar los posibles impactos de estos fenómenos y para diseñar estrategias de mitigación que reduzcan los riesgos asociados, abordando la compleja interacción entre el geosistema, el territorio y el paisaje.

8.1. Aplicación de la metodología GTP en la gestión de riesgos

Para abordar la relación entre las variables de precipitación, erosión y movimientos en masa en el CTC y el CB dentro del marco de la metodología GTP (Geosistema, Territorio y Paisaje), se definen cada uno de estos conceptos de la siguiente manera:

El geosistema en el contexto del CTC y el CB se define como un sistema natural complejo que engloba todos los elementos físicos, bióticos y abióticos interactuantes en estos espacios geográficos específicos como se esquematiza en la figura 30. Los componentes físicos comprenden la topografía del terreno principalmente sus rangos de pendientes que van desde ligeramente inclinadas a escarpadas como se aprecia en los mapas 5 y 6, la geología que incluye tipos de rocas y estructuras geológicas como la Formación Guachinté (TOg) y la Formación Volcánica (Kv), los suelos derivados de estas formaciones y la dinámica de los sistemas de fallas que influyen en estas áreas. Los componentes bióticos se refieren a la vegetación natural presente en los cerros y sus áreas circundantes, que actúa como un factor crucial en la estabilización del suelo y la protección contra la erosión.

Por otro lado, los componentes abióticos, particularmente significativos en este caso, se centran en la precipitación como factor hidroclimatológico determinante. La precipitación juega un papel fundamental en los procesos erosivos y la generación de movimientos en masa en estos cerros. La interacción compleja entre la geología, la topografía, la vegetación y las condiciones climáticas define la dinámica del geosistema, donde los procesos naturales como la erosión son

exacerbados por eventos climáticos extremos, especialmente durante períodos de precipitación intensa.

Este enfoque metodológico integrado permite comprender mejor las dinámicas y vulnerabilidades del geosistema de los cerros objeto de estudio, proporcionando una base sólida para la aplicación de estrategias de gestión de riesgo. La identificación precisa de estos componentes y sus interacciones es crucial para implementar medidas efectivas de conservación del suelo, planificación del uso del territorio que considere los riesgos geológicos, y mitigación de impactos derivados de eventos climáticos extremos, asegurando así la sostenibilidad ambiental de estos paisajes naturales y su valor como recursos culturales y ecológicos (Bertrand & Georges, 2006).

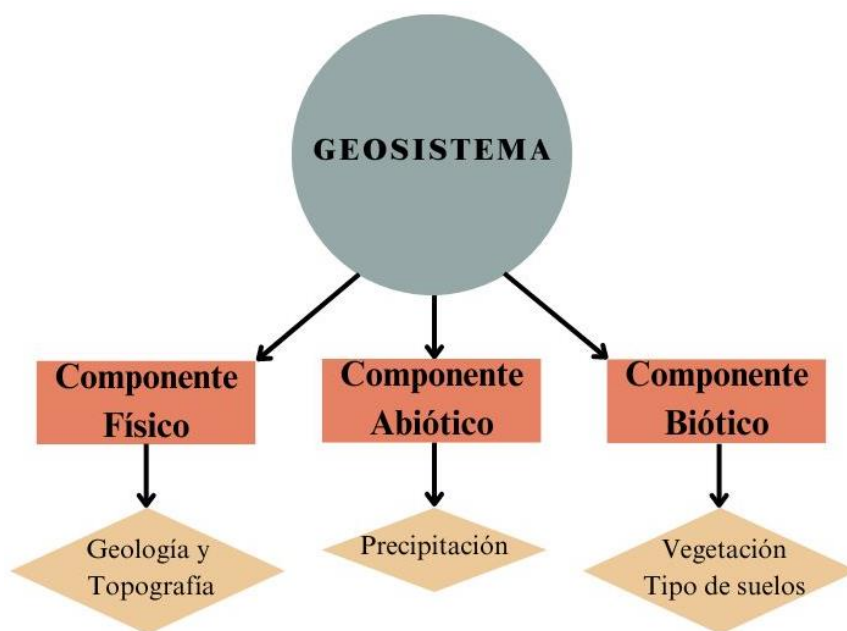


Figura 30. Modelo conceptual del Geosistema. Elaboración propia

El territorio en el contexto del CTC y el CB se define como el espacio físico ocupado y transformado por actividades humanas, que interactúan significativamente con el geosistema natural, como se esquematiza en la figura 31. Utilizando técnicas de fotointerpretación y análisis multitemporal, se ha observado la influencia de estas actividades antrópicas en ambos cerros, especialmente en las zonas donde se han registrado movimientos en masa.

En particular, se ha identificado la actividad de extracción minera, confirmada mediante la interpretación de capas de recursos mineros, donde la geología local y características estructurales permiten la extracción de carbón. Esta actividad minera no solo altera la estabilidad del terreno directamente afectado, sino que también contribuye a la degradación del suelo y aumenta la susceptibilidad a movimientos en masa.

Además, las imágenes analizadas revelan la expansión urbana y la construcción de infraestructura vial como factores adicionales que inciden en las áreas propensas a movimientos en masa. Estas actividades antropogénicas modifican el paisaje natural, interrumpen los procesos naturales de erosión y compactación del suelo, y aumentan los riesgos asociados a eventos climáticos extremos.

En ese contexto, la degradación del suelo por erosión en estos cerros es el resultado de una interacción compleja entre factores naturales inherentes como la geología y condiciones estructurales, y la influencia significativa de las actividades humanas (Bertrand & Georges, 2006).

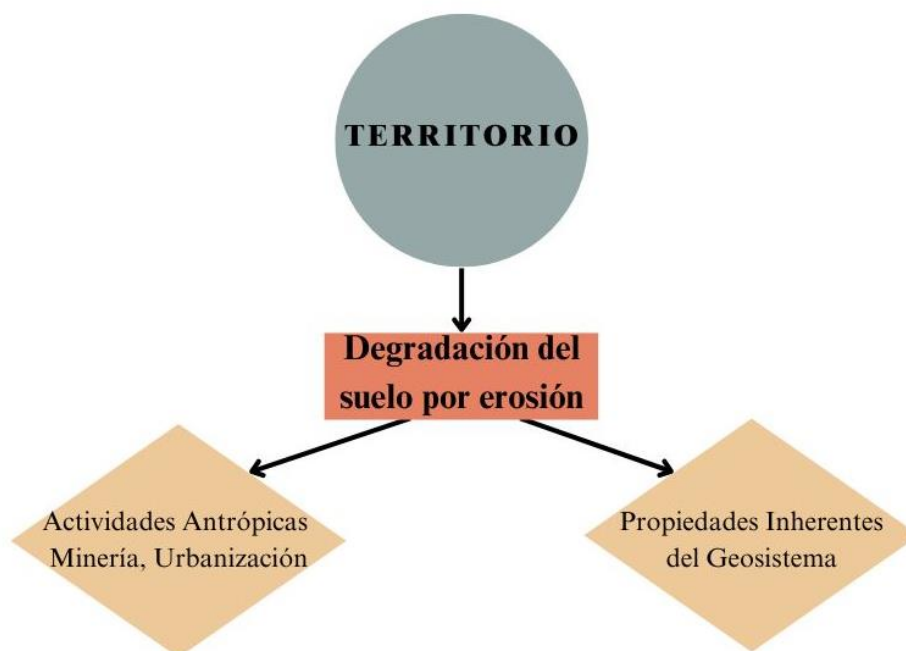
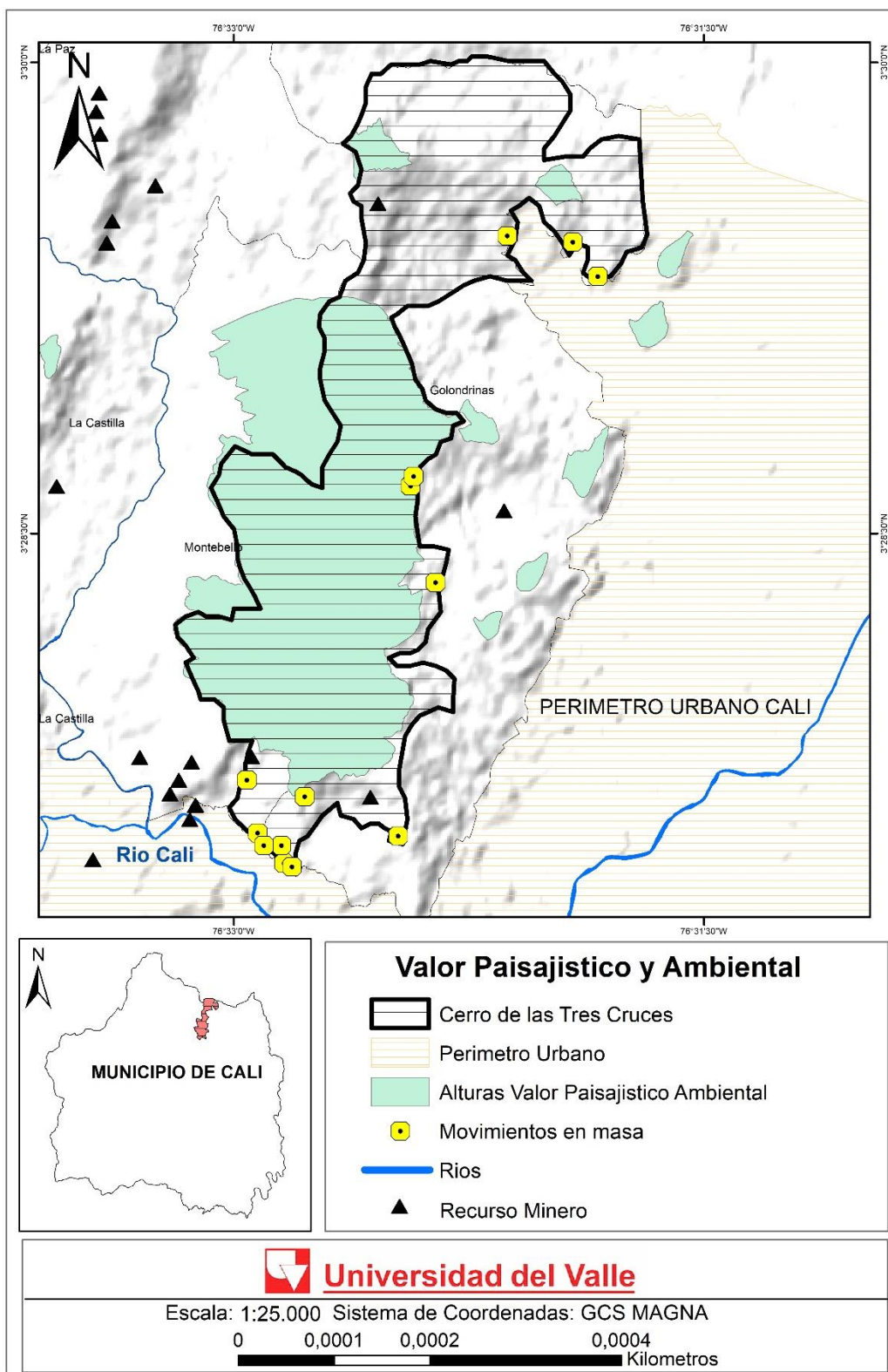


