

PMOT



ESTUDIOS DE GESTION DEL RIESGO DE DESASTRES

Diciembre de 2025

CENTRO DE PLANIFICACIÓN Y ACCIÓN ECUMÉNICA

- CEPAE -

Carmen María Pérez Sánchez
Presidenta

Agustín Sandino Echavarría
Director CEPAE

Jacobo Reyes Navarro
Asesor CEPAE

Equipo Consultor:

Augusto Pinto Carrillo
Arquitecto Urbanista – Director

José Mario Mayorga Henao
Sociólogo, Geógrafo y Estadístico

Cristhian Ortega Ávila
Economista

Diana Adarve Vargas
Ambiente y Riesgos

Andrés Santana Martínez
Ingeniero Civil

Nelson Medina Nina
Sociólogo

Julián Roa
Abogado

Tabla de contenido

1. Introducción	10
1.1. Localización del área de estudio	11
2. La Gestión del Riesgo de Desastres	13
3. Marco normativo.....	14
4. Marco conceptual.....	18
5. Antecedentes históricos	21
6. Caracterización física del territorio e insumos técnicos para el desarrollo del análisis de amenazas.....	27
6.1. Geología.....	27
6.1.1. Estratigrafía	29
6.1.1.1. Complejo Duarte (Formación Duarte - Rocas ultramáficas-máficas, dominado por ultramafitas, con metamorfismo de contacto. Neocomiano)	29
6.1.1.2. Complejo Duarte (Formación Duarte - Rocas ultramáficas-máficas, dominado por ultramafitas, con metamorfismo de contacto. Neocomiano)	29
6.1.1.3. Formación Arroyo Jigüey (Rocas volcánicas masivas de carácter intermedio-ácido, con metamorfismo de contacto).....	30
6.1.1.4. Fm. Arroyo Jigüey. (Rocas volcánicas masivas, ácidas intermedias-básicas, con metamorfismo de contacto)	30
6.1.1.5. Metapiroxenita.....	31
6.1.1.6. Formación Tireo (Rocas piroclásticas, básico-intermedio, con metamorfismo de contacto) 31	
6.1.1.7. Formación Tireo (Roca piroclástica de carácter básico-intermedio de color gris-verde (cenizas, tobas de lapilli, tobas litoclásticas))	31
6.1.1.8. Tonalita	32
6.1.1.9. Granito	32
6.1.1.10. Formación Loma Rodríguez	32
6.1.1.11. Formación Valdesia	33
6.1.1.12. Formación Iguana	33
6.1.1.13. Formación Fort Resolue (calizas).....	33
6.1.1.14. Formación Fort Resolue (conglomerado de caliza)	33
6.1.1.15. Formación Fort Resolue (alternancia de conglomerados y areniscas)	34
6.1.1.16. Formación Fort Resolue (alternancia de conglomerado, arenisca gravosa, arenisca, limo y marga calcárea).....	34
6.1.1.17. Formación San Cristóbal	35
6.1.1.18. Grupo Ingenio Caei (Miembro Boca de los Arroyos – conglomerados, arenas, limos y calizas).....	35

6.1.1.19.	Grupo Ingenio Caei (Miembro Sabana Grande – calizas, calcarenitas y arenas finas)	35
6.1.1.20.	Formación Llanura Costera (arena con estratificación deltaica)	36
6.1.1.21.	Formación Llanura Costera (arena calcárea con estratos de grava)	36
6.1.1.22.	Formación Yanigua (margas amarillentas y calizas)	36
6.1.1.23.	Formación los Haitises (calizas arrecifales y calizas)	37
6.1.1.24.	Diques básicos	37
6.1.1.25.	Formación La Isabela (caliza arrecifal, calciruditas y calcarenitas)	38
6.1.1.26.	Llanura de inundación (gravas, arenas y lutitas)	38
6.1.1.27.	Penillanura relictas	38
6.1.1.28.	Terraza baja (canto, grava, arena y limo)	38
6.1.1.29.	Terraza alta (canto, grava, arena y limo)	39
6.1.1.30.	Depósitos coluvioaluviales (arenas y lutitas con cantos)	39
6.1.1.31.	Fondos de valle (conglomerados, gravas y arenas)	39
6.1.2.	Geología estructural	40
6.2.	Geomorfología	40
6.2.1.	Metodología	41
6.2.2.	Unidades y subunidades geomorfológicas	42
6.2.2.1.	Explotación minera (Aemc)	43
6.2.2.2.	Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco)	43
6.2.2.3.	Cerro remanente (Dcr)	44
6.2.2.4.	Colina remanente disectada (Dcred)	44
6.2.2.5.	Laderas coluviales suaves (Dlcs)	44
6.2.2.6.	Lomeríos disectados (Dld)	44
6.2.2.7.	Laderas disectadas abruptas a escarpadas (Dldae)	44
6.2.2.8.	Lomo denudado bajo (Dldb)	45
6.2.2.9.	Laderas disectadas moderadas (Dldm)	45
6.2.2.10.	Laderas erosivas muy disectadas (Dlemd)	45
6.2.2.11.	Ladera moderada irregular (Dlmi)	45
6.2.2.12.	Laderas onduladas suaves (Dlos)	45
6.2.2.13.	Cauce aluvial permanente (Fcap)	45
6.2.2.14.	Planos de inundación reciente (Fpir)	46
6.2.2.15.	Terraza fluvio torrencial alta (Fta)	46
6.2.2.16.	Terraza fluvio torrencial baja (Ftb)	46
6.2.2.17.	Terraza marina (Mtm)	46

6.2.2.18.	Cuesta estructural (Sce).....	46
6.2.2.19.	Espolón bajo de longitud media (Sesbm).....	47
6.2.2.20.	Faceta triangular (Sft).....	47
6.2.2.21.	Ladera de contrapendiente (Slc)	47
6.2.2.22.	Ladera de contrapendiente de cuesta (Slcc)	47
6.2.2.23.	Ladera de contrapendiente escarpada (Slce)	47
6.2.2.24.	Ladera estructural de cuesta (Slec).....	47
6.2.2.25.	Ladera estructural disectada (Sled)	48
6.2.2.26.	Ladera estructural moderada ondulada (Slemo).....	48
6.2.2.27.	Sierra estructural muy disectada (Ssmnd).....	48
6.3.	Procesos morfodinámicos	48
6.4.	Cobertura del suelo	49
6.5.	Pendientes	51
6.6.	Curvatura	52
6.7.	Delimitación y zonificación de amenazas	53
6.7.1.	Delimitación y zonificación de la amenaza por movimientos en masa.....	54
6.7.1.1.	Marco teórico	¡Error! Marcador no definido.
6.7.1.2.	Alcance	¡Error! Marcador no definido.
6.7.1.3.	Herramientas o Insumos	¡Error! Marcador no definido.
6.7.1.4.	Zonificación de la amenaza por movimientos en masa rural	54
6.7.1.4.1.	Factores condicionantes	55
6.7.1.4.1.1.	Unidades geomorfológicas.....	55
6.7.1.5.	Generación del mapa de susceptibilidad mediante el método Bivariado	56
6.7.1.5.1.	Pesos de evidencia (Weight of Evidence, WofE)	57
6.7.1.5.1.1.	Cobertura vegetal	59
6.7.1.5.1.2.	Geología.....	60
6.7.1.5.1.3.	Unidades geomorfológicas.....	63
6.7.1.5.1.4.	Curvatura	66
6.7.1.5.1.5.	Pendientes	68
6.7.1.5.1.6.	Validación del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa	70
6.7.1.5.2.	Factores detonantes	72
6.7.1.5.2.1.	Lluvia	72
6.7.1.5.2.2.	Sismos	73
6.7.1.6.	Generación del Mapa de Amenaza por Movimientos en Masa	79

6.7.1.7.	Normas y lineamientos para la mitigación, restricción y/o prevención de riesgo por amenazas por Movimientos en Masa en suelo rural	81
6.7.2.	Delimitación y zonificación de amenaza por inundaciones	85
6.7.2.1.	Marco Teórico	85
6.7.2.2.	Resumen	¡Error! Marcador no definido.
6.7.2.3.	Alcance	86
6.7.2.4.	Herramientas e insumos	86
6.7.2.5.	Zonificación de la Susceptibilidad por Inundación Rural.....	86
6.7.2.5.1.	Metodología Empleada para la Zonificación de la Susceptibilidad.....	87
6.7.2.5.2.	Análisis de los eventos históricos	88
6.7.2.5.2.1.	Base de Datos Desinventar	88
6.7.2.5.3.	Análisis de geoformas asociadas a inundaciones	89
6.7.2.5.4.	Susceptibilidad por inundaciones	90
6.7.2.6.	Zonificación de la Amenaza por Inundaciones	93
6.7.2.6.1.	Metodología Empleada para la Zonificación de la Amenaza	93
6.7.2.6.2.	Análisis multitemporal de imágenes satelitales	94
6.7.2.6.3.	Generación del mapa de amenaza por inundaciones.....	97
7.	Bibliografía	102

Lista de figuras

Figura 1. Localización del área de estudio.....	13
Figura 2. Análisis porcentual de los eventos históricos	26
Figura 3. Unidades geológicas del municipio de San Cristóbal.....	28
Figura 4. Modelos morfológicos y morfométricos con software SAGA GIS	42
Figura 5. Subunidades geomorfológicas del municipio de San Cristóbal	43
Figura 6. Procesos morfodinámicos del municipio de San Cristóbal	49
Figura 7. Coberturas vegetales del municipio de San Cristóbal	50
Figura 8. Mapa de pendientes en grados	52
Figura 9. Curvatura	53
Figura 10. Metodología para zonificar amenazas por movimientos en masa	55
Figura 11. Mapa de unidades geomorfológicas.....	56
Figura 12. Relación de deslizamientos y el factor condicionante	58
Figura 13. Zonificación de la cobertura vegetal en función del W final	60
Figura 14. Zonificación de la geología en función del W final	63
Figura 15. Zonificación de la geomorfología en función del W final	66
Figura 16. Zonificación de la curvatura en función del W final	68
Figura 17. Zonificación de las pendientes en función del W final	69
Figura 18. Resultados de la curva ROC.....	71
Figura 19. Detonante lluvia a partir de Isoyetas para el municipio de San Cristóbal	73
Figura 20. Coeficiente Amplificación Sísmica (ST)	78
Figura 21. Aceleración Sísmica (Sa)	79
Figura 22. Amenaza por movimientos en masa.....	80
Figura 23. Porcentaje de amenaza por movimientos en masa	81
Figura 24. Esquema metodológico para la obtención de la susceptibilidad por inundaciones	88
Figura 25. Subunidades geomorfológicas del municipio de San Cristóbal	90
Figura 26. Susceptibilidad inundación por geomorfología en el municipio de San Cristóbal	91
Figura 27. Porcentaje de susceptibilidad inundación por geomorfología en el municipio de San Cristóbal	92
Figura 28. Rastros antiguos	96
Figura 29. Rastros recientes	97
Figura 29. Insumos para la zonificación de amenaza	98
Figura 29. Mapa de amenaza por inundación del municipio de San Cristóbal	100
Figura 23. Porcentaje de amenaza por inundación	101

Lista de tablas

Tabla 1. Eventos históricos DESINVENTAR	22
Tabla 2. Cuantificación de las coberturas del municipio	51
Tabla 3. Valores obtenidos para la Cobertura vegetal	59
Tabla 4. Valores obtenidos para las unidades geológicas	61
Tabla 5. Valores obtenidos para las unidades geomorfológicas	64
Tabla 6. Valores obtenidos para la curvatura	67
Tabla 7. Valores obtenidos para las pendientes	69
Tabla 8. Resultados de validación del modelo de susceptibilidad	71
Tabla 9. Clasificación de los perfiles de suelo	74
Tabla 10. Definición del tipo de perfil por Unidad Geológica	75
Tabla 11. Valores propuestos coeficiente Fa	77
Tabla 12. Clasificación grupo de uso	77
Tabla 13. Eventos Históricos DesInventar municipio de San Cristóbal	89
Tabla 14. Criterios de selección de zonas de susceptibilidad a inundación por elevación	92
Tabla 15. Esquema metodológico para la obtención de la amenaza por inundaciones	94
Tabla 15. Esquema de ponderación de variables temáticas para el modelo de amenaza por fenómenos de inundación	98
Tabla 15. Rangos estimados para la zonificación de la amenaza por inundación	99

1. Introducción

La Gestión del Riesgo de Desastres constituye un componente fundamental para el desarrollo sostenible de los territorios, en especial en contextos vulnerables a amenazas naturales y antrópicas. El municipio de San Cristóbal, situado en la región sur de la República Dominicana, representa un área estratégica tanto por su importancia histórica y social, como por su dinámica territorial, urbana y ambiental. No obstante, su localización geográfica y sus condiciones socioeconómicas la hacen susceptible a diversos eventos adversos, como inundaciones, deslizamientos de tierra, sismos y fenómenos hidrometeorológicos extremos.

En este contexto, el presente Estudio de Gestión del Riesgo de Desastres tiene como propósito identificar, caracterizar y analizar los principales factores de riesgo que afectan a San Cristóbal, con el fin de aportar insumos técnicos que orienten la planificación territorial, la toma de decisiones institucionales y la formulación de estrategias de reducción del riesgo y aumento de la resiliencia comunitaria.

El estudio se enmarca en las políticas nacionales e internacionales de gestión del riesgo, alineándose con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015-2030) y la Ley No. 147-02 sobre Gestión de Riesgos en la República Dominicana. A través del análisis de amenazas, evaluación de vulnerabilidades y la identificación de capacidades locales, se busca brindar un diagnóstico integral que facilite la formulación de medidas preventivas, de mitigación y preparación frente a desastres.

Este documento está dirigido a autoridades locales, organismos de respuesta, actores comunitarios, instituciones académicas y demás entidades interesadas en fortalecer la resiliencia del territorio sancristobalense frente a los riesgos presentes y futuros.

La Ley No. 368-22 de Ordenamiento Territorial, Uso del Suelo y Asentamientos Humanos establece que los Planes Municipales de Ordenamiento Territorial (PMOT) deben incorporar los Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo. Sin embargo, en San Cristóbal el proceso enfrentó limitaciones técnicas que impidieron realizar un estudio integral de vulnerabilidad y riesgo.

Estas limitaciones justifican desarrollar únicamente el Estudio de Amenazas complementado con la identificación de áreas con condición de amenaza y condición de Riesgo, como se menciona a continuación:

- **Limitaciones de información y acceso a insumos oficiales**

Los insumos técnicos requeridos para analizar vulnerabilidad (inventarios estructurales, datos socioeconómicos, capas de exposición, bases históricas de daños) no se encuentran disponibles públicamente o no pudieron ser accedidos mediante las entidades nacionales correspondientes. Esto imposibilita un análisis cuantitativo verificable.

- **Escala cartográfica insuficiente**

La cartografía disponible en el municipio no posee una escala adecuada para estudios de vulnerabilidad parcelaria o estructural. No permite determinar tipologías constructivas, densidad edificaciones, ni condiciones físicas específicas, requeridas para evaluar fragilidad o daño

esperado. No se cuenta con un catastro que permita hacer análisis predial. La vulnerabilidad requiere escalas detalladas (1:5.000 o menores) y un levantamiento físico exhaustivo que no se encuentra disponible.

- **Coherencia con estándares internacionales**

Las directrices internacionales (UNDRR, Banco Mundial, CEPAL) aceptan la elaboración de mapas de amenazas y zonas indicativas de Riesgo derivadas de la superposición de amenaza más la ocupación general del territorio. Esto permite establecer determinantes mínimas para uso del suelo, aun sin estudios completos.

Cuando no existe información suficiente para análisis completos. La práctica internacional valida este enfoque progresivo.

- **Conformidad con la Ley 368-22**

La Ley 368-22 prioriza integrar determinantes territoriales y restricciones de riesgo al PMOT. Para ello, basta con:

- identificar zonas de amenaza,
- reconocer ocupaciones existentes en zonas expuestas,
- delimitar áreas con condición de riesgo derivadas de la superposición de amenaza más ocupación.

La norma no exige que el municipio genere estudios de vulnerabilidad estructural o modelaciones avanzadas cuando no existan insumos oficiales disponibles.

- **Suficiencia técnica para el PMOT**

El análisis de amenazas desarrollado permite:

- delimitar zonas no aptas para urbanización,
- determinar áreas condicionadas a estudios específicos posteriores,
- establecer determinantes del uso del suelo.

Esto satisface la necesidad mínima para la planificación territorial municipal.

- **Enfoque gradual requerido por las guías**

Los estudios de riesgo completos deben realizarse en fases posteriores o como requisito para proyectos específicos. El PMOT identifica dónde deben desarrollarse estos estudios adicionales.

Dadas las limitaciones de información, cartografía, acceso territorial y recursos técnicos, los Estudios Básicos para el PMOT de San Cristóbal se elaboraron válidamente al nivel de amenazas. Este enfoque cumple con la Ley 368-22, la Ley 147-02 y las buenas prácticas internacionales, permitiendo identificar áreas con condición de amenaza y condición de riesgo como insumo esencial para el ordenamiento territorial.

1.1. Localización del área de estudio

la zona de estudio corresponde al municipio de San Cristóbal, ubicado en la provincia del mismo nombre, en la zona sur de Republica Dominicana, aproximadamente a 26 km de Santo Domingo. El municipio limita al norte con el municipio de Cambita Garabitos y el municipio de Los Cacaos, al sur

está bordeado por el mar Caribe, al este con el municipio de Bajos de Haina y el Distrito Nacional y al oeste con el municipio de Yaguata.

Tiene una superficie total de 1240.6 km^2 y una altitud media de 33 m.s.n.m. Fundado en el siglo XVI, San Cristóbal es conocido por su relevancia histórica, ya que fue el lugar donde se promulgó la primera Constitución dominicana el 6 de noviembre de 1844, consolidando así la independencia de la nación.

El municipio destaca por su dinamismo económico basado en la industria, la agricultura y el comercio. Además, posee un importante patrimonio cultural y natural, con atractivos como las Cuevas del Pomier, un sitio arqueológico con arte rupestre taíno.

Figura 1. Localización del área de estudio



2. La Gestión del Riesgo de Desastres

Ante la creciente preocupación mundial por el aumento en la frecuencia e intensidad de los desastres naturales —fenómeno en gran parte asociado al cambio climático—, muchos países han comenzado a implementar medidas políticas, legales, técnicas, económicas e institucionales orientadas a reducir sus impactos negativos sobre la vida humana y los medios de subsistencia de las comunidades. Estas preocupaciones fueron ampliamente discutidas durante la Conferencia Mundial sobre la Reducción de Desastres, llevada a cabo en Kobe, Prefectura de Hyogo, Japón, del 18 al 22 de enero de 2005.

De dicha conferencia surgió el Marco de Acción de Hyogo (MAH), cuyo objetivo principal es lograr una “reducción significativa de las pérdidas causadas por los desastres, tanto en vidas humanas como en bienes ambientales, económicos y sociales” de los países y sus comunidades.

En este contexto, cobra relevancia el enfoque de Gestión del Riesgo de Desastres (GRD), el cual busca integrar, bajo una perspectiva de gestión, los conceptos de prevención, mitigación, preparación y respuesta frente a los desastres. La efectividad de los sistemas de RRD y GRD depende en gran medida del fortalecimiento de las capacidades institucionales de los actores clave, tanto en los diferentes niveles del gobierno como en el sector privado y la sociedad civil, así como de la coordinación efectiva entre estos actores.

Este desafío institucional es precisamente uno de los ejes del segundo objetivo estratégico del MAH, que destaca la necesidad de “desarrollar y fortalecer instituciones, mecanismos y capacidades en todos los niveles, especialmente en el ámbito comunitario, que contribuyan de manera sistemática a generar resiliencia frente a las amenazas”.

En años recientes, debido a la creciente variabilidad del clima y al cambio climático, ha aumentado el reconocimiento de la importancia de articular las acciones de gestión del riesgo de desastres con las estrategias de adaptación al cambio climático en todos los niveles. Esta relación fue destacada en el taller sobre “Riesgos relacionados con el clima y eventos extremos”, llevado a cabo en El Cairo en junio de 2007 bajo el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) y el Programa de Trabajo de Nairobi (NWP). Entre sus recomendaciones se destaca la importancia de identificar y promover mecanismos institucionales que mejoren la coordinación entre las acciones de reducción del riesgo y las relacionadas con los impactos climáticos, especialmente aquellos derivados de eventos extremos.

3. Marco normativo

La Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) en la República Dominicana se fundamenta en un conjunto de leyes, decretos, políticas públicas e instrumentos internacionales que establecen las obligaciones del Estado y los gobiernos locales para prevenir, reducir y manejar los riesgos derivados de amenazas naturales, socio-naturales y antrópicas. Este marco orienta la elaboración de los Estudios Básicos de Riesgo del municipio de San Cristóbal y su integración al Plan Municipal de Ordenamiento Territorial (PMOT).

A continuación, se presentan las principales disposiciones legales aplicables al presente estudio, ampliadas y contextualizadas:

1. Constitución de la República Dominicana (2015)

La Constitución establece la responsabilidad indelegable del Estado en materia de gestión del riesgo.

Los artículos más relevantes son:

- Artículo 66: dispone que el Estado debe prevenir, controlar y sancionar los factores de deterioro ambiental, así como mitigar los efectos de los desastres naturales.

- Artículo 67: impone la obligación de promover políticas de gestión del riesgo y adaptación climática como parte de la protección del medio ambiente, los recursos naturales y la vida de las personas.
- Artículo 147: reconoce la planificación del territorio como función esencial del Estado e introduce la obligación de incorporar la reducción del riesgo de desastres en los instrumentos de ordenamiento territorial.

Estos principios constitucionales respaldan la necesidad de elaborar estudios de riesgos como insumos obligatorios para la planificación municipal.

2. Ley No. 147-02 sobre Gestión de Riesgos (2002)

Norma rectora de la gestión del riesgo en el país. Sus aspectos más importantes para este estudio son:

- Instituye el Sistema Nacional de Prevención, Mitigación y Respuesta (SNPMR).
- Crea la estructura de coordinación nacional, regional, provincial y municipal.
- Establece la obligación de identificar amenazas, vulnerabilidades y escenarios de riesgo en todos los niveles del territorio.
- Define responsabilidades específicas para las autoridades municipales en prevención, respuesta y regulación de usos del suelo en zonas de riesgo.
- Declara obligatoria la formulación de planes y estudios especializados como soporte de la toma de decisiones territoriales.

Esta ley sirve como fundamento técnico y jurídico para los Estudios Básicos de Riesgo del municipio.

3. Decreto No. 360-06

Reglamenta la organización y funcionamiento del Centro de Operaciones de Emergencias (COE). Define:

- Procedimientos para la coordinación de la respuesta ante emergencias.
- Roles de los organismos de primera respuesta.
- Integración del COE a los mecanismos de alerta temprana y de protección civil.

Es una base normativa clave para comprender la estructura de respuesta municipal.

4. Decreto No. 874-09

Reglamento de aplicación de la Ley 147-02. Establece:

- Las funciones de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE).
- Las competencias de los Comités Regionales, Provinciales y Municipales de Prevención, Mitigación y Respuesta (CPMR).
- Lineamientos para la formulación de planes municipales de gestión del riesgo y para organizar acciones preventivas, educativas y de mitigación.

Este decreto operacionaliza cómo se estructura la GRD en el nivel municipal.

5. Decreto No. 275-13

Oficializa dos instrumentos fundamentales:

- Plan Nacional de Gestión Integral del Riesgo de Desastres (PN-GIRD).
- Plan Nacional para la Reducción del Riesgo Sísmico (PN-RRS).

Ambos documentos establecen lineamientos estratégicos de alcance nacional que deben ser integrados en los estudios municipales, especialmente en lo referente a sismos, infraestructura crítica y protocolos de actuación.

6. Decreto No. 364-12

Crea la Escuela Nacional de Gestión de Riesgos (ESNAGERI), encargada de:

- La formación de personal técnico, municipal y voluntario.
- El fortalecimiento de capacidades para la prevención, mitigación, preparación y respuesta.

La capacitación derivada de este decreto es un insumo clave para la sostenibilidad del PMOT y los estudios de riesgo.

7. Ley No. 140-13 sobre el Sistema Nacional 9-1-1

Implanta el Sistema Único 9-1-1 como mecanismo de alerta, coordinación y atención de emergencias.

Su relevancia radica en:

- Facilitar la comunicación ciudadana ante eventos peligrosos.
- Integrar a Defensa Civil, Policía, Salud y otras entidades en protocolos de atención rápida.

Contribuye a la reducción de vulnerabilidad y al fortalecimiento de la respuesta municipal.

8. Decreto No. 187-14

Reglamenta la organización y operación del Sistema 9-1-1 y garantiza la implementación de la Ley 140-13.

Aporta lineamientos para:

- La atención oportuna de emergencias.
- La coordinación entre instituciones.
- El funcionamiento de centros operativos y sistemas de monitoreo.

9. Decreto No. 18-13

Crea la Comisión para el Manejo de Desastres Naturales, instancia de articulación interinstitucional encargada de:

- Coordinar acciones estatales en prevención, mitigación y respuesta.
- Supervisar la ejecución de planes estratégicos de riesgo.

Su existencia refuerza la estructura institucional que debe articularse con los estudios municipales.

10. Ley No. 64-00 sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales

Marco ambiental fundamental del país. Para los estudios de riesgo:

- Exige que la planificación territorial incorpore criterios de prevención y mitigación.
- Regula actividades que aumentan la exposición al riesgo (deforestación, ocupación de riberas, extracción de agregados, etc.).
- Establece el sistema de evaluación de impacto ambiental (EIA), obligatorio para obras en zonas de riesgo.
- Define las áreas protegidas, zonas de amortiguamiento y normas para la protección de cuencas y recursos hídricos.

Esta ley establece determinantes ambientales que son insumo directo del PMOT.

11. Ley No. 176-07 del Distrito Nacional y los Municipios

Regula el régimen municipal. Sus disposiciones relevantes:

- Define la competencia municipal en ordenamiento territorial, uso del suelo, protección civil y medio ambiente.
- Ordena la formulación de planes locales de emergencia y mitigación.
- Obliga a los municipios a regular el crecimiento urbano en función de las amenazas y riesgos existentes.

- Establece la autoridad del Ayuntamiento para aplicar restricciones del uso del suelo cuando exista riesgo para la población.

Es un fundamento clave para la integración de los estudios de riesgo en la gestión municipal.

12. Normativa sobre Ordenamiento Territorial y Uso del Suelo (Ley 368-22 y lineamientos complementarios)

La normativa vigente en materia de ordenamiento territorial en República Dominicana está encabezada por la **Ley No. 368-22 de Ordenamiento Territorial, Uso del Suelo y Asentamientos Humanos**, instrumento jurídico marco que regula la planificación, la gestión del territorio y la ordenación de los asentamientos humanos a escala nacional, regional, provincial y municipal.

Esta ley es **fundamental** para el presente estudio, ya que establece los principios, determinantes, restricciones y procedimientos que deben aplicarse en la formulación del **Plan Municipal de Ordenamiento Territorial (PMOT)** de San Cristóbal y en la elaboración de los **Estudios Básicos de Gestión del Riesgo**.

Los aspectos más importantes de esta ley para la GRD se resumen a continuación:

a. Integración obligatoria de la gestión del riesgo en la planificación territorial

- Los artículos **52 a 59** establecen que los usos del suelo deberán definirse considerando las amenazas, vulnerabilidades y condiciones de riesgo presentes en el territorio.
- Se reconoce el **riesgo de desastres** como determinante ambiental, físico y social que restringe y condiciona el uso del suelo y la localización de actividades.
- Los municipios deben incorporar en el PMOT los mapas de amenazas, escenarios de riesgo y zonas con restricciones derivadas de los Estudios Básicos.

b. Determinantes ambientales, territoriales y sectoriales

La Ley 368-22 establece que el PMOT debe incorporar:

- **Zonas de riesgo no mitigable**, donde se prohíben nuevos asentamientos o actividades incompatibles.
- **Zonas de riesgo mitigable**, sujetas a medidas técnicas, ambientales y estructurales obligatorias.
- **Áreas protegidas**, cuerpos hídricos, rondas de ríos, zonas de amortiguamiento y áreas de interés ecológico.
- **Zonas de preservación y conservación**, cuya ocupación está restringida.

Estas determinantes deben ser incluidas de forma obligatoria en el diagnóstico territorial y en el modelo de ordenamiento.

c. Uso minero y actividades especiales (Artículo 58)

La ley dispone que:

- El **uso minero** se asigna exclusivamente al espacio que abarque el **título de concesión minera** otorgado por el Estado.
- Las actividades mineras deben ser compatibles con las determinantes ambientales, territoriales y de riesgo del PMOT.
- Toda actividad minera queda sujeta a las leyes sectoriales (minería, ambiente, agua, biodiversidad) y a las restricciones que imponga la gestión del riesgo.

Este punto es particularmente relevante en San Cristóbal, donde varias concesiones mineras se traslapan con zonas agropecuarias, forestales, suburbanas y áreas protegidas.

d. Competencias municipales

La Ley 368-22 otorga al municipio la responsabilidad de:

- Formular, actualizar y aplicar el PMOT municipal.

- Definir los usos del suelo y emitir autorizaciones conforme a los escenarios de riesgo y determinantes ambientales.
- Regular construcciones y desarrollos urbanos en zonas de amenaza.
- Coordinar con los órganos nacionales (MIVED, MEPyD, SEMARN, INDRHI, Minería, etc.) para armonizar la información técnica y normativa.

e. Instrumentos técnicos asociados a la Ley 368-22

El desarrollo de la ley se complementa con:

- Reglamentos nacionales de ordenamiento territorial.
- Guías metodológicas para PMOT municipales.
- Determinantes ambientales y sectoriales que deben integrar los Estudios Básicos.

En conjunto, la Ley 368-22 constituye la base jurídica que ordena la utilización del territorio y condiciona cualquier decisión relacionada con la localización de infraestructura, asentamientos humanos, actividades económicas y usos del suelo en el municipio de San Cristóbal.

13. Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015–2030)

República Dominicana es país signatario de este acuerdo internacional, el cual orienta las políticas nacionales y municipales mediante cuatro prioridades:

1. Comprender el riesgo.
2. Fortalecer la gobernanza del riesgo.
3. Invertir en reducción del riesgo para aumentar resiliencia.
4. Mejorar la preparación, respuesta y recuperación post-desastre.

El Marco de Sendai es un referente transversal en la formulación de los Estudios Básicos.

14. Marco conceptual

Adaptación: comprende el ajuste de los sistemas naturales o humanos a los estímulos climáticos actuales o esperados o a sus efectos, con el fin de moderar perjuicios o explotar oportunidades beneficiosas. En el caso de los eventos hidrometeorológicos la adaptación al cambio climático corresponde a la gestión del riesgo de desastres en la medida en que está encaminada a la reducción de la vulnerabilidad o al mejoramiento de la resiliencia en respuesta a los cambios observados o esperados del clima y su variabilidad.

Alerta: Estado anterior a la ocurrencia de un posible fenómeno peligroso que se declara con el fin de que los organismos operativos activen procedimientos de acción preestablecidos para que la población tome precauciones específicas debido a la inminente ocurrencia del evento previsible. Además de informar a la población del grado de peligro, los estados de alerta se declaran con el objeto de que la población y las instituciones adopten una acción específica ante la situación que se presenta.

Amenaza: Probabilidad de que un fenómeno potencialmente dañino se presente en un período de tiempo y área determinada. (*Ley 147-02, Art. 5*)

Las amenazas pueden ser:

- **Naturales:** inundaciones, deslizamientos, sismos, huracanes, tormentas, erosión, etc.

- **Socio-naturales:** incendio forestal inducido, deslizamientos por deforestación, inundaciones por ocupación de riberas, etc.
- **Antrópicas o tecnológicas:** fugas químicas, incendios industriales, accidentes de transporte, etc.

Análisis de vulnerabilidad: Es el proceso mediante el cual se determina el nivel de exposición y la fragilidad al daño de un elemento o grupo de elementos ante una amenaza específica.

Caídas: la caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable.

Delimitación: identificación del límite de un área determinada mediante un polígono. Debe realizarse bajo el sistema de coordenadas oficial definido por la autoridad cartográfica nacional y su precisión estará dada en función de la escala de trabajo.

Desastre: Situación o proceso social que se desencadena como resultado de la ocurrencia de un fenómeno de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre que, al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en una comunidad, causa alteraciones intensas en las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad, representadas por la pérdida de vida y salud de la población, la destrucción o pérdida de bienes de la colectividad y daños severos sobre el medio ambiente, requiriendo una respuesta inmediata de las autoridades y de la población para atender a los afectados y restablecer la normalidad.