Figura 31. Modelo conceptual del Territorio. Elaboración propia

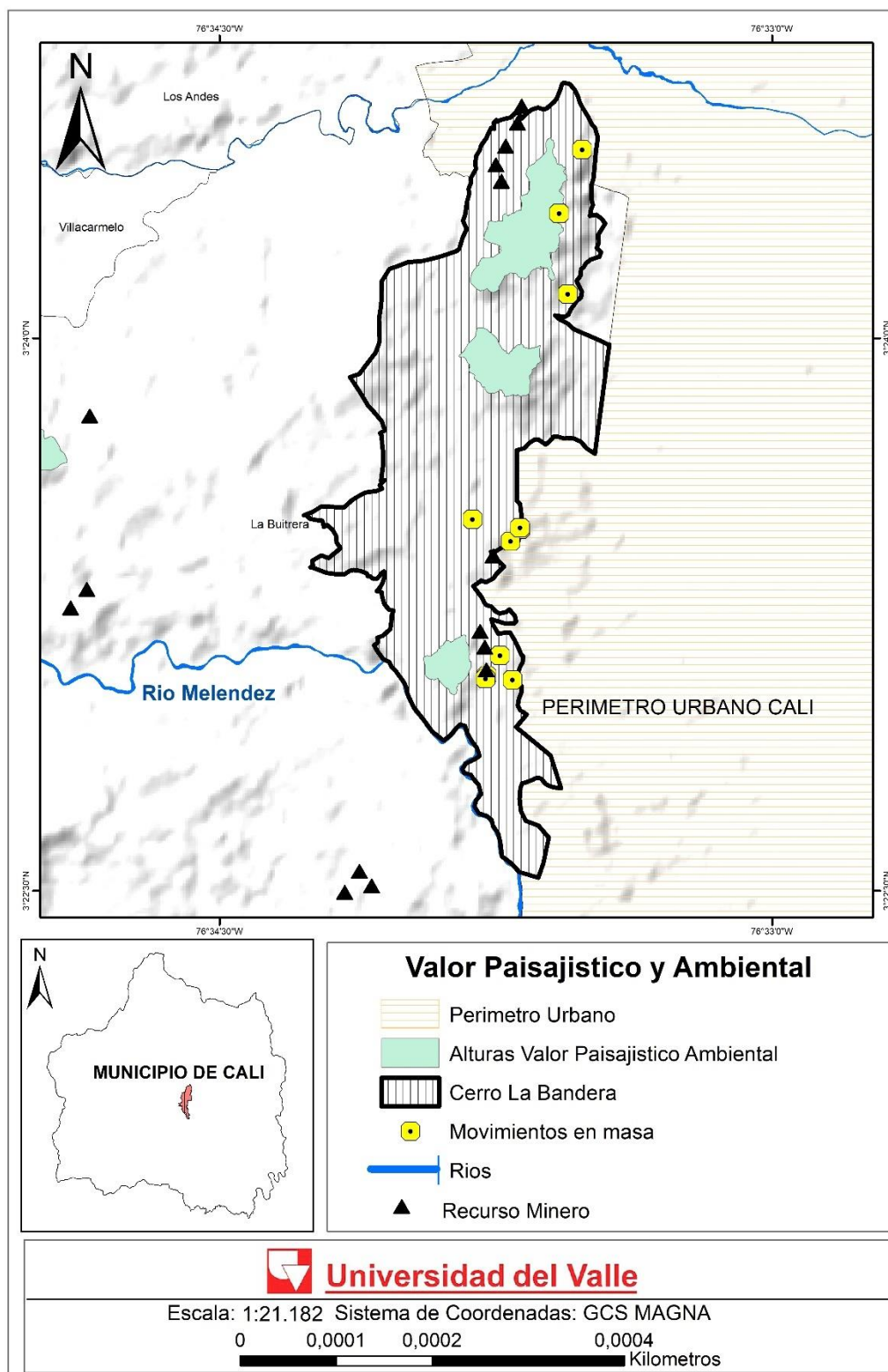
El paisaje en el contexto del CTC y el CB se define como la manifestación visible y perceptible del geosistema y territorio, resultado de la interacción dinámica entre procesos

naturales y actividades humanas a lo largo del tiempo, como se esquematiza en la figura 32. Este paisaje incluye la morfología del terreno y la vegetación predominante. Sin embargo, no se reconocen cuerpos o corrientes permanentes de agua dentro de los cerros estudiados. La densidad vegetal juega un papel crucial en la evaluación del nivel de erosión de los cerros, siendo un indicador visualmente significativo de los impactos ambientales.

En cuanto a la morfología, ambos cerros exhiben pendientes pronunciadas que han condicionado diversas actividades humanas, como deportes de montaña y actividades recreativas. Actualmente, la mayoría del área de ambos cerros está catalogada como alturas con valor paisajístico y ambiental como se observa en los mapas 11 y 12, lo que significa que estos espacios son reconocidos por su importancia estética y ecológica dentro del contexto urbano de Cali. Las áreas de alto valor paisajístico y ambiental son elementos destacados dentro del paisaje urbano y rural que funcionan como hitos visuales. La preservación de estos elementos es crucial para mantener la identidad visual del municipio y promover el bienestar físico y espiritual de la comunidad. Además, ambos cerros son designados como ecoparques, áreas destinadas a la conservación de la biodiversidad y el disfrute turístico en un entorno natural protegido, como se puede apreciar en los mapas 11 y 12 (DAPM, 2016).



Mapa 11. Mapa de Valor Paisajístico y Ambiental CTC, elaboración propia con información del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, Alcaldía de Santiago de Cali.



Mapa 12. Mapa de Valor Paisajístico y Ambiental CB, elaboración propia con información del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, Alcaldía de Santiago de Cali.

En particular, el CTC posee un significado cultural y religioso, albergando el monumento de Las Tres Cruces, lo que lo convierte en un destino de peregrinación especialmente durante la Semana Santa. Este aspecto cultural y religioso refuerza su valor como patrimonio local y contribuye a la actividad antrópica en el cerro.

Por otro lado, el CB ha sido históricamente afectado por la minería de carbón desde principios del siglo XX, lo que ha generado una notable degradación del suelo y un impacto visual negativo significativo. Aunque actualmente se promueve como un pulmón verde para la ciudad de Cali, durante el periodo de estudio que abarca los movimientos en masa ocurridos entre 1979 y 2016, la actividad minera fue determinante en la generación de eventos de remoción en masa debido a la exposición de suelos y la pérdida de cobertura vegetal.

El paisaje de estos cerros no solo refleja la interacción compleja entre los elementos naturales y humanos, sino que también revela su importancia cultural, religiosa y ecológica para la ciudad de Cali. Además, la configuración del paisaje desempeña un papel crucial en la ocurrencia de movimientos en masa del CTC y CB. La morfología del terreno, caracterizada por pendientes pronunciadas y alteraciones debido a la minería y la urbanización, influye directamente en la estabilidad del suelo. La vegetación, aunque importante para la estabilización del terreno, también puede ser afectada por estos eventos, modificando el paisaje de manera significativa. Así, la comprensión de cómo el paisaje natural y modificado interactúa con los procesos geológicos es esencial para implementar medidas efectivas de mitigación y manejo de riesgos en estas áreas vulnerables.

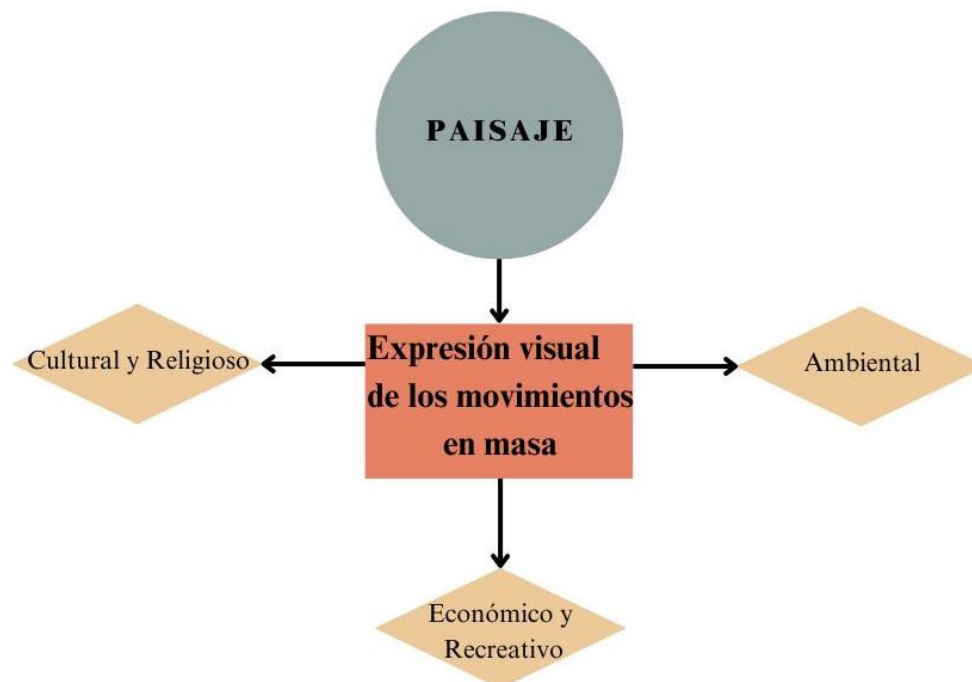


Figura 32. Modelo conceptual del Paisaje. Elaboración propia

La expresión visual del paisaje, según los conceptos anteriores aplicados a los cerros de La Bandera y Las Tres Cruces, se refiere a la representación perceptible y observable de los elementos naturales y culturales que interactúan en estos espacios geográficos específicos. A continuación, se presentan las principales definiciones asociadas con el GTP de los Cerros.

- Cultural y Religioso:

Los 26 movimientos en masa registrados entre 1969 y 2016 en los cerros de Las Tres Cruces y La Bandera de Cali revelan una interacción compleja entre aspectos culturales y religiosos, así como la influencia de actividades antropogénicas como la minería.

En el CTC, la expresión visual cultural y religiosa está representada por el monumento de Las Tres Cruces, que constituye un símbolo prominente de importancia espiritual y un lugar de peregrinación para la comunidad local. La ubicación estratégica y la estructura del monumento son visibles desde varios puntos de la ciudad, subrayando su relevancia cultural y su impacto visual como un ícono de fe y tradición religiosa.

Por otro lado, en el CB, la expresión visual cultural está influenciada por su historia minera. Las infraestructuras mineras abandonadas y los cambios en la topografía, resultado de décadas de extracción de carbón, configuran un paisaje industrial histórico que refleja el pasado económico y

laboral de la región. Aunque menos centrado en aspectos religiosos, este contexto industrial histórico enriquece la identidad visual del cerro y proporciona un testimonio tangible del desarrollo económico y las transformaciones del paisaje a lo largo del tiempo.

En conjunto, estos aspectos culturales y la huella industrial histórica son parte integral del paisaje de los cerros, influyendo en cómo se perciben y se utilizan estos espacios naturales, así como en la percepción pública y la gestión de los riesgos asociados a los movimientos en masa. La gestión integrada de estos elementos culturales y económicos es crucial para preservar la identidad local, mitigar riesgos y promover un desarrollo sostenible en estos entornos vulnerables.

- Ambiental:

Los eventos de movimientos en masa en los cerros de Las Tres Cruces y La Bandera de Cali destacan la importancia de la expresión visual ambiental en la gestión de estos espacios naturales. Ambos cerros exhiben una notable vegetación predominante y biodiversidad, a pesar de la actividad minera pasada en el CB. Esta vegetación no solo contribuye significativamente a la regulación ambiental, sino que también sostiene el bienestar ecológico de la ciudad al proporcionar hábitats naturales y servicios ecosistémicos vitales. La expresión visual ambiental en estos cerros se evidencia en la preservación de áreas verdes y la calidad del paisaje, lo cual contrasta positivamente con el entorno urbano circundante. Estos espacios naturales no solo son estéticamente atractivos, sino que también desempeñan un papel crucial en la mitigación de riesgos ambientales, como la erosión del suelo y los movimientos en masa inducidos por eventos climáticos extremos. La preservación y gestión adecuada de estos elementos ambientales son fundamentales para mantener la resiliencia de la ciudad ante los desafíos ambientales.

los cerros frente a los desafíos ambientales y antropogénicos, asegurando así su valor como recursos naturales estratégicos para la ciudad de Cali y sus habitantes.

- Económico y Recreativo

Los movimientos en masa registrados en los cerros de La Bandera y Las Tres Cruces están intrínsecamente relacionados con la expresión visual del paisaje en términos económicos y recreativos. En el caso del CB, el paisaje económico se caracteriza por los vestigios visibles de la actividad minera histórica, como escombros mineros y áreas rehabilitadas. Estos elementos no solo reflejan la historia económica del área, sino que también constituyen un impacto visual notable

derivado de la extracción de recursos naturales, que ha modelado significativamente la morfología del cerro. Por otro lado, la expresión visual recreativa se manifiesta en ambos cerros a través de instalaciones diseñadas para actividades al aire libre y turísticas. Senderos bien mantenidos, miradores y áreas recreativas ofrecen vistas panorámicas que realzan el atractivo turístico y recreativo de estos espacios naturales. Estas infraestructuras facilitan que residentes y visitantes disfruten de la naturaleza y participen en actividades deportivas, promoviendo un uso sostenible del paisaje que complementa sus valores culturales y ambientales.

La interacción entre la historia económica reflejada en el paisaje del CB y las oportunidades recreativas proporcionadas en ambos cerros subraya la complejidad y la importancia de gestionar estos espacios de manera integral. La preservación de su valor económico, recreativo y cultural es esencial para equilibrar el desarrollo humano con la conservación ambiental y la gestión de riesgos asociados a movimientos en masa, asegurando así su utilidad continua y sostenible para las generaciones futuras.