Deslizamientos: son un movimiento ladero abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una o más superficies de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante (modificado de PMA: GCA, 2007). Los deslizamientos pueden ser rotacionales, traslacionales (planares o en cuña) o compuestos según la forma del movimiento y la cantidad de superficies de falla.

Elementos expuestos: Es el contexto social, material y ambiental representado por las personas o por los recursos y servicios que pueden verse afectados con la ocurrencia de un evento peligroso. Corresponden a las actividades humanas, todas las obras realizadas por el hombre tales como edificaciones, líneas vitales o infraestructura, centros de producción, servicios, la gente que los utiliza y el medio ambiente.

Emergencia: Estado caracterizado por la alteración o interrupción intensa de las condiciones normales de funcionamiento u operación de la sociedad, causadas por un evento o por la inminencia del mismo, que requiere de una reacción inmediata del mismo nivel de decisión y que genera la atención o preocupación de las instituciones del Estado, los medios de comunicación y de la comunidad en general.

Evaluación de la amenaza: Es el proceso mediante el cual se determina la probabilidad de ocurrencia y la severidad de un evento en un tiempo específico y en un área determinada.

Evaluación de riesgo: Es el resultado de relacionar la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar las posibles consecuencias sociales, económicas y ambientales asociadas a uno o varios eventos.

Evento o suceso: Descripción de un fenómeno natural, tecnológico o provocado por el hombre, en términos de sus características, su severidad, ubicación y área de influencia. Es el registro en el tiempo y el espacio de un fenómeno que caracteriza una amenaza.

Exposición (elementos expuestos): se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza.

Factores condicionantes: cualquier acontecimiento, circunstancia, suceso o situación previa que predispone o prepara las condiciones de la fuente ante la materialización de un evento. La caracterización de estos factores, así como la identificación de sus interacciones, permite la incorporación en la zonificación de la susceptibilidad y de esta manera en la evaluación de la respectiva amenaza para un área determinada (Glade & Crozier, 2005).

Factores detonantes: también llamados desencadenantes y corresponden a cualquier acontecimiento, circunstancia, suceso o caso posible que genere una perturbación de la fuente y conlleve a la materialización de un evento (Portilla M., 2012).

Fuente: lugar o sitio donde se puede generar un evento.

Gestión de riesgos: Planteamiento y aplicación de medidas orientadas a reducir los efectos adversos de eventos peligrosos sobre la población, los bienes, servicios y el medio ambiente. Acciones integradas de prevención, mitigación de desastres y preparación para la atención y recuperación de la población potencialmente afectable.

Inundaciones: las inundaciones son fenómenos hidrológicos resultado de la dinámica de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas ocasionando un aumento progresivo del nivel de las aguas que sobrepasa la capacidad de retención del suelo y supera la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas.

Líneas vitales: Infraestructura básica o esencial de los servicios básicos. De la energía: perezas, subestaciones, líneas de fluido eléctrico, plantas de almacenamiento de combustibles, oleoductos, gasoductos. Transporte: redes, viales, puentes, terminales de transporte, aeropuertos, puertos fluviales y marítimos. Del Agua: plantas de tratamiento, acueductos, alcantarillados, canales de irrigación y conducción. De las comunicaciones: redes y plantas telefónicas, estaciones de radio y televisión, oficinas de correo e información pública.

Mitigación: planificación y ejecución de medidas de intervención dirigidas a reducir o disminuir el riesgo.

Movimiento en masa: Conocidos también como volcanes, derrumbes, deslizamientos o fenómenos de remoción en masa. Es el desplazamiento (de manera súbita o lenta) de material de suelo, roca o ambas, sobre una pendiente, y cuya ocurrencia se puede presentar de manera natural o influenciada por acciones antrópicas.

Plan de contingencia: Procedimientos específicos preestablecidos de coordinación, alerta, movilización y repuesta ante ocurrencia o inminencia de un evento particular para el cual se tienen escenarios de consecuencias definidos.

Plan de emergencias: Definición de funciones, responsabilidades y procedimientos generales de reacción y alerta institucional inventario de recursos, coordinación de actividades operativas y simulación para la capacitación y revisión, con el fin de salvaguardar la vida, proteger los bienes y

recobrar la normalidad de la sociedad tan pronto como sea posible después de ocurrido un desastre.

Plan de gestión de riesgos: Conjunto coherente y ordenado de estrategias, políticas, programas y proyectos, que se formula para orientar las actividades de Prevención-Mitigación de riesgos, los preparativos para la atención de emergencias y la rehabilitación y reconstrucción en caso de desastre; para garantizar condiciones apropiadas de seguridad frente a los diversos riesgos existentes y disminuir las pérdidas materiales y sociales que se desprenden de la ocurrencia de desastres y mejorar la calidad de vida de la población.

Prevención: medidas y acciones dispuestas con anticipación con el fin de evitar o impedir la ocurrencia de un evento adverso o reducir sus efectos sobre la población, los bienes, servicios y el medio ambiente.

Reducción de riesgo: proceso de la gestión del riesgo compuesto por la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes, entiéndase: mitigación del riesgo y a evitar nuevos riesgos en el territorio, entiéndase: prevención del riesgo. Son medidas de mitigación y prevención que se adoptan con antelación para reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los recursos ambientales, para evitar o minimizar los daños y pérdidas en caso de producirse los eventos físicos peligrosos. La reducción del riesgo la componen la intervención correctiva del riesgo existente, la intervención prospectiva de nuevo riesgo y la protección financiera.

Resiliencia: la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas.

Riesgo: Es la probabilidad de que se presenten unas desfavorables consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio particular y durante un tiempo de exposición determinado. Se obtiene de relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos

Susceptibilidad: es el grado de predisposición que tiene una fuente a que en él se genere un evento (Escobar, 2007).

Vulnerabilidad: susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.

4. Antecedentes históricos

La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres, (antes Red de Estudios Sociales sobre Desastres en América Latina), ha desarrollado un software para la captura y consulta de desastres y ha llevado a cabo el registro de estos en la base de datos a manera de inventario de desastres, sistema que ha denominado DesInventar.

Este sistema tiene el fin de proveer a los diversos actores en actividades de prevención y mitigación de desastres de mejores capacidades para el acopio, procesamiento, análisis y representación homogénea de los desastres, entendidos como los efectos adversos sobre poblaciones, bienes e infraestructura vulnerables por fenómenos socionaturales y naturales.

En el presente apartado se evidencian los eventos de desastres ocurridos en el municipio de San Cristóbal, tomando como referencia la Base de Datos y el Sistema de inventario de efectos de desastres DESINVENTAR, frente a los fenómenos de inundación, deslizamientos, incendios entre otros:

Tabla 1. Eventos históricos DESINVENTAR

Evento	Fecha	Observaciones	Descripción de la Causa	Muertos	Heridos
FIRE	1966/3/1	Se dice que los damnificados superan los 1 000. (DI6Author : DI6Date :)		1	
Intoxicación	1968/2/7	En lo que va del año 30 personas han muerto por el mismo tóxico. (DI6Author : DI6Date :)	Intoxicación por Parathion	1	
PLAGUE	1968/1/19	(DI6Author : DI6Date :)	Enfermedad desconocida afecta cafetales		
ACCIDENT	1974/8/12	(DI6Author : DI6Date :)	Vehículo volcado por falta de visibilidad por lluvias		1
FIRE	1973/9/12	(DI6Author : DI6Date :)			
STRONGWIND	1970/5/11	Ver fichas 1663 a 1667. (DI6Author : DI6Date :)	Tornado causado por vaguada		
FIRE	1982/5/19	La fuente no informa sobre el monto de las pérdidas y el número de personas que quedaron cesantes por la paralización de la fábrica. (DI6Author : DI6Date :)	Sobrecalentamiento de una máquina		
RAIN	1979/7/29	Ver fichas 1490 a 1492. (DI6Author : DI6Date :)	Lluvias torrenciales		
OTHER	1979/3/16	Las parcelas se han ido perdiendo ente 10-40 tareas; niveles del agua han descendido a más de 60 pies del antiguo cauce; pozos tubulares han disminuido; los peces han desaparecido	Extracción de materiales márgenes de los ríos		

Evento	Fecha	Observaciones	Descripción de la Causa	Muertos	Heridos
		debido a los bajos niveles (especies como dajao corbina anguilla guabina y otras). El perfil del suelo refleja que el mismo se halla en su parte no aprovechable lo que se denomina roca madre. Se estima que en 5 años esta zona estará desértica. (DI6Author : DI6Date :)			
STRONGWIND	1975/9/17	Se afectaron el tendido eléctrico y cayeron cables telefónicos. Ver ficha 878. (DI6Author : DI6Date :)	Huracán Eloisa		
EPIDEMIC	1975/9/26	Huracán Eloisa causó averías en el acueducto produciendo la contaminación de las aguas. (DI6Author : DI6Date :)	Gastroenteritis (agua contaminada por avería acueducto)		113
EPIDEMIC	1975/6/21	Epidemia de polio afecta al país desde hace varios meses. 49 casos en el Distrito Nacional y resto en provincias. Las autoridades han tomado medidas vacunando a la población infantil. No obstante continúan apareciendo casos nuevos hasta el 2 de agosto 116 casos en total. (DI6Author : DI6Date :)	Poliomielitis	6	116
FLOOD	1981/6/3	Ver fichas 812 a 818. (DI6Author : DI6Date :)	Lluvias torrenciales y desbordamientos		
FLOOD	1981/5/22	Evacuados 26 familias. Ver fichas 793 a 798. (DI6Author : DI6Date :)	Lluvias torrenciales y desbordamientos		
EPIDEMIC	2000/9/23	Ver fichas 742 a 754. (DI6Author : DI6Date :)	Dengue clásico		45
EPIDEMIC	2000/7/5	Ver fichas 733 a 737. (DI6Author : DI6Date :)	Fiebre porcina por no vacunar al ganado		

Evento	Fecha	Observaciones	Descripción de la Causa	Muertos	Heridos
EPIDEMIC	1991/9/25	Numerosos hospitalizados en Hospital Pina y en hospitales privados. Médicos aseguran que más del 95% de los niños hospitalizados tienen sarampión. (DI6Author : DI6Date :)	Brote de sarampión		
EXPLOSION	1991/9/8	La explosión ocurrió en una panadería. (DI6Author : DI6Date :)	Cilindro de gas	1	
EPIDEMIC	1991/8/12	La enfermedad se ha diseminado en barrios populares: Pueblo Nuevo Lava Piés Los Novas San Isidro Jeninga Las Floras Madre Vieja debido a la escasés de agua potable. El número de enfermos no ha sido cuantificado. (DI6Author : DI6Date :)	Brote de fiebre tifoidea		
LEAK	1991/6/24	El escape de un tanque de gas propano de 6 000 galones provocó obstrucción del tránsito. (DI6Author : DI6Date :)	Desprendimiento de cabezote de tanque de gas propano		
EXPLOSION	1981/11/4	(DI6Author : DI6Date :)		2	
OTHER	1981/7/1	Un rayo cae sobre mujeres produciéndole la muerte a una y lesionando a otra con múltiples quemaduras. (DI6Author : DI6Date :)	Caída de rayo	1	1
FIRE	1988/10/3	(DI6Author : DI6Date :)			
RAIN	1988/8/25	Ver fichas 649 a 652. (DI6Author : DI6Date :)	Depresión tropical		
RAIN	1988/7/13	Varias comunidades incomunicadas por las fuertes lluvias. (DI6Author : DI6Date :)	LLuvias torrenciales		
FIRE	1988/3/22	El incendio destruyó una vivienda y todos sus ajuares. Las pérdidas se estiman en			

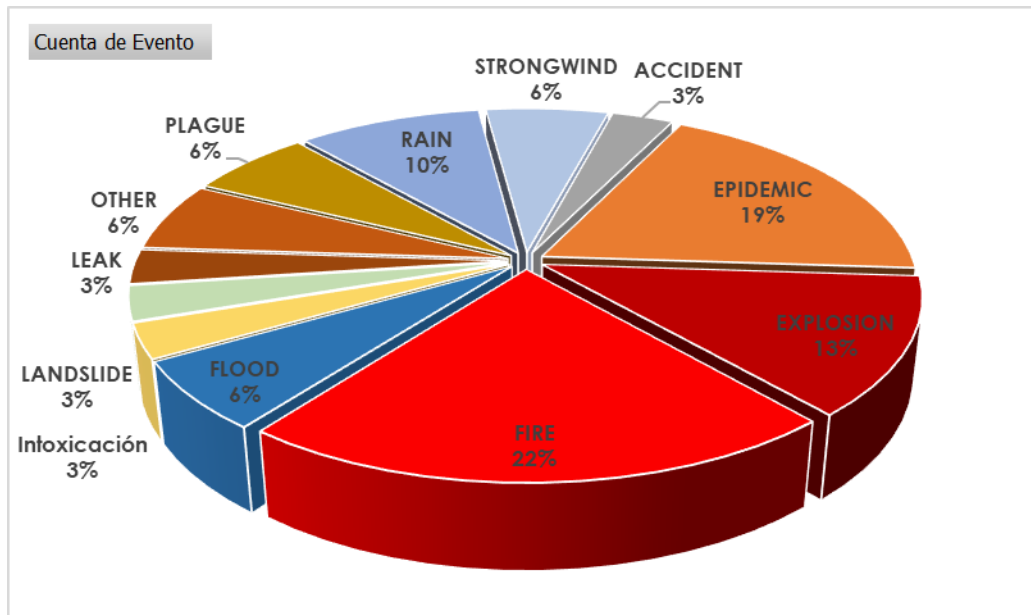
Evento	Fecha	Observaciones	Descripción de la Causa	Muertos	Heridos
		varios miles de pesos. (DI6Author : DI6Date :)			
EXPLOSION	1990/8/9	La explosión del cilindro de gas se originó en un restaurante y derribó una pared. (DI6Author : DI6Date :)	Cilindro de gas		10
FIRE	1994/2/15	Pérdidas cuantiosas. La lluvia favoreció la extinción del fuego. (DI6Author : DI6Date :)			
LANDSLIDE	1994/5/20	La familia murió asfixiada tras el deslizamiento de tierra que sepultó su vivienda. Las fuertes lluvias registradas en San Cristobal han provocado derrumbes y desbordamientos de ríos y cañadas. (DI6Author : DI6Date :)		8	
PLAGUE	1995/8/16	Ver fichas de 433 a 440. (DI6Author : DI6Date :)	Broca del café		
EXPLOSION	2000/10/3	Llas causas de la explosion mal manejo de pólvora. (DI6Author : DI6Date :)	Explosion de polvorin		
FIRE	1968/4/13	(DI6Author : DI6Date :)			

Fuente: DESINVENTAR, 2025

En la consulta se encontraron 32 eventos en total de fenómenos de inundación, deslizamientos, incendios y explosiones. Siendo los incendios y epidemias los que han afectado más a los habitantes del municipio de San Cristóbal. En la Figura 2 se hace un análisis estadístico de la información.

Se determinó que los eventos históricos asociados a fenómenos naturales dentro del municipio de San Cristóbal, el 6% corresponde a inundaciones, el 3% a deslizamientos y el 10% a lluvias.

Figura 2. Análisis porcentual de los eventos históricos



Fuente: Elaboración propia

Adicional a lo anterior, fue realizada una indagación de la información disponible de los huracanes y tormentas que han afectado a San Cristóbal:

Eventos recientes con impacto confirmado en San Cristóbal

- En 2018, los remanentes del huracán Beryl provocaron lluvias intensas: se reportaron inundaciones, daños a viviendas, aislamiento de comunidades y afectaciones en infraestructura hídrica. Se destaca que en la provincia de San Cristóbal se inundaron cientos de viviendas.
- En 2023, la tormenta tropical Franklin generó precipitaciones fuertes, desbordes e inundaciones en el país. Según reportes, algunas de las zonas más golpeadas correspondieron al sur, lo que incluye áreas próximas a San Cristóbal.
- En eventos recientes de lluvias intensas (no siempre vinculados a huracanes), se han activado alertas de inundación y crecientes fluviales afectando varios municipios, incluyendo San Cristóbal.

Al construir un análisis de antecedentes específico para San Cristóbal, se identifican varias limitaciones:

- No existe un registro público consolidado y accesible de todos los desastres, con datos desagregados por municipio, fecha, magnitud, daños, viviendas afectadas, pérdidas económicas, etc.
- Muchos estudios nacionales o de alcance general documentan eventos por provincia o región, sin detallar los municipios afectados.
- En los casos en que existen reportes de eventos recientes (como Beryl 2018, Franklin 2023), la información disponible se refiere a impactos globales de la provincia o de zonas cercanas, lo que impide confirmar con precisión la magnitud del impacto sobre todo el municipio de San Cristóbal.

- La infraestructura de datos (mapas de inundación histórica, base de datos de desbordes, monitoreo hidrológico, registros de daños estructurales) es limitada, incompleta o discontinua.

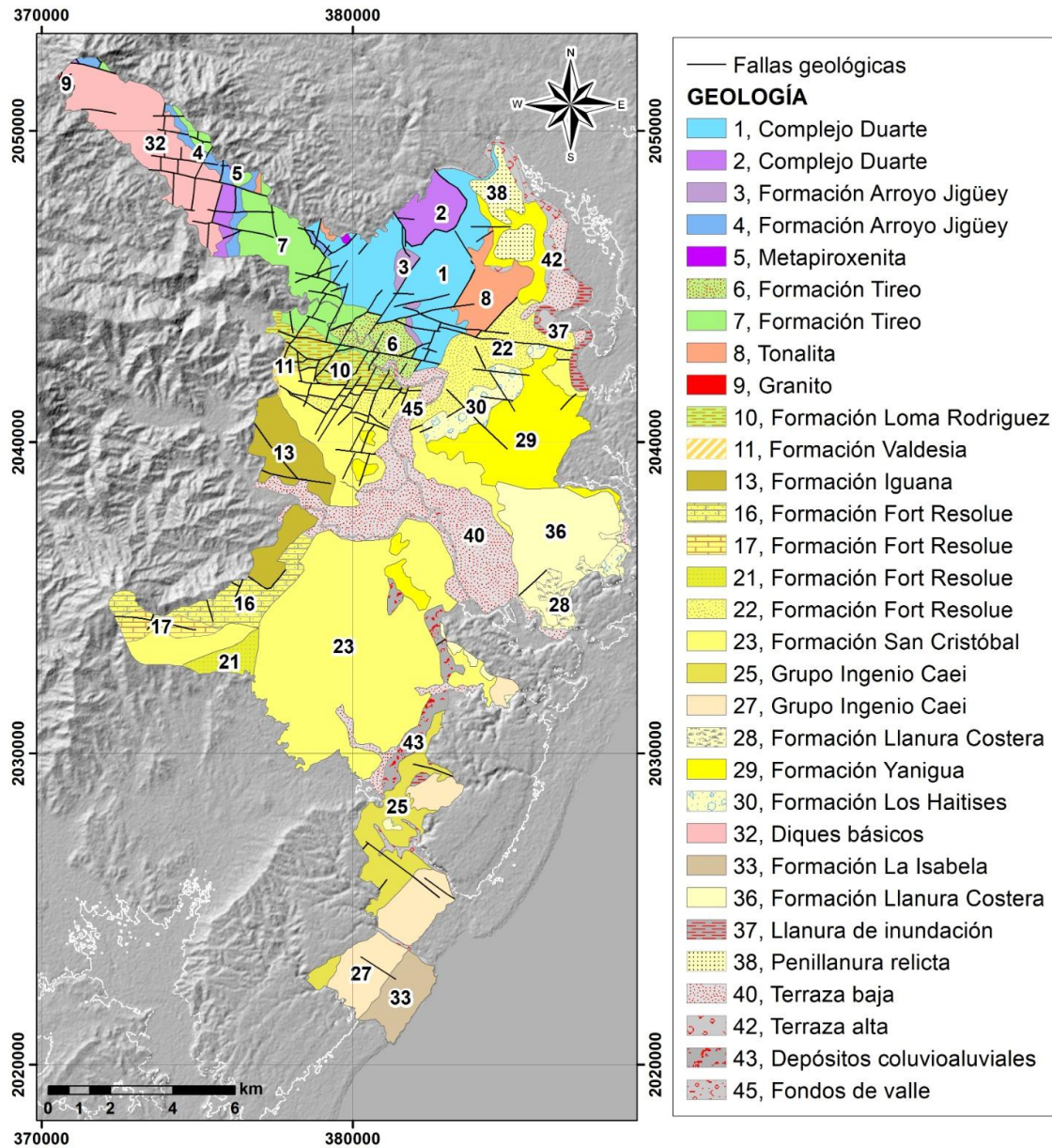
Estas limitaciones restringen la posibilidad de generar series históricas confiables específicas para San Cristóbal, lo que justifica — si fuera necesario — la consideración de incertidumbres en el análisis.

5. Caracterización física del territorio e insumos técnicos para el desarrollo del análisis de amenazas

5.1. Geología

El municipio de San Cristóbal se encuentra entre las planchas geológicas 6171-II San Cristóbal, 6170-I Nizao y 6171-I Los Alcarrizos del Servicio Geológico Nacional a escala 1:50.000, que se caracterizan por presentar principalmente unidades sedimentarias como la Formación Fort Resolue, la Formación San Cristóbal, Formación Yanigua entre otras. En la siguiente figura, se presenta la distribución de cada una de las unidades geológicas en el municipio de San Cristóbal.

Figura 3. Unidades geológicas del municipio de San Cristóbal



Fuente: Modificado del Servicio Geológico Nacional, 2020

5.1.1. **Estratigrafía**

A continuación, se presenta la descripción de las unidades geológicas presentes en el municipio:

5.1.1.1. Complejo Duarte (Formación Duarte - Rocas ultramáficas-máficas, dominado por ultramafitas, con metamorfismo de contacto. Neocomiano)

Litológicamente, se trata de un conjunto de esquistos albítico-cloríticos, esquistos albíticoepidótico-actinolíticos y anfibolitas epidóticas con actinolita-hornblenda que, en general, presentan una fuerte deformación dúctil acompañada por un metamorfismo de tipo sincinemático. Todas ellas se caracterizan por presentar macroscópicamente tonos verdes más o menos oscuros, grano fino a medio y una penetrativa fábrica planar (Sp) o, más raramente, plano-linear (Sp-Lp), que generalmente presenta una dirección NNO-SSE a NO-SE y un acusado buzamiento al E o NE. La Sp está definida por la orientación planar de cloritas y el aplastamiento de lentejones milimétricos de tonos claros cuarzoplagioclásicos. La Lp, cuando está presente, está definida por la orientación unidimensional preferente de prismas de anfíboles verdes de tamaños milimétricos. En los esquistos máficos se observan a la microescala texturas nematoblásticas y grano-lepidoblásticas, en ocasiones microbandeadas. La Sp está definida por bandas de lepidoblastos de clorita, la elongación de albitas con sombras de presión rellenas de clorita y calcita, el alargamiento de agregados de epidota y el alineamiento de la actinolita y de las placas de opacos. El microbandeado, cuando está presente, está formado por una alternancia de niveles ricos en hornblenda-actinolita y capas ricas en plagioclasa y epidota. La asociación mineral indicativa del pico térmico del metamorfismo en estas rocas está formada por actinolita, hornblenda verde-azulada, clorita, albita, esfena, epidota, cuarzo, mica blanca y calcita, siendo indicativa de condiciones de la facies de los esquistos verdes. Como minerales accesorios aparecen ilmenita, magnetita, zircón y opacos. Como minerales retrógrados secundarios se observan clorita rica en Fe, sericita, feldespato-K, minerales arcillosos y óxidos Fe-Ti.

5.1.1.2. Complejo Duarte (Formación Duarte - Rocas ultramáficas-máficas, dominado por ultramafitas, con metamorfismo de contacto. Neocomiano)

Esta Formación se presenta, como una banda alargada de dirección NO-SE, situada en el oeste de la Cordillera Oriental. Desde el punto de vista litológico, esta unidad consiste en un conjunto de rocas esquistosas, predominantemente volcánicas con intercalaciones sedimentarias, que presentan un grado variable de deformación y metamorfismo. Todas estas rocas presentan alta la relación Fe/Mg, y muy bajo contenido en potasio (K). Junto con los esquistos denominados de Amina, formación equivalente situada al NO, los esquistos de Maimón forman el flanco septentrional del Cinturón Metamórfico Intermedio (Bowin, 1960, 1966).

En la cartografía de esta Formación, se ha diferenciado un conjunto litológico milonítico situado al SO de la formación Maimón, que se identifica con una zona de cizalla dúctil, y condiciones metamórficas de la facies de los esquistos verdes. En la cartografía se ha diferenciado por una trama sobreimpuesta al color, y separado del otro conjunto litológico por un cabalgamiento. El otro

conjunto litológico, se encuentra deformado y en facies de prehnita-pumpellita y con diferentes grados de esquistosidad.

5.1.1.3. Formación Arroyo Jigüey (Rocas volcánicas masivas de carácter intermedio-ácido, con metamorfismo de contacto)

Como característica fundamental de esta unidad destaca por su carácter masivo y monótono, lo cual dificulta enormemente su cartografía y la toma de datos estructurales, de dirección y buzamiento. El aspecto de campo es el de rocas masivas y compactas que desde lejos pueden llegar a confundirse con lavas, ya que los fragmentos vítricos y líticos suelen tener tamaños milimétricos y no presentan ninguna clase de estructura ni granoclasificación interna. No obstante, “de visu” se puede reconocer su textura fragmentaria y en algunos casos la existencia de vidrios desvitrificados, de colores amarillentos a verdosos. Los fragmentos de cristales corresponden mayoritariamente a feldespatos y piroxenos y su presencia es baja. Los fragmentos líticos son los más abundantes y suelen ser de composición andesítica-traquiandesítica y basáltica. Aunque también se han encontrado fragmentos de rocas hipoabisales y plutónicas.

Los espesores son difíciles de estimar, en esta unidad tan masiva, pero según se ha señalado en el apartado anterior, pueden alcanzar varios miles de metros. La naturaleza del material vitroclástico fragmentario indica un origen piroclástico submarino tanto en erupciones freáticas como freatomagmáticas. Las cenizas volcánicas de las erupciones freáticas consisten en fragmentos procedentes de las paredes del conducto y del relleno del cráter, pero no contiene material juvenil, constituyendo generalmente estas explosiones freáticas, la actividad póstuma (fumarólica e hidrotermal) de erupciones freatomagmáticas precedentes. Esta actividad hidrotermal puede dar lugar al desarrollo de mineralizaciones de sulfuros, metales base y metales preciosos ligados a procesos epitermales, con gran interés económico.

5.1.1.4. Fm. Arroyo Jigüey. (Rocas volcánicas masivas, ácidas intermedias-básicas, con metamorfismo de contacto)

Como se ha mencionado anteriormente, esta unidad forma el cuerpo fundamental de la Formación Arroyo Jigüey y generalmente se presenta como un conjunto masivo, de tonos verdosos a grises, en el que casi siempre es difícil observar la estratificación lo que contribuye negativamente en la cartografía de su estructura interna. El tipo litológico dominante, correspondiente a estos afloramientos de carácter masivo, consiste en tobas y brechas volcánicas sin ningún tipo de granoclasificación interna, en la que los fragmentos vítricos, líticos o, en menor proporción, cristales, tienen un tamaño medio que oscila entre algo menos de 2mm y 1cm.

Los fragmentos son mayoritariamente de tipo no vesicular y color verdoso a gris claro, aunque también los hay, en menor proporción, vesiculares de color negro y los formados por trozos angulosos (1 a 3mm) de vidrio (palagonita) devitrificado de color marrón amarillento a verde, con algunas vesículas. Los fragmentos de cristales corresponden a feldespatos y piroxenos y su presencia no llega al 1% del total de estas tobas. Entre los fragmentos líticos, son dominantes los

procedentes de basaltos y andesitas, aunque también se reconocen fragmentos de doleritas y gabros.

5.1.1.5. Metapiroxenita

A escala de afloramiento, las anfibolitas presentan en general un aspecto más masivo y con tonos más oscuros que el de los esquistos máficos. No obstante, la fábrica planar (Sp) o plano-lineal (Sp-Lp) está bien definida por un bandeo milimétrico de capas verdes oscuras ricas en anfíbol, alternantes con lentejones claros muy aplastados ricos en plagioclasa y cuarzo. Contribuyen a su definición la disposición paralela de las láminas micáceas, las plagioclasas y los prismas de anfíbol. La lineación mineral contenida en el plano de foliación Sp, esta definida por la orientación de los nematoblastos de anfíbol y el alineamiento de las colas de recrystalización en torno a porfiroclastos. Aunque difíciles de acceso y con mala calidad de afloramiento, la toma sistemática de datos en las zonas de contacto con las tonalitas foliadas revela el paralelismo entre la fábrica de las anfibolitas y el contorno de estos cuerpos elongados.

5.1.1.6. Formación Tireo (Rocas piroclásticas, básico-intermedio, con metamorfismo de contacto)

Las rocas piroclásticas de la Fm. Tireo fueron emitidas y parcialmente remobilizadas (flujos de masas) o retrabajadas ya solidificadas en un medio submarino relativamente profundo. Se trata de depósitos debris flows, generalmente poligénicos, en capas masivas de potencia variable, constituidas por bloques heterométricos soportados por la matriz. En la carretera de San Cristóbal a Borbón, San Cristóbal- Cambita Garabito- La Colonia se observan capas gradadas de estos depósitos con laminación cruzada de alto ángulo a techo. Sin embargo, por encima de la secuencia de tobas verdes principal, al SW de Restauración aparecen unos 30-100 m., de tobas verdes y rojas-moradas alternantes, con capas decimétricas intercaladas de lapilli acrecionario (Lewis et al., 1991b; Stein et al., 2004). Estas facies piroclásticas evidencian procesos de la fragmentación explosiva por expansión de los volátiles magmáticos. Los depósitos de caída resultantes, depositados en un medio de aguas someras transicional a subaéreo, forma capas relativamente bien seleccionadas y estratificadas de tobas y tobas de lapilli.

5.1.1.7. Formación Tireo (Roca piroclástica de carácter básico-intermedio de color gris-verde (cenizas, tobas de lapilli, tobas litoclásticas))

Esta unidad consiste esencialmente en lavas basálticas afaníticas, de carácter masivo, aunque también se reconocen, localmente, pillow-lavas, que generalmente contienen algunos microfenocristales de clinopiroxeno. Estos ocurren como cristales euhedrales a anhedrales que con frecuencia se agrupan formando texturas micro-glomeroporfídicas. El porcentaje de microfenocristales de clinopiroxeno parece depender del grado de cristalinidad de la roca. La matriz es de grano muy fino y sus texturas varían desde holovítreas a vitroporfídicas y holocristalinas. Algunas lavas muestran textura intersectal. En las lavas holovítreas y vitroporfídicas la matriz es de color

marrón y frecuentemente esferulítica. Las fracturas de tipo perlítico son típicas en lavas holovítreas. En los tipos holocristalinos las texturas variolíticas son comunes. Estas varían desde incipientes crecimientos radiales de cristales fibrosos de plagioclasa y piroxeno a cuerpos radiales de grano fino bien definidos que consisten en el intercrecimiento de cristales de plagioclasa y prismas de piroxeno. Algunos tienen vidrio intersticial. Las diabasas corresponden a tipos holocristalinos de grano medio. Tienen texturas ofíticas e intergranulares siendo sus principales componentes plagioclasas, piroxenos y óxidos de hierro. Estas rocas se distribuyen aparentemente de una forma regular por toda la formación en asociación con los términos lávicos y se interpretan bien como centros de los flujos de lavas, o como sills intruyendo en éstos.

5.1.1.8. Tonalita

A escala regional, las tonalitas foliadas se caracterizan por aflorar exclusivamente como cuerpos intercalados en la serie metamórfica del Complejo Duarte. Así es como afloran, además, en las Hojas de Villa Altagracia, Arroyo Caña, Bonao y Los Alcarrizos, donde se han cartografiado un total de cinco stocks de tonalitas foliadas, muy próximos entre sí, todos ellos elongados subconcordantemente con la esquistosidad regional, es decir, según una dirección NNO-SSE a NO-SE. La presencia en ellos de una fábrica magmática y deformativa planar subvertical paralela al contacto y el aplastamiento de xenolitos, sugiere que la intrusión del magma estuvo condicionada por el campo de esfuerzos externo imperante en ese momento. Durante su emplazamiento, aparentemente sin a tardicinemático, se produce en las rocas encajantes del Complejo Duarte una recristalización de tipo corneánico, que da lugar a cambios texturales y mineralógicos a lo largo de una aureola de metamorfismo de contacto cuyo espesor es del orden de 1-2 km.

5.1.1.9. Granito

A escala regional, las tonalitas foliadas se caracterizan por aflorar exclusivamente como cuerpos intercalados en la serie metamórfica del Complejo Duarte. Así es como afloran, además, en las Hojas de Villa Altagracia, Arroyo Caña, Bonao y Los Alcarrizos, donde se han cartografiado un total de cinco stocks de tonalitas foliadas, muy próximos entre sí, todos ellos elongados subconcordantemente con la esquistosidad regional, es decir, según una dirección NNO-SSE a NO-SE. La presencia en ellos de una fábrica magmática y deformativa planar subvertical paralela al contacto y el aplastamiento de xenolitos, sugiere que la intrusión del magma estuvo condicionada por el campo de esfuerzos externo imperante en ese momento. Durante su emplazamiento, aparentemente sin a tardicinemático, se produce en las rocas encajantes del Complejo Duarte una recristalización de tipo corneánico, que da lugar a cambios texturales y mineralógicos a lo largo de una aureola de metamorfismo de contacto cuyo espesor es del orden de 1-2 km.

5.1.1.10. Formación Loma Rodríguez

Esta caliza estratificada de color crema rosáceo presenta ciertas tonalidades amarillentas; son rocas de resistencia media, compactas, de grano fino, en los planos de estratificación a veces se observa un material arcilloso carbonatado de color gris verdoso. Constituye la secuencia inferior del

corte estratigráfico del afloramiento. En algunos intervalos se alterna con una caliza margosa, al parecer, estratificada. Los fenómenos físicos geológicos presentes en las áreas donde aflora esta unidad se observan: el de Intemperismo: Se presenta muy extendido, como resultado de la meteorización, se forman los suelos finos de colores crema y rojizos y el Carso: Su manifestación es extensa tanto superficial como subterránea.

5.1.1.11. Formación Valdesia

Hacia el tope de la Formación los estratos son de menor espesor y la textura es más fina, pudiéndose observar capas de areniscas muy gruesas a muy finas, grises y blancas en su mayoría, con estratificación lenticular, laminación inclinada de bajo ángulo y convoluta (escapes de fluidos), seguidas de limolitas con laminación paralela. El conjunto es cubierto por conglomerados medios macizos, con rodados disperso e imbricado. La parte superior muestra ricos niveles de megaflora en limolitas grises en capas macizas o con laminación ondulada, intercaladas con areniscas muy gruesas a muy finas con estratificación lenticular, laminación ondulítica, paralela, inclinada de bajo ángulo.

5.1.1.12. Formación Iguana

Dentro de los materiales terciarios que constituyen parte de la Cuenca de San Cristóbal, están los conglomerados poligénicos de matriz marga-arenosa, a veces sin cementar y otras fuertemente cementados, con cantos de filitas, cuarcitas, calizas y areniscas, forman el cerro de margen derecha de aguas abajo de la cerrada. Sus características geotécnicas presentan fuerte dispersión, desde un material escollerable hasta uno granular impermeable, o una arena o calcarenita ocre. Este conglomerado pasa en transición a depósitos margoso-arenosos, marinos con estratificación cruzada de bajo ángulo y continúa hacia arriba con un conglomerado gravoso, lenticular con estratificación poco marcada.

5.1.1.13. Formación Fort Resolue (calizas)

La caliza arrecifal se encuentra distribuida en forma de líneas o anillos de rocas en la zona intermareal costera y en la que se pueden distinguir macroscópicamente restos de fósiles de organismos arrecifales, tales como los corales y las algas calcáreas a lo largo de todos los afloramientos cartografiados en esta Hoja Geológica.

5.1.1.14. Formación Fort Resolue (conglomerado de caliza)

En esta parte de la Hoja Geológica de San Cristóbal (6171-II), donde se acumulan los depósitos conglomeráticos, como producto de la erosión de las diferentes unidades estratigráficas que la conforman, tras el levantamiento tectónico, por lo que puede distinguirse una gran variedad de rocas sedimentarias entre sus componentes clásticos, que también pueden formar parte de estos depósitos conglomeráticos si durante la ortotectónica dio lugar a emplazamiento de rocas intrusivas que también se podría encontrar formando parte de estos depósitos. Los conglomerados

ocurren en forma de abanicos aluviales y se trata de depósitos de materiales en parte consolidados o cementados por caliche y en parte poco consolidados o no consolidados. La granulometría es muy variada, desde arenas hasta cantos rodados o bloques calizos de un decímetro o más de diámetro.

5.1.1.15. Formación Fort Resolue (alternancia de conglomerados y areniscas)

Su potencia, deducida por medios cartográficos, es de unos 1000 metros, mucho mayor que la asignada inicialmente en la descripción original de la unidad. Como se ha mencionado su base es una discordancia angular erosiva, de escala regional, que la separa los materiales plegados de la Formación Majagua (Mioceno inferior) del Grupo Ocoa. Su techo está marcado por una discontinuidad erosiva de orden menor, que define su paso a la unidad suprayacente, la Fm Ingenio Caei. Vila y Feinberg (1982), datan la base de la unidad en el Mioceno medio a partir de la asociación de foraminíferos planctónicos. Más tarde, Heubeck y Mann (1991) también proponen una edad del Mioceno medio para la Fm. Río Nizao a partir de muestras tomadas cerca del pueblo de Santana, en la Hoja de Nizao. Aunque Vilas y Feinberg (1982) citan varias muestras de edad Mioceno inferior tomadas cerca de la base de la Fm. Ingenio Caei, tanto Heubeck y Mann (1991) como Heubeck et al. (1991) consideran que esta fauna es retrabajada y procede de los materiales infrayacentes del Grupo Río Ocoa, más concretamente de la Fm Majagua.

5.1.1.16. Formación Fort Resolue (alternancia de conglomerado, arenisca gravosa, arenisca, limo y marga calcárea)

Esta alternancia conglomerática formado por una serie siliciclástica de aproximadamente 10 Km., interrumpida por dos episodios de naturaleza regresiva y transgresiva, los denominados lugares Loma De Porquero y Borbón, respectivamente. Su contacto con la unidad rocas ultramáficas – máficas, dominado por ultramafitas con metamorfismo de contacto (Fm. Duarte), es gradual. Los mejores cortes, pequeños y de poca continuidad lateral, para estudiar esta unidad litológica se localizan en la Loma de Porquero, en la carretera que une el pueblo de Hato Damas con los Bajos De La Pared con el Río Haina y, sobre todo, en el camino de tierra que sigue hacia el Sur la ribera al Este del Río Haina entre las aldeas de Yerba Buena, Mango Bartolo y Mata Paloma. Los depósitos de la base del conglomerado son, principalmente, arenas finas y medias, limos, en menor medida, calizas con corales. Este conglomerado se inicia con unos 100 metros de arenas finas y limos con foraminíferos planctónicos y bentónicos y restos de plantas y corales que, progresivamente, incorporan a techo un número mayor de pasadas conglomeráticas. Estos conglomerados son polimícticos y no presentan organización interna, poseen base plana y contienen una matriz arenosa fina, en ocasiones algo lutítica. Los cantos son redondeados a subredondeados y de naturaleza volcánica (tufitas, lavas rio-dacitas, basaltos), plutónica (tonalitas) y sedimentaria (calizas con macroforaminíferos), en su mayoría derivados de la Cordillera Central y del Grupo Río Ocoa. La serie sedimentaria a esta altura define una secuencia positiva, estrato y granocreciente, que finaliza con la aparición de los depósitos del Miembro de la Loma de Duveaux.

5.1.1.17. Formación San Cristóbal

La serie de las margas arenosas es bastante uniforme hasta alcanzar la zona de: El Pomier, Sabana Toro, Río Blanco, Canasta, San Isidro, Ingenio Nuevo, Doña Ana y parte del poblado de Yaguatate (Noreste), destacándose en el borde de aguas abajo de ésta, tanto en margen derecha como izquierda, la existencia de un contacto anormal entre margas arcillosas y el conglomerado poligénico que se produce por un cambio brusco de buzamiento en una distancia muy corta, apreciándose la existencia de una estructura flexural fallada.

5.1.1.18. Grupo Ingenio Caei (Miembro Boca de los Arroyos – conglomerados, arenas, limos y calizas)

El Miembro Boca de Los Arroyos constituye el miembro más complejo de la formación. Está formado por una serie siliciclástica de 250 metros interrumpida por dos episodios de naturaleza regresiva y transgresiva, los denominados Miembros Loma de Duveaux y Laguna de Los Reyes, respectivamente. Su contacto con el Mb Cerro El Peñón es gradual.

Los mejores cortes, pequeños y de poca continuidad lateral, para estudiar este miembro se localizan en la Loma de Santana, en la carretera que une el pueblo de Santana con el de Nizao y, sobre todo, en el camino de tierra que sigue hacia el sur la rivera este del Río Nizao entre las aldeas de La Boca de Los Arroyos y Juan Barón. Los depósitos de la base del Mb Boca de Los Arroyos son, principalmente, arenas finas y medias, limos, conglomerados y, en menor medida, calizas con corales. Este miembro se inicia con unos 100 metros de arenas finas y limos con foraminíferos planctónicos y bentónicos y restos de plantas y corales que, progresivamente, incorporan a techo un número mayor de pasadas conglomeráticas. Estos conglomerados son polimícticos y no presentan organización interna, poseen base plana y contienen una matriz arenosa fina, en ocasiones algo lutítica. Los cantos son redondeados a subredondeados y de naturaleza volcánica (tufitas, lavas rio-dacitas, basaltos), plutónica (tonalitas) y sedimentaria (calizas con macroforaminíferos), en su mayoría derivados de la Cordillera Central y del Grupo Río Ocoa. La serie sedimentaria a esta altura define una secuencia positiva, estrato y granocreciente, que finaliza con la aparición de los depósitos del Miembro de la Loma de Duveaux.

5.1.1.19. Grupo Ingenio Caei (Miembro Sabana Grande – calizas, calcarenitas y arenas finas)

El Miembro Sabana Grande (unidad cartográfica N°15) está formado por unos 60 m de depósitos de naturaleza mixta carbonatada-siliciclástica que se depositan, mediante una superficie erosiva, sobre las arenas y conglomerados del Mb Boca de Los Arroyos. Esta subunidad está formada principalmente por calcarenitas y calizas detríticas con corales, algas, macroforaminíferos, briozoos y moluscos, que se alternan con arenas finas carbonatadas y limos margosos bioturbados. Desde un punto de vista petrográfico, se pueden clasificar como wackstones bioclásticos y boundstones de corales. Las calizas se encuentran muy karstificadas y llegan a desarrollar verdaderas calcretas. Hacia techo, y de forma transicional, aparecen los conglomerados y arenas del Miembro Palenque (unidad cartográfica N°16), de escasa potencia, formado por conglomerados canaliformes, de escasa matriz arenosa y amplia extensión lateral.

5.1.1.20. Formación Llanura Costera (arena con estratificación deltaica)

La unidad es esencialmente una arena de grano fino a grueso, colores gris rosado, gris y gris oscuro, friable, dura, maciza y áspera, ligeramente calcárea y en partes muy micácea y pirítica; los granos son redondeados y muy bien cementados. La arena contiene conglomerados y peñas de cuarcita a intervalos irregulares; localmente, se presentan vetas de calcita a lo largo de fracturas. Ciertas secciones de la arena muestran características cuarcíticas y otras son muy feldespáticas, verdes y glauconíticas. Estos depósitos de sedimentos mayormente subaéreos y producido por una corriente a la entrada en un cuerpo permanente de agua. La mayor parte de los sedimentos deltaicos se depositan en consecuencia en el cuerpo de agua donde las olas y las corrientes ayudan a transportar y a depositar las arenas. El contacto inferior de la Formación Llanura Costera es concordante con los materiales depositados durante el Plioceno, con la cual guarda estrecha relación. El ambiente de sedimentación es continental, y sus sedimentos representan el relleno de cuenca (facies fluvial y/o piedemonte), de una fase erosiva, contemporánea o subsiguiente a un período de intensa actividad tectónica (Léxico Estratigráfico de la Cordillera Central, 1987).

5.1.1.21. Formación Llanura Costera (arena calcárea con estratos de grava)

Constituye una de las unidades características del sector centro-occidental de la Llanura Costera del Caribe, si bien hasta la fecha son prácticamente inexistentes los estudios relativos a ella. Se dispone al sur de las cordilleras Oriental y Central, oculta en buena parte por abanicos y piedemontes cuaternarios. Pese a la deficiencia de sus afloramientos y la precariedad de sus dataciones, se ha correlacionado con los materiales que en la región de Los Haitises fueron descritos por Brower y Brower (1982) como Fm Yanigua y precisados posteriormente por Iturralde (2001), Díaz de Neira y Hernaiz (2004), García-Senz (2004), Hernaiz (2004), Monthel (2004), Monthel y Capdeville (2004) y Monthel et al. (2004).

No aflora su base, de carácter discordante en otros puntos de la región, donde se apoya sobre materiales paleógenos y mesozoicos de las cordilleras citadas, en tanto que su techo ha sido erosionado, siendo probable que se encontrase próximo a los restos de la superficie que constituye la actual divisoria entre las cuencas de los ríos Isabela y Haina, de lo que se deduce un espesor mínimo de 60 m. Siendo las margas su constituyente principal, incluyen niveles de orden decimétrico de arenas, calizas margosas y acumulaciones bioclásticas y de corales.

5.1.1.22. Formación Yanigua (margas amarillentas y calizas)

Constituye una de las unidades características del sector centro-occidental de la Llanura Costera del Caribe, si bien hasta la fecha son prácticamente inexistentes los estudios relativos a ella. Se dispone al sur de las cordilleras Oriental y Central, oculta en buena parte por abanicos y piedemontes cuaternarios. Pese a la deficiencia de sus afloramientos y la precariedad de sus dataciones, se ha correlacionado con los materiales que en la región de Los Haitises fueron descritos por Brower y Brower (1982) como Fm Yanigua y precisados posteriormente por Iturralde

(2001), Díaz de Neira y Hernaiz (2004), García-Senz (2004), Hernaiz (2004), Monthel (2004), Monthel y Capdeville (2004) y Monthel et al. (2004).

Petrográficamente, los niveles calizos aparecen como wackestones-packstones bioclásticos, con una proporción muy variable tanto de aloquímicos (30-70%) como de matriz (15-60%) y cemento (0-45%), incluyendo ocasionalmente cuarzo. El contenido faunístico de los niveles margosos es escaso, pese a lo cual se han hallado *Ammonia* sp., *A. (Rotalia) becarii* (Linneo), *Nonion* sp., *Bolivina* sp., *Elphidium* sp., *Cibicides* sp., *Criboelphidium* sp., *Asterigerina* sp., *Cancris* sp., *Globigerina* sp. Y *Rotalia* sp., además de Ostrácodos, radiolas de Equínidos y fragmentos de Lamelibranquios, que sugieren una edad pliocena, acorde con la edad Plioceno-Pleistoceno Inferior propuesta para la Fm Los Haitises y asignada a la presente unidad.

5.1.1.23. Formación los Haitises (calizas arrecifales y calizas)

Se trata del conjunto calcáreo que constituye las zonas más elevadas de Santo Domingo (plaza de Las Banderas, avenidas 27 de febrero y Kennedy, Ensanche Ozama, carretera de San Isidro...), a modo de umbral entre las zonas deprimidas topográficamente situadas al norte (Villa Mella, La Victoria...) y la vertiente caribeña.

Por su semejanza litológica y edad equiparable, la unidad se ha correlacionado con los materiales calcáreos que en la región de Los Haitises fueron descritos por Brower y Brower (1982) como Fms. Cevicos y Los Haitises y agrupados por Iturralde (2001) como Fm Los Haitises, criterio seguido y precisado por Díaz de Neira y Hernaiz (2004) y García-Senz (2004). Las evidentes diferencias morfológicas que muestra el presente conjunto en la Llanura Costera del Caribe con respecto a la región de Los Haitises derivan de su distinta evolución estructural y del diferente grado de meteorización sufrido.

Petrográficamente aparecen como calizas fosilíferas (biomicritas) con grado de recristalización variable y porosidad tanto primaria como secundaria. Predominan los boundstones de corales, reconociéndose además packstones y wackestones bioclásticos con proporciones variables de aloquímicos (20-50%), matriz (15-70%) y cemento (95%), con una elevada proporción de matriz (60-85%), superior a la de cemento (<40%).

5.1.1.24. Diques básicos

Los diques básicos cuatro (4), dentro del cuerpo intrusivo de tonalitas, suelen tener potencias inferiores a un metro y muestran un alto grado de alteración superficial lo cual dificulta la obtención de buenas muestras. Afloran en el sector Suroeste de la Hoja, con dirección aproximada N-60°E y se prolongan desde la zona de La Boca de Los Dos Ríos y Río Jamey. También se han observado en la carretera que va de Hato Dama- Cerro El Guano – San Francisco. En esta zona muestran orientaciones menos definidas con predominio de las norteadas. Además, están más frescos y corresponden a rocas microgranudas.

5.1.1.25. Formación La Isabela (caliza arrecifal, calciruditas y calcarenitas)

Esta formación ocupa una extensa banda costera en el extremo oriental del área, al pie del paleoacantilado que delimita el borde de una superficie de erosión situada a mayor altura. Está constituida por calizas arrecifales y otros materiales detríticos derivados de la destrucción y retrabajamiento del antiguo arrecife, que forman niveles de calciruditas y calcarenitas. Su espesor máximo puede oscilar entre 15 y 20 m, lo que corresponde a la altura aproximada del pequeño acantilado que forma sobre el nivel actual del mar.

5.1.1.26. Llanura de inundación (gravas, arenas y lutitas)

Aparecen exclusivamente en relación con el arroyo Guajimia y el río Ozama, configurando franjas de anchura de orden hectométrico. Están constituidas por gravas polimícticas con una alta proporción de constituyentes calcáreos, en matriz arenosa, si bien son frecuentes las pasadas de arenas y lutitas. Su espesor es difícil de determinar al no observarse el sustrato, pero puede alcanzar 5 m. Por su dinámica actual se incluyen en el Holoceno.

5.1.1.27. Penillanura relictas

Sobre el Macizo tonalítico, y rocas volcánicas ultramáficas- máficas, con preponderancia de ultramafitas, con metamorfismo de contacto (Fm. Duarte) y arena, limo y arcilla (Fm. Llanura Costera), se desarrollan arrasamientos generalizados. Su paisaje presenta una disposición que se aproxima en la mayoría de los casos a lo que se considera una penillanura. Ejemplos existen en todas sus regiones, especialmente en las meridionales. Además, son características extensibles a aquellos lugares considerados montañosos (RIBEIRO, 1941), como puede ser el caso de los lugares Los Montones y Los Montones Arriba, pues están constituidas por superficies de erosión. El estudio de los aplanamientos que afectan al Macizo Los Montones y Los Montones Arriba, tiene su mayor dificultad en su datación, siempre muy difícil de determinar debido a la falta de referencias estratigráficas. Se sabe que los viejos arrasamientos posthercénicos (preterciario) sufren distintos retoques durante el Cretácico, un período de condiciones geotectónicas especialmente distensivas, que favorecerían el desarrollo de superficies de erosión (BIROT, 1949; BRUM FERREIRA, 1978). En el Terciario, donde la situación geotectónica cambia a compresiva, se modifica sustancialmente el relieve de Los Montones y Los Montones Arriba, pues queda rota la continuidad de los grandes arrasamientos antiguos (SOLE, 1952). Es entonces cuando el paisaje adquiere la fisonomía actual. El elemento morfológico principal de Los Montones y Los Montones Arriba, las superficies de erosión originales quedan interferidas por otros tipos de procesos erosivos.

5.1.1.28. Terraza baja (canto, grava, arena y limo)

Estos materiales aparecen relacionados con los sistemas aluviales de los ríos: Tireo, Grande, La Descubierta y Pinar Bonito. Los depósitos se sitúan a apenas 0,5-1,5 m. de altura, sobre el cauce actual del río. Este término “cauce actual del río” resulta un tanto efímero y sujeto a variaciones,

como se ha comprobado durante los meses de septiembre a noviembre de 1998. Así, durante el paso del Huracán Georges y las lluvias que le sucedieron, se produjeron notables cambios en la red de drenaje, desbordamientos y deposiciones en régimen de avenidas, que pueden ser equivalentes a estos depósitos que se describen aquí. Por tanto, la edad de los mismos puede ser perfectamente holocena. La potencia de estos depósitos es muy reducida, rara vez superan 1-1,5 m., y están constituidos por gravas y arenas de diversa granulometría y composición. En general, predominan los fragmentos comprendidos entre 5 y 25 cm. de diámetro, si bien, ocasionalmente, se han llegado a medir alguno de orden métrico. Además, hay que señalar la existencia de una fracción de granulometría más fina, tamaño arena, y composición arcósica y litarenita.

5.1.1.29. Terraza alta (canto, grava, arena y limo)

Las llanuras de inundación se encuentran ampliamente representadas, apareciendo como bandas planas adyacentes al cauce de numerosos ríos y arroyos, destacando en cualquier caso las correspondientes a los ríos Ozama, Isabela y Yabacao, alcanzando la del primero 3 km de anchura. Dentro de estas llanuras se reconocen cauces y meandros abandonados, que denotan una continua deriva de los cauces. La llanura de inundación de los ríos principales está constituida por gravas polimícticas en matriz arenosa, si bien son frecuentes las pasadas de arenas y lutitas. Su espesor es difícil de determinar al no observarse el sustrato, pero debe sobrepasar 5 m. En el caso de la llanura de inundación de algunos cursos menores, se observa un claro predominio lutítico. En cuanto a los cauces y meandros abandonados, a su composición en estado activo, con predominio de gravas y arenas, se superpone un contenido lutítico derivado de procesos de decantación ligados a su actual dinámica de encharcamiento. Por su dinámica actual se asignan al Holoceno, sin que deba descartarse que su actividad se iniciase a finales del Pleistoceno.

5.1.1.30. Depósitos coluvioaluviales (arenas y lutitas con cantos)

Este depósito sólo se ha identificado en el sector oriental del área, en el valle del arroyo Pajarito, que se caracteriza por la presencia de un relieve irregular y morfología poco definida. Actualmente está siendo desmantelada como consecuencia de la captura fluvial del Río Nizao sobre el valle del Arroyo Pajarito, donde aflora extensamente, lo que ha dificultado mucho su interpretación sedimentaria y geomorfológica. No existen secciones claras sobre la misma y en áreas desprovistas de vegetación aparece como un material homogéneo, de detríticos finos con cantos dispersos de calizas, calcarenitas y areniscas bioclásticas, procedentes de los taludes cercanos del relieve correspondiente al Grupo Ingenio. Su espesor puede variar de forma notable (2 a 8 m) en función de la morfología irregular de su superficie. Su origen puede estar ligado a la degradación y removilización de pequeños depósitos de ladera formados al pie de la Loma Duveaux, o incluso de abanicos aluviales procedentes de posiciones septentrionales.

5.1.1.31. Fondos de valle (conglomerados, gravas y arenas)

Los fondos de valle se encuentran distribuidos en toda la hoja y en ocasiones confluyen y continúan en el lecho menor del río Nizao, o bien enlazan con la terraza baja de este último. Están constituidos

por gravas polimícticas con matriz arenosa, cuya litología varía según el área fuente de cada lugar. El tamaño de los cantos oscila notablemente, predominado diámetros de 10 a 20 cm. Su potencia se sitúa entre 2 y 5 m.

5.1.2. Geología estructural

La geología estructural de San Cristóbal, ubicada en la parte sur-central de la República Dominicana, refleja una historia tectónica compleja relacionada con la colisión y desplazamiento lateral entre las placas del Caribe y América del Norte. Esta región se encuentra dentro de la zona de deformación activa conocida como el Cinturón de Fallas de Enriquillo-Plantain Garden, una estructura transcurrente izquierda que ha sido responsable de numerosos eventos sísmicos significativos en el Caribe. San Cristóbal está situada cerca de importantes sistemas de fallas, entre ellas la Falla de Enriquillo, que se extiende en dirección este-oeste a lo largo del sur de la isla y es una de las fallas más activas de la región. Estas estructuras tectónicas han dado lugar a una intensa deformación de las unidades geológicas presentes, que incluyen principalmente rocas sedimentarias del Cretácico superior al Terciario, así como intrusivos ígneos y algunas secuencias volcánicas más antiguas asociadas al arco ígneo paleoantillano. La zona muestra evidencias de plegamiento, fallamiento inverso y fallamiento transcurrente, con estructuras que revelan tanto compresión como desplazamiento lateral, lo que sugiere un régimen tectónico transpresivo. Además, el levantamiento tectónico ha influido en el modelado del relieve, generando colinas y depresiones estructurales que controlan en gran parte la morfología del paisaje. La actividad tectónica ha influido también en el desarrollo de sistemas de drenaje, zonas de debilidad geomecánica y la sismicidad local, haciendo que San Cristóbal y sus alrededores sean considerados de alta amenaza sísmica.

5.2. Geomorfología

El propósito de la cartografía geomorfológica es proporcionar información concisa y sistemática sobre las formas del terreno; su origen, los procesos naturales que han ocurrido y los fenómenos naturales activos. En ese sentido los mapas geomorfológicos deben ser herramientas útiles, que permitan evaluar el comportamiento de los terrenos, inventariar los movimientos en masa y sus aplicaciones en la evaluación de amenazas naturales, considerar el desarrollo de obras de infraestructura, y establecer zonificaciones geomecánicas, entre otras. La ciencia geomorfológica involucra y relaciona al paisaje con los procesos que le dieron origen y sus condiciones ambientales. Por lo tanto, para lograr una descripción y caracterización adecuada es necesario representarla y transmitirla en forma gráfica o de mapas.

El levantamiento geomorfológico estuvo dirigido a caracterizar las geoformas, afectadas por los procesos morfodinámicos y agentes tanto endógenos como exógenos, que a su vez han modelado los diferentes paisajes geomorfológicos. Para su caracterización se consideró la metodología

desarrollada por el Servicio Geológico Colombiano la cual va encaminada a la evaluación de las amenazas naturales (SGC-metodología Carvajal-2011).

En el municipio de San Cristobal se han diferenciado unidades de ambiente fluvial, estructural y denudacional, según Carvajal 2011. Las unidades enmarcadas en cada uno de los ambientes se caracterizaron por morfografía, morfometría, morfodinámica, morfocronología, entre otras propiedades.

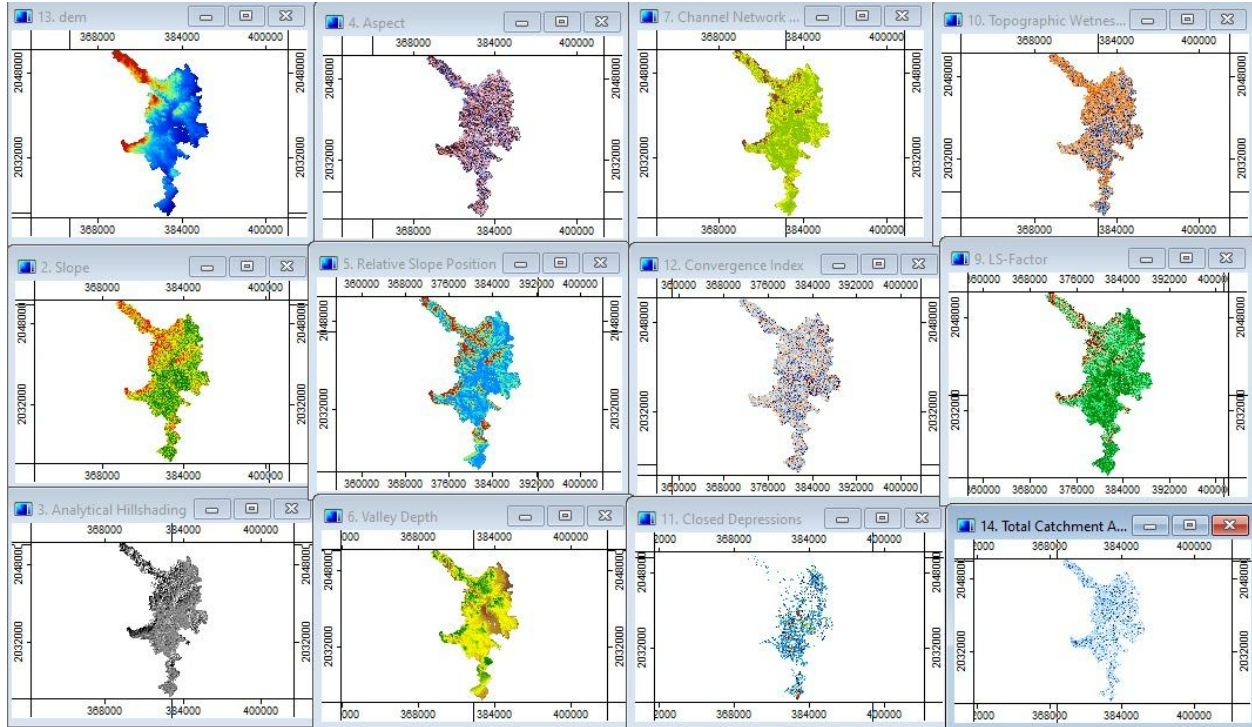
5.2.1. Metodología

En el estudio de las formas del terreno, es indispensable el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), las imágenes satelitales, y el Modelo Digital del Terreno (MDT) elaborados, con el que se calculan otros factores como lo son las pendientes del terreno, el modelo de sombras, entre otros; con el fin de determinar por medio de interpretación, los tipos de materiales involucrados, los procesos morfodinámicos, y las formas predominantes del terreno, para su reconocimiento posterior en campo. Para su caracterización se consideró la metodología (SGC-metodología Carvajal-2011) la cual va encaminada a la evaluación de las amenazas naturales.

Por otro lado, se enlistan algunos de los insumos utilizados para la caracterización geomorfológica del municipio de San Cristóbal.

- ArcMap 10.5
- ArcCatalog 10.5
- ArcToolbox 10.5
- SAGA GIS 5.0.0
- Modelo Digital de Elevación (DEM).
- Modelos SAGA: Analytical Hillshading, Slope, Aspect, Cross-sectional curvature, Relative Slope Position, Closed Depressions, Topographic Wetness Index, LS Factor, Channel Network, Valley Depth, Convergence Index.

Figura 4. Modelos morfológicos y morfométricos con software SAGA GIS



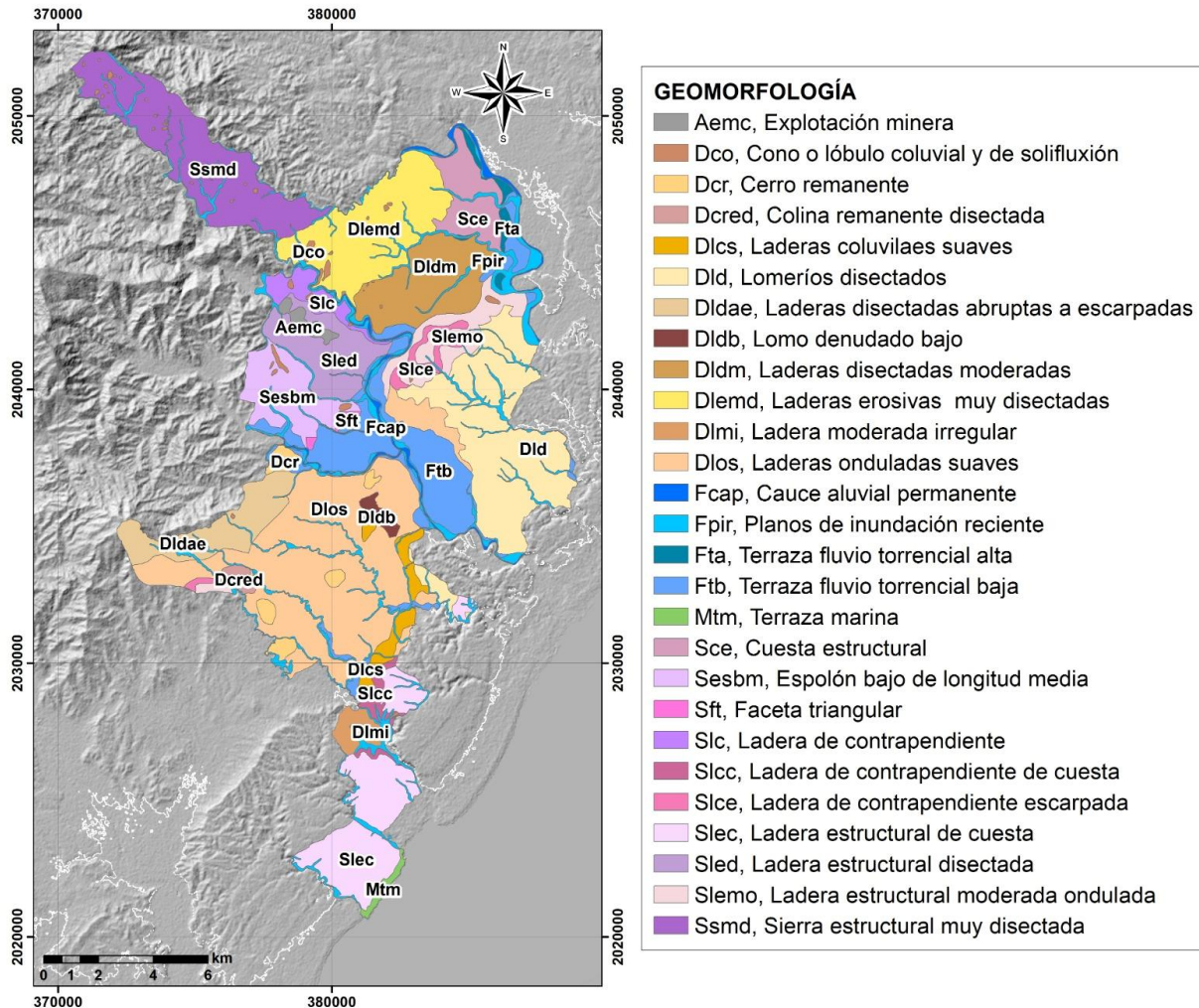
Fuente: Elaboración propia

5.2.2. **Unidades y subunidades geomorfológicas**

En el municipio de San Cristóbal se identificaron unidades y subunidades de ambiente fluvial, estructural, denudacional, y antrópico, las cuales se definieron con base en criterios genéticos, morfológico, geométrico, y en función de los procesos geomorfológicos específicos, ya sea de carácter erosivo o de acumulación. Para la delimitación de las geoformas se utilizaron imágenes satelitales, aéreas y el modelo digital del terreno.