Al considerar los elementos de Geosistema, Territorio y Paisaje dentro de la metodología GTP, se facilita el estudio integrado y la comprensión de cómo los factores de precipitación, degradación del suelo por erosión y movimientos en masa interactúan y afectan tanto al geosistema natural y territorio como al paisaje modificado por la actividad humana en el CTC y el CB, como se observa en la tabla 13, donde se relacionan los factores como la precipitación, la degradación del suelo por erosión y los movimientos en masa con los componentes de la GTP para la zona de estudio.

Factores / Componente	Geosistema (Naturaleza)	Territorio (Actividades Humanas)	Paisaje
Suelos y Erosión	Suelos derivados de rocas sedimentarias y volcánicas Fm Volcánica Kv y Fm Guachinté TOg; Recursos Minero; susceptibilidad a la erosión por pendientes pronunciadas y escarpadas; fallas geológicas; resultados del Método USLE indican erosión moderada-alta.	Urbanización incipiente; infraestructura vial y construcciones. Impacto de la actividad minera en la estabilidad del terreno, modificación de drenajes naturales, comprensión del suelo y pérdida de vegetación por actividades mineras y recreativas.	Valor paisajístico y ambiental de los cerros. Erosión del suelo; cambios en la fertilidad y estabilidad del suelo; impacto visual denotado en ortofotos.
Clima y Precipitación	Patrones históricos de ocurrencia de movimientos en masa durante los meses de precipitaciones altas; umbrales mínimos para movimientos en masa alrededor de 160 mm.	Aumento de la frecuencia de eventos extremos debido al cambio climático. Influencia de la urbanización en los patrones de escurrimiento y drenaje. Infraestructura vial y su impacto en la hidrología local.	Impacto en la intensidad y frecuencia de movimientos en masa. Cambios estacionales en la vegetación y su relación con la precipitación.
Movimientos en Masa	Historial de movimientos en masa entre 1969 y 2016 y sus causas geológicas y antropogénicas.	Influencia de las precipitaciones y la degradación de suelo por erosión además de la minería y la urbanización en la ocurrencia de movimientos en masa.	Impacto visual, estructural y cultural en el paisaje; riesgos asociados a este fenómeno para las poblaciones locales e infraestructura.

Tabla 13. Matriz integrada de factores en relación con los componentes de la metodología GTP para los cerros estudiados.

Se resalta la conexión crucial entre los factores de precipitación, la degradación del suelo por erosión en la ocurrencia de movimientos en masa en los cerros de La Bandera y Las Tres Cruces de Cali. La influencia de estos fenómenos se ve amplificada por actividades antropogénicas como la minería y la expansión urbana. En el caso del CB, la historia de la minería de carbón ha dejado secuelas visibles de degradación del suelo, aumentando su vulnerabilidad a movimientos

en masa. Por otro lado, el CTC, aunque menos afectado por la minería, enfrenta desafíos similares debido a la presión urbana y la alteración del paisaje natural. La combinación de factores naturales y actividades humanas intensifica los riesgos geológicos en estos entornos, subrayando la necesidad de estrategias de manejo integradas que consideren tanto la conservación ambiental como la seguridad comunitaria.

8.1.1. Monitoreo y análisis de la precipitación dentro del marco de la GTP

Luego de realizar un análisis de la precipitación en El CTC y El CB se han identificado patrones significativos que revelan la influencia crítica de la precipitación en la ocurrencia de movimientos en masa en estos entornos naturales. La precipitación, considerada como componente abiótico del Geosistema, influye directamente en las variables de erosión y movimientos en masa en estos cerros.

Los resultados muestran que existe un umbral crítico mínimo de precipitación acumulada a corto plazo (LC) de 3 días, como se puede apreciar en la figura 12, el cual se utilizó por presentar la menor dispersión de datos y a partir del cual se observa un aumento notable en la frecuencia de movimientos en masa desencadenados por lluvias acumuladas a largo plazo. Específicamente, se ha determinado que aproximadamente 55 mm de lluvia acumulada a largo plazo (LL) para 30 días, 120 mm para 60 días y 190 mm para 90 días son los valores que preceden a estos eventos.

En términos de análisis, la combinación más crítica identificada es la de 3 días de precipitación a corto plazo (LC) con 90 días de lluvia acumulada a largo plazo (LP), destacándose por su consistencia en provocar movimientos en masa. Este hallazgo subraya la importancia de considerar la historia de precipitaciones como factor determinante en la estabilidad del suelo en estos cerros.

El análisis también reveló que el 75% de los eventos registrados ocurrieron con menos de 4 mm de lluvia a corto plazo (LC) en los 90 días previos al evento, mientras que solo el 4% ocurrió con más de 392 mm. **Esto indica que son las lluvias a largo plazo (LP) las que tienen un efecto más significativo en la saturación y debilitamiento del suelo,** predisponiéndolo a movimientos en masa con lluvias subsiguientes menos intensas, pero igualmente disruptivas.

En el presente estudio sobre la precipitación, fundamentado en métodos empíricos y el uso de estaciones de lluvia dentro y alrededor de los cerros de Las Tres Cruces y La Bandera,

proporciona una base sólida para la definición de umbrales críticos de lluvia. Estos datos son vitales para el desarrollo y mejora de sistemas de alerta temprana (SAT), herramientas esenciales en la gestión de riesgos urbanos. Implementar los SAT permite anticipar y mitigar los impactos de movimientos en masa, protegiendo no solo a las comunidades locales sino también la infraestructura y el entorno natural que estos cerros representan en el paisaje urbano de Cali. A continuación, se presenta una visión integrada para entender cómo los umbrales de precipitación y los sistemas de alerta temprana juegan un papel crucial en la gestión de riesgos urbanos y la protección del entorno natural en los cerros de Las Tres Cruces y La Bandera en la ciudad de Cali mediante los componentes de geosistema, territorio y paisaje. Ver tabla 14.

Aspecto \ Componente	Geosistema	Territorio	Paisaje
Umbrales de precipitación	Influencia crítica en la erosión y movimientos en masa: La precipitación acumulada a largo plazo es la que influye más directamente en la erosión y en la predisposición del suelo a movimientos en masa, siendo crítica para evaluar riesgos naturales.	Planificación urbana y gestión de riesgos: Es esencial en este aspecto considerar los umbrales de precipitación para gestionar adecuadamente los riesgos asociados con la expansión urbana y las actividades industriales.	Impacta la calidad ambiental y estética del paisaje determinado por la vegetación, la biodiversidad y la vulnerabilidad a movimientos en masa.
Sistemas de Alertas Tempranas	La implementación de SAT permite anticipar y mitigar los efectos adversos de los movimientos en masa, protegiendo el geosistema y la estabilidad del terreno.	Integración con la gestión de recursos y riesgos industriales con el fin de proteger la infraestructura y la población local de eventos naturales extremos como los movimientos en masa	Contribuye a gestionar el uso recreativo y turístico del entorno natural, asegurando la seguridad de visitantes y residentes frente a posibles riesgos naturales.

Tabla 14. Matriz integrada de aspectos de la precipitación en relación con los componentes de la metodología GTP para los cerros estudiados.

8.1.2. Identificación participativa de áreas vulnerables a la erosión y movimientos en masa

Para abordar la identificación de áreas vulnerables a la erosión que condicionan el terreno para la ocurrencia de los eventos de movimientos en masa en el área de los cerros de Las Tres Cruces y La Bandera, utilizamos la estructura de metodología GTP (Geosistema, Territorio y Paisaje) e integramos los resultados del análisis de pérdida de suelo mediante el método USLE (Universal Soil Loss Equation) con la caracterización de los geosistemas y paisajes locales, como se observa en la tabla 15.

Aspecto \ Componente	Geosistema	Territorio	Paisaje
Degradación de Suelo por Erosión	Características geológicas y geomorfológicas que influyen en la erosión del suelo.	Intervención humana a través de urbanización, y actividades mineras, que aumentaron la erosión.	Alteración visual y funcional del paisaje natural debido a la erosión.
Resultados del Método USLE	CTC: 68% erosión moderada, 8% severa, 17% ligera. CB: 73% erosión moderada, 11% severa, 6% ligera.	Refleja el grado específico de erosión y la gran relevancia del grado de erosión moderada para cada cerro.	Indica cómo la erosión afecta la apariencia y funcionalidad del paisaje en ambos cerros.

Tabla 15. Matriz integrada de aspectos de la degradación del suelo por erosión en relación con los componentes de la metodología GTP para los cerros estudiados.

En el CTC, de acuerdo con la sección A del mapa 15, se identificó que el 68% del área experimenta erosión moderada (10-50 toneladas por hectárea al año), con un 8% de erosión severa (50-200 toneladas por hectárea al año) y un 17% de erosión ligera (0-10 toneladas por hectárea al año). Esto indica áreas significativamente vulnerables a movimientos en masa debido a la pérdida de cobertura vegetal y la exposición al agua de lluvia. Similarmente, se puede apreciar en la sección B del mapa 15, que, en el CB, el 73% del área muestra erosión moderada, con un 11% de erosión

severa y un 6% de erosión ligera. Esta situación es comparable en términos de vulnerabilidad, aunque con una mayor proporción de áreas con erosión severa.

Ambos cerros presentan características geológicas y geomorfológicas que influyen en la susceptibilidad a la erosión, como pendientes pronunciadas y tipos de suelo susceptibles.

La intervención humana mediante actividades como la urbanización y la minería puede haber intensificado la erosión en estas áreas, aumentando la vulnerabilidad a movimientos en masa. Es importante señalar que estas variables no fueron consideradas en el mapa de pérdida de suelo generado mediante el método USLE. Esto sugiere que la erosión podría ser mucho más severa en una gran parte del área de los cerros, ya que la información utilizada para determinar cada factor de la ecuación podría no reflejar completamente su impacto real.

Por otra parte, la erosión y su eventual evolución en los movimientos en masa alteran la apariencia y la funcionalidad del paisaje, afectando tanto su valor estético como su capacidad para soportar actividades humanas de manera segura.

El método USLE ha proporcionado datos precisos sobre el grado de erosión hasta el año 2016, subrayando la importancia de fortalecer las medidas de conservación actuales. En el caso del CB, ahora reconocido como un pulmón verde para la ciudad, este cambio es significativo. El cerro ha transformado su paisaje desde ser un área asemejada a un área desértica, afectada por alta erosión, a convertirse en un vital pulmón verde para la ciudad de Cali. Este progreso resalta la efectividad de las estrategias de conservación implementadas hasta ahora. Sin embargo, para asegurar la sostenibilidad ambiental a largo plazo, es crucial intensificar estas acciones. Esto implica implementar medidas de conservación y restauración de la vegetación, junto con técnicas de manejo del suelo que mitiguen la erosión. Además, se deben establecer programas de monitoreo continuo para evaluar la efectividad de estas medidas por parte de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y detectar cambios en la erosión y movimientos en masa con el tiempo. Integrar estos resultados en la planificación urbana y territorial es fundamental para evitar el desarrollo en áreas particularmente vulnerables y promover prácticas de uso del suelo sostenibles y responsables.

Mediante el análisis del geosistema, el territorio y el paisaje se proporciona un marco integral para entender la dinámica de la degradación del suelo por erosión y la eventual ocurrencia

de movimientos en masa en los cerros de Las Tres Cruces y La Bandera, facilitando la toma de decisiones informadas orientadas hacia la conservación y gestión sostenible del paisaje urbano de la ciudad de Cali.

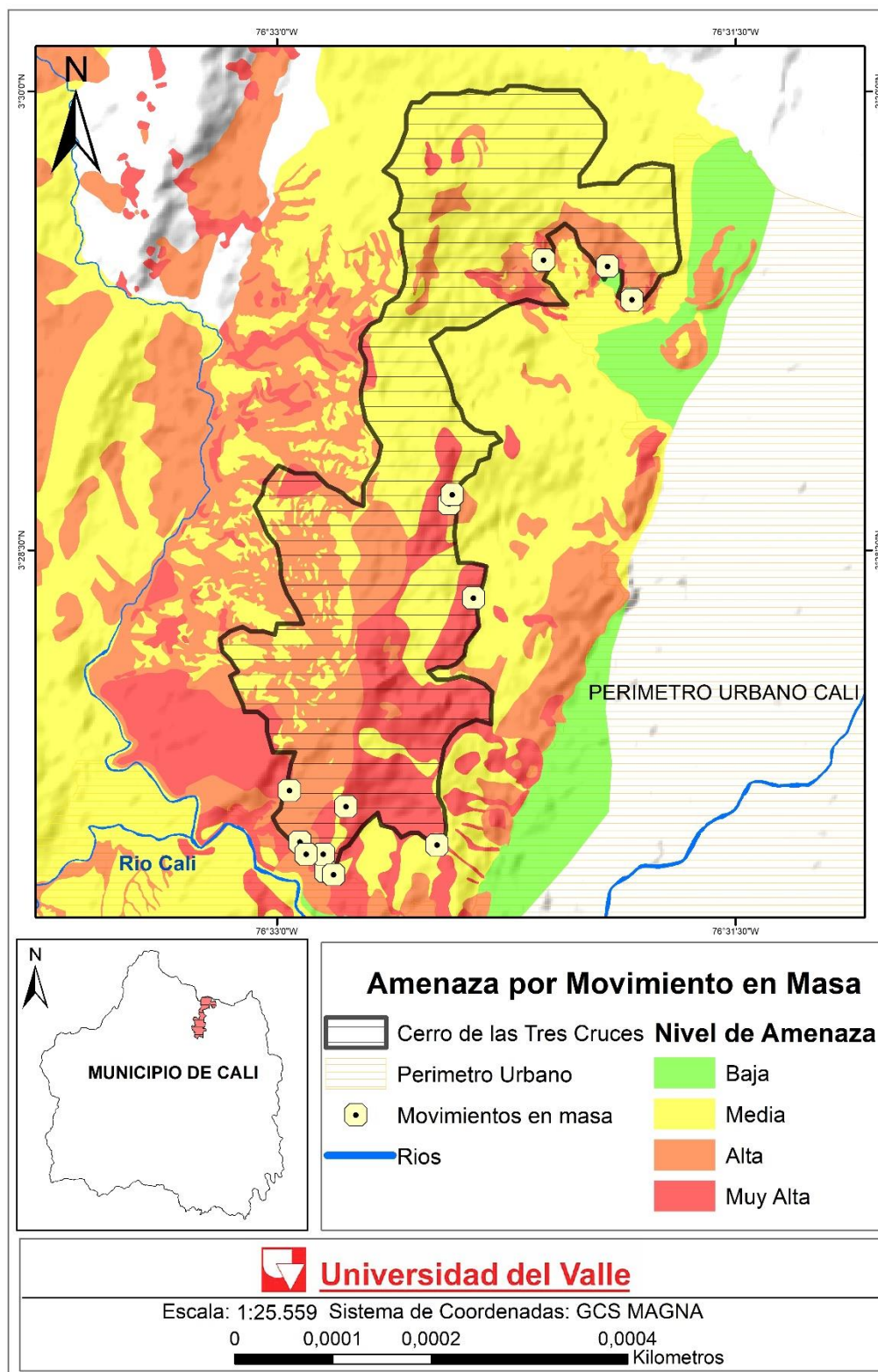
8.1.3. Implementación de prácticas de conservación del suelo en colaboración con comunidades locales

En el ámbito de la planificación del uso del suelo, es crucial integrar metodologías que permitan entender y gestionar los riesgos geológicos de manera efectiva. En cuanto al análisis de todas las variables en relación con el geosistema, territorio y paisaje se proporciona un marco robusto para detallar la interacción compleja entre los sistemas geológicos, las dinámicas territoriales y la configuración paisajística. Este enfoque no solo examina los aspectos físicos del entorno, como la geología y la geomorfología, sino que también considera cómo las actividades humanas influyen y son influenciadas por estos factores naturales, como se muestra esquematizado en la tabla 16.

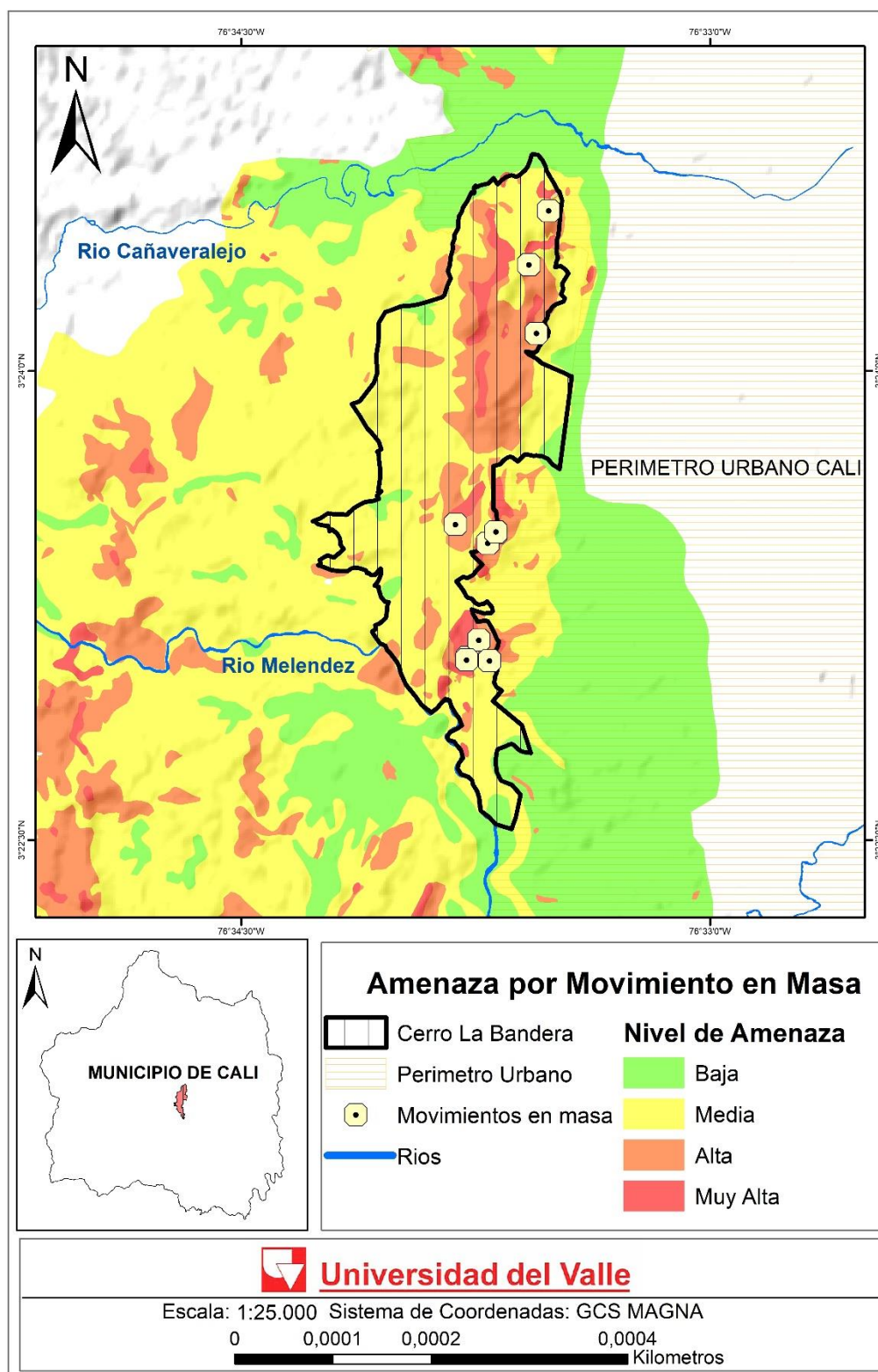
Componentes / Aspectos	Importancia en la planificación del uso del suelo en CTC y CB
Geosistema	Identificación de la geología y la geomorfología para delimitar áreas críticas susceptibles a movimientos en masa y erosión del suelo, considerando la influencia de factores hidroclimatológicos como la precipitación como detonantes de estos eventos.
Territorio	Evaluación de cómo la actividad minera de carbón y otras actividades antrópicas afectan las dinámicas del suelo y aumentan los riesgos de degradación.
Paisaje	Consideración del impacto estético y funcional de la minería de carbón y la degradación del suelo en el paisaje y la seguridad del entorno.

Tabla 16. Matriz integrada de aspectos de la planificación del uso del suelo en relación con los componentes de la metodología GTP para los cerros estudiados.

Para la integración de la información, como se puede apreciar en los mapas 13 y 14, se utilizó la capa de zonificación de amenaza por movimientos en masa desarrollada por el IDEAM e INGEOMINAS (2018), junto con la capa de eventos de movimientos en masa y esta cartografía reflejó la estrecha relación entre esta zonificación de amenaza por movimientos en masa propuesta por las entidades mencionadas y los 26 movimientos en masa ocurridos en los cerros de Las Tres Cruces y La Bandera entre 1979 y 2016.



Mapa 13. Mapa de Degradación de Amenaza por Movimiento en masa con los eventos registrados en el CTC, elaboración propia con información del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, Alcaldía de Santiago de Cali, 2018.



Mapa 14. Mapa de Degradación de Amenaza por Movimiento en masa con los eventos registrados en el CB, elaboración propia con información del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, Alcaldía de Santiago de Cali, 2018.

En el contexto específico de los cerros de La Bandera y Las Tres Cruces, nuestra cartografía muestra claramente que las áreas zonificadas con amenaza alta y muy alta coinciden de manera precisa con los puntos donde ocurrieron los 26 movimientos en masa. Esta relación se explica por la intensa interacción de factores geológicos y geomorfológicos que predisponen estas áreas a sufrir movimientos en masa. Las pendientes pronunciadas, los tipos de suelo susceptibles y la falta de cobertura vegetal son elementos clave que aumentan la vulnerabilidad a estos eventos. Además, la degradación del suelo por erosión, junto con la actividad minera y la incipiente expansión urbana desde las Comunas adyacentes a cada uno de los cerros, actúan como factores adicionales que incrementan los riesgos preexistentes. La zonificación de amenaza por movimientos en masa se fundamenta en un exhaustivo análisis de factores geológicos y geomorfológicos. La influencia de la precipitación y la degradación del suelo por factores erosivos y antropogénicos ha sido determinante en la ocurrencia de los 26 movimientos en masa registrados en estas áreas durante el periodo de 1979 a 2016. Estos eventos han puesto de manifiesto la vulnerabilidad frente a fenómenos naturales y actividades humanas que alteran la estabilidad del terreno.

Es crucial reconocer que la ocurrencia de movimientos en masa no solo indica riesgos inmediatos, sino que también sugiere la posibilidad de eventos recurrentes en el mismo lugar o en zonas adyacentes debido a las características del terreno. Esto subraya la importancia de implementar medidas preventivas continuas y de largo plazo, así como de integrar rigurosamente la gestión del riesgo en la planificación del uso del suelo. De esta manera, se pueden mitigar eficazmente los impactos negativos sobre la vida humana y los recursos naturales, asegurando un desarrollo sostenible y seguro en estas áreas vulnerables.

9. Conclusiones

El estudio revela que la precipitación y los procesos erosivos tienen una relación directa y crucial en los movimientos en masa observados en el Cerro de las Tres Cruces y el Cerro La Bandera durante el periodo de 1979 a 2016. Se enfocó en analizar datos de las principales estaciones pluviométricas, imágenes satelitales, metodologías que dimensionan las pérdidas de suelo y la metodología GTP, este enfoque integral permitió examinar cómo estas variables interactúan para influir en la ocurrencia de movimientos en masa en las áreas estudiadas.

El uso de herramientas tecnológicas como ArcMap facilitó una comprensión más profunda de las complejas interacciones entre precipitación, degradación del suelo por erosión. Estos hallazgos destacan la importancia de considerar múltiples factores para la gestión y prevención de desastres naturales en estos cerros.

Se determinó empíricamente que la precipitación acumulada a largo plazo, hasta 90 días antes del evento, actúa como el principal factor predisponente al sobresaturar el suelo, lo cual facilita la desestabilización del terreno de manera que incluso lluvias de intensidad moderada pueden desencadenar estos movimientos en masa.

Los resultados obtenidos indican que la lluvia antecedente de los días previos al evento permite establecer umbrales máximos de precipitación; mientras tanto, los umbrales mínimos solo se distinguen cuando se consideran combinaciones de LL superiores a 30 días y estos permanecen constantes para cualquier combinación de LC

Por otra parte, las características geomorfológicas de estos cerros, con pendientes pronunciadas y al encontrarse geográficamente influenciados por un sistema de fallas NE/SW, aumentan la susceptibilidad del terreno a los procesos erosivos. Además, la actividad minera históricamente desarrollada especialmente en el CB ha exacerbado la erosión al perturbar la estructura del suelo y remover la cobertura vegetal protectora. Otro factor que interviene en la degradación del suelo por erosión tiene que ver con la expansión urbana desde las Comunas 1 y 2 hacia el CTC, y desde las Comunas 18 y 19 hacia el CB, lo cual ha intensificado estos procesos erosivos al modificar los drenajes naturales y aumentar la impermeabilización del suelo. Es importante destacar que el análisis de la degradación del suelo se realizó mediante el método

USLE, el cual reveló que la mayoría de las áreas donde ocurrieron los 26 eventos de movimientos en masa presentan niveles de erosión moderada a alta. Este método, sin embargo, no incorporó variables antrópicas como la minería, pero este factor si se logró evidenciar con el análisis multitemporal y el traslape con las capas de cartografía geológica de recursos mineros y por lo cual se pudo realizar la comprensión completa de estos factores que contribuyeron notoriamente a la erosión en estos cerros.