En la siguiente figura se presenta el mapa de unidades geomorfológicas del municipio de San Cristóbal.

Figura 5. Subunidades geomorfológicas del municipio de San Cristóbal



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen cada una de las subunidades geomorfológicas:

5.2.2.1. Explotación minera (Aemc)

Son extensas áreas dedicadas a la extracción de materiales y minerales a cielo abierto, cuyo proceso extractivo se realiza en la superficie del terreno, y con maquinarias mineras de gran tamaño.

5.2.2.2. Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco)

Estructura en forma de cono o lóbulo con morfología alomada baja. Su origen es relacionado a procesos de transporte y depositación de materiales sobre las laderas y por efecto de procesos hidrogravitacionales en suelos saturados y no saturados. Su depósito está constituido por bloques

y fragmentos heterométricos de rocas preexistentes, embebidos en una matriz arcillosa a areno limo arcilloso.

5.2.2.3. Cerro remanente (Dcr)

Prominencias topográficas aisladas de morfología colinada, alomada o montañosa que sobresalen de la topografía circundante. La unidad presenta cimas agudas a redondeadas, laderas de longitud moderadamente corta a larga de forma convexa. Su origen se asocia a procesos de erosión y meteorización diferencial acentuada y antigua. Incluye los cerros semienterrados en sedimentos recientes.

5.2.2.4. Colina remanente disectada (Dcred)

Prominencias topográficas aisladas con una altura entre 200 y 399 metros sobre su nivel de base local, que presenta una cima redondeada y estrecha limitada por laderas cortas a moderadamente largas de forma convexa y pendientes abruptas a escarpadas, un alto grado de disección de los drenajes, desarrollo de valles en U y un índice de relieve bajo a moderado. Su origen es relacionado a procesos de denudación intensos.

5.2.2.5. Laderas coluviales suaves (Dlcs)

Son geoformas producto de acumulación de materiales (suelo residual y/o fragmentos de roca), transportados principalmente por la acción de la gravedad desde zonas puntuales ligeramente más elevadas. Algunas de estas laderas presentan formas de lóbulos alargados, indicando arrastre de material con ayuda del agua.

5.2.2.6. Lomeríos disectados (Dld)

Prominencias topográficas de morfología alomada o colinada, con cimas redondeadas y amplias, de laderas cortas a moderadamente largas de forma rectas, cóncavas y convexas, con pendientes muy inclinadas a muy abruptas, con índice de relieve bajo. Estas geoformas son originadas por procesos de denudación intensos y cuyas laderas se caracterizan por la moderada disección, generando valles en U con fondo redondeado a plano. Se presentan movimientos en masa tipo deslizamiento rotacional con superficie de falla poco profundos.

5.2.2.7. Laderas disectadas abruptas a escarpadas (Dldae)

Superficie en declive de morfología alomada o colinada, pendiente abrupta a escarpada, inclinada a escarpada, la longitud varía entre corta y muy larga. El patrón de drenaje es subdendrítico a subparelo. Estas laderas se pueden formar en suelos residuales y depósitos coluviales. Estas geoformas son originadas por procesos de denudación intensos y cuyas laderas se caracterizan por la moderada disección.

5.2.2.8. Lomo denudado bajo (Dldb)

Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo menor que 250 m y la longitud del eje principal es menor que 250 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. El tope o parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca dominante y de los procesos erosivos que lo han modelado. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto cordillerano o de la velocidad de la erosión del río principal o eje geomorfológico.

5.2.2.9. Laderas disectadas moderadas (Dldm)

Superficies del terreno de pendiente moderada, de longitud moderada a larga, de formas planas, cóncavas y convexas, patrón de drenaje dendrítico y originada por procesos de denudación intensos que generan laderas con moderada disección.

5.2.2.10. Laderas erosivas muy disectadas (Dlemd)

Corresponde a superficies del terreno de pendientes muy inclinadas a escarpadas, de longitudes moderadas a extremadamente largas, de formas planas, cóncavas y convexas, patrón de drenaje típico dendrítico a subparalelo; son originadas por procesos de denudación intensos y cuyas laderas se caracterizan por la moderada disección. Presenta procesos erosivos intensos como cárcavas, surcos y soliflucción, sobre materiales de suelo o roca.

5.2.2.11. Ladera moderada irregular (Dlmi)

Superficie en declive de morfología alomada o colinada, pendiente inclinada a escarpada, la longitud varía entre corta y muy larga. El patrón de drenaje es subdendrítico a subparelo. Estas laderas se pueden formar en suelos residuales y depósitos coluviales.

5.2.2.12. Laderas onduladas suevas (Dlos)

Superficie en declive de morfología alomada o colinada, pendiente inclinada a escarpada, la longitud varía entre corta y muy larga. El patrón de drenaje es subdendrítico a subparelo. Estas laderas se pueden formar en suelos residuales y depósitos coluviales.

5.2.2.13. Cauce aluvial permanente (Fcap)

Canal de forma irregular excavado por erosión de las corrientes perennes o estacionales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales. Dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias. Los cauces rectos se restringen a valles estrechos en forma de V, generalmente relacionados al control estructural de fallas o diaclasas. Estos cauces cuando recorren grandes distancias pueden formar lagunas y

rápidos. Cuando las corrientes fluyen en zonas semiplanas a planas (llanura aluvial), los cauces son de tipo meándrico o divagante, como producto del cambio súbito de la dirección del flujo. Dependiendo la cantidad de carga de sedimentos, la pendiente y caudal pueden llegar a formar sistemas anastomosados, trenzados, divergentes y otras unidades asociadas.

5.2.2.14. Planos de inundación reciente (Fpir)

Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable. Se localiza bordeando los cauces fluviales, donde es limitado localmente por escarpes de terraza. Incluye los planos fluviales menores en formas de “U” o “V”, al igual que a los conos coluviales menores de los flancos de los valles intramontanos. En regiones montañosas, donde las corrientes fluviales tienden a unirse con sus tributarios para formar el cauce principal, en red de drenaje de tipo subparalelo de mediana densidad, se presentan como superficies estrechas, alargadas y profundas. Su depósito está constituido por sedimentos finos, originados durante eventos de inundación fluvial.

5.2.2.15. Terraza fluvio torrencial alta (Fta)

Superficie elongada, plana a suavemente ondulada, que se ha modelado sobre sedimentos fluviales de una terraza previa por acción de ríos, quebradas o arroyos torrenciales y que se presenta en forma pareada, limitada por escarpes de diversas alturas que siguen el cauce de un río. Su origen se relaciona con procesos de erosión y acumulación aluvial.

5.2.2.16. Terraza fluvio torrencial baja (Ftb)

Superficie elongada, plana a suavemente ondulada, que se ha modelado sobre sedimentos fluviales por acción de ríos, quebradas o arroyos torrenciales y que se presenta en forma pareada, limitada por escarpes de diversas alturas que siguen el cauce de un río. Su origen se relaciona con procesos de erosión y acumulación aluvial sobre antiguas llanuras de inundación.

5.2.2.17. Terraza marina (Mtm)

Las terrazas son superficies elevadas horizontales a subhorizontales que sufren un desnivel respecto al nivel del mar. El origen de este desnivel puede ser tectónico o por cambios en el nivel del mar. Previo a la formación de una terraza marina es necesario un medio propicio para el crecimiento de corales y algas coralinas, o formación de playas. En contraste, también pueden generarse terrazas marinas a partir de plataformas de abrasión levantadas.

5.2.2.18. Cuesta estructural (Sce)

Definidas por estratos inclinados en favor de la pendiente del terreno, son de longitud corta a larga, predominan las laderas estructurales suavemente inclinadas (10° - 20°), de formas rectas a cóncavas y pendientes muy inclinadas a abruptas.

5.2.2.19. Espolón bajo de longitud media (Sesbm)

Saliente de morfología alomada, dispuesta perpendicularmente a la tendencia estructural general de la región, desarrollados sobre rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias y limitado por drenajes paralelos a subparalelos. Con laderas de longitudes variables, con pendientes que se ven reducidas de abruptas a inclinadas por intensos procesos denudativos. La particularidad de esta unidad radica en que el relieve relativo es menor que 250 m y la longitud del eje principal del espolón varía entre 250 m y 1000 m.

5.2.2.20. Faceta triangular (Sft)

Plano vertical a subvertical abrupto, recto con una geometría en planta triangular a trapezoidal (base amplia y techo angosto). Su origen se relaciona al truncamiento y desplazamiento de relieves estructurales o de interfluvios, por procesos de fallamiento y posterior erosión diferencial.

5.2.2.21. Ladera de contrapendiente (Slc)

Superficie en declive, de morfología regular a irregular, definida por planos (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno. Puede presentarse con longitud larga a extremadamente larga y con pendientes suavemente inclinadas a escarpadas. En esta geoforma los datos estructurales no permiten establecer una asociación con alguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros).

5.2.2.22. Ladera de contrapendiente de cuesta (Slcc)

): Superficie vertical a subvertical muy corta a corta, de forma cóncava o convexa de pendiente escarpada, generada por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno.

5.2.2.23. Ladera de contrapendiente escarpada (Slce)

Superficie en declive, de morfología regular a irregular, definida por planos (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno. Puede presentarse con longitud larga a extremadamente larga y con pendientes escarpadas. En esta geoforma los datos estructurales no permiten establecer una asociación con alguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros).

5.2.2.24. Ladera estructural de cuesta (Slec)

Superficie con estratos dispuestos a favor de la pendiente del terreno (10° - 25°), de longitud larga a extremadamente larga, de forma recta a irregular, con pendientes inclinadas a muy inclinadas, relacionada a una estructura de cuesta.

5.2.2.25. Ladera estructural disectada (Sled)

Superficie en declive, de morfología regular a irregular, definida por planos preferentes (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) paralelos al sentido de la inclinación del terreno. Puede presentarse con longitud larga a extremadamente larga y con pendientes suavemente inclinadas a escarpadas. En esta geoforma los datos estructurales no permiten establecer una asociación con alguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros), presenta procesos erosivos intensos y alta disección.

5.2.2.26. Ladera estructural moderada ondulada (Slemo)

Superficie en declive, de morfología regular a irregular, definida por planos preferentes (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) paralelos al sentido de la inclinación del terreno. Puede presentarse con longitud larga a extremadamente larga y con pendientes suavemente moderadas. En esta geoforma los datos estructurales no permiten establecer una asociación con alguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros).

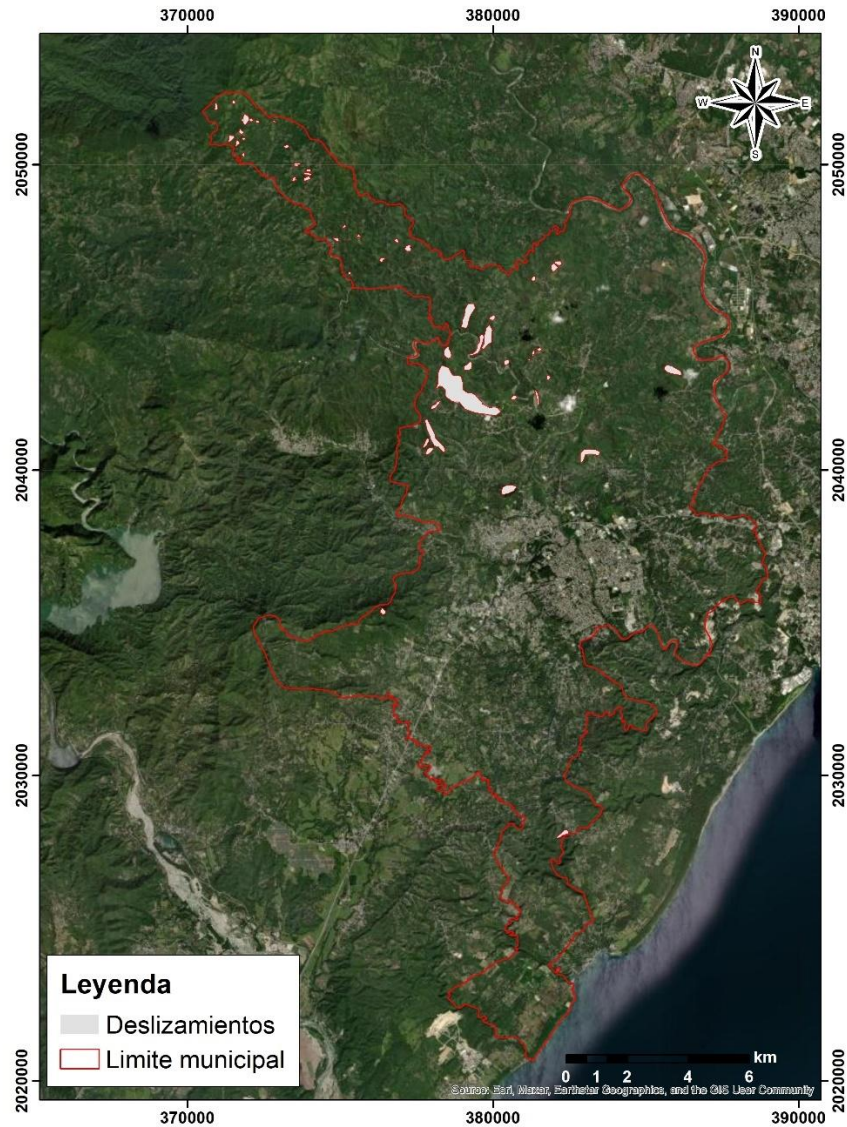
5.2.2.27. Sierra estructural muy disectada (Ssmd)

Prominencia topográfica de morfología montañosa, de laderas largas a extremadamente largas, cóncavas, convexas o rectas, con pendientes muy inclinadas a escarpadas. Su origen está relacionado con procesos de fallamiento intenso en macizos rocosos ígneos, metamórficos y sedimentarios. En esta geoforma la ausencia de datos estructurales no permite establecer una asociación con alguna estructura (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros).

5.3. **Procesos morfodinámicos**

Dentro de las geoformas que se encuentran asociadas a la inestabilidad de las laderas están las laderas erosivas muy disectadas y sierras estructurales muy disectadas principalmente. La elaboración del inventario de procesos morfodinámicos debe permitir entender la ocurrencia de los movimientos en masa y sus características más importantes: fecha de ocurrencia, localización, forma, dimensiones, los factores que intervinieron o intervienen en su ocurrencia o su potencialidad de ocurrencia.

Figura 6. Procesos morfodinámicos del municipio de San Cristóbal



Fuente: Elaboración propia

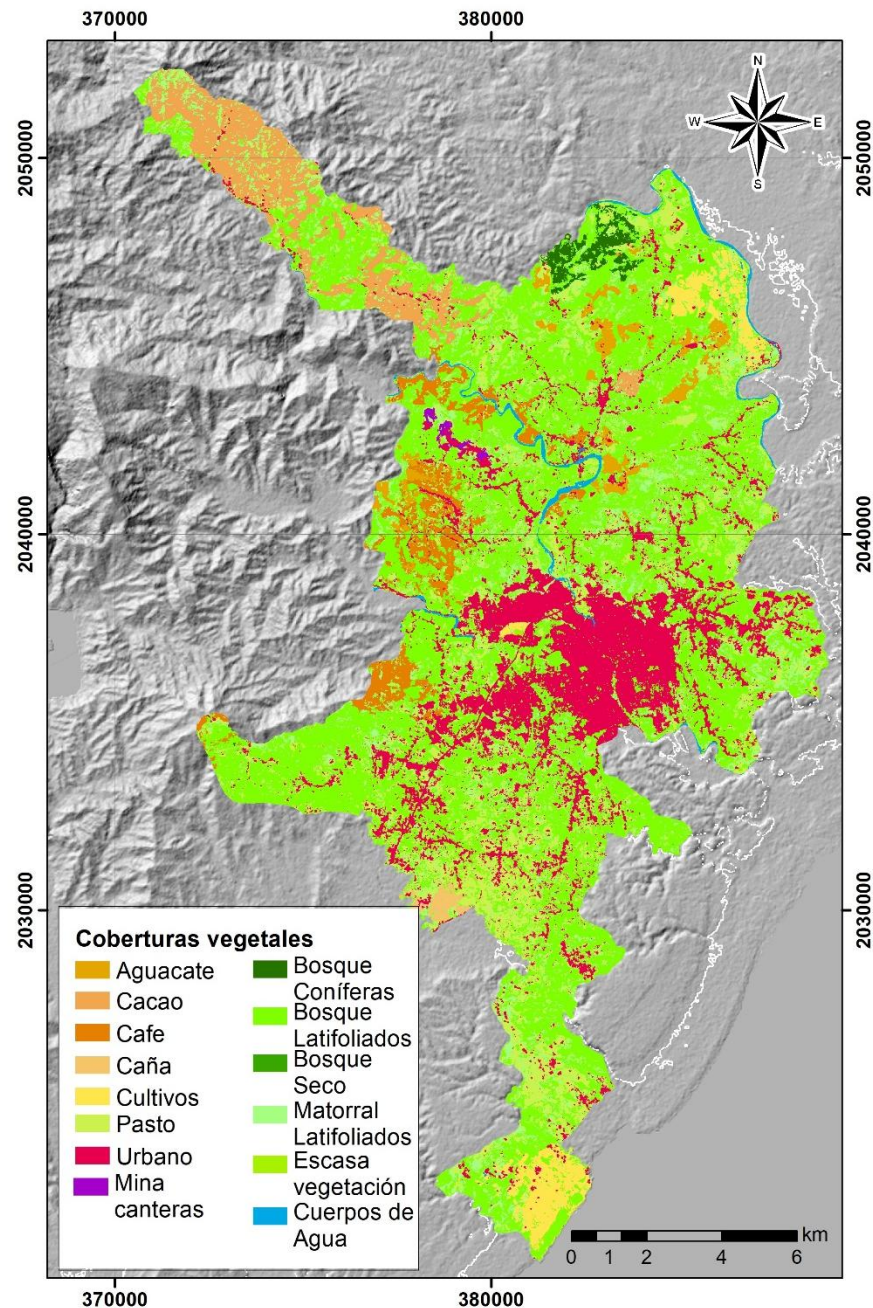
Los procesos morfodinámicos más comunes son los deslizamientos traslacionales, aunque también se presentan flujo de tierra y flujo de lodo, así mismo la gran mayoría de procesos identificados en el municipio están inactivos.

5.4. Cobertura del suelo

Las coberturas vegetales presentan un efecto directo sobre los procesos erosivos, disminuyen la escorrentía superficial porque reducen la cantidad y la velocidad del movimiento del agua en zonas de alta pendiente. También su sistema radicular presenta un entretejido que actúa como amarre a los horizontes superficiales del suelo y que tanto árboles como arbustos de raíz profunda facilitan

el drenaje profundo, reduciendo en esta forma la probabilidad de deslizamientos y fallas superficiales. En la Figura 7 se presentan las coberturas vegetales del municipio.

Figura 7. Coberturas vegetales del municipio de San Cristóbal



Fuente: Elaboración propia

Para el municipio de San Cristóbal se observa que las coberturas vegetales dominantes son los bosques latifoliados (44.31%), seguidos de las áreas urbanas (15.13%), pastos (14.53%) y matorrales latifoliados (10.98%).

Tabla 2. Cuantificación de las coberturas del municipio

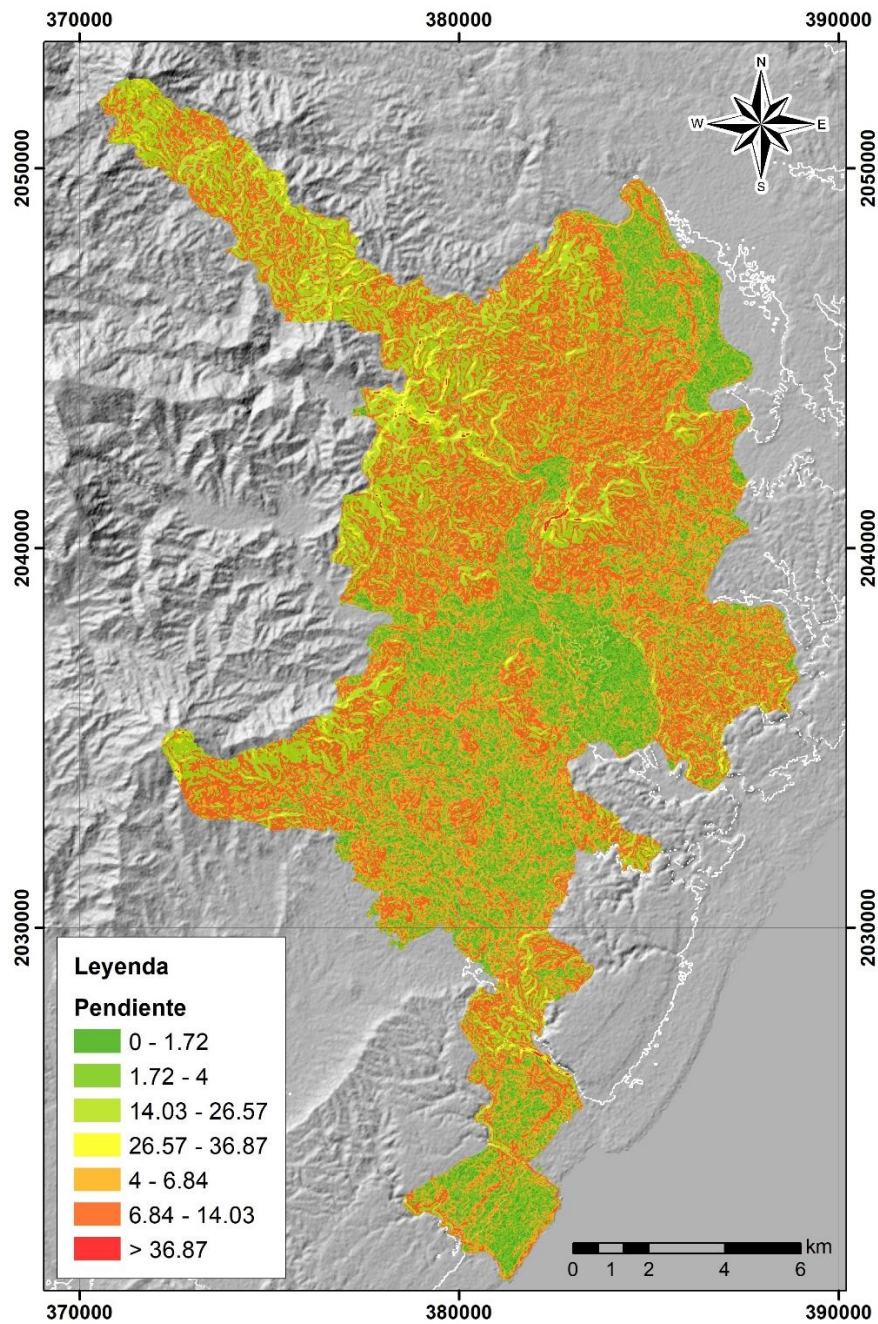
Categoría	Área Ha	Porcentaje
Bosque Latifoliados	9406.426619	44.31
Bosque Coníferas	182.131706	0.86
Bosque Seco	0.196271	0.00
Pasto	3084.983313	14.53
Cuerpos de Agua	185.368339	0.87
Urbano	3211.938408	15.13
Cacao	1068.464318	5.03
Café	684.85185	3.23
Aguacate	348.072085	1.64
Caña	73.973063	0.35
Matorral Latifoliados	2331.471139	10.98
Cultivos	541.307325	2.55
Escasa vegetación	76.199461	0.36
Mina canteras	33.076032	0.16

Fuente: Elaboración propia

5.5. Pendientes

El municipio de San Cristóbal tiene 6.18% de su relieve clasificado como plano (0° - 1.72°), 21.13% ligeramente inclinado (1.72° - 4°), 22.39% moderadamente inclinado (4° - 6.84°), 29.67% fuertemente inclinado (6.84° - 14.03°), 18.74% ligeramente escarpado (14.03° - 26.57°), 1.78% moderadamente escarpado (26.57° - 36.87°) y 0.11% fuertemente escarpado ($>36.87^{\circ}$). Es decir, alrededor del 90% del municipio tiene pendientes entre el rango de moderadamente inclinado a moderadamente escarpado. En la siguiente figura, se presenta el mapa de pendientes en el territorio.

Figura 8. Mapa de pendientes en grados

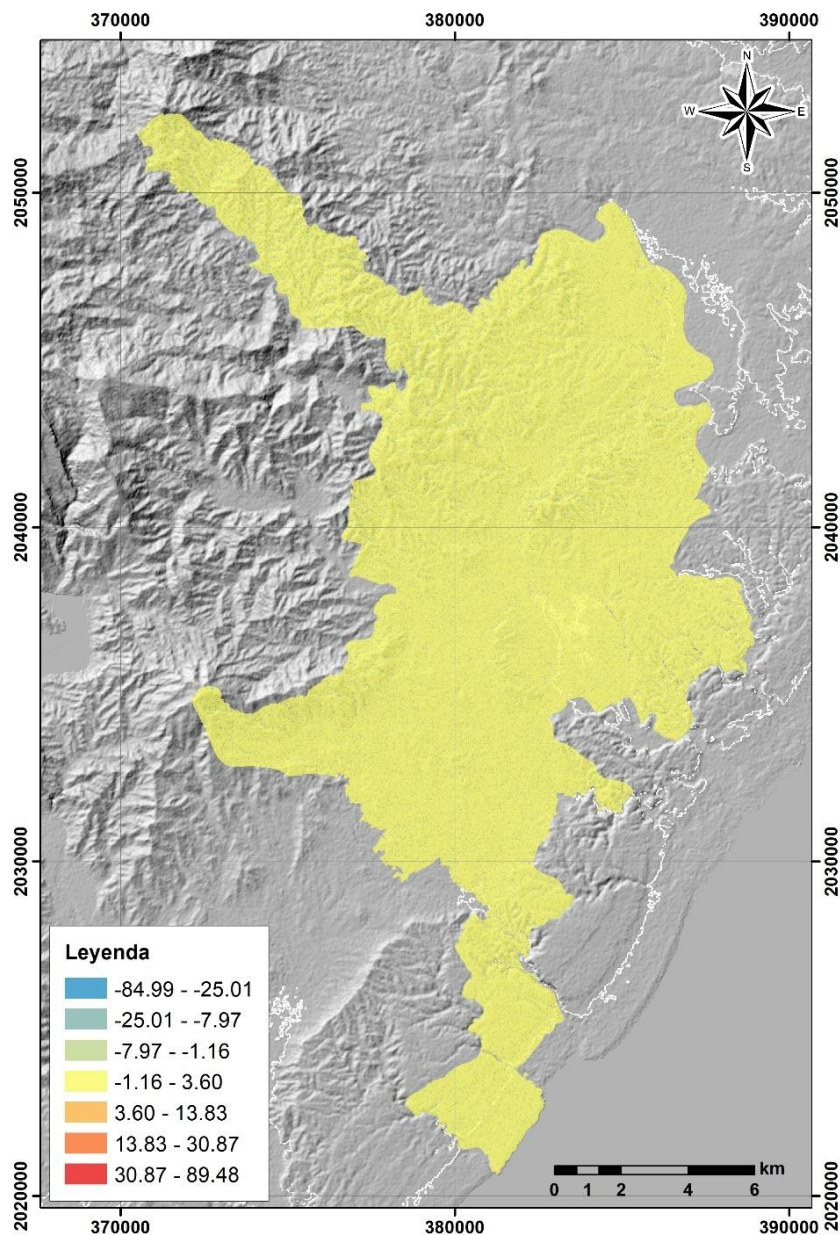


Fuente: Elaboración propia

5.6. Curvatura

San Cristóbal presenta curvatura entre -84.99 a -1.16, clasificadas como convexa (14.81%), entre -1.16 a 3.60, clasificadas como semi plana (85%) y entre 3.60 a 89.48, clasificadas como cóncava (0.28%). En la figura se muestra el mapa con los valores de curvatura en el territorio.

Figura 9. Curvatura



Fuente: Elaboración propia

5.7. Delimitación y zonificación de amenazas

Se desarrolla la caracterización de las condiciones de amenaza por movimientos en masa para los eventos principales que pueden llegar a afectar el municipio de San Cristóbal considerando la información disponible. Los resultados permitirán zonificar y caracterizar el riesgo al que podrían estar expuestos los habitantes, la infraestructura vital dentro del municipio de San Cristóbal.

5.7.1. Delimitación y zonificación de la amenaza por movimientos en masa

Se entiende por movimiento en masa el deslizamiento hacia el exterior y en sentido descendiente del material que constituye una ladera. Esta clase de eventos, por lo general, se presentan en zonas con relieves pronunciados, controlados fundamentalmente por la acción de la gravedad (Cruden, 1991).

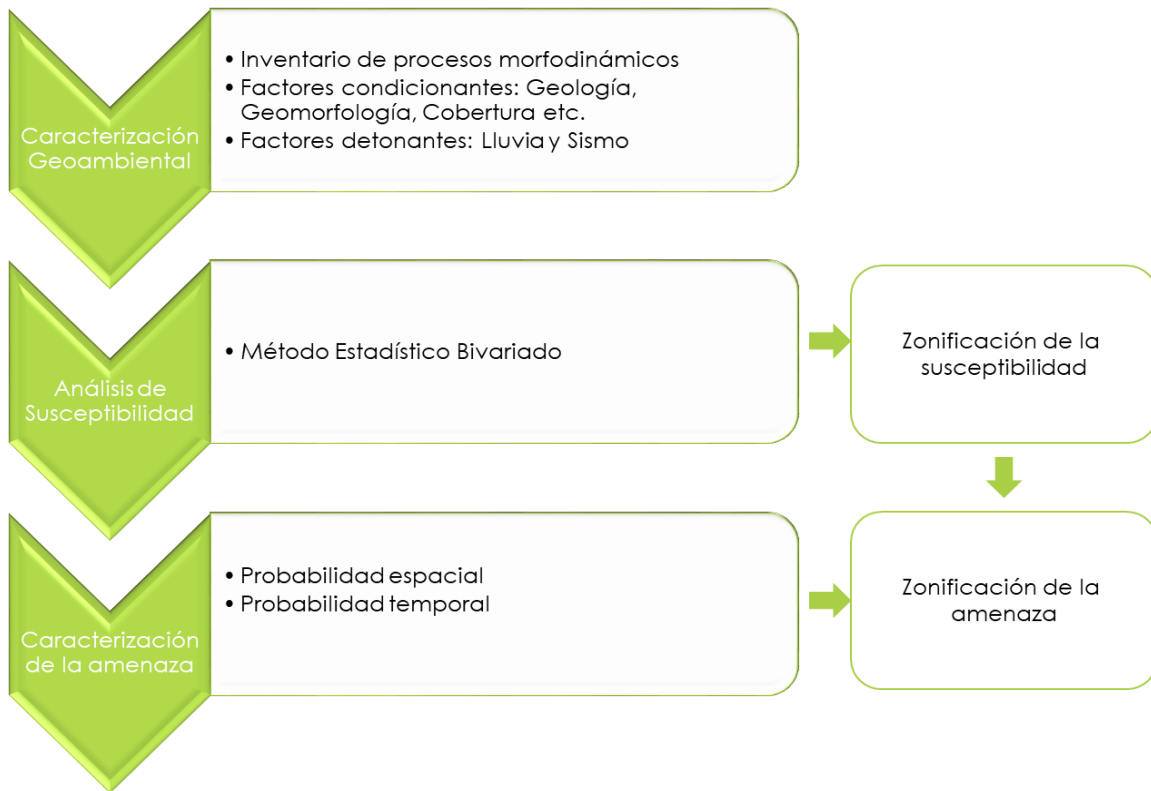
La estabilidad de las laderas está regida por una serie de factores topográficos, geológicos, ambientales y antrópicos que inciden en la probabilidad de que los materiales que componen la ladera se muevan. El paulatino crecimiento durante los últimos años de la ocupación y el desarrollo de actividades económicas en zonas catalogadas como potencialmente inestables, ha llamado la atención de las autoridades nacionales y provinciales. En virtud de lo anterior, y considerando además los recientes acontecimientos naturales, los cuales han dejado gran cantidad de damnificados y multitudinarias pérdidas económicas, generaron como resultado la necesidad de incorporar la gestión del riesgo en el ordenamiento territorial.