El análisis de la zonificación de amenazas por movimientos en masa revela que, en el Cerro de las Tres Cruces el 47,6% de la superficie (234.15 hectáreas) presenta una amenaza media, el 29,32% (144.23 hectáreas) una amenaza alta y finalmente el 23,08% (113.54 hectáreas) una amenaza muy alta. Es importante destacar que no se registran áreas de amenaza baja en este cerro, indicando que la mayor parte del terreno presenta niveles de amenaza media a muy alta por movimientos en masa. En contraste, el Cerro de la Bandera muestra una distribución del 4,2% de la superficie (11.61 hectáreas) en amenaza baja, el 61,4% (169.71 hectáreas) en amenaza media, el 24,9% (68.82 hectáreas) en amenaza alta y el 9,5% (26.26 hectáreas) en amenaza muy alta. Los 26 movimientos en masa analizados se concentran en las zonas de amenaza alta y muy alta en ambos cerros, destacando la necesidad de implementar medidas de mitigación específicas para estas áreas críticas y reducir así el impacto de futuros eventos.

En el estudio también se aplicó una aproximación basada en los principios de geosistema, territorio y paisaje (GTP) para analizar las relaciones de causalidad entre la precipitación, los procesos erosivos y los movimientos en masa en el CTC y el CB. Aunque no se encontró una materialización específica en la literatura de la metodología GTP, esta nos proporcionó un marco conceptual flexible para comprender la complejidad del entorno natural y humano en estas áreas de estudio. No se trató simplemente de una metodología estática, sino más bien de un sistema integrador que consideró todas las características que interactúan en una zona determinada, para este caso, dos cerros tutelares de la ciudad de Cali. Es esencial destacar que, al adherirse a los principios de geosistema, territorio y paisaje dentro del marco GTP, se establece una base sólida para analizar cómo los fenómenos naturales y las actividades humanas afectan la estabilidad del suelo y la vulnerabilidad a los movimientos en masa. Esta flexibilidad en la aplicación de GTP no solo enriquece la comprensión de los procesos ambientales, sino que también facilita la

formulación de estrategias efectivas de manejo del paisaje y de mitigación de riesgos, adaptadas a las necesidades locales y a los desafíos específicos de la ciudad de Cali y sus áreas circundantes.

A pesar de las limitaciones encontradas, este estudio proporciona una base sólida para abordar los desafíos asociados con los procesos erosivos y los movimientos en masa en el CTC y el CB. Destaca la importancia de una gestión integrada del riesgo que considere tanto los aspectos naturales como los antropogénicos para proteger la vida y los recursos en estas áreas vulnerables.

10. Recomendaciones

Debido a que la precipitación acumulada a largo plazo fue identificada como el principal factor predisponente a la desestabilización del terreno, se hace fundamental establecer un sistema de monitoreo continuo de las precipitaciones e incorporar el análisis de umbrales de precipitación de lluvias acumuladas a largo plazo en los estudios de movimientos en masa en estas áreas. A menudo, se encuentra en la literatura que para el análisis de movimientos en masa solo se centran en la lluvia detonante inmediata, sin considerar adecuadamente la lluvia antecedente que prepara el terreno para la degradación y eventual ocurrencia de movimientos en masa. Este enfoque integral permitirá una comprensión más completa y precisa de los factores que contribuyen a la vulnerabilidad del terreno, facilitando así la implementación de medidas preventivas y mitigadoras más efectivas en áreas importante de la ciudad de Cali.

Cabe destacar que, el estudio se basa únicamente en eventos ocurridos hasta el año 2016. Es fundamental actualizar el análisis con datos recientes hasta el 2024 para reflejar los cambios y tendencias actuales, así como para mejorar la precisión de las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

Las dificultades encontradas para acceder a información detallada sobre eventos pasados resaltan la necesidad urgente de mejorar la disponibilidad y gestión de datos por parte de las entidades gubernamentales. Esto incluye la compilación y actualización constante de registros históricos de movimientos en masa y otros datos relevantes, esenciales para una gestión de riesgos más informada y efectiva en estas áreas vulnerables ya que así, no solo se fortalecerían en cuanto la capacidad de respuesta ante eventos naturales adversos en la ciudad de Cali, sino que también se mejorarían los aspectos en cuanto a la planificación urbana y la gestión integrada del paisaje, promoviendo la sostenibilidad y la resiliencia de áreas importantes de la ciudad en el largo plazo.

11. Bibliografía

- Achicanoy, J., Rojas, R., & Sanchez, G. (2018). Análisis y Proyección de las Coberturas Vegetales Mediante el Uso de Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica en la Localidad de Suba. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 41–58.
- Alonso, A., Torralba, A., Ivón, F., Martín, C., & Abolafio, F. B. (2011). Erosión y Manejo del Suelo. Importancia del Laboreo ante los Procesos Erosivos Naturales y Antrópicos. *Agricultura Ecológica En Secano: Soluciones Sostenibles En Ambientes Mediterráneos*. Ministerio De Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 13–38.
- Aristizábal, E., & Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá originados por fenómenos naturales y antrópicos en el período 1880-2007. *Revista Gestión y Ambiente*, 10(2), 17–30.
- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J. D., Ignacio Vélez, J., Martínez, H., & Guerra, A. (2011). Análisis de Umbrales Empíricos de Lluvia para el Pronóstico de Movimientos en Masa en el Valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA*, 95–111.
- Bertrand, C., & Georges, B. (2006). *Geografía del Medio Ambiente. El Sistema GTP: Geosistema, Territorio, Paisaje*. Universidad de Granada.
- Bircher, P., Liniger, H. P., & Prasuhn, V. (2019). Comparing different multiple flow algorithms to calculate RUSLE factors of slope length (L) and slope steepness (S) in Switzerland. In *Geomorphology* (Vol. 346). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106850>
- Burrough, P. A. (1986). *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Clarendon Press.
- Castro, J. A., Cabrera, J. A., & Villareal, J. E. (2022). Soil loss evaluated by the USLE method in the Estibana river sub-basin, *Acta Agronomica*, 71(4). <https://doi.org/10.15446/acag.v71n4.108071>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2023). *Disasters Year in Review 2022*. 70. https://cred.be/sites/default/files/2022_EMDAT_report.pdf
- Corporación Observatorio Sismológico del Suroccidente (OSSO), & Departamento Administrativo de Planeación Municipal (DAMP). (2013). *Evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo por Movimientos en Masa en el Municipio de Santiago de Cali, Primera Fase*.
- Corporación Observatorio Sismológico del Suroccidente (OSSO), & Departamento Administrativo de Planeación Municipal (DAMP). (2016). *Evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo por Movimientos en Masa en el Municipio de Santiago de Cali, Cuarta Fase*.
- Costa, J. E., & Baker, V. R. (1981). *Surficial Geology. Building with the Earth*. New York: John Wiley & Sons, 510.
- Cruden, D. M. (1991). A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27–29.
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (1997). *Ley 388 de 1997*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=339>

- Departamento Administrativo de la Función Pública. (2012). Ley 1523 de 2012. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (2014). Decreto 1807 de 2014. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>
- Dissmeyer, G., & Foster, G. (1983). Modifying the Universal Soil Loss Equation for Forest Land. *Soil Erosion and Conservation*. S. A. EL-SWAIFY, 480–195.
- Duque, C. A., & Garcia, W. (2017, May 4). Cerro de la Bandera: Desierto a un Paisaje Verde. CVC. <https://cvc.gov.co/carousel/2761-cerro-de-la-bandera-de-desierto-a-un-paisaje-verde>
- Durán, R., Mojica, P., Alvarado, B., & Loboguero, A. (1981). Evaluación de las Reservas de Carbón en siete zonas de Colombia. *Pub. Geol. Esp. Ingeominas*, 6.
- Echeverri, O., & Valencia, Y. (2004). Análisis de los Deslizamientos en la Cuenca De La Quebrada la Iguañá de la Ciudad de Medellín a partir de de Interacción Lluvia-Pendiente-Formación Geológica. In *Año* (Vol. 71).
- Editorial Etecé. (2023, November 19). Erosión del Suelo. Concepto De. <https://concepto.de/erosion-del-suelo/>
- Evans, I. S. (1972). General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In Chorley, R. J. (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*. Harper and Row.
- FAO-PNUMA-UNESCO. (1980). Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo de la Agricultura y la Alimentación (FAO), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente e (PNUMA), Organización de las Naciones para el Medio Ambiente (UNESCO).
- Flórez-Yepes, G. Y., Rincon-Santamaría, A., Cardona, P. S., Alzate Alvarez, A. M., Flórez-Yepes, G. Y., Rincon-Santamaría, A., Cardona, P. S., & Alzate-Alvarez, A. M. (2017). Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. *DYNA*, 84(201), 95. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55759>
- Garciano, S. P. (2015). Estimación de Umbrales de Lluvia Detonante de Deslizamientos en las Microcuencas de los Corregimientos de Villa Restrepo y Juntas de la Cuenca Combeima Ibagué - Tolima.
- GEMMA. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas (Vol. 4).
- Grosse, E. (1935). Acerca de la geología del sur de Colombia, Patía y Nariño. *Compilación de Los Estudios Geológicos Oficiales En Colombia – 1917 a 1933*, III, 133–231.
- Honorato, R., Barrales, L., Peña, I., & Barrera, F. (2001). Entre la IV y IX Región de Chile. In *Cien. Inv. Agr* (Vol. 28, Issue 1).
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (2001). Evaluación de Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa en Santafé de Bogotá - Colombia.

- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2002). Modelo para el Pronóstico de la Amenaza por Deslizamientos en Tiempo Real. In Primer Simposio Latinoamericano de Control de Erosión, Bucaramanga.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2006). Estudio de Zonificación de Tierras a Escala 1:100.000 para el Departamento del Valle del Cauca.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2009). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Valle del Cauca, Subdirección de Agrología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 20.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. (2016). Suelos y tierras de Colombia, subdirección de agrología.
- Kinnell, P. I. A., & Yu, B. (2020). CLIGEN as a weather generator for predicting rainfall erosion using USLE based modelling systems. *Catena*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104745>
- Krynine, P. D. (1980). Petrology, stratigraphy, and origin of the Triassic sedimentary rocks. *Continental Red Beds. Developments in Sedimentology*, Elsevier Scientific Pub, 29, 562.
- Lal, R. A. T. T. A. N. (2001). Soil Degradation by Erosion. *Land Degradation & Development*, 16(6), 519–539.
- Lara, S., & Sepúlveda, V. (2008). Remociones En Masa.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems*. John Wiley & Sons.
- Lu, S., Liu, B., Hu, Y., Fu, S., Cao, Q., Shi, Y., & Huang, T. (2020). Soil erosion topographic factor (LS): Accuracy calculated from different data sources. *CATENA*, 187, 104334. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2019.104334>
- Martínez-Mena, M., Carrillo-López, E., Boix-Fayos, C., Almagro, M., García Franco, N., Díaz-Pereira, E., Montoya, I., & de Vente, J. (2020). Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems. *Catena*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104352>
- Mayorga Márquez, R. (2003). Determinación de Umbrales de LLuvia Detonante de Deslizamiento en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 7, 157–168.
- McKean, J., & Roering, J. (2004). Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, 57(3–4), 331–351. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00164-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00164-8)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, & Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2015). Protocolo para la Identificación y Evaluación de la Degradación de Suelos por Erosión.
- Mitchell, J. K., & Burbenzer, G. D. (1984). Estimación de la pérdida del suelo. Kirby, M. J y Morgan, R. P. C. (Compiladores).

- Montero Olarte, J. (2017). Clasificación de Movimiento en Masa y su Distribución en Terrenos Geológicos de Colombia.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30. <https://doi.org/10.1002/HYP.3360050103>
- Moreno, H. A., María, ;, Vélez, V., Juan, ;, & Montoya, D. (2006). La Lluvia y los Deslizamientos de Tierra en Antioquia: Análisis de su Ocurrencia en las Escalas Interanual, Intraanual y Diaria.
- Núñez, & Solís, J. (2001). Manejo y conservación de suelo. EUNED.
- Pacheco, H. A., Cevallos; Richard X, Vince; & Carlos J. (2019). Cálculo del factor C de la RUSLE, en la cuenca del río Carache, Trujillo-Venezuela usando imágenes del Satélite Miranda VRSS-1.
- Pérez Salinas, J. E., Rodríguez, F. R., López Santos, A., Torres-González, J. A., Antonio de Jesús, M. J., Díaz Romo, A., & Valdivia Martínez, O. (2019). Erodibility and erosion risk of black soils of central Mexico: Study of a Phaeozem. *Terra Latinoamericana*, 37(4), 391–400. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.531>
- Plan de Ordenamiento Territorial Del Municipio de Santiago de Cali (2014).
- Portilla Gamboa, M. E. (2014). Reconstrucción y Análisis de Ocurrencias Regionales de Múltiples Eventos de Movimientos en Masa Generados por Lluvias Históricas en los Pirineos.
- Portuguez M. (2015). Estimación De La Pérdida De Suelos Por Erosión Hídrica En La Cuenca Del Río Sigüas Utilizando Geo informática. *Canales Científicos*, 76(2), 324. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i2.797>
- Prado Hernández, J. V., Rivera Ruiz, P., León Mojarro, B. de, Carrillo García, M., Martínez Ruiz, A., Rivera Ruiz, P., León Mojarro, B. de, Carrillo García, M., & Martínez Ruiz, A. (2017). Calibración de los modelos de pérdidas de suelo USLE y MUSLE en una cuenca forestal de México: Caso El Malacate. *Agrociencia*. In *Agrociencia* (Vol. 51, Issue 3). Colegio de Postgraduados. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000300265&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Proyecto Multinacional Andino (PMA): Geociencias para las Comunidades Andinas (GCA). (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas. *Publicación Geológica Multinacional*, 4.
- Rodríguez Castiblanco, E. A. (2017). Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1: 25.000.
- Rutebuka, J., De Taeye, S., Kagabo, D., & Verdoodt, A. (2020). Calibration and validation of rainfall erosivity estimators for application in Rwanda. *Catena*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104538>
- Santos Preciado, J. M. (2004). *Sistemas de Información Geográfica*. https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=xjbeDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=que+es+Sistema+de+informaci%C3%B3n+geografica&ots=wrt7lCuJ7h&sig=ZLr-pE_-

Cp0rzX-

xHZFtACHvcCQ&redir_esc=y#v=onepage&q=que%20es%20Sistema%20de%20informaci%C3%B3n%20geografica&f=false

SEMARNAT, C. de P. (2003). (2003). Evaluación de la Degradación de los Suelos Causada por el Hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2020). Riesgo por Movimientos en Masa en Colombia. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Riesgo-por-movimientos-en-masa-en-Colombia.aspx>

Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>

WangG, & Sassa, K. (2003). Pore pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: Effects of grain size and fine-particle content. *Engineering Geology*, 69(1–2), 109–125.

Wieczorek, G. F. (1996). Landslide Triggering Mechanisms. *Landslides Investigation and Mitigation - Special Report N° 247*. Transportation Research Board - National Research Council, 76–90.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Department of Agriculture, Science and Education Administration., 537.

Zachar, D. (1982). Soil Erosion. Elsevier Scientific Publishing Company. https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=o8ny2dUkpM8C&oi=fnd&pg=PP1&ots=mLclTUxGMs&sig=3PWFr82xyzlirCO_dw99iz8U-tA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Zhang, K., Yu, Y., Dong, J., Yang, Q., & Xu, X. (2019). Adapting & testing use of USLE K factor for agricultural soils in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 269, 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.09.033>.

12. Anexos

Anexo A. Catálogo histórico de movimientos en masa para el CTC y CB

Anexo B. Series de datos de precipitación de las 9 estaciones.

Anexo C. Serie de datos de precipitación para cada movimiento en masa en 1, 3 y 5 días antes del evento

Anexo D. Determinación del Factor R para el método USLE

ANEXO A

Catálogo histórico de movimientos en masa para el CTC y CB

	CATALOGO DE MOVIMIENTOS EN MASA PARA LOS CERROS TUTELARES DEL MUNICIPIO DE CALI, PERIODO 1979-2016
	Influencia de la lluvia y los procesos erosivos en los movimientos en masa en el Cerro de las Tres Cruces y en el Cerro de la Bandera en el municipio de Santiago de Cali
	Manuela Jiménez - Magda Carolina Pedroza Carvajal

ID	AÑO	MES	DÍA	Sitio-Barrio- Comuna/Corregimiento	LATITUD	LONGITUD	TIPO DE MOVIMIENTO	CAUSAS	FACTOR DETONANTE
MM 01	1979	Enero	19	Mina de carbón - Limites Comuna 18	3°23'8.32"N	76°33'44.36"O	Deslizamiento	Degradación del suelo por minería	Lluvia
MM 02	1984	Febrero	15	Ladera al suroccidente de Cali	3°23'26.92"N	76°33'42.63"O	Flujo	Morfología altamente escarpada	Lluvia
MM 03	1985	Marzo	30	Mina de carbón - Limites Comuna 18	3°23'4.35"N	76°33'42.31"O	Deslizamiento	Degradación del suelo por minería	Lluvia
MM 04	1987	Mayo	31	Los Andes- Cerro de las Tres Cruces	3°27'39.71"N	76°32'46.43"O	Flujo	Falta de control de las aguas de escorrentía superficial. Las principales causas se deben a causas antrópicas y las alta pendientes de los taludes existentes.	Infiltracion de agua
MM 05	1987	Noviembre	21	Alto Nápoles- Limite Comuna 18 y Cerro la Bandera	3°23'28.87"N	76°33'41.05"O	Deslizamiento	Morfología altamente inclinada	Lluvia
MM 06	1993	Mayo	23	Alto Nápoles- Limite Comuna 18 y Cerro la Bandera	3°23'29.12"N	76°33'41.08"O	Deslizamiento	Degradacion del suelo por antecedentes de movimientos en masa en el punto	Lluvia
MM 07	1997	Abril	14				Deslizamiento	Lluvias y las características del terreno	Lluvia
MM 08	1998	Mayo	5	Alto Nápoles- Limite Comuna 18 y Cerro la Bandera	3°23'28.88"N	76°33'41.06"O	Deslizamiento	Terreno de inestabilidad geologica	Lluvia
MM 09	2000	Diciembre	13	Sector Las Minas, Los Chorros Limite Comuna 18	3°23'4.52"N	76°33'46.69"O	Deslizamiento	Degradacion del suelo por incidencia de meteorizacion	Lluvia
MM 10	2000	Abril	16				Deslizamiento	Localización, erosión	Lluvia
MM 11	2000	Noviembre	22				Flujo	Flujo de aguas de escorrentía a través de la ladera y del talud de la vía	Lluvia
MM 12	2000	Junio	4				Flujo	No Registra	Lluvia
MM 13	2001	Octubre	30				Deslizamiento	Degradacion del suelo	No Registra
MM 14	2001	Junio	11				Deslizamiento	No Registra	Lluvia

	CATALOGO DE MOVIMIENTOS EN MASA PARA LOS CERROS TUTELARES DEL MUNICIPIO DE CALI, PERIODO 1979-2016
	Influencia de la lluvia y los procesos erosivos en los movimientos en masa en el Cerro de las Tres Cruces y en el Cerro de la Bandera en el municipio de Santiago de Cali
	Manuela Jiménez - Magda Carolina Pedroza Carvajal

ID	AÑO	Tipo de Material del Movimiento - LITOLOGIA	OBSERVACIONES	FUENTE DE INFORMACIÓN
MM 01	1979	Se observa una roca con alto grado de meteorización y con algún indicio de inestabilidad.	Un deslizamiento registrado en una mina de carbón situada al suroccidente de la ciudad causó la muerte a un trabajador. En las minas de carbón localizadas al suroccidente de Cali se labora con gran riesgo pues no se observan las reglas elementales de seguridad.	EL TIEMPO (1979)-01-20 P.14A
MM 02	1984	Material con suelo finogranular limo arcilloso saturado	La fuente no registró ningún efecto.	SIMMA – IDEAM Inventario
MM 03	1985	El talud inestable de roca diabásica.	Una persona murió y varias se encuentran desaparecidas al derrumbarse la mina La Cascada ubicada en la ladera de la cordillera occidental al sur de Cali propiedad de la Central Hidroeléctrica de Anchicayá. La Cascada lleva 20 años de explotación continua y en los últimos meses se adelantaban gestiones para acabar con su funcionamiento.	EL TIEMPO (1985)-03-31 P.12B
MM 04	1987	Presencia de suelos blandos saturados y erosionables.	La fuente no registró ningún efecto.	SIMMA-SD
MM 05	1987	Deslizamiento planar que afecta el suelo residual y el saprolito de diabasa, en una zona de pendientes fuertes	EL Comité Operacional de Emergencia indicó que se atendieron deslizamientos en Alto Napoles Tres de Mayo y el bajo Jordan. En Alto Nápoles dos casas quedaron totalmente destruidas. 4 hab/familia-vivienda.	EL PAIS (1987)-11-23 P.C4
MM 06	1993	Caída de roca con granulometría variada y suelo residual.	Hay numerosas viviendas que amenazan con venirse al suelo. Entretanto la Cruz Roja que se movilizaba en una ambulancia no pudo llegar hasta el lugar del deslizamiento dada las difíciles condiciones para acceder al lugar sólo hasta la tarde una comisión logró hacerlo.	EL PAIS (1993)-05-24 P.B3/SIMMA-SD
MM 07	1997	Hubo sobresaturación de la humedad generada por las lluvias y la alta pendiente del terreno.	El número de damnificados se dedujo al multiplicar el número de viviendas destruidas por el número promedio de integrantes de un hogar en Cali	DAPM y Corporación OSSO - Salida de campo
MM 08	1998	Caída de roca con granulometría variada y suelo residual.	El CLE informó que una vivienda del sector de Alto Napoles debió ser evacuada porque una roca que cayó de la loma ocasionó daños parciales. 4 adultos y una menor fueron evacuados. En la fuente de SIMMA se menciona que se afectaron los servicios públicos.	EL TIEMPO CALI (1998)-05-06 P.2/SIMMA – IDEAM Inventario
MM 09	2000	Material con roca ígnea con alto grado de meteorización.	El número de damnificados y evacuados se dedujo al multiplicar el número de viviendas destruidas y el número de viviendas afectadas por el promedio de habitantes por cada hogar en Cali (3.7). * Esta ficha está asociada con la ficha de serial 2001-00037 que contiene los datos consolidados del hecho. En la fuente SIMMA se mencionan 2 heridos.	El País, (2001)-12-14, P. / SIMMA IDEAM Inventario
MM 10	2000	No Registra	La fuente no registró ningún efecto.	Reporte Secretaría Riesgo en página web
MM 11	2000	No Registra	El periódico informa que un pequeño derrumbe se registró en el sector, aunque no hubo heridos si se presentaron daños en una vivienda.	EL TIEMPO y ADN Prensa
MM 12	2000	No Registra	La fuente no registró ningún efecto.	SIMMA-SD
MM 13	2001	Ladera conformada por suelos arcillosos	Se afectó el camino peatonal	SIGPAD
MM 14	2001	No Registra	La fuente no registró ningún efecto.	Reporte Secretaría Riesgo en página web

	CATALOGO DE MOVIMIENTOS EN MASA PARA LOS CERROS TUTELARES DEL MUNICIPIO DE CALI, PERIODO 1979-2016
	Influencia de la lluvia y los procesos erosivos en los movimientos en masa en el Cerro de las Tres Cruces y en el Cerro de la Bandera en el municipio de Santiago de Cali
	Manuela Jiménez - Magda Carolina Pedroza Carvajal