5.7.1.1. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa

A manera general la zonificación de la amenaza por movimientos en masa consiste en la implementación del método estadístico bivariado, los cuales integran las variables que inciden en el desencadenamiento de los fenómenos de inestabilidad.

Entendiendo la amenaza como la probabilidad de ocurrencia de un evento, en este caso de inestabilidad, se determina la probabilidad de ocurrencia de dicho evento (Alzate, 2012).

Figura 10. Metodología para zonificar amenazas por movimientos en masa



Fuente: Ajustado de SGC. (2017).

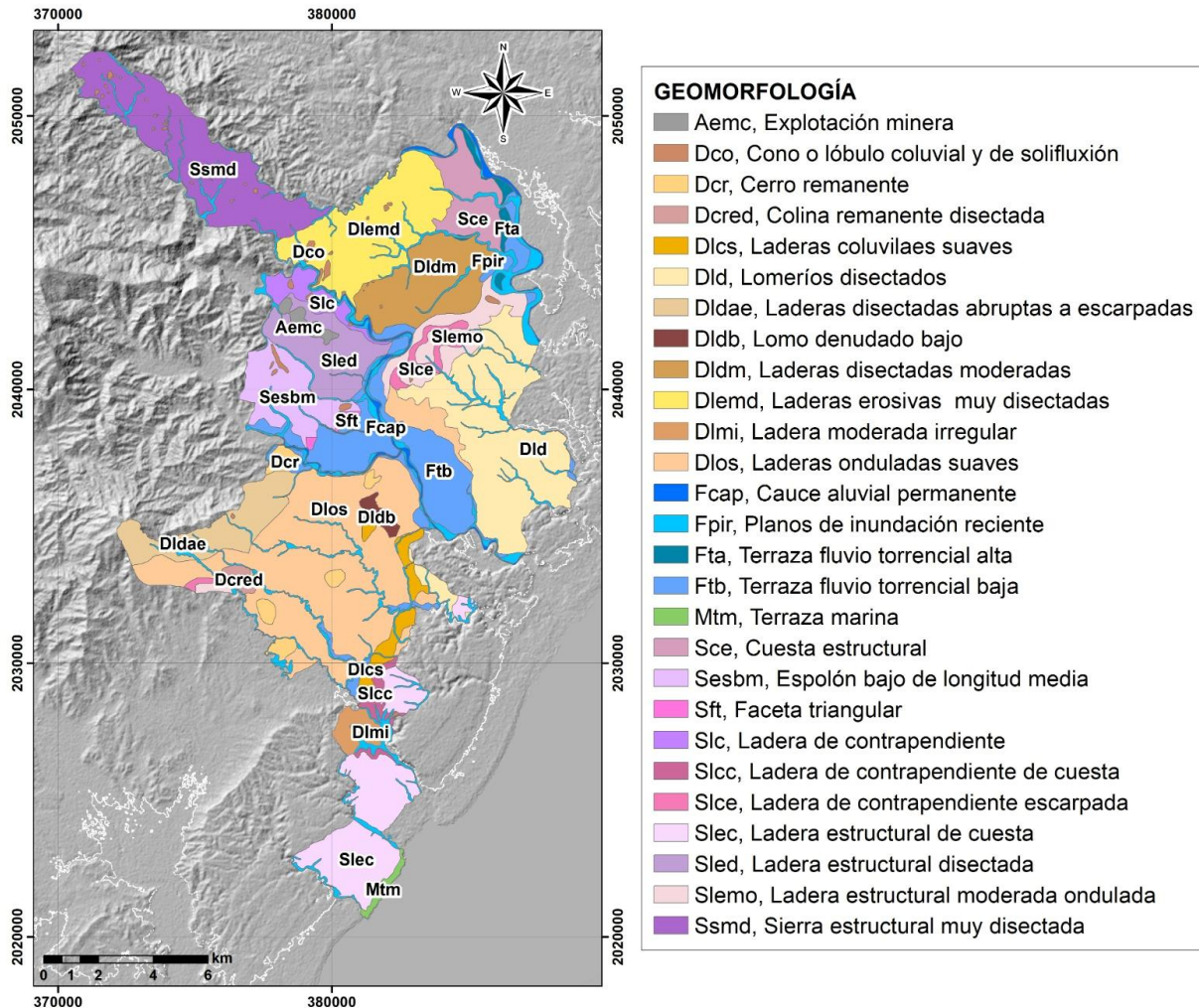
5.7.1.1.1. Factores condicionantes

Estos factores comprenden las unidades geológicas superficiales, y las subunidades geomorfológicas. Para elaborar la zonificación se contó con la cartografía básica, el modelo digital del terreno y los sensores remotos.

5.7.1.1.1.1. Unidades geomorfológicas

El proceso de interpretación y zonificación geomorfológica se basó en la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC-metodología Carvajal-2011), que se encarga de la evaluación de las amenazas naturales, y utiliza la interpretación cartográfica y define unidades y subunidades geomorfológicas caracterizando los procesos morfodinámicos. Dentro de las geoformas que se encuentran asociadas a la inestabilidad de las laderas están los lóbulos coluviales, y deslizamientos.

Figura 11. Mapa de unidades geomorfológicas



Fuente: Elaboración propia

5.7.1.2. Generación del mapa de susceptibilidad mediante el método Bivariado

El mapa de susceptibilidad es el primer paso para calcular la amenaza de un territorio, el método más usado para el cálculo de dicha susceptibilidad se basa en la superposición de los diferentes factores causales los cuales hemos mencionado anteriormente. Considerando el alcance de este estudio sobre una zona rural se procede a implementar el método estadístico bivariado.

La metodología empleada para la zonificación responde a un modelo de Pesos de Evidencia (WofE), donde a través de un inventario de deslizamientos y flujos evalúan la incidencia de cada una de las clases que componen las variables: cobertura, curvatura, pendientes, unidades geológicas superficiales y geomorfología.

La susceptibilidad del terreno frente a movimientos en masa, en términos de probabilidad, puede ser considerada como la adición de la susceptibilidad a deslizamientos y la susceptibilidad a flujos, bajo la hipótesis de que la ocurrencia de estos es independiente y no excluyente; así mismo, la amenaza final calculada, corresponde al producto de la susceptibilidad general y la probabilidad temporal de que en el transcurso de un año se supere un umbral de lluvia y que dicha precipitación sea capaz de detonar un movimiento en masa.

5.7.1.2.1. Pesos de evidencia (Weight of Evidence, WofE)

El método evalúa las diferentes asociaciones entre las evidencias o factores condicionantes y las áreas inestables mediante pesos. Los pesos de cada factor causal se calculan aplicando un enfoque Bayesiano en donde calcula la probabilidad incondicional y condicional de ocurrencia de un movimiento en masa (Bonham, 1994).

“La aplicación de este método está sujeta a ciertas condiciones que deben tenerse en cuenta al momento de interpretar los resultados obtenidos. De acuerdo con van Westen (2013), en un análisis estadístico efectivo se requiere un gran número de zonas inestables relacionadas con varios tipos de mecanismos con una información de edad lo más fiel posible (SGC, 2016).”

Teniendo en cuenta la descripción espacial anterior, la función de susceptibilidad por movimientos en masa (LSI – landslide susceptibility index) se calcula para cada píxel mediante la siguiente expresión matemática:

$$LSI = \sum_n^{i=1} Wf_i f_{ci}$$

Donde:

- Wf_i corresponde al peso de evidencia factor condicionante.
- i – ésimo con $i = (1, 2, \dots, n)$., la magnitud del peso.
- W_f indica el grado de importancia de las variables en la ocurrencia de los eventos.

Ahora bien, si se mira la relación de los diferentes factores causales en función de los eventos de movimientos en masa podemos encontrar una relación en función del píxel que representa la clase o el movimiento en masa registrado en la clase.

Figura 12. Relación de deslizamientos y el factor condicionante

		w: Factor condicionante con potencialidad de deslizamientos		
		Presente	Ausente	
L: Deslizamientos	Presente	Npix1	Npix2	Área total deslizada
	Ausente	Npix3	Npix4	Área total no deslizada
		Área total con unidad w	Área total sin unidad w	Área total del mapa

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior se puede interpretar de la siguiente forma:

Npix1 = hay presencia del factor condicionante (Npix3) en el deslizamiento (Npix2). Lo cual es indicativo de una muy alta significancia de ese factor en el deslizamiento.

Npix2 = no hay presencia del factor condicionante (Npix3) en el deslizamiento (Npix2). Lo cual es indicativo de una significancia alta por efecto de la presencia del deslizamiento.

Npix3 = factor condicionante. Lo cual es indicativo de una significancia media por efector del factor que alguna vez contribuyó al deslizamiento.

Npix4 = no hay deslizamiento ni factor condicionante. Lo cual es indicativo de una significancia baja.

Con lo anteriormente mencionado podemos obtener pesos donde pueden ser positivos o pesos negativos en donde se van a relacionar mediante la siguiente formula.

$$W_f = W_j^+ - W_j^-$$

Donde, W_j^+ es el peso positivo para cada clase del factor condicionante i , siendo este un indicativo de la relevancia del factor de la ocurrencia de los procesos gravitacionales. Mientras que W_j^- es el peso negativo y expresa la importancia de la ausencia del factor dentro de la ocurrencia del fenómeno. Indica la importancia de la ausencia del factor en el deslizamiento.

Posteriormente, se muestra cada uno de los factores causales en relación con la clasificación de W final aplicado en el método bivariado y zonificado en 4 rangos.

5.7.1.2.1.1. Cobertura vegetal

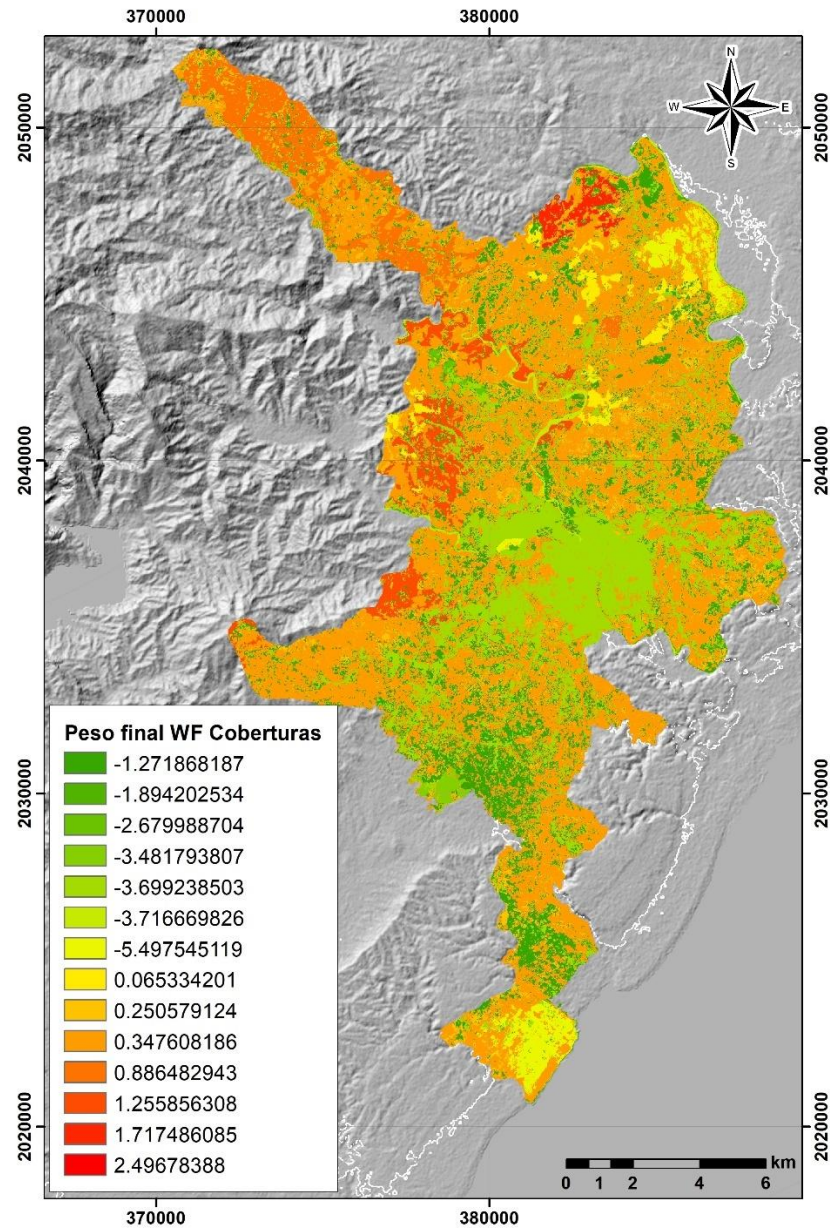
De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 3, los tipos de cobertura que presentan un contraste positivo, y por lo tanto implican una estrecha asociación con la ocurrencia de deslizamientos, corresponden a bosques latifoliados, bosque seco, cacao, café, aguacate, minas cantera y matorral latifoliado, como se observa en la Figura 13. Por otra parte, las coberturas que presentan una correlación negativa con los deslizamientos corresponden a Bosque coníferas, pasto, cuerpos de agua, urbano, caña, cultivos y escasa vegetación.

Tabla 3. Valores obtenidos para la Cobertura vegetal

COBERTURAS VEGETALES									
CODIGO	CLASE	NPC	NPIX1	NPIX2	NPIX3	NPIX4	W+	W-	WF
Bosque Latifoliados	1	601985	4900	4361	597085	752299	0.17876716	-0.16884103	0.34760819
Bosque Coníferas	2	11626	413	8848	11213	1338171	1.68020993	-0.03727615	1.71748608
Bosque Seco	3	13	1	9260	12	1349372	2.49668479	-9.9093E-05	2.49678388
Pasto	4	197640	424	8837	197216	1152168	-1.16072996	0.11113823	-1.27186819
Cuerpos de Agua	5	11884	2	9259	11882	1337502	-3.70804131	0.00862851	-3.71666983
Urbano	6	205614	41	9220	205573	1143811	-3.53839298	0.16084553	-3.6992385
Cacao	7	68391	1047	8214	67344	1282040	0.81770656	-0.06877639	0.88648294
Café	8	43893	958	8303	42935	1306449	1.17899659	-0.07685972	1.25585631
Aguacate	9	22298	162	9099	22136	1327248	0.06422725	-0.00110695	0.0653342
Caña	10	4723	1	9260	4722	1344662	-3.47839628	0.00339753	-3.48179381
Matorral Latifoliados	11	148965	1263	7998	147702	1201682	0.21988455	-0.03069457	0.25057912
Cultivos	12	34657	1	9260	34656	1314728	-5.47163471	0.02591041	-5.49754512
Escasa vegetación	13	4833	5	9256	4828	1344556	-1.89115823	0.0030443	-1.89420253
Mina canteras	14	2123	1	9260	2122	1347262	-2.67852288	0.00146582	-2.6799887

Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Zonificación de la cobertura vegetal en función del W final



Fuente: Elaboración propia

5.7.1.2.1.2. Geología

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 4 , los tipos de unidades geológicas que presentan un contraste positivo y por lo tanto implican una estrecha asociación con la ocurrencia de deslizamientos, corresponden principalmente al Complejo Duarte, la formación Arroyo Jigüey, Metapiroxenita, formación Tiro, formación Loma Rodríguez, formación Iguana, formación Valdesia, formación Fort Resolue principalmente, como se observa en la Figura 14.

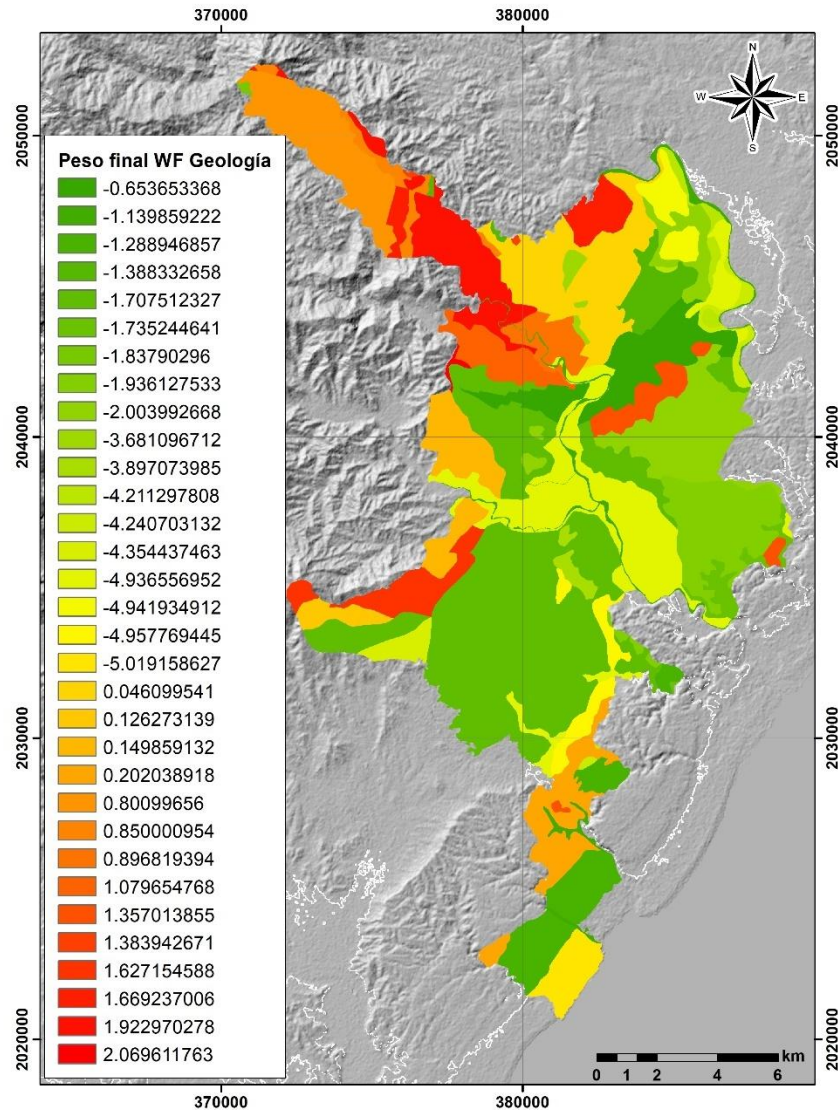
Tabla 4. Valores obtenidos para las unidades geológicas

GEOLOGIA									
CODIGO	CLASE	NPC	NPIX1	NPIX2	NPIX3	NPIX4	W+	W-	WF
Complejo Duarte	1	91802	653	8608	91149	1258235	0,04291776	-0,0031818	0,04609954
Complejo Duarte	2	25796	842	8419	24954	1324430	1,59258204	-0,076655	1,66923701
Formación Arroyo Jigüey	3	5760	1	9260	5759	1343625	-3,6769277	0,00416902	-3,6810967
Formación Arroyo Jigüey	4	13655	213	9048	13442	1335942	0,83674419	-0,0132568	0,85000095
Metapiroxenita	5	902	24	9237	878	1348506	1,38199867	-0,001944	1,38394267
Formación Tireo	6	21184	343	8918	20841	1328543	0,8746444	-0,022175	0,89681939
Formación Tireo	7	56388	2065	7196	54323	1295061	1,71177395	-0,2111963	1,92297028
Tonalita	8	25947	45	9216	25902	1323482	-1,3738215	0,01451112	-1,3883327
Granito	9	916	1	9260	915	1348469	-1,8373326	0,00057033	-1,837903
Formación Loma Rodriguez	10	26164	500	8761	25664	1323720	1,04335502	-0,0362997	1,07965477
Formación Valdesia	11	1602	82	9179	1520	1347864	2,06184507	-0,0077667	2,06961176
Formación Iguana	12	44993	354	8907	44639	1304745	0,14452515	-0,005334	0,14985913
Formación Fort Resolue	13	31609	979	8282	30630	1318754	1,53838788	-0,0887667	1,62715459
Formación Fort Resolue	14	11791	91	9170	11700	1337684	0,12510682	-0,0011663	0,12627314
Formación Fort Resolue	15	11247	1	9260	11246	1338138	-4,3461764	0,00826111	-4,3544375
Formación Fort Resolue	16	58910	214	9047	58696	1290688	-0,6325594	0,02109396	-0,6536534
Formación San Cristóbal	17	320419	494	8767	319925	1029459	-1,4917149	0,21579741	-1,7075123
Grupo Ingenio Caei	18	45596	377	8884	45219	1304165	0,19456399	-0,0074749	0,20203892
Grupo Ingenio Caei	19	59497	116	9145	59381	1290003	-1,256548	0,0323989	-1,2889469
Formación Llanura Costera	20	13943	17	9244	13926	1335458	-1,7267081	0,00853655	-1,7352446
Formación Yanigua	21	7141	1	9260	7140	1342244	-3,8918766	0,00519737	-3,897074
Formación Yanigua	22	90703	89	9172	90614	1258770	-1,9441362	0,05985647	-2,0039927
Formación Los Haitises	23	24837	614	8647	24223	1325161	1,30652849	-0,0504854	1,35701385

GEOLOGIA									
CODIGO	CLASE	NPC	NPIX1	NPIX2	NPIX3	NPIX4	W+	W-	WF
Diques básicos	24	69121	981	8280	68140	1281244	0,74084421	-0,0601524	0,80099656
Formación La Isabela	25	21692	1	9260	21691	1327693	-5,0030613	0,01609736	-5,0191586
Formación Llanura Costera	26	67737	70	9191	67667	1281717	-1,8922672	0,04386032	-1,9361275
Llanura de inundación	27	10047	1	9260	10046	1339338	-4,2333384	0,00736474	-4,2407031
Penillanura relictas	28	20104	1	9260	20103	1329281	-4,9270329	0,01490201	-4,9419349
Terraza baja	29	128630	7	9254	128623	1220761	-4,8371393	0,09941761	-4,936557
Terraza alta	30	9758	1	9260	9757	1339627	-4,2041488	0,00714899	-4,2112978
Depósitos coluvioaluviales	31	20420	1	9260	20419	1328965	-4,9426297	0,01513976	-4,9577694
Fondos de valle	32	20334	45	9216	20289	1329095	-1,1295802	0,010279	-1,1398592

Fuente: Elaboración propia

Figura 14. Zonificación de la geología en función del W final



Fuente: Elaboración propia

5.7.1.2.1.3. Unidades geomorfológicas

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 6, los tipos de subunidades geomorfológicas que presentan un contraste positivo y por lo tanto implican una estrecha asociación con la ocurrencia de deslizamientos, corresponden principalmente a sierra estructurales, laderas estructurales, espolones y algunas laderas denudadas, como se observa en la Figura 15.

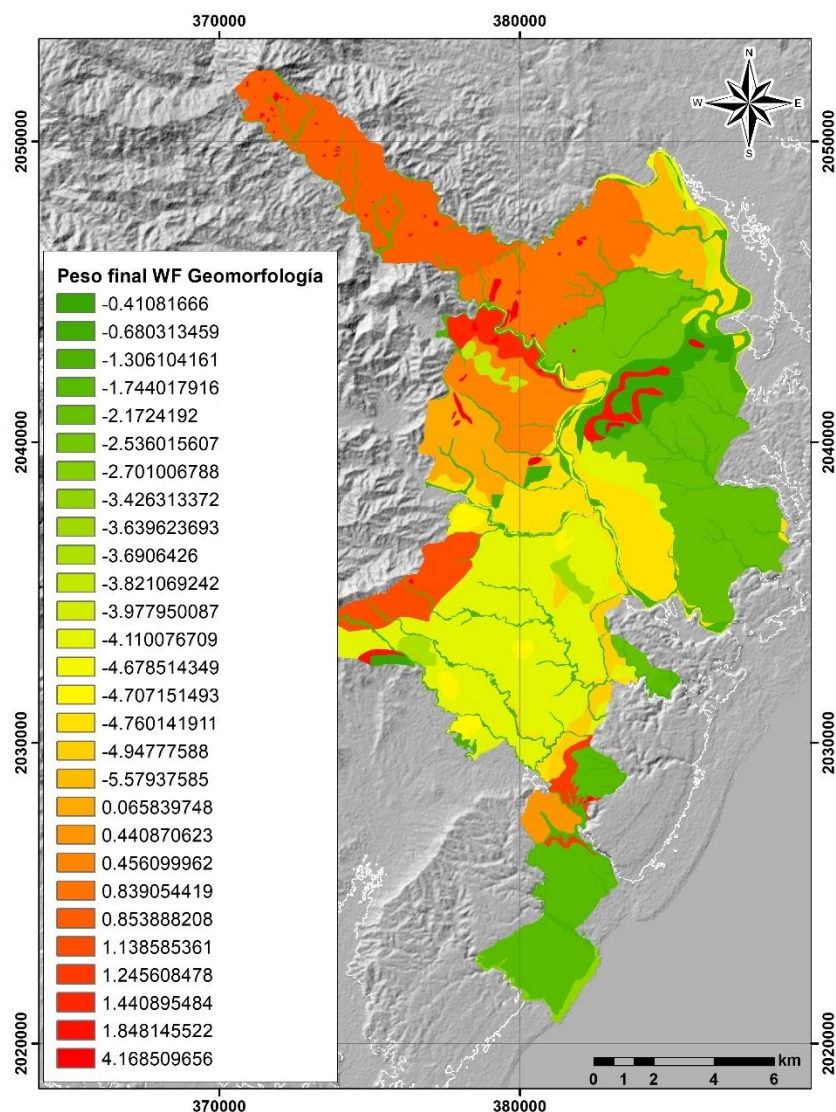
Tabla 5. Valores obtenidos para las unidades geomorfológicas

GEOMORFOLOGIA									
CODIGO	CLASE	NPC	NPIX1	NPIX2	NPIX3	NPIX4	W+	W-	WF
Lomeríos disectados	1	153172	133	9128	153039	1196345	-2.0665075	0.10591169	-2.1724192
Sierra estructural muy disectada	2	118175	1682	7579	116493	1232891	0.74374381	-0.1101444	0.85388821
Terraza fluvio torrencial alta	3	7739	1	9260	7738	1341646	-3.9723071	0.00564299	- 3.97795009
Ladera estructural de cuesta	4	90658	115	9146	90543	1258841	- 1.68705659	0.05696133	- 1.74401792
Ladera de contrapendiente de cuesta	5	9337	214	9047	9123	1340261	1.22901348	-0.016595	1.24560848
Cauce aluvial permanente	6	15502	1	9260	15501	1333883	- 4.66706838	0.01144597	- 4.67851435
Planos de inundación reciente	7	104756	206	9055	104550	1244834	-1.2479531	0.05815106	- 1.30610416
Ladera moderada irregular	8	13050	137	9124	12913	1336471	0.43558253	-0.0052881	0.44087062
Cerro remanente	9	15947	1	9260	15946	1333438	- 4.69537186	0.01177964	- 4.70715149
Cuesta estructural	10	37530	1	9260	37529	1311855	- 5.55127781	0.02809804	- 5.57937585
Faceta triangular	11	3460	12	9249	3448	1345936	- 0.67905155	0.00126191	- 0.68031346
Espolón bajo de longitud media	12	46418	337	8924	46081	1303303	0.06351837	- 0.00232138	0.06583975
Colina remanente disectada	13	5815	1	9260	5814	1343570	- 3.68643264	0.00420996	-3.6906426
Ladera de contrapendiente escarpada	14	12131	485	8776	11646	1337738	1.80302228	- 0.04512325	1.84814552
Ladera estructural moderada ondulada	15	39345	180	9081	39165	1310219	- 0.40099048	0.00982618	- 0.41081666
Laderas erosivas muy disectadas	16	98742	1412	7849	97330	1252054	0.74849131	- 0.09056311	0.83905442

GEOMORFOLOGIA									
CODIGO	CLASE	NPC	NPIX1	NPIX2	NPIX3	NPIX4	W+	W-	WF
Ladera estructural disectada	17	50324	528	8733	49796	1299588	0.43499778	- 0.02110218	0.45609996
Ladera de contrapendiente	18	17449	473	8788	16976	1332408	1.40113096	- 0.03976452	1.44089548
Terraza fluvio torrencial baja	19	109516	7	9254	109509	1239875	- 4.67626043	0.08388148	- 4.76014191
Laderas coluviales suaves	20	20220	1	9260	20219	1329165	-4.9327866	0.01498928	- 4.94777588
Lomo denudado bajo	21	5527	1	9260	5526	1343858	- 3.63562807	0.00399562	- 3.63962369
Laderas disectadas moderadas	22	70126	40	9221	70086	1279298	- 2.48700745	0.04900816	- 2.53601561
Laderas disectadas abruptas a escarpadas	23	50036	976	8285	49060	1300324	1.06425471	- 0.07433066	1.13858536
Laderas onduladas suaves	24	241518	33	9228	241485	1107899	- 3.91646364	0.19361307	- 4.11007671
Explotación minera	25	6621	1	9260	6620	1342764	- 3.81625921	0.00481003	- 3.82106924
Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión	26	8894	2245	7016	6649	1342735	3.89583049	- 0.27267917	4.16850966
Planos de inundación reciente	27	2168	1	9260	2167	1347217	- 2.69950756	0.00149922	- 2.70100679
Terraza marina	28	4469	1	9260	4468	1344916	- 3.42310472	0.00320865	- 3.42631337

Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Zonificación de la geomorfología en función del W final



Fuente: Elaboración propia

5.7.1.2.1.4. *Curvatura*

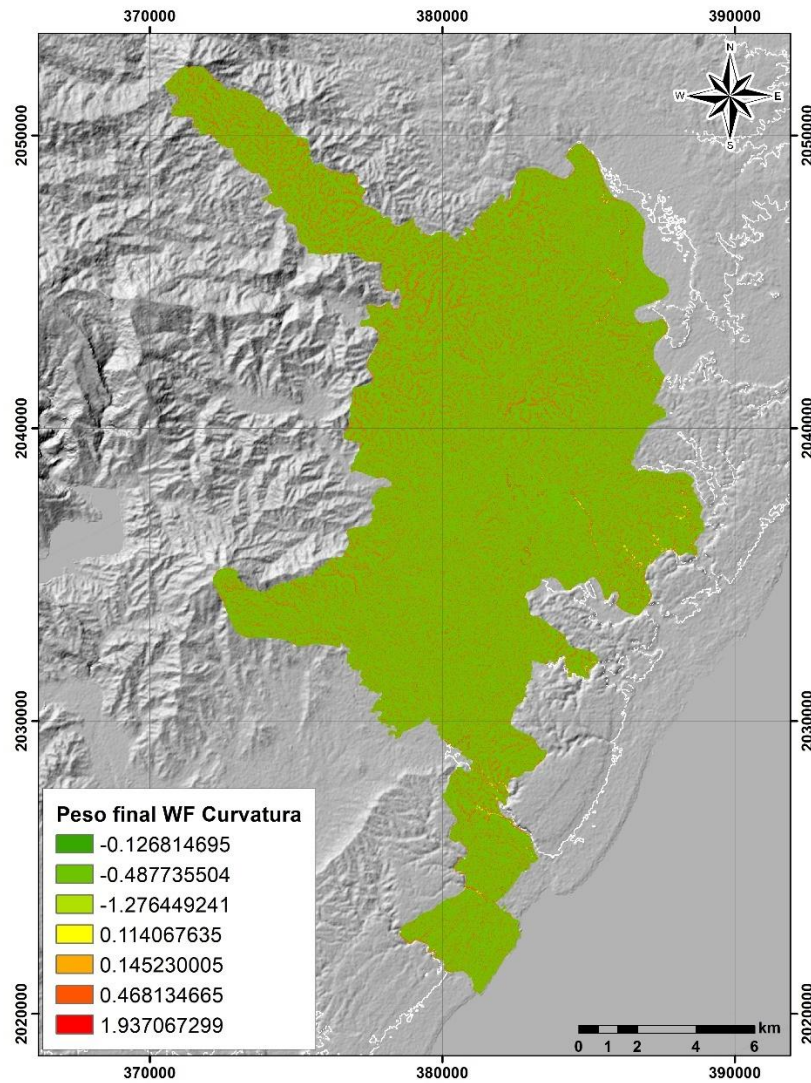
De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 6, los tipos de curvatura que presentan un contraste positivo y por lo tanto implican una estrecha asociación con la ocurrencia de deslizamientos, corresponden principalmente a los cóncavos, sin embargo, en zonas de depósito los de curvatura convexa también son referentes de movimientos en masa.