ID	AÑO	MES	DÍA	Sitio-Barrio- Comuna/Corregimiento	LATITUD	LONGITUD	TIPO DE MOVIMIENTO	CAUSAS	FACTOR DETONANTE
MM 15	2001	Diciembre	17	La Cruz, La Hormiga Los Chorros Limite Comuna 18	3°23'5.03"N	76°33'46.48"O	Deslizamiento	Degradacion del suelo y morfologia escarpada	Lluvia
MM 16	2004	Enero	15	Alto Aguacatal Limite Comuna 1	3°27'26.33"N	76°32'48.84"O	Deslizamiento	Morfologia altamente inclinada	Lluvia
MM 17	2004	Abril	9				Flujo	No Registra	Lluvia
MM 18	2005	Abril	28				Deslizamiento	No Registra	No Registra
MM 19	2005	Febrero	3	Sector Altos de Normandía – Bataclán-Limite Comuna 2	3°28'20.64"N	76°32'21.39"O	Deslizamiento	Degradacion del suelo por procesos de meteorizacion	Lluvia
MM 20	2006	Octubre	12				Deslizamiento	Terreno de inestabilidad geologica	Lluvia
MM 21	2007	Marzo	30	Avenida 15 Oeste Limite Comuna 1	3°27'42.89"N	76°32'57.50"O	Deslizamiento	Carece completamente de estructuras de contención y de control de escorrentías	Lluvia
MM 22	2010	Noviembre	10	Aguacatal – Comuna 1	3°27'26.97"N	76°32'50.38"O	Flujo	Degradacion del suelo por meteorizacion	Lluvia
MM 23	2011	Agosto	31	Aguacatal – Comuna 1	3°27'30.40"N	76°32'50.87"O	Deslizamiento	Deslizamiento de tipo rotacional, propiciado por las condiciones litológicas de la zona.	Lluvia
MM 24	2011	Abril	8				Deslizamiento	Características del terreno	No Registra
MM 25	2011	Diciembre	17				Deslizamiento	Localización, erosión	No Registra
MM 26	2016	Septiembre	29				Deslizamiento	Deslizamiento de tipo rotacional, propiciado por las condiciones litológicas de la zona.	Lluvia

	CATALOGO DE MOVIMIENTOS EN MASA PARA LOS CERROS TUTELARES DEL MUNICIPIO DE CALI, PERIODO 1979-2016	
	Influencia de la lluvia y los procesos erosivos en los movimientos en masa en el Cerro de las Tres Cruces y en el Cerro de la Bandera en el municipio de Santiago de Cali	
	Manuela Jiménez - Magda Carolina Pedroza Carvajal	

ID	AÑO	Tipo de Material del Movimiento - LITOLOGIA	OBSERVACIONES	FUENTE DE INFORMACIÓN
MM 15	2001	Material constituido por suelo residual y roca altamente meteorizada	La fuente no registró ningún efecto.	SIMMA -IDEAM Inventario
MM 16	2004	Macizo de roca altamente fracturada con diaclasamiento en mas de tres direcciones	La fuente no registró ningún efecto.	SIMMA -IDEAM Inventario
MM 17	2004	Flujo de piedras y lodo	La fuente no registró ningún efecto.	DAPM y Corporación OSSO - Salida de campo
MM 18	2005	No Registra	El CMGRD en el informe de las actividades realizadas por las secretaría de gobierno informa que el deslizamiento afectó 1 vivienda y a 4 personas (Se hizo conversión de 1 vivienda afectada x3.7 habitantes por cada hogar en Cali, según el DANE).	Reporte Secretaria Riesgo en pagina web
MM 19	2005	Suelo saprolítico altamente meteorizado	En el Inventario de Movimientos en Masa de Cali, tiene la nomenclatura D21	Diario El País (2005)
MM 20	2006	No Registra	La fuente no registró ningún efecto.	DAPM y Corporación OSSO - Salida de campo
MM 21	2007	Caída de materiales, el talud tiene una altura promedio de (2.50 m), una pendiente superior a 70 grados y	En el Inventario de Movimientos en Masa de Cali, tiene la nomenclatura D29. Hay una vivienda afectada y están en peligro por lo menos tres mas. Localización y escorrentía factores importantes en la detonacion	Solicitud de concepto sobre condiciones de riesgo. Oficio 4132.2.5.8
MM 22	2010	Material finogranular limo arcilloso saturado con alto coheficiente de plasticidad en muestra fresca	El informe de la CMGRD de las actividades realizadas por la Secretaría de Gobierno Municipal, menciona que resultaron afectadas 1 vivienda y 4 personas (Se hizo conversión de 1 vivienda afect. x 3.7 habitantes por hogar en Cali, según el DANE). YDA. Se menciona la ola invernal como causa del deslizamiento	CMGRD (Informe de la CMGRD de las actividades realizadas por la Secretaría de Gobierno Municipal)
MM 23	2011	Caída de roca con granulometria variada y suelo residual.	Se informa que la desestabilización del terreno se dio por la acumulación de aguas lluvia y de drenajes contruidos artesanalmente; se suma a esto el deficiente uso del suelo por parte de las personas pues construyen sin ninguna norma técnica y hay deforestación aumentando así la inestabilidad del terreno. El deslizamiento afectó 1 vivienda y a 5 personas (Se hizo conversión de 1 vivienda afect. x 3.7 habitantes). YDA	EL TIEMPO CALI (2011)-08-11. P.9
MM 24	2011	No Registra	La fuente no registró ningún efecto.	CMGRD Censo Ola Invernal 2011
MM 25	2011	Hubo sobresaturación de la humedad generada por las lluvias y la alta pendiente del terreno.	La fuente no registró ningún efecto.	DAGMA, 18/19/2011, Urgencia por deslizamiento a Subdirección de Bienes inmuebles y Recurso Físico.
MM 26	2016	Caída de roca con granulometria variada y suelo residual.	Se informa que la desestabilización del terreno se dio por la acumulación de aguas lluvia y de drenajes contruidos artesanalmente; se suma a esto el deficiente uso del suelo por parte de las personas pues construyen sin ninguna norma técnica y hay deforestación aumentando así la inestabilidad del terreno. El deslizamiento afectó 1 vivienda y a 5 personas.	EL TIEMPO CALI (2011)-08-11. P.10

ANEXO B
SERIES DE PRECIPITACIÓN 9 ESTACIONES

ID	X	Y	ELEVACION	ESTACION	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PP MED ANUAL
1	76.60940	3.50652	1649	AGUACATAL	1984	82	139	45	174	175	130	29	172	179	200	147	80	1552
					1985	138	31	137	48	145	61	51	113	176	163	236	32	1331
					1987	25	72	56	160	75	75	49	49	127	121	53	88	950
					1993	19	61	54	355	158	86	51	35	134	88	157	47	1245
					1997	117	65	124	200	123	82	4	0	131	101	149	42	1138
					1998	6	104	123	204	245	146	135	73	116	85	194	56	1487
					2000	54	143	84	83	197	75	78	75	116	119	107	29	1160
					2001	44	62	96	116	142	44	144	0	134	62	132	75	1051
					2004	74	10	19	253	97	74	57	31	110	96	103	31	955
					2005	104	34	117	138	215	68	51	129	36	119	78	51	1140
					2007	133	8	123	185	163	49	43	112	49	94	87	65	1111
					2010	20	39	86	207	144	84	151	63	82	123	294	96	1389
					2011	42	84	40	196	185	89	95	56	55	112	168	140	1262
					2016	19	29	147	136	132	206	62	19	142	183	136	168	1379
TOTAL					62.64	62.93	89.36	175.36	156.86	90.64	71.43	66.21	113.36	119.00	145.79	71.43	1225.00	
2	76.57988	3.41057	1056	CAÑAVERALEJO PG	1984	236	211	102	279	142	121	4	127	187	198	216	87	1910
					1985	157	21	163	61	123	100	36	56	139	221	166	134	1377
					1987	87	74	108	177	159	103	62	51	78	251	226	41	1417
					1993	65	102	190	279	218	34	25	24	147	126	186	9	1405
					1997	208	104	143	168	140	126	2	1	135	131	242	12	1412
					1998	11	113	63	291	357	127	100	42	177	86	176	83	1626
					2000	208	208	124	110	301	121	79	91	136	56	231	121	1786
					2001	109	176	153	42	141	88	26	2	162	149	145	192	1385
					2004	221	56	42	128	261	48	63	19	67	188	168	116	1377
					2005	115	65	260	192	243	72	42	64	120	198	165	216	1752
					2007	82	26	161	264	294	49	90	101	34	153	122	220	1596
					2010	7	126	51	210	217	32	100	136	161	156	327	91	1614
					2011	99	124	49	354	86	37	107	22	93	290	248	193	1702
					2016													
TOTAL					123.46	108.15	123.77	196.54	206.31	81.38	56.62	56.62	125.85	169.46	201.38	116.54	1566.08	
3	76.62863	3.45101	1864	BRASILIA	1984	169	223	87	236	187	147	89	125	158	178	164	77	1840
					1985	127	68	171	75	153	71	52	79	145	181	123	58	1303
					1987	46	81	83	229	110	106	77	81	148	187	154	155	1457
					1993	57	141	105	249	229	166	16	31	132	99	127	49	1401
					1997	153	107	161	224	283	150	2	0	141	109	272	38	1640
					1998	17	149	109	276	276	129	80	92	121	61	137	118	1565
					2000	75	146	105	74	147	96	37	45	180	120	94	75	1194
					2001	80	77	111	105	111	49	63	2	148	103	107	60	1016
					2004	109	79	21	250	214	73	106	40	89	84	161	24	1250
					2005	147	35	143	195	243	122	62	104	18	115	217	146	1547
					2007	167	16	164	260	193	65	63	104	116	194	106	94	1542
					2010	38	71	105	342	199	108	184	64	108	93	229	90	1631
					2011	58	157	68	201	318	146	145	103	95	134	191	180	1796
					2016	66	17	58	51	83	43	68	1	42	28	42	22	521
TOTAL					93.50	97.64	106.50	197.64	196.14	105.07	74.57	62.21	117.21	120.43	151.71	84.71	1407.36	

ANEXO B
SERIES DE PRECIPITACIÓN 9 ESTACIONES

ID	X	Y	ELEVACION	ESTACION	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PP MED ANUAL
4	76.53250	3.44141	1000	COLEGIO SAN JUAN	1984	199	227	80	133	159	142	33	71	82	215	249	75	1665
					1985	124	10	97	32	103	85	25	34	110	109	116	90	935
					1987	43	66	192	198	145	46	57	58	65	179	158	73	1280
					1993	51	43	153	167	175	28	24	22	86	54	160	41	1004
					1997	204	46	82	182	76	105	0	0	139	115	243	8	1200
					1998	10	77	61	236	166	76	67	96	132	44	139	64	1168
					2000	133	93	79	59	276	77	57	28	108	53	108	107	1178
					2001	97	81	141	76	81	31	21	0	159	90	111	150	1038
					2004	174	21	22	171	113	59	21	23	68	160	154	72	1058
					2005	73	44	101	120	212	43	75	76	46	120	168	136	1214
					2007	114	36	175	236	120	48	23	80	19	190	126	99	1266
					2010	16	82	107	185	83	31	37	73	48	95	230	128	1115
					2011	71	148	42	186	57	76	96	14	48	232	205	104	1279
					2016	5	10	53	71	34	35	4	6	42	33	22	30	345
TOTAL					93.86	70.29	98.93	146.57	128.57	63.00	38.57	41.50	82.29	120.64	156.36	84.07	1124.64	
5	76.44392	3.49761	940	GUACHAZAMBO LO	1984	243	258	34	90	197	87	61	105	88	130	90	80	1463
					1985	72	30	124	29	89	94	10	110	194	119	104	33	1008
					1987	8	44	147	75	159	0	33	69	120	129	68	13	865
					1993	20	64	138	109	167	3	0	53	154	93	201	60	1062
					1997	292	45	117	60	71	108	0	0	42	56	164	7	962
					1998	16	26	68	109	115	40	45	131	115	36	157	22	880
					2000	31	82	111	78	123	38	18	25	79	61	60	59	765
					2001	73	32	65	94	93	3	0	91	48	94	92	778	
					2004	60	31	36	148	75	42	38	10	36	69	244	57	846
					2005	53	36	86	29	162	27	35	39	29	164	116	87	863
					2007	68	0	94	159	74	41	83	127	43	173	41	24	927
					2010	23	17	17	204	65	86	103	97	53	95	264	119	1143
					2011	35	151	27	231	91	51	94	27	46	190	175	176	1294
					2016	0	17	95	173	137	0	28	28	89	120	64	78	829
TOTAL					71.00	59.50	82.79	113.43	115.57	50.71	39.36	58.64	84.21	105.93	131.57	64.79	977.50	
6	-76.49336	3.44689	956	LANTA RIO CAUC	1984	128	268	129	116	166	76	3	90	127	151	160	57	1471
					1985	110	20	78	48	90	29	13	47	165	86	106	46	838
					1987	13	52	111	149	128	11	67	69	71	179	104	50	1004
					1993	25	98	163	162	164	3	1	27	47	66	116	42	914
					1997	111	52	81	166	95	103	1	0	117	91	232	8	1057
					1998	6	88	103	184	183	84	68	109	84	51	115	40	1115
					2000	102	100	128	76	163	89	48	28	92	51	89	90	1056
					2001	152	50	162	88	74	49	11	0	150	112	65	121	1034
					2004	161	17	29	115	134	50	14	19	95	181	151	68	1034
					2005	62	22	131	100	330	69	0	54	110	81	142	140	1241
					2007	113	6	168	248	375	15	87	291	7	117	78	130	1635
					2010	10	44	24	217	103	38	107	63	97	74	242	86	1105
					2011	3	197	18	265	123	60	88	21	53	139	183	95	1245
					2016	0	0	0	0	0	0	1	7	28	9	22	33	100
TOTAL					71.14	72.43	94.64	138.14	152.00	48.29	36.36	58.93	88.79	99.14	128.93	71.86	1060.64	

ANEXO B
SERIES DE PRECIPITACIÓN 9 ESTACIONES

ID	X	Y	ELEVACION	ESTACION	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PP MED ANUAL
7			1228	LAS BRISAS	1984	332	239	174	344	291	132	52	136	406	315	367	79	2867
					1985	176	0	169	104	173	105	59	62	193	294	209	149	1693
					1987	100	98	153	253	204	153	62	73	94	266	273	141	1870
					1993	67	115	194	351	310	24	38	23	148	155	258	78	1761
					1997	212	86	225	192	192	126	2	0	149	166	292	14	1656
					1998	10	144	163	297	384	117	110	75	252	103	223	200	2078
					2000	186	246	125	105	342	162	145	77	273	57	199	136	2053
					2001	120	236	192	39	122	71	52	3	193	144	216	138	1526
					2004	224	54	26	217	265	34	76	27	94	206	208	109	1540
					2005	85	87	236	272	184	133	35	89	130	230	190	267	1938
					2007	119	26	233	356	337	55	142	128	41	279	112	239	2067
					2010	63	176	95	376	288	242	336	173	202	291	402	366	3010
					2011	98	294	222	516	178	136	149	45	135	292	277	243	2585
					2016	19	62	297	318	250	260	29	25	178	398	156	217	2209
TOTAL					129.36	133.07	178.86	267.14	251.43	125.00	91.93	66.86	177.71	228.29	241.57	169.71	2060.93	
8			1298	LA FONDA CANTA CLARO	1984	351	275	116	330	262	199	46	127	331	321	382	183	2923
					1985	275	37	203	157	215	89	78	60	270	326	198	148	2056
					1987	73	94	130	234	182	195	107	89	114	295	326	124	1963
					1993	111	163	289	345	478	36	72	40	164	192	306	101	2297
					1997	235	138	286	250	201	218	7	3	173	133	330	12	1986
					1998	11	125	117	222	320	163	79	62	237	54	206	130	1726
					2000	195	291	129	86	244	149	76	50	204	67	159	158	1808
					2001	142	191	207	75	112	50	65	5	173	155	239	198	1612
					2004	302	34	51	269	280	44	60	68	91	178	204	138	1719
					2005	142	21	199	167	219	64	10	84	132	184	205	189	1616
					2007	90	19	190	290	283	18	80	123	46	236	171	248	1794
					2010	26	176	78	192	230	141	188	137	116	161	348	183	1976
					2011	104	341	65	543	105	102	124	39	89	274	286	192	2264
					2016	84	26	259	308	241	175	42	7	140	124	74	170	1650
TOTAL					152.93	137.93	165.64	247.71	240.86	117.36	73.86	63.86	162.86	192.86	245.29	155.29	1956.43	
9			1179	LA LADRILLERA	1984	170	216	67	270	63	120	70	69	333	285	238	94	1995
					1985	100	12	145	98	132	55	54	60	181	199	179	93	1308
					1987	67	49	102	251	116	90	42	92	113	266	289	65	1542
					1993	126	93	197	228	347	14	37	55	175	144	269	77	1762
					1997	265	137	165	298	208	304	6	0	132	125	264	18	1922
					1998	0	180	143	266	262	101	65	62	240	100	172	142	1733
					2000	170	234	192	161	375	118	28	88	223	93	175	33	1890
					2001													0
					2004													0
					2005													0
					2007													0
					2010													0
					2011													0
					2016													0
TOTAL					128.29	131.57	144.43	224.57	214.71	114.57	43.14	60.86	199.57	173.14	226.57	74.57	1736.00	

ANEXO C
PRECIPITACIÓN (LC) DEL DÍA DEL EVENTO

Evento MM	Precipitacion mes del evento	Precipitacion dia del evento	Precipitacion 5 dias antes del evento	Precipitacion 10 dias antes del evento	Precipitacion 15 dias antes del evento	Precipitacion Acumulada 1 mes antes	Precipitacion Acumulada 2 meses antes	Precipitacion Acumulada 3 meses antes
1979/Enero/19	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra
1984/Febrero/16	211	1	0	54	132	189	476	587
1985/Marzo/30	137	23	48	50	58	90	121	259
1987/Mayo/31	159	3	3	12	29	71	231	287
1987/Noviembre/21	53	1	16	23	23	92	210	275
1993/Mayo/23	158	23	0	9	45	140	452	528
1997/Abril/14	200	23	28	29	112	124	271	339
1998/Mayo /5	245	18	111	152	156	250	421	527
2000/Diciembre/13	121	15	1	2	50	185	280	421
2000/Abril/16	110	4	51	51	66	116	382	533
2000/Noviembre/22	107	10	51	62	81	181	255	340
2000/Junio/4	75	1	10	24	100	171	255	353
2001/Octubre/30	149	19	51	63	70	86	246	248
2001/Junio/11	44	10	15	58	58	146	217	347
2001/Diciembre /17	75	12	2	49	50	107	213	261
2004/Enero/15	74	23	8	42	44	65	164	245
2004/Abril/9	128	1	4	5	39	40	103	243
2005/Abril/28	138	2	34	58	58	144	154	190
2005/Febrero/3	34	5	3	3	26	104	122	196
2007/Octubre/12	94	2	17	19	32	68	152	219
2007/Marzo/30	161	2	39	55	74	157	183	265
2010/Noviembre/10	294	12	72	158	186	247	322	390
2011/Agosto/31	56	11	5	15	42	72	158	235
2011/Abril/8	196	5	23	23	23	36	83	128
2011/Diciembre/17	140	7	47	78	106	176	309	393
2016/Septiembre/29	142	2	12	23	41	151	158	200

PRECIPITACIÓN (LC) 3 DÍAS ANTES DEL EVENTO

Evento MM	Precipitacion mes del evento	Precipitacion (LC) 3 dias antes del evento	Precipitacion 5 dias antes del evento	Precipitacion 10 dias antes del evento	Precipitacion 15 dias antes del evento	Precipitacion Acumulada 1 mes antes	Precipitacion Acumulada 2 meses antes	Precipitacion Acumulada 3 meses antes
1979/Enero/19	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra
1984/Febrero/16	211	0	2	53	55	60	146	270
1985/Marzo/30	137	0	0	10	11	42	91	209
1987/Mayo/31	159	0	5	31	63	152	237	295
1987/Noviembre/21	53	0	3	7	7	85	195	258
1993/Mayo/23	158	0	0	45	85	182	452	519
1997/Abril/14	200	0	83	91	95	146	269	369
1998/Mayo /5	245	0	40	78	122	206	348	453
2000/Diciembre/13	121	1	1	1	1	82	202	288
2000/Abril/16	110	16	3	25	42	69	249	291
2000/Noviembre/22	107	20	36	51	65	163	246	337
2000/Junio/4	75	1	23	45	128	183	280	349
2001/Octubre/30	149	0	31	38	83	113	186	195
2001/Junio/11	44	0	10	40	68	112	276	379
2001/Diciembre /17	75	0	47	48	75	211	314	378
2004/Enero/15	74	0	21	44	44	69	171	259
2004/Abril/9	128	0	3	4	4	5	32	92
2005/Abril/28	138	0	37	48	67	150	244	275
2005/Febrero/3	34	0	3	21	32	104	135	226
2007/Octubre/12	94	1	11	26	58	62	158	213
2007/Marzo/30	161	19	24	49	72	97	105	238
2010/Noviembre/10	294	25	73	113	118	187	250	318
2011/Agosto/31	56	11	5	15	45	75	161	238
2011/Abril/8	196	8	2	2	7	15	126	161
2011/Diciembre/17	140	10	14	55	86	144	306	399
2016/Septiembre/29	142	0	16	23	55	157	158	225

PRECIPITACIÓN (LC) 5 DÍAS ANTES DEL EVENTO

Evento MM	Precipitacion mes del evento	Precipitacion (LC) 5 dias antes del evento	Precipitacion 5 dias antes del evento	Precipitacion 10 dias antes del evento	Precipitacion 15 dias antes del evento	Precipitacion Acumulada 1 mes antes	Precipitacion Acumulada 2 meses antes	Precipitacion Acumulada 3 meses antes
1979/Enero/19	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra	No Resgistra
1984/Febrero/16	211	0	21	53	75	87	180	302
1985/Marzo/30	137	48	2	10	11	52	97	230
1987/Mayo/31	159	3	10	27	56	145	226	280
1987/Noviembre/21	53	16	7	7	7	91	194	260
1993/Mayo/23	158	0	9	45	85	340	494	559
1997/Abril/14	200	28	82	94	94	149	264	361
1998/Mayo /5	245	111	41	45	85	189	312	416
2000/Diciembre/13	121	1	0	0	70	201	281	372
2000/Abril/16	110	51	1	27	39	69	245	287
2000/Noviembre/22	107	51	0	2	2	63	196	272
2000/Junio/4	75	10	14	90	122	188	271	352
2001/Octubre/30	149	51	0	29	29	42	165	165
2001/Junio/11	44	15	15	58	58	146	273	369
2001/Diciembre /17	75	2	13	14	49	116	205	300
2004/Enero/15	74	8	34	36	46	66	174	249
2004/Abril/9	128	4	3	4	5	22	96	134
2005/Abril/28	138	34	24	24	60	126	220	274
2005/Febrero/3	34	3	0	23	68	101	132	235
2007/Octubre/12	94	17	2	15	47	51	151	206
2007/Marzo/30	161	39	15	40	63	89	138	229
2010/Noviembre/10	294	72	86	114	123	187	252	318
2011/Agosto/31	56	5	5	23	44	82	160	238
2011/Abril/8	196	23	0	0	9	17	124	166
2011/Diciembre/17	140	47	31	59	116	144	306	389
2016/Septiembre/29	142	12	11	29	69	146	159	228

ANEXO D
DETERMINACION DEL FACTOR R (EROSIVIDAD DE LA LLUVIA)
 $A=R*K*LS*C*P$

ID	X	Y	ELE.	ESTACION	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	FACTOR R
1	-76.609	3.5065	1649	Aguacatal	1984-2016	3.203	3.233	6.518	25.102	20.085	6.707	4.165	3.579	10.490	11.560	17.350	4.165	116.157
2	-76.58	3.4106	1056	Cañaveralejo PG	1984-2016	9.733	7.469	9.782	24.665	27.178	4.229	2.047	2.047	10.113	18.337	25.896	8.672	150.168
3	-76.629	3.451	1864	Brasilia	1984-2016	16.780	18.300	21.770	74.976	73.843	21.190	10.674	7.429	26.371	27.837	44.179	13.774	357.123
4	-76.533	3.4414	1000	Colegio San Juan	1984-2016	7.833	4.393	8.702	19.102	14.699	3.529	1.323	1.531	6.021	12.942	21.738	6.285	108.097
5	-76.444	3.4976	940	Guachazambolo	1984-2016	5.157	3.622	7.011	13.162	13.664	2.631	1.585	3.518	7.255	11.479	17.710	4.294	91.088
6	-76.493	3.4469	956	Planta Rio Cauca	1984-2016	4.772	4.946	8.445	17.992	21.783	2.198	1.246	3.274	7.432	9.267	15.672	4.868	101.897
7	-76.59	3.4046	1228	Las Brisas	1984-2017	7.575	8.016	14.482	32.307	28.618	7.073	3.826	2.023	14.297	23.592	26.418	13.039	181.265
8	-76.591	3.3905	1298	La Fonda Canta Claro	1984-2018	11.954	9.724	14.024	31.364	29.652	7.040	2.788	2.084	13.557	19.011	30.753	12.325	184.277
9	-76.579	3.358	1179	La Ladrillera	1984-2019	9.480	9.972	12.016	29.051	26.557	7.561	1.072	2.133	22.943	17.269	29.571	3.203	170.828