Tabla 6. Valores obtenidos para la curvatura

CURVATURA									
CODIGO	CLASE	NPC	NPIX1	NPIX2	NPIX3	NPIX4	W+	W-	WF
-84.99 - -25.01	1	22	1	9260	21	1349236	1.93697488	-9.24213E-05	1.9370673
-25.01 - -7.97	2	1179	9	9252	1170	1348087	0.11396286	-0.00010477	0.11406763
-7.97 - -1.16	3	246867	2418	6843	244449	1104808	0.36543137	- 0.102703296	0.46813467
-1.16 - 3.60	4	1107598	6772	2489	1100826	248431	- 0.10952231	0.378213198	-0.4877355
3.60 - 13.83	5	2329	14	9247	2315	1346942	- 0.12661032	0.000204373	-0.12681469
13.83 - 30.87	6	523	1	9260	522	1348735	- 1.27617027	0.000278969	-1.27644924
30.87 - 89.48	7	127	1	9260	126	1349131	0.14521541	- 0.000014596	0.14523

Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Zonificación de la curvatura en función del W final



Fuente: Elaboración propia

5.7.1.2.1.5. Pendientes

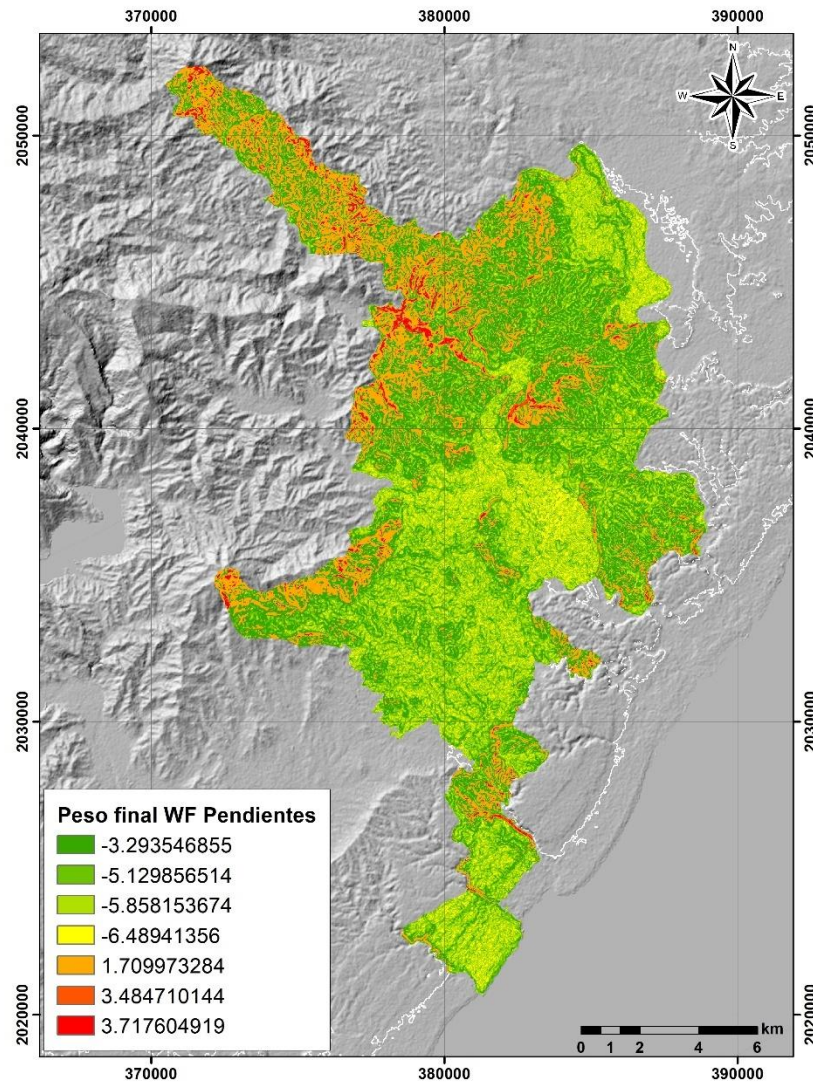
De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 7, los tipos de pendiente que presentan un contraste positivo y por lo tanto implican una estrecha asociación con la ocurrencia de deslizamientos, corresponden principalmente a las abruptas a escarpadas entre 14.03° - 36.87°. Las pendientes que en el municipio presentan una correlación negativa con los deslizamientos corresponden principalmente a pendientes suaves a moderadas entre 0° - 6.84°.

Tabla 7. Valores obtenidos para las pendientes

PENDIENTES									
CODIGO	CLASE	NPC	NPIX1	NPIX2	NPIX3	NPIX4	W+	W-	WF
0 - 1.72	1	89542	1	9260	89541	1259843	-6.42086046	0.0685531	-6.48941356
1.72 - 4	2	282523	7	9254	282516	1066868	-5.62398888	0.23416479	-5.85815367
4 - 6.84	3	305365	16	9245	305349	1044035	-4.8750305	0.25482601	-5.12985651
6.84 - 14.03	4	400913	143	9118	400770	948614	-2.95670691	0.33683995	-3.29354686
14.03 - 26.57	5	254328	5149	4112	249179	1100205	1.10222244	-0.60775084	1.70997328
26.57 - 36.87	6	24497	3636	5625	20861	1328523	3.23459423	-0.48301069	3.71760492
> 36.87	7	1477	264	8997	1213	1348171	3.45668863	-0.02802151	3.48471014

Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Zonificación de las pendientes en función del W final



Fuente: Elaboración propia

5.7.1.2.1.6. Validación del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa

Acorde a Veguería (2006) la validación refleja la confiabilidad de los procesos del modelamiento y genera mayor facilidad a la hora de realizar una comparación para poder escoger el modelo que mejor se ajuste a los resultados esperados. Entre los métodos de validación se encuentra la curva ROC. Esta herramienta se usa con el fin de hacer una relación directa entre las zonas que se encuentran inestables en el terreno y las zonas de muy alta susceptibilidad.

La curva ROC es una función que muestra la relación entre dos variables: la Sensibilidad, o rata de verdaderos positivos; y la 1 – Especificidad, o rata de falsos positivos (Vakhshoori & Zare, 2016).

La Sensibilidad es la proporción de pixeles que fueron correctamente clasificados como de movimientos en masa (también llamados “inestables”) (Hoang y Pham, 2016). Se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{TP}{TP+FN}; \text{ donde}$$

TP: Verdaderos Positivos (True Positives), son pixeles correctamente clasificados como “inestables”.

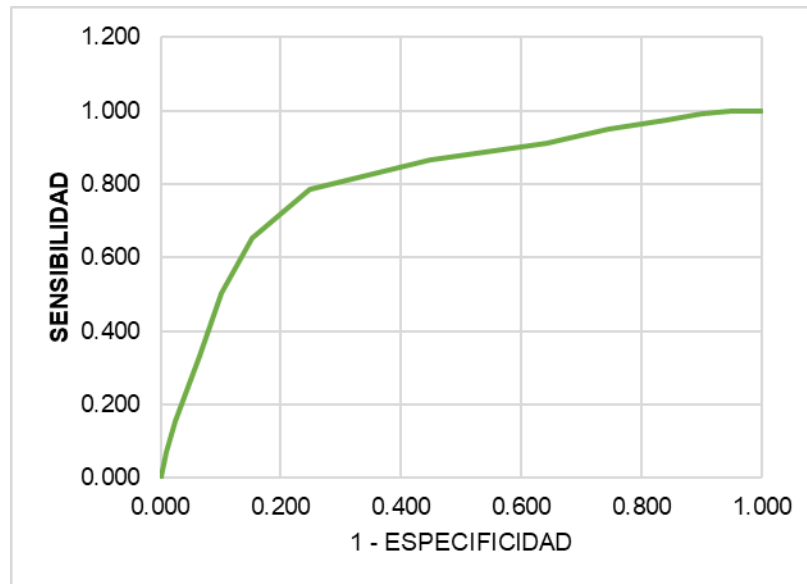
FN: Falsos Negativos (False Negatives), son pixeles incorrectamente clasificados como “estables”.

A su vez, la Especificidad corresponde a la proporción de pixeles correctamente clasificados como de no-movimientos en masa (también llamados “estables”) (Hoang y Pham, 2016). El uso de la curva ROC puede ser aplicado con un objetivo, sobre el modelo final: construir la Curva de Éxito (Success Rate Curve) (como lo citan en Vakhshoori & Zare, 2006; Osna et. al., 2014; Lucà et. al., 2011; Tien et. al; 2016). La Curva de éxito sirve para determinar qué tan bien los mapas de susceptibilidad han clasificado las áreas donde están los movimientos en masa, y se elabora con la ayuda de la información suministrada por el mapa de inventario de entrenamiento (i.e. el mapa que fue usado para la elaboración del documento de susceptibilidad, con el 70% de los movimientos) (Chung & Fabri, 1999 en Vakhshoori & Zare, 2016).

La medida estadística para valorar si la gráfica ROC es válida, es el área bajo la curva (AUC) de esta (Vakhshoori & Zare, 2016). La superficie bajo la curva debe residir en un intervalo entre 0.5 y 1.0: si el AUC está en un valor entre 0.9 y 1.0, se considera que la calidad del modelo es excelente; si se encuentra entre 0.8 y 0.9, se considera que este es bueno; si está entre 0.7 y 0.8, que es aceptable; si se aloja entre 0.6 y 0.7, es pobre; y finalmente, si es menor a 0.6, se considera que el documento no cumplió con las expectativas (Tien et. al., 2016; Vakhshoori & Zare, 2016).

En la Figura 18 se muestran los datos y la curva que se generó dentro del análisis de este trabajo teniendo un área bajo la curva de 0.95%, lo que significa que el modelo tiene un buen nivel de relación con las zonas de alta susceptibilidad y los movimientos en masa presentes el terreno.

Figura 18. Resultados de la curva ROC



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Resultados de validación del modelo de susceptibilidad

CLASES	PIXELES CON DESLIZAMIENTO EN CADA CLASE	TODOS LOS PIXELES DEL MAPA CON DESLIZAMIENTO	TODOS LOS PIXELES DE CADA CLASE	TODOS LOS PIXELES DEL MAPA	1 - ESPECIFICIDAD	SENSIBILIDAD	AUC
1	0	14759	7618	565668	1.000	1.000	0.81
2	0		8030		0.992	1.000	
3	0		9608		0.984	1.000	
4	0		11846		0.975	1.000	
5	0		15622		0.963	1.000	
6	120		48366		0.947	1.000	
7	220		58850		0.899	0.991	
8	335		96307		0.841	0.974	
9	471		104308		0.745	0.948	
10	583		195218		0.642	0.912	
11	1049		201312		0.448	0.867	
12	1735		96984		0.248	0.786	
13	1933		53923		0.153	0.652	
14	2198		38149		0.101	0.503	
15	2325		42535		0.065	0.334	
16	1067		17592		0.025	0.155	

CLASES	PIXELES CON DESLIZAMIENTO EN CADA CLASE	TODOS LOS PIXELES DEL MAPA CON DESLIZAMIENTO	TODOS LOS PIXELES DE CADA CLASE	TODOS LOS PIXELES DEL MAPA	1 - ESPECIFICIDAD	SENSIBILIDAD	AUC
17	875		7819		0.009	0.072	
18	764		1507		0.002	0.005	
19	634		470		0.001	0.004	
20	450		96		0.000	0.002	

Fuente: Elaboración propia

5.7.1.2.2. Factores detonantes

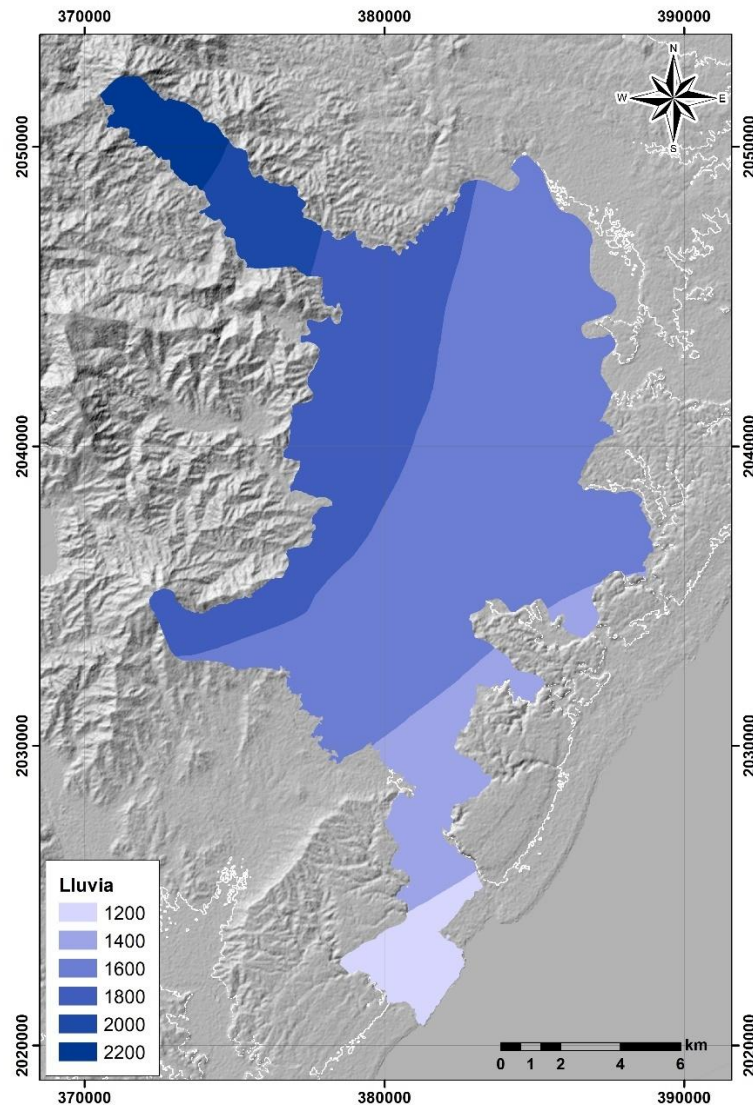
El Decreto 1807 de 2014 define como factores detonantes la lluvia y los sismos, los cuales son los de mayor relevancia por las condiciones estructurales y climáticas de los municipios colombianos. A continuación, se detallan los factores detonantes determinados para el análisis de la estabilidad de las laderas del municipio de San Cristóbal.

5.7.1.2.2.1. Lluvia

La respuesta de las laderas a una lluvia con capacidad de detonar un movimiento en masa depende del posible mecanismo de falla. Altas intensidades de lluvia frecuentemente detonan movimientos superficiales y flujos de detritos debido a que la disipación de las presiones de poros positivas es muy rápida, especialmente en materiales permeables. Lluvias de baja a moderada intensidad, que se presentan por días o semanas, pueden detonar flujos de detritos y deslizamientos profundos, siendo entonces importante la lluvia antecedente al reducir la succión del suelo e incrementar las presiones de poros positivas, especialmente en suelos de baja permeabilidad (Corominas et al., 2013).

Para la detonante lluvia se utilizó la información de las isoyetas las cuales para el municipio de San Cristóbal varían desde los 1200 mm hasta los 2200 mm, como se muestra en la

Figura 19. Detonante lluvia a partir de Isoyetas para el municipio de San Cristóbal



Fuente: Elaboración propia

5.7.1.2.2.2. Sismos

La aplicación de una fuerza sísmica horizontal sobre los materiales potencialmente inestables de una ladera, puede potenciar la ocurrencia de deslizamientos al aumentar el esfuerzo cortante, disminuir la resistencia por aumento de la presión de poros y por las deformaciones asociadas por la onda sísmica, llegando a la falla por esfuerzo cortante (Alzate, 2012).

La determinación de la aceleración sísmica estuvo basada en datos generados por la norma Sismo Resistente y demás lineamientos que esta norma contempla. La expresión empleada para su determinación es la que sigue:

$$S_a = S_T \times A_a \times F_a \times I$$

Dónde:

ST: Coeficiente de amplificación sísmica.

Aa: Coeficiente de aceleración horizontal pico efectiva.

Fa: Coeficiente de amplificación.

I: Coeficiente de importancia.

A continuación, se detalla el procedimiento empleado para la obtención de los parámetros anteriormente referenciados.

- Coeficiente de Aceleración Horizontal pico Efectiva (Aa)

Para el municipio de San Cristóbal se determinó que pertenece a la zona sísmica 2 y considerando que la estabilidad del Espectro de Respuesta Elástico está dada como 0.635 para todos los tipos de suelos en la Zona Sísmica I. Por consiguiente, una aceleración pico en tierra horizontal efectiva, estimada como 40% de la estabilidad, podría ser calculada como 0.25g para la zona 1 y para la Zona II sería 2/3 de este valor o 0.17g.

- Definición del Tipo de Perfil de Suelo

El tipo de perfil de suelo se definió teniendo en cuenta la clasificación presentada en la tabla A.2.4-1 de la NSR-10.

Tabla 9. Clasificación de los perfiles de suelo

TIPO DE PERFIL	DESCRIPCIÓN	DEFINICIÓN
A	Perfil de roca competente	Vs mayor o igual a 1500 m/s
B	Perfil de roca con rigidez media	Vs entre 1500 y 760 m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante	Vs entre 760 y 360 m/s
	Perfiles de suelo muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	N mayor a 50 o Su mayor o igual a 100 kPa

TIPO DE PERFIL	DESCRIPCIÓN	DEFINICIÓN
D	Perfiles de suelo rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante	Vs entre 360 y 180 m/s
	Perfiles de condiciones suelo que cumplan con cualquiera de las dos	N entre 50 y 15 o Su entre 100 kPa y 50 kPa
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante	Vs menor de 180 m/s
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	IP mayor a 20 W mayor a 40% Su menor de 50 kPa

Fuente: Adoptado y modificado de NSR-10. Tabla A.2.4-1.

Con base en lo anterior, para las Unidades Geológicas cartografiadas se definieron los siguientes tipos de perfil, según sus propiedades.

Tabla 10. Definición del tipo de perfil por Unidad Geológica

SIM	FORMACIÓN	COMPOSICIÓN	Fa	PERFIL
1	Complejo Duarte	Rocas ultramáficas-máficas, dominado por ultramafitas	1	B
2	Complejo Duarte	Rocas volcánicas máficas- ultramáficas, predominancia de basalto Rocas volcánicas máficas- ultramáficas, predomin	1.2	C
3	Formación Arroyo Jigüey	Rocas volcánicas masivas de caracter intermedio-ácido, con metamorfismo de contacto	1.2	C
4	Formación Arroyo Jigüey	Rocas volcánicas masivas, ácidas-intermedias-básicas con metamorfismo de contacto	1.4	D

SIM	FORMACIÓN	COMPOSICIÓN	Fa	PERFIL
5	Metapiroxenita	Metapiroxenita, hornblendita (metamorfismo de contacto)	1.2	C
6	Formación Tireo	Rocas piroclásticas, básico-intermedio, con metamorfismo	1.2	C
7	Formación Tireo	Cenizas, tobas de lapilli, tobas litoclásticas	1.4	D
8	Tonalita	Tonalita	1	B
9	Granito	Granito y granodiorita	1	B
10	Formación Loma Rodriguez	Caliza estratificada, en parte margosa	1.2	C
11	Formación Valdesia	Alternancia de arenisca, arenisca gravosa, limolita	1.2	C
13	Formación Iguana	Conglomerados con intercalaciones de arenisca y marga y marga	1.2	C
16	Formación Fort Resolue	Calizas	1.2	C
17	Formación Fort Resolue	Conglomerado de caliza	1.2	C
21	Formación Fort Resolue	Conglomerados y areniscas	1.2	C
22	Formación Fort Resolue	Alternancias de conglomerado, arenisca gravosa, arenisca, limo y marga calcárea	1.2	C
23	Formación San Cristóbal	Marga arenosa con capas de arenisca calcárea	1.2	C
25	Grupo Ingenio Caei	Conglomerados, arenas, limos y calizas	1.2	C
27	Grupo Ingenio Caei	Calizas, calcarenitas y arenas finas	1	B
28	Formación Llanura Costera	Arena con estratificación deltaica	1.2	C
29	Formación Yanigua	Margas amarillentas y calizas	1.2	C
29	Formación Yanigua	Margas amarillentas y calizas	1.2	C
30	Formación Los Haitises	Calizas arrecifales y calizas	1.2	C
32	Diques básicos	Ocurrencia frecuente de diques básico	1.4	D
33	Formación La Isabela	Calizas arrecifales, calciruditas y calcarenitas	1	B
36	Formación Llanura Costera	Arena calcarea con estratos de grava	1.2	C
37	Llanura de inundación	Gravas, arenas y lutitas	1.2	C
38	Penillanura relictas	Penillanura relictas	1.2	C
40	Terraza baja	Canto, grava, arena y limo	1	B
42	Terraza alta	Canto, grava, arena y limo	1.2	C
43	Depósitos coluvioaluviales	Arenas y lutitas con cantos	1.2	C
45	Fondos de valle	Conglomerados, gravas y arenas	1	B

Fuente: Elaboración propia

- Coeficiente de Amplificación (Fa)

Los valores de Fa están consignados en la siguiente tabla, coeficiente que se encuentra en función de Aa y del tipo de perfil previamente definido. Para valores intermedios de Aa se permite interpolar entre los valores del mismo tipo de perfil.

Tabla 11. Valores propuestos coeficiente Fa

TIPO DE PERFIL	INTENSIDAD DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS				
	AA<0,1	AA=0,2	AA=0,3	AA=0,4	AA>0,5
A	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
D	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
E	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9

Fuente: Adoptado y modificado de NSR-10. Tabla A.2.4-3

- Coeficiente de Importancia (I)

Este coeficiente está en función del grupo de uso. La contienen los cuatro (4) grupos definidos por la normativa NSR-10.

Tabla 12. Clasificación grupo de uso

GRUPO	TIPO DE ESTRUCTURA
I	Estructuras de ocupación normal
II	Estructuras de ocupación especial
III	Estructuras de atención a la comunidad
IV	Edificaciones indispensables

Fuente: Adoptado y modificado de NSR-10. Tabla A.2.4-3

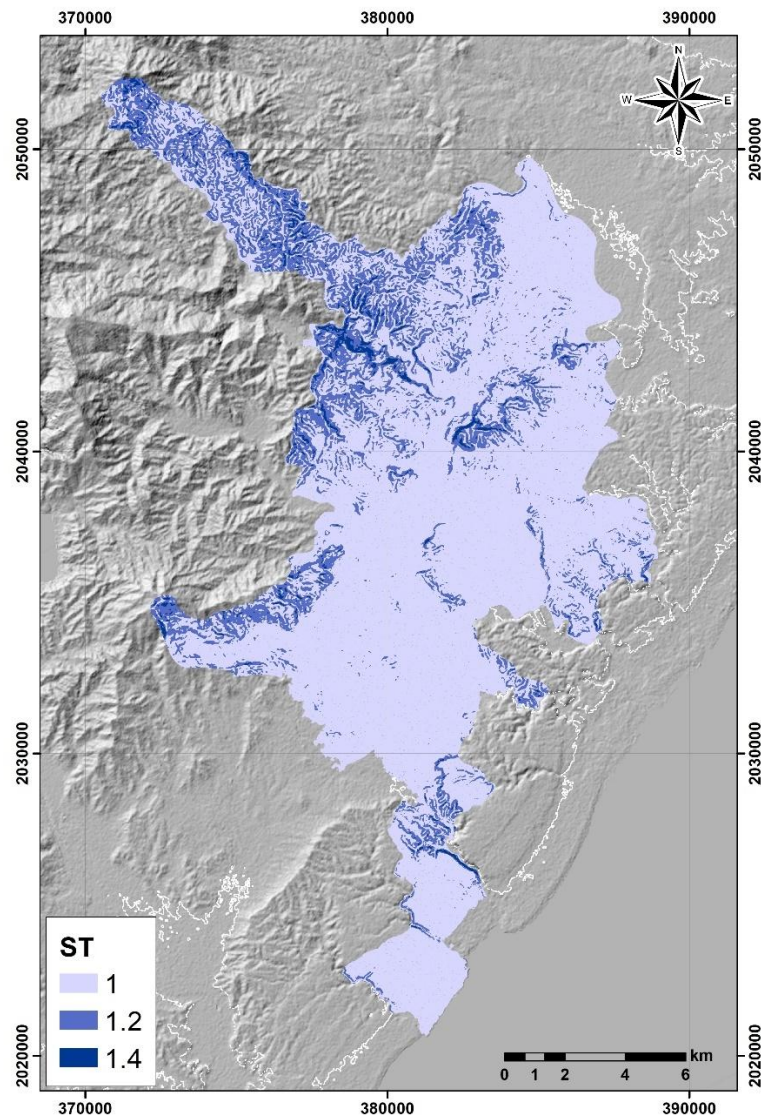
Para el municipio de San Cristóbal, se definió el primer grupo de uso, al cual la norma sismo resistente le asigna un coeficiente de importancia de 1.00.

- Coeficiente Amplificación Sísmica (ST)

El factor de amplificación sísmica se definió de acuerdo a lo establecido por el Euro Código, el cual asigna un valor de amplificación, considerando la topografía (pendiente) que presenta la zona en estudio. A grandes rasgos, establece para pendientes entre los 15 y 30°, un factor de amplificación igual a 1.2. En caso de que la pendiente del talud o ladera supere los 30°, el valor de amplificación será de 1.4.

Partiendo del mapa de pendientes generado, le fue asignado a cada unidad de trabajo (pixel), el valor de amplificación sísmica (ST) correspondiente.

Figura 20. Coeficiente Amplificación Sísmica (ST)

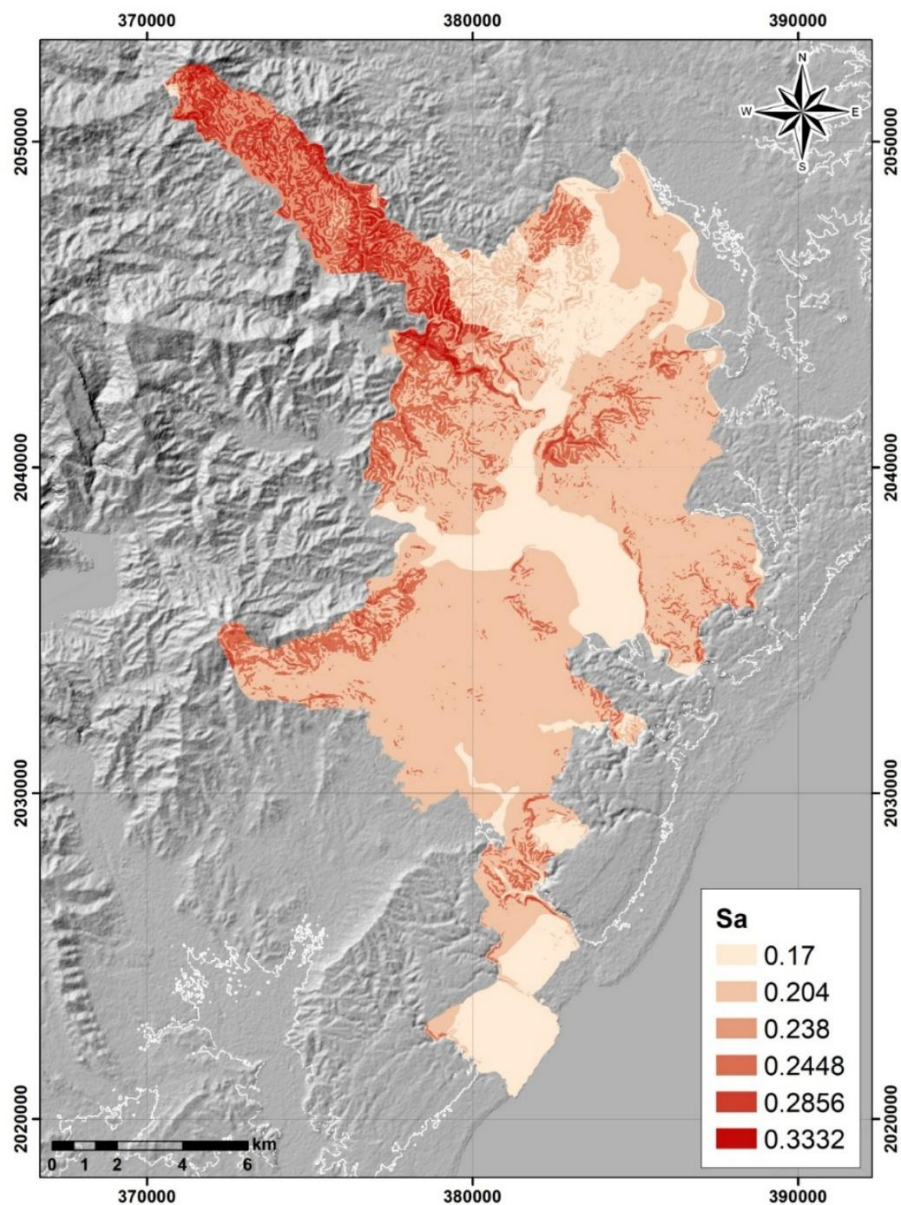


Fuente: Elaboración propia

- Aceleración Sísmica (Sa)

A continuación, se calcula la aceleración sísmica, insumo para la evaluación y zonificación de la amenaza por lo movimientos en masa para del municipio de San Cristóbal, resultado de la aplicación del procedimiento anteriormente descrito.

Figura 21. Aceleración Sísmica (Sa)



Fuente: Elaboración propia

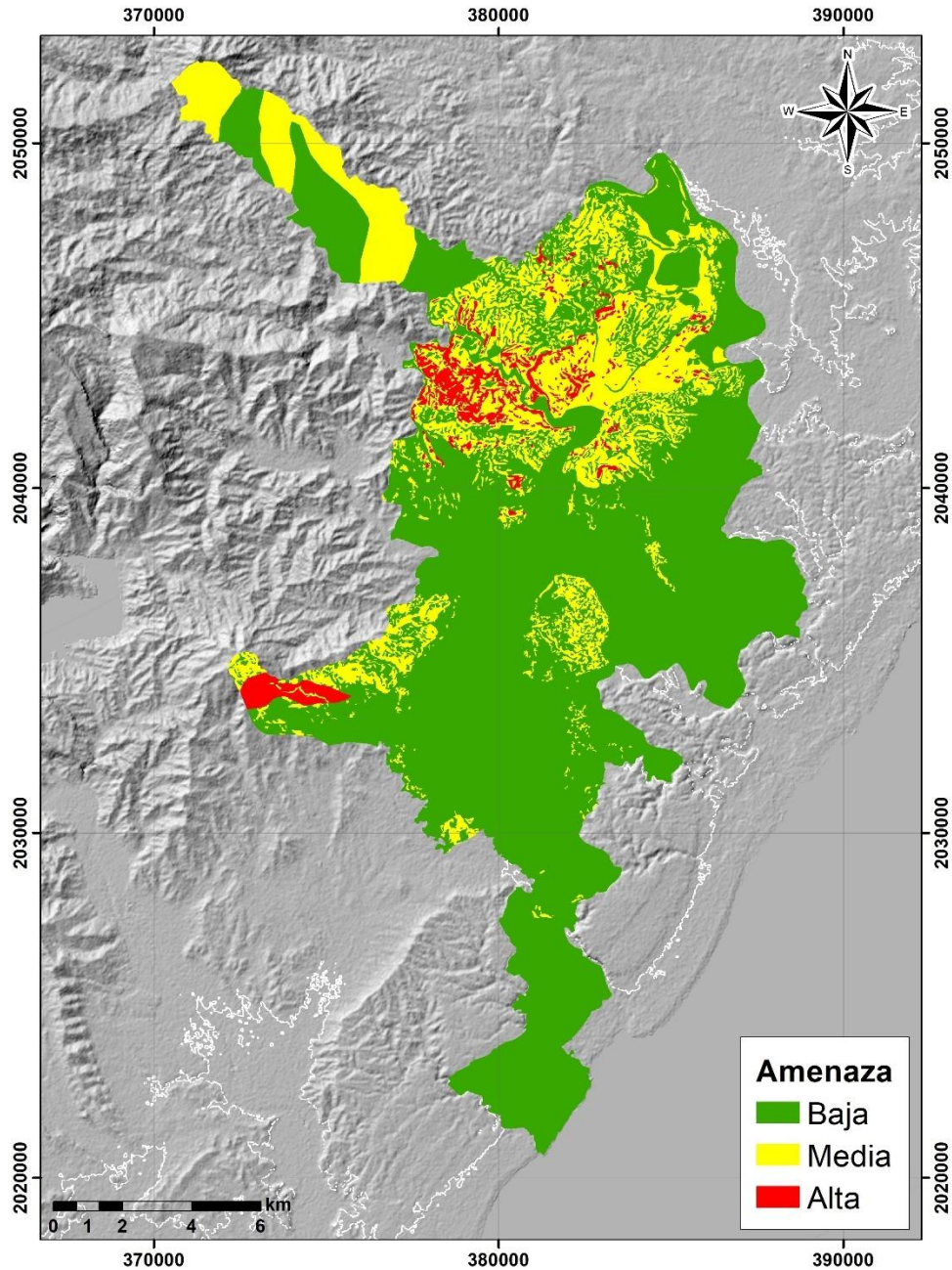
5.7.1.3. Generación del Mapa de Amenaza por Movimientos en Masa

Para el análisis de amenaza la metodología empleada se basa en un análisis de probabilidad espacial y probabilidad temporal. Una vez definida la susceptibilidad, esta se caracterizó con la

frecuencia de ocurrencia de los tipos de movimientos en masa analizados. Posteriormente se evaluó con los factores detonantes (lluvia o sismo) con el fin de definir la probabilidad temporal de ocurrencia de un movimiento en masa (SGC, 2017).

A continuación, se ilustra la zonificación de la amenaza por fenómenos de movimientos en masa del municipio de San Cristóbal:

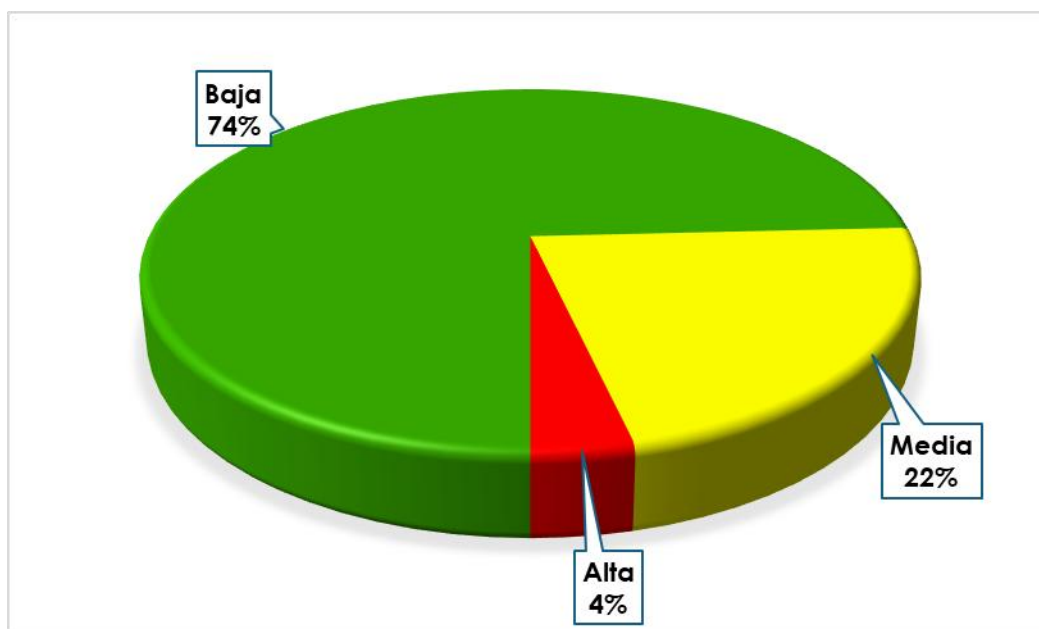
Figura 22. Amenaza por movimientos en masa



Fuente: Elaboración propia

El municipio del San Cristóbal presenta un 4% del territorio en amenaza por movimientos en masa alta y corresponde principalmente a laderas de fuertes pendientes, algunas de las cuales presentan procesos morfodinámicos activos asociados a fenómenos de movimientos en masa. El 22% del municipio presenta amenaza media a movimientos en masa y corresponde a laderas con procesos morfodinámicos intermitentes, y el 74% del municipio presenta amenaza baja.

Figura 23. Porcentaje de amenaza por movimientos en masa



Fuente: Elaboración propia

5.7.1.4. Normas y lineamientos para la mitigación, restricción y/o prevención de riesgo por amenazas por Movimientos en Masa en suelo rural

Con base en los resultados de los estudios básicos de amenaza por Movimientos en Masa, el equipo consultor para efectos del análisis de la condición de Amenaza establece que estas áreas generarán restricción asociada a procesos urbanísticos en los polígonos del municipio donde se proyecta desarrollo, teniendo en cuenta que estos eventos responden en su mayoría a causas naturales e incluye factores climáticos y topográficos.

Normas y lineamientos generales

- Para las áreas sin ocupar zonificadas en amenaza alta se debe realizar el monitoreo de la ocurrencia de deslizamientos e inundaciones al igual que su recuperación mediante la implementación de medidas como la revegetalización, recuperación de cauces de ríos y quebradas que no permitan que aumente la amenaza.

- En áreas en donde se presentan una condición de amenaza se recomienda implementar medidas no estructurales orientadas a la prohibición y/o restricción de la construcción de nueva infraestructura, esto con el fin de que se generen nuevos escenarios de riesgo. El desarrollo de estas áreas se condiciona a la elaboración de los estudios detallados. Los estudios podrán estar a cargo del gestor y/o promotor y/o urbanizador dentro del trámite de los instrumentos de planeamiento intermedio y de licenciamiento urbanístico.
- En las áreas en condición de amenaza y en condición de riesgo, se recomienda elaborar estudios detallados de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, con el fin de establecer las zonas de riesgo alto mitigable y no mitigable.
- Los estudios detallados en zonas en condición de amenaza no ocupadas deben estar en caminados en la ejecución de obras que permitan mitigar la amenaza.
- Las áreas que se definan en los estudios detallados como zonas de riesgo alto no mitigable se deben destinar como zonas con uso de suelo de protección y que por tanto tienen restringida la posibilidad de urbanizarse.
- Las personas y/o estructuras que se encuentren en zonas de riesgo alto no mitigable se deben reubicar.
- Con el fin de disminuir la vulnerabilidad de las estructuras proyectadas, se recomienda la divulgación y promoción de las normas de urbanismo y construcción.
- Para futuros desarrollos urbanísticos en las zonas recomendadas para la expansión urbana, se recomienda realizar estudios geotécnicos de acuerdo con el reglamento vigente.
- En las zonas de expansión urbana se recomienda establecer áreas de aislamiento o protección para las edificaciones que se proyecten en la parte superior o inferior.

Infraestructuras y Obras de Control

Construcción de Infraestructuras:

- Desarrollar y mantener muros de contención, terrazas y sistemas de drenaje para estabilizar las áreas propensas a remociones en masa, de acuerdo con la zonificación de amenaza por movimientos en masa.
- Implementar barreras naturales y artificiales para detener y redirigir el flujo de materiales durante deslizamientos.

Mantenimiento:

- Realizar mantenimiento periódico de infraestructuras de control, como muros de contención y sistemas de drenaje, para asegurar su funcionamiento efectivo.
- Desarrollar programas de monitoreo y mantenimiento de laderas y pendientes para detectar signos de inestabilidad tempranamente.

Planificación y Ordenamiento Territorial

Regulación del Uso del Suelo:

- Implementar políticas de ordenamiento territorial que desalienten la urbanización y el desarrollo agrícola intensivo en áreas de alta amenaza de remoción en masa.
- Promover prácticas agrícolas sostenibles que estabilicen el suelo, como la agroforestería y el uso de cultivos de cobertura.

Conservación de Ecosistemas:

- Proteger y restaurar la vegetación natural en laderas y áreas inestables para mejorar la cohesión del suelo y reducir la erosión.
- Fomentar la reforestación y la protección de la cubierta vegetal en áreas propensas a remociones en masa.

Sistemas de Alerta Temprana y Monitoreo

Alerta Temprana:

- Implementar sistemas de alerta temprana que utilicen tecnologías avanzadas, como sensores tipo geófono, termocupla, pluviómetro, higrómetro, inclinómetro o estaciones meteorológicas, para proporcionar alertas rápidas y precisas a la comunidad.
- Desarrollar y mantener protocolos de comunicación y respuesta que involucren a autoridades locales, organizaciones comunitarias y la población en general.

Monitoreo Continuo:

- Establecer mecanismos de monitoreo geotécnico para realizar un seguimiento constante a las áreas con amenaza media y alta.
- Utilizar datos de monitoreo para mantener registro actualizado del histórico de eventos.

Educación y Concienciación Comunitaria

Programas de Educación:

- Implementar programas de educación y concienciación dirigidos a la población rural para fomentar una comprensión adecuada de los riesgos de remoción en masa y las medidas de prevención.
- Realizar talleres, simulacros y campañas informativas para enseñar a la comunidad cómo actuar antes, durante y después de un evento de remoción en masa.

Participación Comunitaria:

- Fomentar la participación activa de la comunidad en la planificación y ejecución de medidas de mitigación.
- Crear comités locales de gestión de riesgo que trabajen en coordinación con las autoridades municipales y regionales.

Fortalecimiento Institucional y Legal

Actualización de Normativas:

- Desarrollar e implementar políticas específicas para la protección de áreas vulnerables y la gestión de emergencias por remociones en masa.

Capacitación y Entrenamiento:

- Aprovechar el potencial del cuerpo de bomberos local para proveer capacitación regular, así como del uso de tecnologías de alerta temprana.

Programas de Investigación

Investigación Aplicada:

- Promover la investigación sobre las dinámicas geológicas y el impacto del cambio climático en la estabilidad de laderas y suelos en el municipio.
- Desarrollar estudios que evalúen la efectividad de las medidas de mitigación implementadas y que identifiquen oportunidades de mejora.

Innovación Tecnológica:

- Colaborar con instituciones académicas y de investigación para desarrollar soluciones adaptadas a las condiciones locales de San Cristóbal.

Implementación y Monitoreo

Planes de Contingencia:

- Desarrollar y mantener planes de contingencia específicos para enfrentar eventos de remoción en masa, incluyendo protocolos claros de evacuación y respuesta.

Monitoreo y Evaluación:

- Realizar evaluaciones periódicas de las medidas implementadas para asegurar su eficacia y realizar ajustes según sea necesario, en el marco de los estudios detallados de las áreas en condición de riesgo.

- Utilizar indicadores de desempeño para medir el impacto de las estrategias de mitigación y prevención y publicar informes anuales de progreso.

5.7.2. Delimitación y zonificación de amenaza por inundaciones

En el ordenamiento territorial un factor muy importante para tener en cuenta desde el año 2011 es la gestión del riesgo, poder determinar cuáles son eventos de origen natural que pueden afectar y dejar expuesta a una comunidad, su economía, estructuras físicas y los servicios ecosistémicos de los cuales se abastece, hace que sea necesario plantear medidas que permitan minimizar el grado de afectación de estas y reducir los daños. Esto puede lograrse con el análisis particular de cada situación y de conocer el papel que desempeña la sociedad en la utilización de su territorio.

Este análisis fue realizado con base en información primaria y secundaria de diversas fuentes: Las fuentes de información primaria se basan en los datos obtenidos en las campañas de campo, mientras que la información secundaria parte de los reportes por parte de entidades oficiales.

Para el manejo y la gestión del riesgo se realizó la identificación y análisis de la susceptibilidad y de la amenaza en el municipio de San Cristobal por fenómenos de inundaciones, con la ayuda de información temática de geología, geomorfología, cobertura y uso del suelo, eventos históricos, e interpretación de imágenes satelitales disponibles.

5.7.2.1. Marco Teórico

La diversidad de ambientes geográficos, la variabilidad climática y la influencia antrópica cerca de los cauces, son los principales causantes de afectaciones a los sistemas hídricos ya que producen cambios en su dinámica fluvial, alterando su topografía, dirección y volumen, dando lugar a fenómenos como inundación, socavación, sedimentación, etc., requiriendo así un tratamiento oportuno, pues de lo contrario se podrían ocasionar grandes afectaciones sociales, ambientales y económicas.

Los eventos de inundación lenta se dan cuando al ocurrir una precipitación capaz de saturar el terreno, el volumen remanente escurre por los ríos y arroyos o sobre el terreno. Conforme el escurrimiento avanza hacia la salida de las cuencas, se incrementa proporcionalmente con el área drenada, si el volumen que fluye por el cauce excede la capacidad de éste, se presentan desbordamientos sobre sus márgenes y el agua desalojada puede permanecer horas o días sobre el terreno inundado. Este efecto se presenta en zonas donde la pendiente es baja, y por ende, la capacidad de los ríos disminuye provocando desbordamientos que generan inundaciones en las partes aledañas (CENAPRED, 2004).

El análisis de la amenaza por inundación se mide en función de la frecuencia de ocurrencia y para su zonificación se hace necesario realizar un análisis de la dinámica fluvial, para ello se identificaron

y clasificaron las diferentes geoformas de acuerdo con su relevancia en la dinámica actual y con el inventario o registro de eventos se caracterizan el tipo de flujo y la altura de la lámina de agua.

A partir de la información cartográfica y la información temática como la geología, geomorfología, cobertura y uso del suelo, eventos históricos, elevación e interpretación de imágenes satelitales disponibles, se realizó la zonificación de la susceptibilidad, la evaluación de la amenaza y la identificación de las necesidades de información para el avance en el conocimiento de las inundaciones en el municipio de San Cristóbal.

5.7.2.2. Alcance

- Analizar la cartografía geomorfológica considerando las formas del terreno y el catálogo de eventos disponible que permita delimitar las zonas susceptibles de ser afectadas por inundaciones en el municipio de San Cristóbal.
- Realizar el análisis multitemporal de las imágenes disponibles, con el fin de detectar posibles cambios de dirección del drenaje y áreas históricamente afectadas por inundaciones.
- Desarrollar el mapa de amenaza por inundaciones para el municipio de San Cristóbal, a partir del análisis de ocurrencia de los eventos, el análisis multitemporal de imágenes y de las áreas con susceptibilidad media y alta.
- Identificar las necesidades de información para el avance en el conocimiento de las inundaciones en el municipio de San Cristóbal.

5.7.2.3. Herramientas e insumos

Los insumos empleados son los siguientes:

- Modelo Digital de Terreno – MDT.
- Mapa de Geomorfología a un nivel de detalle 1: 25.000.
- Registro histórico de eventos de inundación.
- Fotointerpretación de las zonas de inundación y divagación de los ríos principales.

5.7.2.4. Zonificación de la Susceptibilidad por Inundación Rural

De acuerdo con el protocolo para la gestión del riesgo, las inundaciones son un fenómeno de anegamiento temporal de terrenos que no están normalmente cubiertos de agua y sedimentos. Debido a la amplia variedad de definiciones existente en el ámbito técnico, científico y de toma de decisiones, se realiza una síntesis de la tipología de inundaciones de acuerdo con UNAL & SGC (2013).

De acuerdo con el mecanismo de generación: las inundaciones pueden ser: fluviales, pluviales, costeras o de otro tipo. Las **inundaciones fluviales** son inundaciones producidas por el flujo excedente de agua y sedimentos transportados por corrientes (ríos, quebradas), el cual desborda la

capacidad de transporte del cauce. Las inundaciones fluviales pueden ser lentas y repentinas. Las inundaciones fluviales lentas son producidas normalmente por precipitaciones prolongadas, pero también pueden ser producidas por huracanes, ciclones tropicales, deshielo, entre otras. Las inundaciones fluviales repentinas son producidas normalmente, por precipitación convectiva, pero también pueden ser producidas por la movilidad de grandes volúmenes de flujos provenientes de glaciares, movimientos en masa, escombros o represas. Las **inundaciones pluviales** se producen por: la acumulación de agua precipitada en una determinada superficie (generalmente plana o cóncava) sin que esta provenga del desbordamiento del cauce; también puede ser producida por la incapacidad de los sistemas de alcantarillado o canales de desagüe en eventos de lluvia de gran magnitud o intensidad. Las **inundaciones costeras** pueden ser originadas por el aumento en la marea causada por fuertes vientos de tormenta, ciclones tropicales o extra tropicales, o también por las tormentas de mar y los tsunamis. **Otro tipo** de inundaciones puede ser el producido por eventos extraordinarios como: terremotos, erupciones volcánicas, rotura de infraestructuras hidráulicas de almacenamiento de agua.

De acuerdo con la duración: las inundaciones pueden ser: súbitas o de tipo torrencial; lento o de tipo aluvial; y encharcamiento. Las **inundaciones súbitas o de tipo torrencial** suelen producirse en ríos de montaña o en corrientes cuyas áreas de drenaje presentan fuertes pendientes y suelen ser producidas por crecidas repentinas y de corta duración (minutos a horas). Las **inundaciones lentas o de tipo aluvial** se producen por el desbordamiento del cauce anegando áreas planas aledañas al mismo y suelen ser originadas por crecidas progresivas y de larga duración (horas a días, inclusive meses en algunas zonas del país). El fenómeno de **encharcamiento** se origina por la saturación del suelo en zonas moderadamente onduladas a planas con duración de horas a días y en general pueden darse por ausencia o falencia en los sistemas de drenaje de aguas pluviales en áreas urbanizadas.

La zonificación de la susceptibilidad se realiza mediante la incorporación de la metodología propuesta por el Fondo Adaptación (2014) en el Protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los POMCA, la cual hace énfasis a la identificación de geoformas asociadas a inundación y la caracterización de eventos históricos.

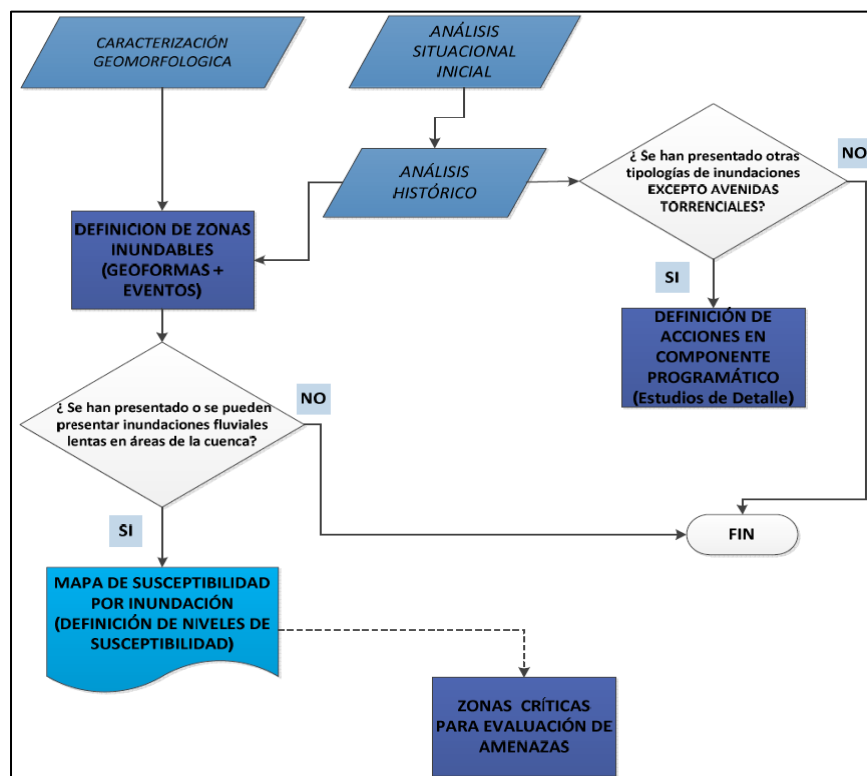
5.7.2.4.1. Metodología Empleada para la Zonificación de la Susceptibilidad

Las inundaciones son definidas en el glosario internacional de hidrología (OMM/UNESCO, 1974) como un aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce definiéndose como nivel normal aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños, es decir, una elevación mayor a la habitual en el cauce, por lo que puede generar pérdidas.

Para llevar a cabalidad el desarrollo de los objetivos propuestos se ha desarrollado la metodología para la evaluación de la susceptibilidad, a partir del protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los POMCA de acuerdo con los alcances técnicos del proyecto.

En la Figura 24, se muestra el mapa conceptual de la metodología que se sigue para alcanzar el objetivo final de este estudio que es la evaluación de la amenaza por eventos de inundación.

Figura 24. Esquema metodológico para la obtención de la susceptibilidad por inundaciones



Fuente: Protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los POMCA de acuerdo con los alcances técnicos del proyecto, Fondo Adaptación, 2014.

5.7.2.4.2. Análisis de los eventos históricos

Los antecedentes e información recopilada para la zonificación de amenaza por inundación se basaron en datos específicos de las áreas en riesgo previamente definidas.

5.7.2.4.2.1. Base de Datos Desinventar

La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres, (antes Red de Estudios Sociales sobre Desastres en América Latina), ha desarrollado un software para la captura y consulta de desastres y ha llevado a cabo el registro de estos en la base de datos a manera de inventario de desastres, sistema que ha denominado DesInventar.

Este sistema tiene el fin de proveer a los diversos actores en actividades de prevención y mitigación de desastres de mejores capacidades para el acopio, procesamiento, análisis y representación

homogénea de los desastres, entendidos como los efectos adversos sobre poblaciones, bienes e infraestructura vulnerables por fenómenos socionaturales y naturales.

En el presente aparatado se evidencian los registros de eventos asociados a inundación en el municipio de San Cristóbal. La información presentada en la Tabla 13; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se recopiló tomando como referencia de la Base de Datos y el sistema de inventario de efectos de desastres DESINVENTAR.

Tabla 13. Eventos Históricos DesInventar municipio de San Cristóbal

Evento	Fecha	Observaciones	Descripción de la Causa	Muertos	Heridos
RAIN	1979/7/29	Ver fichas 1490 a 1492. (DI6Author : DI6Date :)	Lluvias torrenciales		
FLOOD	1981/6/3	Ver fichas 812 a 818. (DI6Author : DI6Date :)	Lluvias torrenciales y desbordamientos		
FLOOD	1981/5/22	Evacuados 26 familias. Ver fichas 793 a 798. (DI6Author : DI6Date :)	Lluvias torrenciales y desbordamientos		
RAIN	1988/8/25	Ver fichas 649 a 652. (DI6Author : DI6Date :)	Depresión tropical		
RAIN	1988/7/13	Varias comunidades incomunicadas por las fuertes lluvias. (DI6Author : DI6Date :)	LLuvias torrenciales		

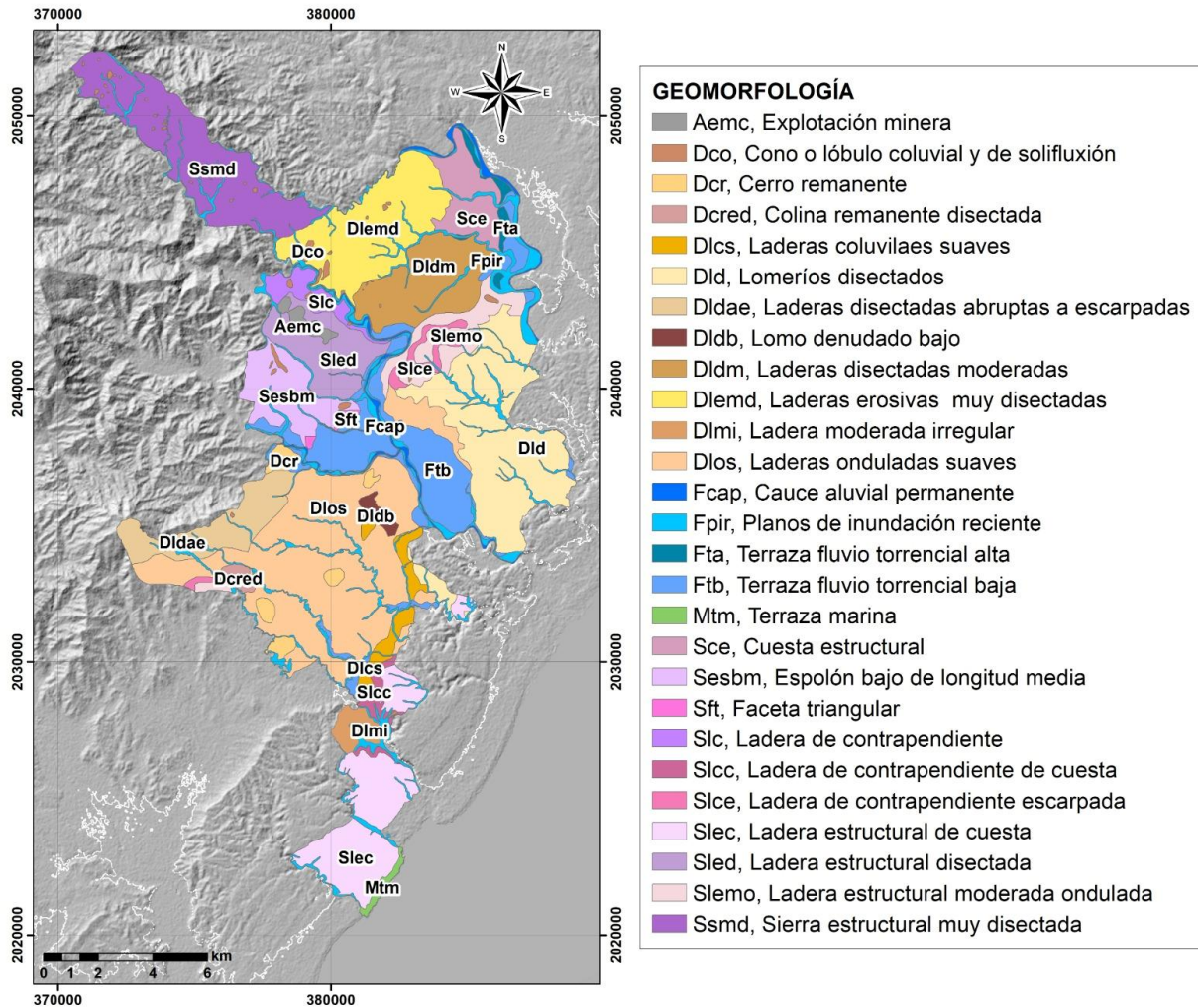
Fuente: DesInventar 2025

5.7.2.4.3. Análisis de geoformas asociadas a inundaciones

Para el análisis de las inundaciones dentro del municipio de San Cristóbal, se tuvieron en cuenta los procesos y las geoformas asociadas a la dinámica fluvial, esto debido a que van a ser las áreas más susceptibles para presentar eventos de inundaciones por desborde de los cauces en creciente progresivas o súbitas. Con el resultado de la interpretación geomorfológica se analizan únicamente las geoformas fluviales que permitieron caracterizar los procesos morfodinámicos dominantes en los fenómenos de inundación, de acuerdo con las características texturales y geométricas.

Las principales características morfológicas utilizadas en el proceso de interpretación y zonificación geomorfológica se basaron en la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC-metodología Carvajal-2011), que se encarga de la evaluación de las amenazas naturales, y utiliza la interpretación cartográfica y define unidades y subunidades geomorfológicas para los ambientes fluviales y glaciares. Dentro de las geoformas que se encuentran asociadas a los eventos de inundación en el municipio de San Cristóbal, están los cauces aluviales, planos de inundación y terrazas fluvio torrenciales. Ver Figura 25.

Figura 25. Subunidades geomorfológicas del municipio de San Cristóbal

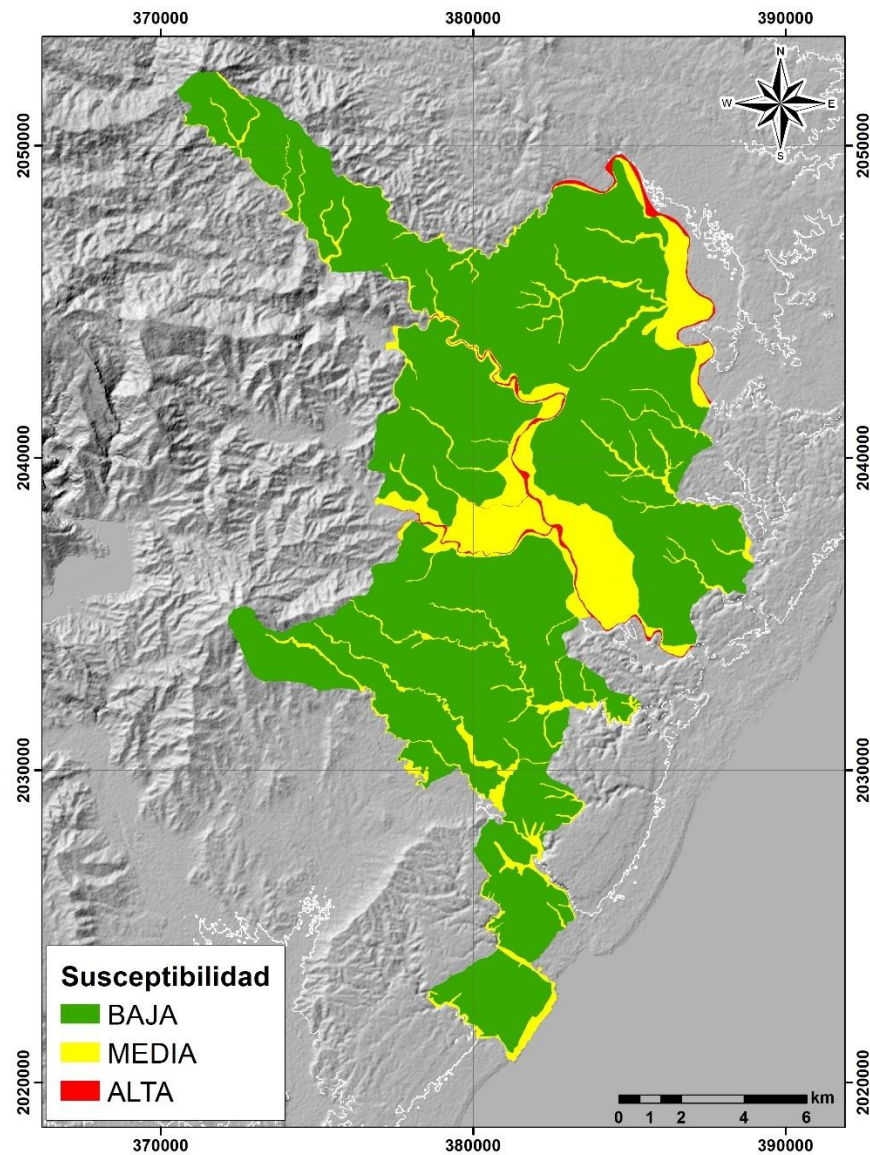


Fuente: Elaboración propia

5.7.2.4.4. Susceptibilidad por inundaciones

Con el análisis de las geoformas asociadas a inundaciones se obtiene la susceptibilidad por inundaciones para el municipio de San Cristóbal para el cual se observa que el relieve del municipio puede dividirse principalmente en dos zonas: la primera corresponde a la parte montañosa que se compone principalmente de geoformas estructurales de alto relieve como sierra y laderas estructurales, y la segunda corresponden a geoformas aluviales como cauces y terrazas. En la Figura 26 se encuentra representado el análisis de susceptibilidad a inundación para el municipio de San Cristóbal con base en la cartografía geomorfológica.

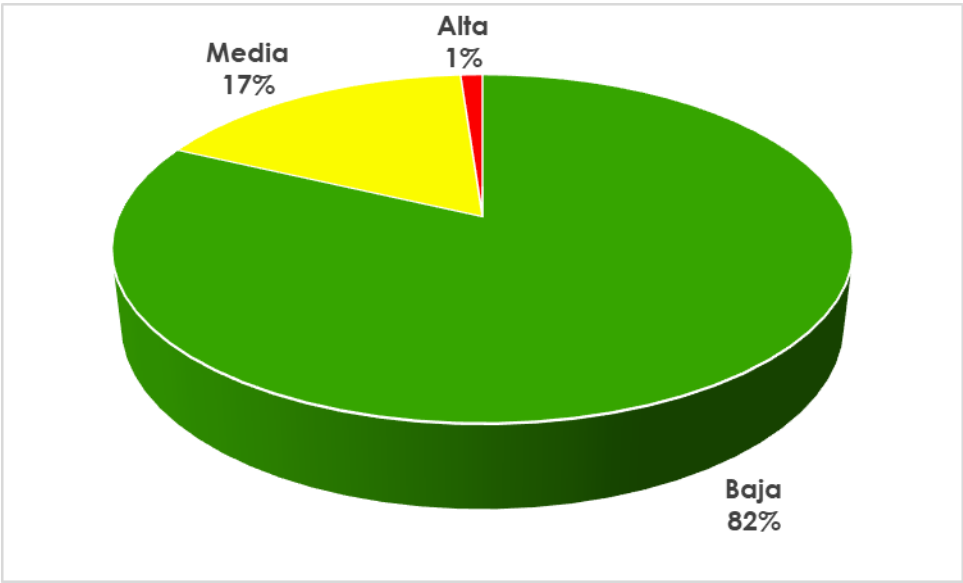
Figura 26. Susceptibilidad inundación por geomorfología en el municipio de San Cristóbal



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 27, se presentan los porcentajes de susceptibilidad a inundación por geomorfología en el municipio de San Cristóbal, estas geoformas se detallan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Como resultado se obtiene que el 1% del municipio se encuentra en una susceptibilidad alta a inundación, un 17% susceptibilidad media, y el 82% en susceptibilidad baja.

Figura 27. Porcentaje de susceptibilidad inundación por geomorfología en el municipio de San Cristóbal



Fuente: Elaboración propia

A partir de la información geomorfológica y los procesos de inundación fluvial se delimitaron y clasificaron las áreas del municipio de San Cristóbal en un rango de susceptibilidad debido a su asociación con los fenómenos de inundación. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se detallan los criterios de clasificación.

Tabla 14. Criterios de selección de zonas de susceptibilidad a inundación por elevación

SUSCEPTIBILIDAD	GEOMORFOLOGÍA	EVENTOS HISTÓRICOS
Susceptibilidad Alta	Geoformas que denotan procesos activos o inundaciones periódicas. (Cauces aluviales, Planos de inundación, etc.).	Áreas donde coincidan dos o más puntos o polígonos de eventos históricos.
Susceptibilidad Media	Geoformas que denotan procesos intermitentes. (Terrazas, y geoformas lejanas del cauce etc.).	Áreas donde al menos un punto o polígono haya sido identificado.
Susceptibilidad Baja	Geoformas que denotan procesos antiguos. (Geoformas otro origen Morfogenético como denudacionales y estructurales).	Sin registros históricos.

Fuente: Tomado y adaptado del Fondo de adaptación, 2014. Protocolo para la incorporación de la Gestión del Riesgo en los POMCA

5.7.2.5. Zonificación de la Amenaza por Inundaciones

El nivel de amenaza por inundación tiene por finalidad reconocer las áreas que son afectadas por el desborde de los drenajes producto de un aumento del nivel de agua sobre las llanuras aluviales, con esto se obliga a reconocer el comportamiento de las áreas que aportan los caudales a las corrientes principales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas (IDEAM, 2010).

Se clasifican dos tipos de amenaza por inundación:

Inundaciones lentas o progresivas: Se producen en terrenos planos que desaguan muy lentamente y cercanos a las riberas de los ríos donde las lluvias son frecuentes o torrenciales. Muchas de ellas son parte del comportamiento normal de los ríos. Según la topografía estas inundaciones causan diferentes efectos en los sectores, las poblaciones ubicadas en pendientes no se inundan seriamente en cambio las poblaciones con superficies planas o algo cóncavas pueden sufrir inundaciones como efecto directo de las lluvias, independiente de las inundaciones producidas por el desbordamiento de ríos y quebradas, donde se ocasionan el estancamiento de aguas (IDEAM, 2010).

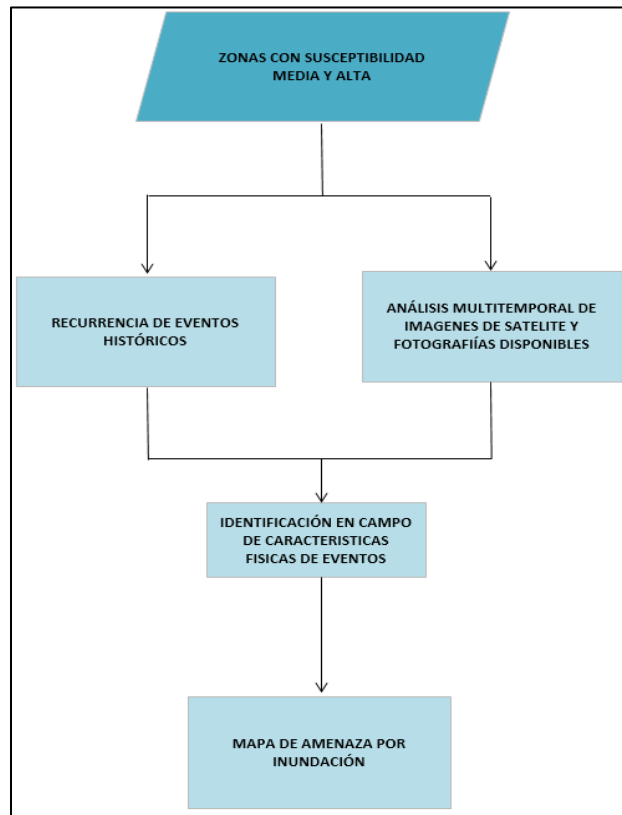
Inundación súbita o repentina: Se producen generalmente en cuencas hidrográficas de altas pendientes por la presencia de grandes cantidades de agua a muy corto tiempo, son causadas por fuertes lluvias, tormentas o huracanes, pueden desarrollarse en hora o minutos. Este tipo de inundación puede arrastrar rocas, tumbar árboles, destruir edificios y otras estructuras, también puede crear nuevos canales de escurrimiento. Los restos flotantes arrastrados pueden acumularse en una obstrucción o represamiento restringiendo el flujo y provocando inundaciones agua arriba del mismo, pero cuando la corriente rompe la represión, la inundación se produce aguas abajo.

A partir de lo anterior y teniendo en cuenta las áreas delimitadas con susceptibilidad media y alta, se realizó la evaluación de las áreas que posiblemente se vean afectadas por inundaciones lentas en el municipio de San Cristóbal.

5.7.2.5.1. Metodología Empleada para la Zonificación de la Amenaza

En la siguiente figura se presenta en una síntesis del método para la zonificación de áreas de amenaza por inundaciones:

Figura 15. Esquema metodológico para la obtención de la amenaza por inundaciones



Fuente: Elaboración propia

Los datos de recurrencia de eventos históricos, análisis geológico - geomorfológico, coberturas vegetales, modelos morfométricos, y análisis multitemporal de las imágenes disponibles, fueron los insumos necesarios para obtener la amenaza por inundación.

5.7.2.5.2. Análisis multitemporal de imágenes satelitales

A partir del análisis multitemporal de imágenes satelitales y los modelos digitales, se identificaron las zonas de divagación de los ríos y caños dentro del municipio de San Cristóbal, de lo cual se evidenciaron cambios en los cauces, meandros abandonados, zona de desbordamiento, y zonas con rasgos de inundación reciente. Adicionalmente se tiene en cuenta el tipo de drenaje principal (ríos meándricos o ríos trenzados).

Estos tipos de drenajes presentan unas características especiales:

Ríos meándricos

- Curvas alternadas unidas por tramos rectos y cortos.
- Erosión en las márgenes exteriores de las curvas.
- Se presentan en canales con pendientes bajas.

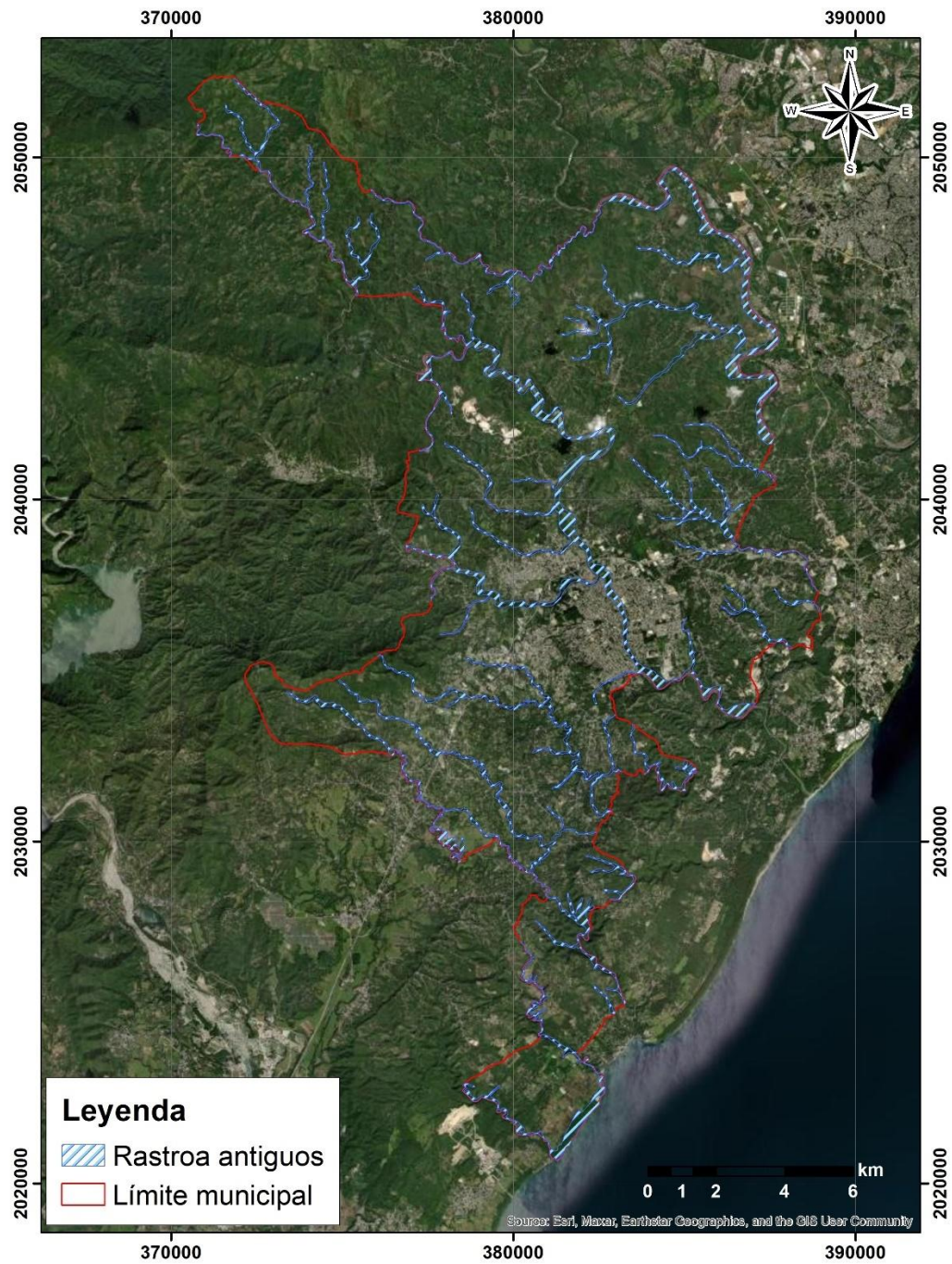
- La carga de sedimentos está compuesta de material fino, principalmente arenas.
- Se forman en valles amplios.

Ríos trenzados

- Muchos canales separados por barras y pequeñas islas.
- Se encuentra en zonas donde son abundantes los sedimentos, descargas de agua, altas y esporádicas y los ríos son sobrecargados con sedimentos.
- Se forman barras durante los periodos de descarga alta que van desviando al río.

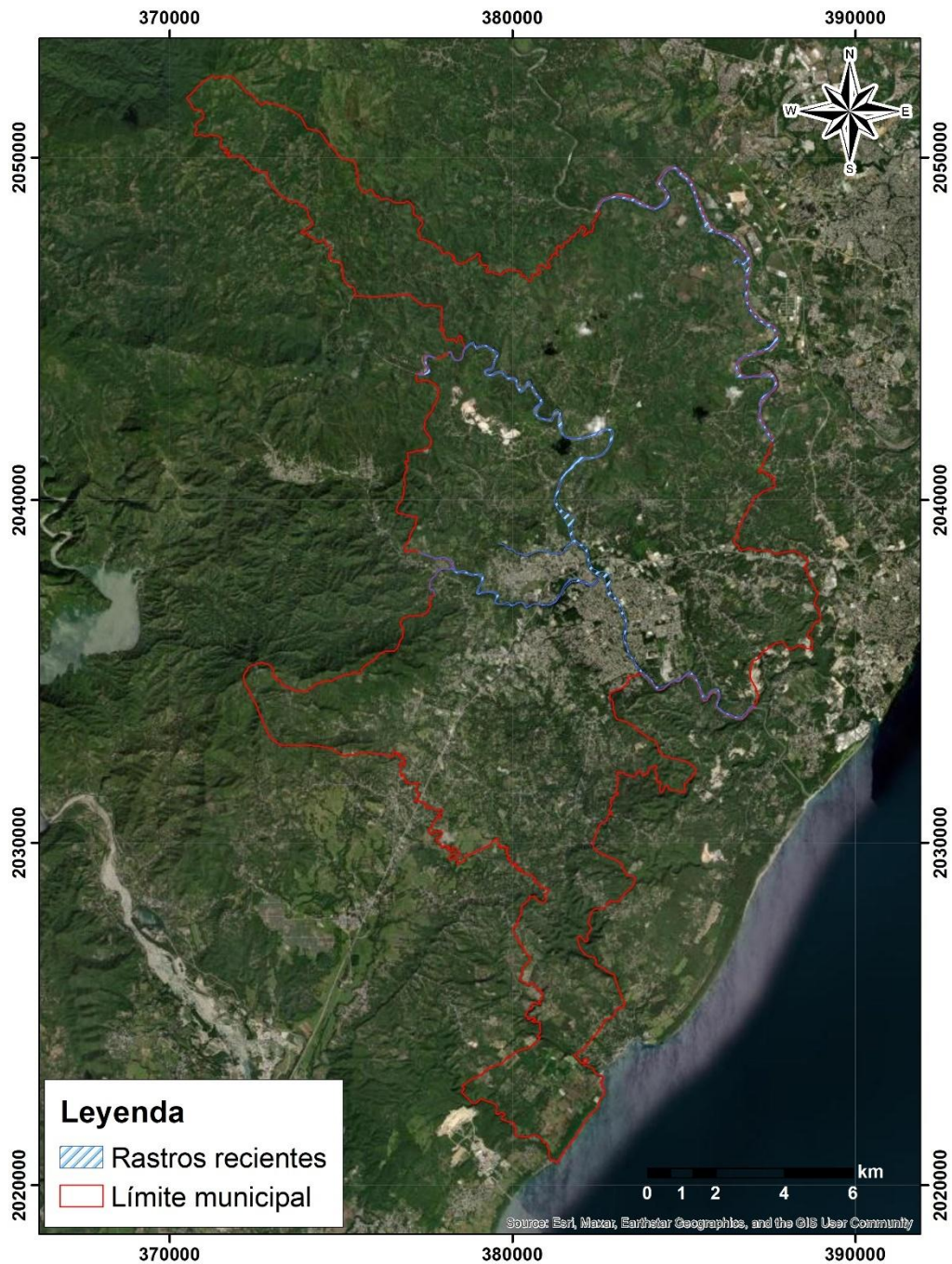
En el área de estudio se identificaron zonas en las cuales se han dado cambios leves en los cauces de los drenajes principales, evidenciado por erosión y migración lateral. En la Figura 28 y Figura 29 se muestra el análisis de las áreas en las que han divagado los cauces aluviales a través del análisis de imágenes satelitales, en las cuales se evidencian las variaciones de la dinámica fluvial.

Figura 28. Rastros antiguos



Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Rastros recientes



Fuente: Elaboración propia

5.7.2.5.3. Generación del mapa de amenaza por inundaciones

Aunque se toma como base la metodología propuesta se incluye algunas variables consideradas por el grupo de profesionales, y se ponderan dependiendo de su grado de influencia en los

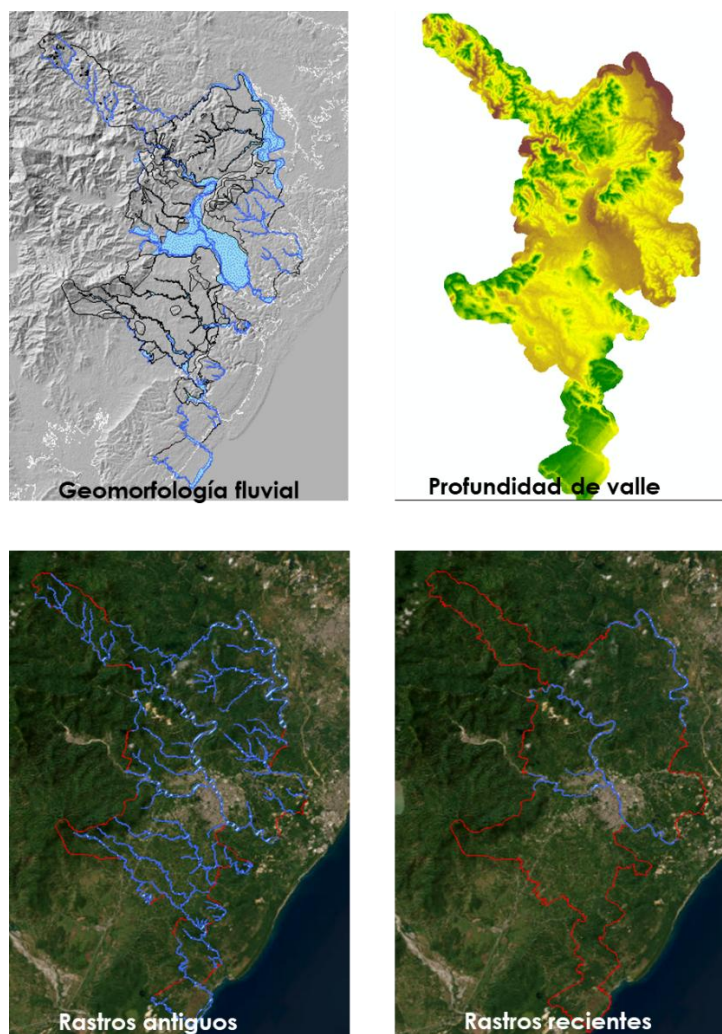
fenómenos de inundación, y se realiza un algebra de mapas mediante herramientas SIG. En la Tabla 16 se presenta la ponderación y en la Figura 30 se encuentran representadas las variables:

Tabla 16. Esquema de ponderación de variables temáticas para el modelo de amenaza por fenómenos de inundación

ID	VARIABLES	PARAMETROS	PONDERACIÓN
1	Geomorfología	Subunidades Fluviales	35%
2	Procesos morfodinámicos asociados a inundaciones	Rastros de inundación recientes	25%
3		Rastros de inundación antiguos	25%
4	Modelo de Elevación Digital	Profundidad Valle (Valley Depth)	15%
5	Registro de Eventos Históricos de Inundación	Recurrencia de eventos históricos	Validador del Modelo de Amenaza

Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Insumos para la zonificación de amenaza



Fuente: Elaboración propia

Se realizó la ponderación y calificación de las variables, con la ayuda de software tipo SIG y se ejecutaron las respectivas operaciones topológicas de la información vectorial de las variables y se generó la suma ponderada de cada una de las variables, para posteriormente definir los rangos de clasificación de la amenaza (baja, media, y alta), que mejor se ajuste a las condiciones del municipio de San Cristóbal. Los rangos se clasificaron de la siguiente manera:

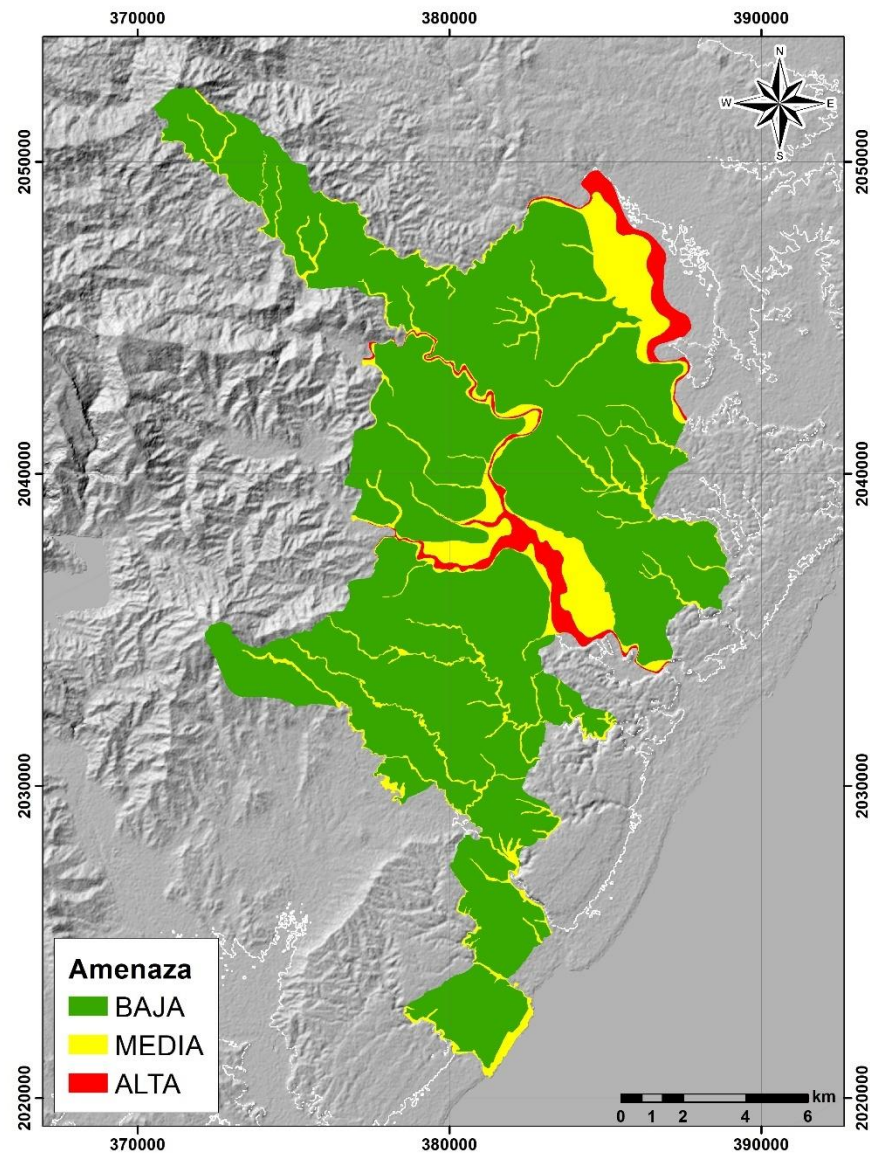
Tabla 17. Rangos estimados para la zonificación de la amenaza por inundación

AMENAZA	RANGOS
Amenaza Alta	65-100%
Amenaza Media	45-65%
Amenaza Baja	0-45%

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 31 se muestra el mapa de la zonificación de amenaza por fenómenos de inundación, el cual es el resultado del análisis de la susceptibilidad, junto con las geoformas asociadas a inundación, cobertura vegetal, modelos de elevación, recurrencia de eventos históricos, e interpretación de imágenes satelitales, en las que se delimitaron las áreas de divagación y socavación de los ríos presentes en el municipio de San Cristóbal.

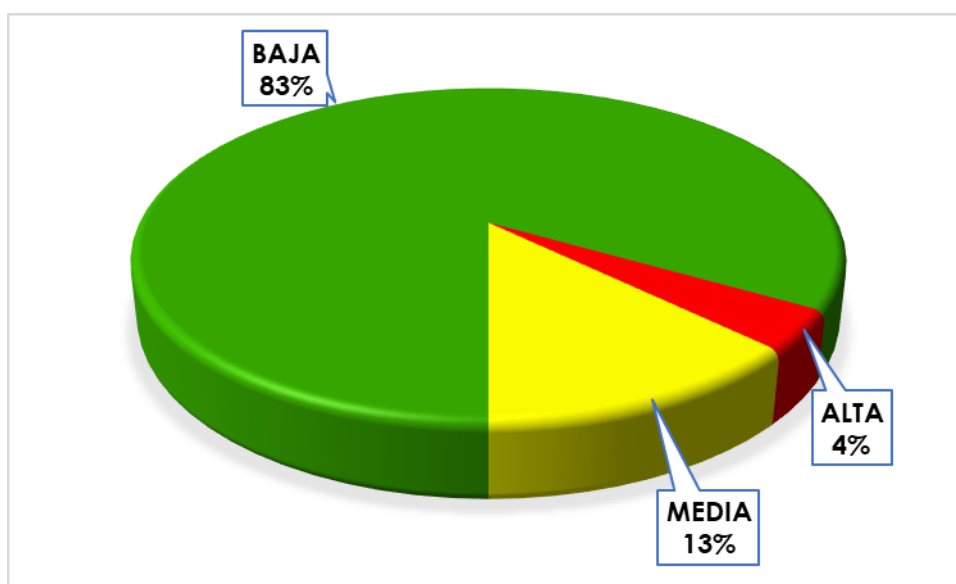
Figura 31. Mapa de amenaza por inundación del municipio de San Cristóbal



Fuente: Elaboración propia

El municipio de San Cristóbal presenta un 4% del territorio en amenaza por inundación alta, y corresponde al modelado Fluvial de los ríos Haina, Yubazo, Nigua y el arroyo Pimentel. El 13% del municipio de San Cristóbal presenta amenaza media a inundación, en cuanto a la amenaza por inundación baja, esta representa el 83%, principalmente por su ubicación en la cual son escasos los fenómenos de inundación.

Figura 32. Porcentaje de amenaza por inundación



Fuente: Elaboración propia

6. Bibliografía

Álzate et al., (2012). Zonificación a escala grande de amenaza por fenómenos de remoción en masa, empleando la herramienta del SIG.

Biggs, J. (2019). Volcanic threat assessment: From hazards to risks. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47(1), 45-68.

Bonham Carter, G. F. (1994). *Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS* (vol. 13). Ottawa: Pergamon Press.

Carvajal, J. H. (2002). Caracterización de la metodología geomorfológica adaptada por INGEOMINAS. Documento interno INGEOMINAS sometido a discusión y modificaciones. 13p. Bogotá.

Carvajal, J.H.P (2011). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológico en Colombia. Servicio Geológico Colombiano.

CHARLTON, R. (2008): *Fundamentals of fluvial geomorphology*. London and New York. Routledge.

Congreso de la República de Colombia. Decreto 1077 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. Actualizado el 5 de diciembre de 2023.

Congreso de la República de Colombia. Decreto 1807 de 2014. Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. Septiembre 19 de 2014.

Congreso de la República de Colombia. Decreto 19 de 2012. Por el cual se dictan normas para suprimir o reformar regulaciones, procedimientos y trámites innecesarios existentes en la Administración Pública. Enero 10 de 2012.

Congreso de la República de Colombia. Decreto 1974 de 2013. Por el cual se establece el procedimiento para la expedición y actualización del Plan Nacional de Gestión del Riesgo. Septiembre 11 de 2013.

Congreso de la República de Colombia. 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 y se dictan otras disposiciones. Abril 14 de 2012.

Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulos, S., et al. (2013). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209-263.

Cruden. (1991). A Simple definition of a landslide: *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*.

Decreto 1077 de 2015. [Presidencia de la República de Colombia]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. 26 de mayo de 2015.

Decreto 1521 de 1998. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se reglamenta el almacenamiento, manejo, transporte y distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo, para estaciones de servicio. 4 de agosto de 1998.

Decreto 1547 de 1984. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se crea el Fondo Nacional de Calamidades y se dictan normas para su organización y funcionamiento. 21 de junio de 1984.

Decreto 1609 de 2002. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera. 31 de julio de 2002.

Decreto 2015 de 2001. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se reglamenta la expedición de licencias de urbanismo y construcción con posterioridad a la declaración de situación de desastre o calamidad pública. 24 de septiembre de 2001.

Decreto 2211 de 1997. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se reglamenta el fondo nacional de bomberos de Colombia, algunas funciones de la delegación nacional de bomberos, el funcionamiento de la junta nacional de bomberos de Colombia y el aporte del uno por ciento (1%) de las compañías aseguradoras, según la Ley 322 de 1996. 5 de septiembre de 1997.

Decreto 2340 de 1997. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se dictan unas medidas para la organización en materia de prevención y mitigación de incendios forestales y se dictan otras disposiciones. 19 de septiembre de 1997.

Decreto 321 de 1999. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas. 17 de febrero de 1999.

Decreto 4002 de 2004. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se reglamentan los artículos 15 y 28 de la Ley 388 de 1997. 30 de noviembre de 2004.

Decreto 4147 de 2011. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se crea la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, se establece su objeto y estructura. 3 de noviembre de 2011.

Decreto 919 de 1989. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se organiza el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres y se dictan otras disposiciones. 1 de mayo de 1989.

Decreto 926 de 2010. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismorresistentes NSR-10. 19 de marzo de 2010.

Decreto 93 de 1998. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se adopta el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres. 13 de enero de 1998.

DESINVENTAR. Sistema de Inventario de Efectos de Desastres. <https://www.desinventar.org/>.

Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas – UNISDR (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Publicado en Ginebra, Suiza, mayo de 2009.

Hoang, N.-D., & Pham, A.-D. (2016). Hybrid artificial intelligence approach based on metaheuristic and machine learning for slope stability assessment: A multinational data analysis. *Expert Systems with Applications*, 46, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.10.020>.

IDEAM. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1: 100.000. Bogotá D.C.

Ley 1454 de 2011. [Congreso de la República de Colombia]. Por la cual se dictan normas orgánicas sobre ordenamiento territorial y se modifica otras disposiciones. 28 de junio de 2011.

Ley 152 de 1994. [Congreso de la República de Colombia]. Por la cual se establece la Ley Orgánica del Plan de Desarrollo. 15 de julio de 1994.

Ley 1523 de 2012. [Congreso de la República de Colombia]. 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 y se dictan otras disposiciones. 24 de abril de 2012.

Ley 322 de 1996. [Congreso de la República de Colombia]. Por la cual se crea el Sistema Nacional de Bomberos de Colombia y se dictan otras disposiciones. 4 de octubre de 1996.

Ley 388 de 1997. [Congreso de la República de Colombia]. Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones. 18 de julio de 1997.

Ley 400 de 1997. [Congreso de la República de Colombia]. por el cual se adoptan normas sobre construcciones sismo resistentes. 19 de agosto de 1997.

Ley 46 de 1988. [Congreso de la República de Colombia]. Por la cual se crea y organiza el sistema nacional para la prevención y atención de desastres, se otorga facultades extraordinarias al presidente de la república y se dictan otras disposiciones. 2 de noviembre de 1988.

Ley 61 de 1978. [Congreso de la República de Colombia]. Ley Orgánica del Desarrollo Urbano. 15 de diciembre de 1978.

Ley 88 de 1947. [Congreso de la República de Colombia]. Sobre fomento del desarrollo urbano del municipio y se dictan otras disposiciones. 15 de diciembre de 1947.

Lucà, F., Conforti, M., & Robustelli, G. (2011). Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134(3-4), 297-308.

Mendivelso, D. (2009). El sistema ITC para el levantamiento geomorfológico y análisis del terreno (tomado y adoptado como material de apoyo para el curso de movimientos en masa). Documento INGEOMINAS. Páginas 15 – 20. Bogotá.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10, segunda actualización, Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, 2010.

Osna, T., Sezer, E. A., & Akgun, A. (2014). GeoFIS: an integrated tool for the assessment of landslide susceptibility. *Computers & Geosciences*, 66, 20-30.

Servicio Geológico Colombiano (2018). Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1: 25.000. Bogotá D. C.

Servicio Geológico Colombiano (2017). Las Amenazas por Movimientos en Masa en Colombia: Una visión a escala 1:100.000 (Primera ed.). Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

Servicio Geológico Nacional. Geología y temáticos. <https://www.sgn.gob.do/>

Tien Bui, D., Ho, T. C., Pradhan, B., Pham, B. T., Nhu, V. H., & Revhaug, I. (2016). GIS-based modeling of rainfall-induced landslides using data mining-based functional trees classifier with AdaBoost, Bagging, and MultiBoost ensemble frameworks. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-22.

Vakhshoori, V., and M. Zare. "Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods." *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7.5 (2016): 1731-1752.

van Westen, C. (2013). Guidelines for the generation of 1:50.000 scale landslide inventory, susceptibility maps, and qualitative risk maps, illustrated with case studies of the provinces Thanh Hoa and Nghe An. University of Twente.

Villota, H., (1997). Una nueva aproximación a la clasificación fisiográfica del terreno. *Revista IAF*, volumen 15, N° 1. Pp 83 - 115. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá.