



Evaluación del peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias en la zona costera del municipio Guamá

(Tesis en opción al título académico de Máster en Geología)

Autor: Ing. Leonor Villalón Poulut

**Tutor (es): Dr.C. Sandra Yanetsy Rosabal Domínguez
MSc. Alberto de las Mercedes Beyris Mazar**

Moa, 2024

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Declaro que soy autor(a) de este trabajo de tesis y que autorizo a la Universidad de Moa a hacer uso del mismo, con la finalidad que estime conveniente.

Firma: _____



Ing. Leonor Villalón Poulut
leonorvillalon28@gmail.com

Ing. Leonor Villalón Poulut autoriza la divulgación del presente trabajo de diploma bajo licencia Creative Commons de tipo **Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada**, se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de las obras y no realice ninguna modificación de ellas. La licencia completa puede consultarse en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/legalcode>

Ing. Leonor Villalón Poulut autoriza al departamento de la Universidad de Moa a distribuir el presente trabajo de tesis en formato digital bajo la licencia Creative Commons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en el repositorio de materiales didácticos disponible en: <http://geologia.mineria.edu.cu/textuales/tesis>

Ing. Leonor Villalón Poulut autoriza al departamento de Geología de la Universidad de Moa a distribuir el presente trabajo de tesis en formato digital bajo la licencia Creative Commons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en la biblioteca digital disponible en: <http://bibliotecadigital.ismm.edu.cu>

Pensamientos

El éxito no es el resultado de un solo esfuerzo, sino de la suma de todos nuestros esfuerzos.

Jewel Plummer Cobb

Agradecimientos

A mi **familia**, por ser la razón de seguir adelante y no rendirme ante los problemas que se presentaban.

A mis **tutores**, por su tiempo, consejos, comprensión y apoyo brindado.

A mis **compañeros** del departamento de Ciencias Aplicadas, por el apoyo, confianza y palabras de alientos durante estos años difíciles.

Al claustro de **profesores** de la XI Edición de la Maestría en Geología, por sus enseñanzas y experiencias transmitidas.

A los **integrantes** de la mención de Geotecnia e Hidrogeología, por el viaje compartido.

A todas aquellas **personas** que directa e indirectamente contribuyeron con el desarrollo de esta investigación.

A todo **aquel** que de alguna forma me ayudó en algún momento de mi vida durante estos años de formación profesional.

A **quienes** quizás no he incluido, gracias por los conocimientos, experiencias, críticas, sugerencias, colaboraciones y frases de aliento ofrecidas.

Eternamente agradecida....

Dedicatoria

A mi **familia**:

Por ser ejemplo de superación en medio de las dificultades que la vida va poniendo.....

Por su amor, esfuerzo y sacrificio.....

Por las noches de desvelo, paciencia y comprensión.....

Por su amor incondicional.....

RESUMEN

Los deslizamientos de tierra constituyen uno de los peligros de mayor significación en zonas montañosas. En este sentido el sector costero del municipio Guamá presenta una alta vulnerabilidad a la incidencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos. Esto, combinado con las condiciones ingeniero- geológicas del área, su elevada complejidad tectónica y las acciones antrópicas, hacen que la ocurrencia de deslizamientos por lluvias, sea recurrente.

Tomando en cuenta esta problemática, la presente investigación se propone como objetivo evaluar el peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias en la zona costera del municipio. En la evaluación se empleó a través de un Sistema de Información Geográfica el método Mora - Vahrson, por medio del análisis de factores condicionantes (pendientes, litología, humedad del suelo) y el registro de lluvias máximas en 24 horas para un periodo de retorno de 50 años, como elemento de disparo.

Como resultados se presenta una caracterización de los mecanismos y tipologías de deslizamientos desarrollados en el área y se describen los principales factores que influyen en las inestabilidades. Además, se obtiene el mapa de peligro de deslizamientos, categorizado en cuatro niveles: Bajo, Moderado, Alto y Muy Alto. Se concluye que las áreas correspondientes al peligro alto, son las de mayor distribución, abarcando el 54 % de la superficie total.

PALABRAS CLAVES: deslizamientos de tierra, municipio Guamá, lluvia

ABSTRACT

Landslides constitute one of the most significant hazard in mountainous areas. In this sense, the coastal sector of the Guamá municipality presents a high vulnerability to the incidence of extreme hydrometeorological phenomena. This, combined with the geological - engineer conditions of the area, its high tectonic complexity and anthropogenic actions, make the occurrence of landslides for rainfall recurrent.

Taking this into account, the present research aims to evaluate the hazard by landslides induced by rain in the evaluated coastal area of the municipality. The Mora - Vahrson method was used in the evaluation, through a Geographic Information System, in the analysis of conditioning factors (slope, lithology, soil humidity) and the record of maximum rainfall in 24 hours for a return period of 50 years, as a shooting element.

As results, a characterization of the mechanisms and typologies of landslides developed in the area is presented and the main factors that influence the instabilities are described. Additionally, the landslide hazard map is obtained, categorized into four levels: Low, Moderate, High and Very High. It is concluded that the areas corresponding to high hazard are those with the greatest distribution, covering 54% of the total surface.

KEY WORDS: landslides, Guamá municipality, rain

ÍNDICE

RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
GLOSARIO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS	XII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN	6
Introducción	6
1.1 Base teórica de la investigación	6
1.2 Factores condicionantes en la formación de deslizamientos	13
1.3 Métodos de estimación de la susceptibilidad del terreno.....	13
1.4 Estado del arte	16
1.5 Conclusiones parciales	22
CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES FÍSICO - GEOGRÁFICAS DE LA ZONA COSTERA DEL MUNICIPIO GUAMÁ	23
Introducción	23
2.1 Ubicación geográfica	23
2.2 Geología	24
2.3 Tectónica y Sismicidad	26
2.4 Relieve	28
2.5 Particularidades climáticas.....	29
2.6 Suelos	31
2.7 Hidrografía.....	33
2.8 Procesos geodinámicos y antrópicos	34
2.9 Conclusiones parciales	38

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL PELIGRO POR DESLIZAMIENTOS DE TIERRA INDUCIDOS POR LLUVIAS	39
Introducción	39
3.1 Metodología para la evaluación del peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias.....	39
3.2 Metodología general de trabajo	42
3.3 Factores condicionantes y desencadenantes de deslizamientos en la zona de estudio..	44
3.4 Factores utilizados en el análisis de la peligrosidad	44
3.5 Valoración de los factores utilizados en el análisis de la peligrosidad	44
3.6 Conclusiones parciales.....	52
CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DEL PELIGRO POR DESLIZAMIENTOS DE TIERRA INDUCIDOS POR LLUVIAS EN LA ZONA COSTERA DEL MUNICIPIO GUAMÁ.....	53
Introducción	53
4.1 Mecanismos y tipologías de deslizamientos identificados en el área de estudio	53
4.2 Descripción de los principales factores que intervienen en la ocurrencia de deslizamientos en el área.....	58
4.3 Caracterización de los factores utilizados en el análisis de la peligrosidad.....	61
Susceptibilidad por el factor litológico (<i>Sl</i>).....	61
Susceptibilidad por el factor ángulo de las pendientes (<i>Sp</i>).....	64
Susceptibilidad por el factor humedad del suelo (<i>Sh</i>).....	68
Influencia del factor de disparo por lluvias máxima en 24 horas (<i>Dll</i>).....	70
4.4 Caracterización del mapa de peligrosidad por lluvias.....	72
4.5 Propuesta de medidas para la prevención y mitigación de deslizamientos de tierra en el área de estudio.....	76
4.6 Conclusiones parciales.....	78
CONCLUSIONES	79
RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA.....	81
ANEXOS.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Nomenclatura de taludes y laderas. Fuente: Suárez, 1998.....	10
Figura 2. Elementos estructurales de un deslizamiento. Fuente: Varnes, 1978.....	11
Figura 3. Mapa de ubicación geográfica de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Colectivo de Autores, 2022.	24
Figura 4. Mapa geológico de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: IGP, 2003.....	26
Figura 5. Principales fallas de la región oriental de Cuba. Fuente: Arango, 2014.....	27
Figura 6. Comportamiento de la sismicidad en el sector de Guamá (año 2000 - febrero 2022 en función del tiempo, en cuanto a acumulados, número de terremotos, magnitud y secuencia en latitud. Fuente: CENAI, 2022.	28
Figura 7. Mapa de pendientes de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por Alberto de las Mercedes Beyris Mazar en Colectivo de Autores, 2022.	29
Figura 8. Mapa de precipitación media anual de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Brito & Beyris, 2016.	31
Figura 9. Mapa de suelos de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: MINAG, 1989.	33
Figura 10. Destrucción del vial (a) e interrupción de la circulación por la carretera principal por la crecida del río Sevilla (b). Fotos: Euclides Fornaris Gómez (Tomadas de Colectivo de Autores, 2022).....	34
Figura 11. Influencia de la erosión marina en el talud (a), compactación del suelo y pérdida de arena (b) y erosión en laderas y acumulación de material en el río (c). Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut ,2022.	35
Figura 12. Formaciones carbonatadas aisladas de diferentes tamaños (a) y calizas lenticulares aisladas en costas acantiladas aterrazadas (b). Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut ,2022...	36
Figura 13. Estado de cobertura del área (a). Afectación del mangle por la actividad antrópica (b). Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut (a) y Elianne Calderón Montoya (b), 2022.	37

Figura 14. Rocas fracturadas, débilmente dispuestas y afectados por procesos de meteorización. Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut ,2022.....	37
Figura 16. Visualización del Sistema de Información Geográfica. Fuente: Elaborado por la autora.	43
Figura 17. Mapa de lluvias máximas en 24 horas, para el 2 % de probabilidad de ocurrencia (50 años) de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Bermúdez & Beyris, 2016.	49
Figura 15. Metodología empleada en la evaluación del peligro de deslizamientos de tierra inducidos por lluvias en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.	51
Figura 18. Mapa de inventario de deslizamientos de tierra de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.	54
Figura 19. Ejemplos de caídas (a) y desprendimientos (b, c) en el área. Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut ,2022.	55
Figura 20. Ejemplos de deslizamientos en el área. Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut ,2022.....	57
Figura 21. Ejemplos de flujos detríticos. Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut ,2022.	58
Figura 22. Ejemplos de las condiciones geólogo - tectónicas de los taludes y laderas del área de estudio. Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut (a) y Elianne Calderón Montoya (b), 2022.	59
Figura 23. Vista del estado de la cobertura vegetal (a) y de los taludes de la carretera Granma - Santiago de Cuba (b, c). Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut ,2022.....	60
Figura 24. Mapa de susceptibilidad por el factor litológico de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.	62
Figura 25. Distribución del nivel de susceptibilidad del factor litológico en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.....	64
Figura 26. Distribución del nivel de susceptibilidad del factor ángulo de las pendientes en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.	67
Figura 27. Mapa de susceptibilidad por el factor ángulo de las pendientes de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.....	67
Figura 28. Mapa de susceptibilidad por el factor humedad del suelo de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.....	69

Figura 29. Distribución del nivel de susceptibilidad del factor humedad del suelo en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.....	70
Figura 30. Distribución del factor de disparo por lluvias máximas en 24 horas en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.....	71
Figura 31. Mapa de susceptibilidad por el factor de disparo por lluvias máximas en 24 horas de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.	72
Figura 32. Mapa de peligro a la ocurrencia de deslizamientos inducidos por lluvias de la zona costera del municipio Guamá (para el 2 % de probabilidad). Fuente: Elaborado por la autora.	73
Figura 33. Distribución de la peligrosidad a la ocurrencia de deslizamientos inducidos por lluvias (2 % de probabilidad) de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de deslizamientos. Fuente: Corominas & García, 1997.....	12
Tabla 2. Características ingeniero - geológicas de las rocas y formaciones geológicas. Fuente: Elaborado por la autora.	46
Tabla 3. Caracterización por el ángulo de las pendientes. Fuente: IPF,1981.....	47
Tabla 4. Valoración del factor de precipitación media anual. Fuente: Mora & Vahrson, 1994.....	48
Tabla 5. Valoración del factor de disparo por lluvias máximas en 24 horas. Fuente: Mora <i>et al.</i> , 1992.....	49
Tabla 6. Valoración del nivel de susceptibilidad de las rocas y formaciones geológicas. Fuente: Elaborado por la autora.	62
Tabla 7. Valoración del nivel de susceptibilidad por el ángulo de las pendientes. Fuente: IPF, 1981; Mora & Vahrson, 1993.	65
Tabla 8. Clasificación del factor de precipitación media anual. Fuente: Mora & Vahrson, 1994.	68
Tabla 9. Clasificación del factor de disparo por lluvias máximas en 24 horas. Fuente: Mora <i>et al.</i> , 1992.....	70
Tabla 10. Consideraciones del peligro de deslizamientos inducidos por lluvias, en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.....	75

GLOSARIO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

Siglas y Abreviaturas	Significado
SIG	Sistemas de Información Geográfica
MDT	Modelo Digital del Terreno
PVR	Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo
CP	Consejo Popular
snm	Sobre el nivel del mar
NC	Norma Cubana
Fm	Formación
Gr	Grupo
IGP	Instituto de Geología y Paleontología

INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra constituyen uno de los peligros de mayor significación en zonas montañosas. En este sentido las características del relieve de la costa sur de la Sierra Maestra enmarcan al municipio Guamá, provincia Santiago de Cuba, como una de las áreas de mayor potencial a la ocurrencia de este peligro (Castellanos, 2008 b; Galbán *et al.*, 2021).

La zona costera constituye para Cuba un área de gran importancia dada su condición de estado insular. Según el Decreto Ley 212, esta se define como la franja marítimo - terrestre de ancho variable donde se produce la interacción de la tierra, el mar y la atmósfera, mediante procesos naturales. En la misma se desarrollan formas exclusivas de ecosistemas frágiles y se manifiestan relaciones particulares económicas, sociales y culturales.

Concretamente en la zona costera del municipio Guamá, sector de estudio de esta investigación, de acuerdo a las particularidades físico - geográficas y su evolución en el tiempo han conformado un paisaje muy complejo. En esta se desarrollan multiplicidad de fenómenos que le han aportado características muy propias. Dentro de estos fenómenos se ubican precisamente los deslizamientos, condicionados principalmente por la topografía y la geología del área.

En cuanto a los factores desencadenantes de este fenómeno Seisdedos *et al.*, (2001) destacan la acción de las lluvias como uno de los principales agentes catalizadores. El mismo señala la ocurrencia de deslizamientos tras el paso del ciclón Flora en 1963, el cual es uno de los eventos climáticos que más deslizamientos catalizó masivamente en todo el macizo de la Sierra Maestra. Además, en la zona del peñón de las Cuevas durante las intensas lluvias de 1997; aunque también existen reportes de fenómenos catalizados por el terremoto de Pílon en 1976.

Por otro lado, el municipio presenta una alta vulnerabilidad a la incidencia de fenómenos meteorológicos extremos, siendo la zona costera aún más vulnerable, dada su exposición a la acción del mar (García *et al.*, 2017). Asociados a estos

eventos y la formación de deslizamientos Brito *et al.*, (2021), señalan afectaciones por incomunicación de consejos populares y en la carretera Granma - Santiago de Cuba, durante el huracán Wilma en el 2005.

Asimismo, en el 2007, reportan grandes daños en gran parte de la zona costera debido a los deslizamientos originados por la intensidad y persistencia de la lluvia. Un año después con el paso del huracán Ike se localizaron desprendimientos de rocas en el área, principalmente en el tramo de la carretera desde Palma Mocha hasta Cotobelo.

Independientemente de lo expuesto previamente, a nivel provincial son pocas las investigaciones que tienen en cuenta la influencia de la lluvia en la generación de deslizamientos (Reyes, 2002; Villalón *et al.*, 2012; Galbán & Guardado, 2016). Específicamente en el sector de estudio, estas se han enfocado fundamentalmente en la evaluación de deslizamientos inducidos por actividad sísmica (Rosabal, 2018).

Además de las investigaciones relacionadas con el análisis de la amenaza sísmica, el acontecimiento de eventos naturales y riesgo que suponen estos en el sector de la carretera Granma - Santiago de Cuba (Seisdedos *et al.*, 2001; Reyes *et al.*, 2005; Morejón *et al.*, 2006; Ferrera *et al.*, 2008; Aguller, 2010; Colmenero, 2015). Por lo que no constan antecedentes de estudios encaminados a la evaluación de las lluvias como agente catalizador principal de deslizamientos.

De lo anteriormente planteado surge la presente investigación titulada **“Evaluación del peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias en la zona costera del municipio Guamá”**, enmarcada en el Proyecto 022 del Programa de Desarrollo de Investigaciones Sismológicas Aplicadas en la República de Cuba: “Gestión de Riesgos de Desastres para la adaptación y la reducción de la vulnerabilidad en la zona costera del municipio Guamá, Santiago de Cuba”. El mismo se fundamenta en las condiciones ingeniero - geológicas del área, así como su predisposición a ser afectada con regularidad por eventos hidrometeorológicos extremos (Seisdedos *et al.*, 2001; García *et al.*, 2017; Colectivo de Autores, 2022).

Para ello, mediante la aplicación del método de Mora & Vahrson (Mora *et al.*, 1992), se pretende dividir el área en sectores con comportamientos y características similares a la ocurrencia de deslizamientos inducidos por lluvias. De este modo se actualiza el peligro para el municipio Guamá y se crea una herramienta de apoyo para el desarrollo de estrategias locales de gestión y mitigación de los impactos.

Problema científico: Limitado conocimiento de la influencia de la lluvia en la ocurrencia de deslizamientos de tierra en la zona costera del municipio Guamá; dadas las particularidades físico - geográficas y climatológicas de la zona.

Objeto de estudio: Peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias.

Campo de acción: Evaluación de la peligrosidad por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias.

Objetivo General: Evaluar el peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias en la zona costera del municipio Guamá.

Objetivos Específicos:

1. Caracterizar los factores que intervienen en la ocurrencia de deslizamientos de tierra en la zona costera del municipio Guamá.
2. Elaborar el mapa de peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias de la zona costera del municipio Guamá.
3. Proponer medidas para mitigar o prevenir deslizamientos de tierra en el área de estudio.

Hipótesis: Si se caracterizan los factores que intervienen en la ocurrencia de deslizamientos de tierra en la zona costera del municipio Guamá; se podrán definir las zonas de mayor peligro a la ocurrencia de movimientos de laderas inducidos por lluvias, lo que permitirá una mejor valoración de la peligrosidad ante este fenómeno.

Aportes Científicos:

1. Caracterización de los factores que intervienen en la ocurrencia de deslizamientos de tierra en la zona de estudio.
2. Mapa de peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias en la zona costera del municipio Guamá.

Impacto ambiental, económico y social. El conocimiento de la peligrosidad por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias en la zona costera del municipio Guamá permitirá:

- Trazar mejores estrategias locales de mitigación, adaptación y reducción de riesgos que promuevan el desarrollo sostenible del área.
- Incremento de la percepción del riesgo en tomadores de decisiones y población en general.
- La implementación de acciones a mediano y largo plazo incluidas en el marco de la Tarea Vida.
- Diseño y ejecución de proyectos de construcción y programas de desarrollos económicamente sustentables.

Actualidad de la investigación: La actualidad de la investigación radica en su correspondencia con los objetivos priorizados de la Defensa Civil Nacional de Cuba establecidos en la Directiva 1/2022, del Presidente del Consejo de Defensa Nacional “Para la organización, planificación y preparación del país para situaciones de desastres”; en la Estrategia Ambiental Nacional y el Plan del Estado para el enfrentamiento al cambio climático a través de la evaluación de los riesgos a escala local y para fines de ordenamiento y manejo de zonas costeras.

Fundamento metodológico: Para la evaluación del grado de peligro se tiene en cuenta los factores significativos implicados en la generación de deslizamientos. Identificados estos, se procede a su caracterización y valoración mediante la asignación de pesos, teniendo en cuenta su incidencia en el desarrollo del fenómeno y las características del área.

Una vez determinado el nivel de susceptibilidad para cada factor, se procede a su reclasificación a través de mapas temáticos de factores condicionantes y un desencadenante. Posteriormente se realiza la combinación de estos, obteniéndose como resultado el mapa de peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias.

La estructura de la tesis se compone de la siguiente manera:

Introducción. Se expone el diseño de la investigación.

Capítulo I. Se establece el basamento teórico de la investigación.

Capítulo II. Se caracterizan las condiciones físico - geográficas e ingeniero - geológicas del área.

Capítulo III. Se desarrolla la metodología empleada en la investigación, la cual permitirá obtener el mapa de peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias en la zona costera del municipio Guamá.

Capítulo IV. Se presentan los resultados de la investigación.

Conclusiones y Recomendaciones.

Bibliografía y Anexos.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

Introducción

En este capítulo se establece el marco teórico conceptual, a partir de la consulta de bibliografías relacionadas con la temática abordada. Primeramente, se realiza el análisis teórico conceptual de los deslizamientos de manera general y de forma particular de aquellos inducidos por precipitaciones. Luego se realiza una introducción a las investigaciones de peligrosidad sobre el fenómeno. Por último, se discuten los principales trabajos realizados sobre la temática en Cuba y el mundo.

1.1 Base teórica de la investigación

Peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo. Conceptos y definiciones

Aunque el peligro por deslizamiento de un lugar sea muy alto, el riesgo no lo será si no produce afectaciones en la población o infraestructuras. Por tanto, el riesgo trae consigo la existencia de un peligro, pero un fenómeno peligroso no conduce necesariamente a un riesgo (Almaguer, 2005). Los siguientes conceptos basados en Varnes (1984) definen la relación entre peligrosidad y riesgo:

- **Peligrosidad (P):** es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente perjudicial dentro de un período de tiempo determinado y en un área específica.
- **Vulnerabilidad (V):** es el grado de pérdidas provocado por la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud determinada sobre un elemento o conjunto de elementos.
- **Riesgo específico (Rs):** es el grado de pérdida esperado debido a un fenómeno natural y se expresa como el producto de $P \times V$.
- Los **elementos bajo riesgo (E):** son las personas, bienes, propiedades, infraestructuras, servicios, actividades económicas, etc., que pueden sufrir las consecuencias directas o indirectas.
- **Riesgo total (Rt):** corresponde al número de vidas pérdidas, daños a la propiedad y a las personas, etc., debidos a un fenómeno natural concreto.

Se define como el producto del riesgo específico y de los elementos bajo riesgo como se observa en la ecuación 1:

$$R_t = E * R_s = E * (P * V) \quad (1)$$

El primer paso en la evaluación del riesgo consiste en la estimación de la peligrosidad a roturas de laderas y ésta, a su vez, se evalúa determinando los siguientes aspectos (Varnes, 1984; Corominas, 1987):

1. Evaluar la susceptibilidad de la ladera a las roturas por deslizamientos.
2. Determinar el comportamiento del deslizamiento (movilidad y dimensiones del mismo).
3. Establecer la potencialidad del fenómeno (probabilidad de ocurrencia).

El término **susceptibilidad** hace referencia a la predisposición del terreno a la ocurrencia de deslizamientos y no implica el aspecto temporal del fenómeno (Santacana, 2001).

Deslizamientos de tierra

Existen diferentes aproximaciones sobre el término deslizamiento de tierra. La primera clasificación sistemática sobre el tema es la planteada por Sharpe (1938). Este considera que un deslizamiento consiste en la caída perceptible o movimiento descendente de una masa relativamente seca de tierra, roca o ambas, a través de un mecanismo de rotura. Para Lomtatze (1977), es una masa de roca que se ha deslizado o desliza cuesta abajo por la vertiente o talud al efecto de la fuerza de gravedad, presión hidrodinámica o fuerzas sísmicas.

Por otra parte, Crozier (1986) lo define como el movimiento gravitacional hacia el exterior de la ladera y descendente de tierra o rocas sin la ayuda del agua como agente de transporte. Cruden (1991), luego de analizar distintas definiciones del término inglés británico *landslip* y su análogo estadounidense, *landslide*, cataloga a los deslizamientos (*Landslides*) como movimientos de masas de roca, residuos o tierra, hacia abajo de un talud. En tanto Suárez (1998) plantea que un deslizamiento

consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada.

Según Galbán (2012) un deslizamiento de tierra es una masa de rocas de baja consolidación o compactación que se ha movido o mueve cuesta abajo por la vertiente o talud (vertiente artificial), lo cual sucede por la acción conjunta o simple de la gravedad, presión hidrodinámica (por efecto de sobresaturación) o fuerzas sísmicas de diversos orígenes. Siguiendo con este concepto, la Directiva 1/2022 de Cuba, define como deslizamiento al movimiento de roca o material poco consolidado pendiente abajo a lo largo de una o varias superficies planas o cóncavas, provocado por lluvias intensas, un sismo o la acción del hombre.

Deslizamientos originados por lluvias

Como ya se declaró con anterioridad, las precipitaciones como agente desencadenante primordial de deslizamientos de tierra, constituye el eje central de esta investigación. Estas son reconocidas como uno de los factores principales en la generación de este fenómeno a nivel mundial, de ahí la importancia de la realización de estudios referentes al tema. En este punto, se hace necesario diferenciar entre el mecanismo de deslizamiento y el transporte de los materiales que componen la ladera por la acción de agentes externos.

Tal como se evidencia en los conceptos descritos previamente, un deslizamiento es el movimiento de una masa de suelo, rocas o ambas, no saturada inicialmente pendiente abajo debido a una falla en el terreno por el propio peso de la masa (Sharpe, 1938; Lomtadze, 1977; Crozier, 1986; Cruden, 1991; Suárez, 1998). A estas condiciones se le debe sumar los llamados estímulos externos, los cuales movilizan el material que conforman la ladera, a causa de un rápido incremento de los esfuerzos o por la reducción de la resistencia (Varnes, 1978; Wang & Sassa, 2003; Galbán, 2012; Directiva 1/2022).

Uno de esos estímulos es el agua, la cual disminuye la resistencia al corte de la masa de suelo y con ello la estabilidad del talud. De manera general, como menciona González de Vallejo *et al.*, (2002), los deslizamientos asociados a eventos

hidrometeorológicos, se relacionan principalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones. Durante las lluvias el agua que se infiltra genera un aumento del contenido de humedad en el suelo, dando lugar a la disminución de la tensión efectiva, la resistencia al cizallamiento y aumento del peso del suelo (González de Vallejo *et al.*, 2002; Galbán *et al.*, 2021).

Las lluvias de poca intensidad, pero en periodos de tiempos prolongados, causan una disminución de la resistencia al cortante por reducción de la cohesión aparente, formando deslizamientos superficiales. Por su parte aquellas de gran intensidad y períodos cortos de tiempo producen un incremento en la presión de poros sobre una superficie de falla potencial generando eventos mucho más profundos (Gostelow, 1991; González de Vallejo *et al.*, 2002; Aleotti, 2004), siendo entendidas como lluvias intensas las precipitaciones de 100 mm o más en 24 horas (Cuevas *et al.*, 2005).

Elementos estructurales de un deslizamiento

Para evaluar los deslizamientos es necesario conocer sus elementos estructurales, dado que el tipo de movimiento, es uno de los principales criterios para la clasificación, diseño e implementación de medidas correctivas o de mitigación. Se toma como condición que para que ocurra un deslizamiento, es necesario la existencia de un talud o ladera que posea pendiente o cambios de altura significativos. Referente a ello Suárez (1998) precisa que se denomina talud (Figura 1 a) cuando se conformó artificialmente y ladera (Figura 1 b) cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural, definiéndose por los siguientes elementos morfométricos:

- **Altura:** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza. Se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
- **Pie:** Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
- **Cabeza o escarpe:** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.

- **Altura de nivel freático:** Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
- **Pendiente:** Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, porcentaje o relación $m/1$; en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.

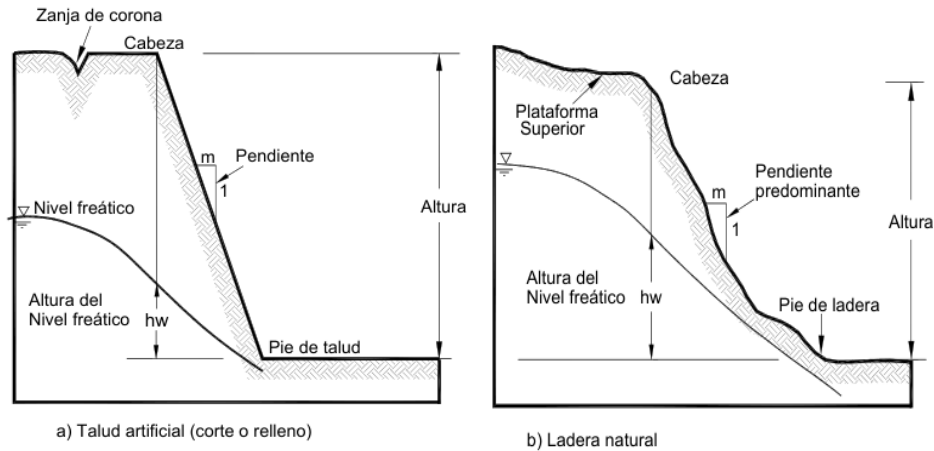


Figura 1. Nomenclatura de taludes y laderas. Fuente: Suárez, 1998.

En la Figura 2 se describen los elementos estructurales según la propuesta de Varnes (1978), los cuales son:

- **Corona:** Sector de la ladera que no ha fallado, se localiza en la parte más alta de la zona deslizada. En ocasiones presenta grietas, llamadas grietas de corona.
- **Escarpe principal:** Superficie de la pendiente muy fuerte, localizada en el límite del deslizamiento y originada por el material desplazado de la ladera. Si este escarpe se proyecta bajo el material desplazado, se obtiene la superficie de ruptura.
- **Escarpe menor:** Superficie de pendiente muy fuerte en el material desplazado, producida por el movimiento diferencial dentro de este componente.
- **Punta de la superficie de ruptura:** Intercepción (algunas veces cubierta) entre la parte baja de la superficie de ruptura y la superficie original del terreno.

- **Cabeza:** Parte superior del material desplazado a lo largo de su contacto con el escarpe principal.
- **Tope:** Punto más alto de contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.
- **Cuerpo principal:** Parte del material desplazado sobre el que yace la superficie de ruptura localizada entre el escarpe principal y la punta de la superficie de ruptura.
- **Flanco:** Lado del deslizamiento.
- **Pie:** Porción del material desplazado que descansa ladera abajo desde la punta de la superficie de ruptura.
- **Dedo:** Margen del material desplazado más distante del escarpe principal.
- **Punta:** Punto en el pie más distante del tope del deslizamiento.

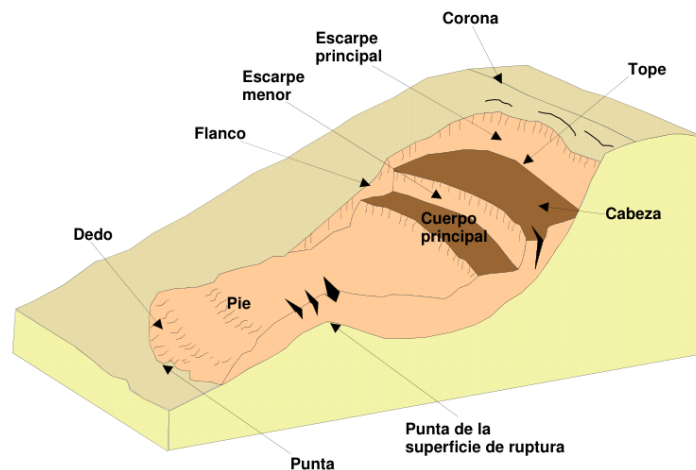
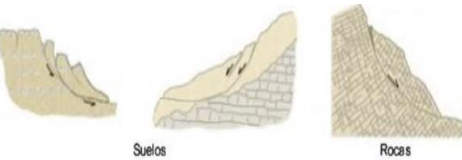


Figura 2. Elementos estructurales de un deslizamiento. Fuente: Varnes, 1978.

Clasificación de los deslizamientos

Existen varias clasificaciones de deslizamientos basadas en el mecanismo de rotura y la naturaleza de los materiales involucrados (Varnes, 1984; Hutchinson, 1988; WP/WLI, 1993; Cruden & Varnes, 1996). En esta investigación se emplea la propuesta por Corominas & García (1997), la cual se presenta en la en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de deslizamientos. Fuente: Corominas & García, 1997.

Tipo	Esquema (Tomado de González de Vallejo, 2002)
Desprendimientos: es aquel movimiento de una porción de suelo o roca, en forma de bloques aislados o masivamente que, en una gran parte de su trayectoria descende por el aire en caída libre, volviendo a entrar en contacto con el terreno, donde se producen saltos, rebotes y rodaduras.	 Rocas Suelos
Vuelcos: son movimientos de rotación hacia el exterior, de una unidad o de un conjunto de bloques o suelo, alrededor de un eje pivotante situado por debajo del centro de gravedad de la masa movida.	 Rocas Suelos
Deslizamientos: son movimientos descendentes relativamente rápidos de una masa de suelo o roca que tiene lugar a lo largo de una o varias superficies definidas que son visibles o que pueden ser inferidas razonablemente o bien corresponder a una franja relativamente estrecha. Se considera que la masa movilizada se desplaza como un bloque único, y según la trayectoria descrita los deslizamientos pueden ser rotacionales o traslacionales.	 Suelos Rocas Deslizamientos rotacionales  Suelos Rocas Deslizamientos traslacionales
Expansiones laterales: el movimiento dominante es la extrusión plástica lateral, acomodada por fracturas de cizalla o de tracción que en ocasiones pueden ser de difícil localización.	 Suelos Bloques rocosos
Flujos: son movimientos de una masa desorganizada o mezclada, donde no todas las partículas se desplazan a la misma velocidad ni sus trayectorias tienen que ser paralelas. Debido a ello la masa movida no conserva su forma en su movimiento descendente, adoptando a menudo morfologías lobuladas.	 Suelos Derrubios Bloques rocosos

1.2 Factores condicionantes en la formación de deslizamientos

Los factores que controlan los movimientos de las laderas son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno (González de Vallejo *et al.*, 2002). Existen dos tipos de factores asociados a ellos, los factores condicionantes o pasivos, los cuales dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno. En tanto los desencadenantes o activos pueden ser considerados como factores externos que provocan o desencadenan las inestabilidades y son responsables, por lo general, de la magnitud y velocidad de los movimientos.

Según Colectivo de Autores (2011) los factores condicionantes en la formación de deslizamientos en un territorio son:

- La estructura geológica de las laderas y taludes.
- Las particularidades de las propiedades físico - mecánicas de las rocas y suelos.
- Las condiciones de actividad de las aguas subterráneas cercanas a la superficie.
- Las condiciones de actividad de las aguas superficiales.
- La presencia de vegetación.
- Las particularidades climáticas de la región.
- El régimen hidrológico de las cuencas, sus arroyos y ríos con sus tramos deslizables.
- El relieve del terreno.
- Los movimientos neotectónicos y los fenómenos sísmicos a ellos asociados.

1.3 Métodos de estimación de la susceptibilidad del terreno

Existen diversas aproximaciones para evaluar el grado de susceptibilidad del terreno frente a los deslizamientos basadas en su mayoría, en la determinación de los factores que influyen en la aparición de las roturas. En general, estos factores se combinan para definir los distintos grados de susceptibilidad, expresándose los

resultados de forma cartográfica mediante los mapas de susceptibilidad (Hártlen & Viberg, 1988; Hansen, 1991; Corominas, 1992; Van Westen, 1993 y 1994; Carrara *et al.*, 1995; Leroi, 1996).

1. Métodos determinísticos

Estos se basan en el análisis de las leyes físicas y mecánicas universales de conservación de masa, energía, equilibrio de fuerzas de movilización y de resistencia (Gökceoglu & Aksoy, 1996). Este método elimina la subjetividad mediante la cuantificación de los grados de riesgo en valores absolutos, por ejemplo, a través del factor de seguridad (Barredo *et al.*, 2002). Una ventaja de este método es el alto grado de simplificación para cartografiado de escala media y regional, debido a la gran variedad de los parámetros geotécnicos. De esta forma, el desempeño del método depende totalmente de la calidad y cantidad de los datos colectados (Dai *et al.*, 2002).

2. Métodos heurísticos

Los métodos heurísticos se basan en el conocimiento a priori de los factores que producen inestabilidad en el área de estudio. Un procedimiento de este tipo es el análisis cualitativo basado en combinación de mapas de factores (Lucini, 1973; Stevenson, 1977; Bosi, 1978). Estos métodos permiten la regionalización o estudio a escala regional y son adecuados para aplicaciones en el campo de los sistemas expertos (Carrara *et al.*, 1995). El principal inconveniente radica en que, en la mayor parte de los casos, el conocimiento disponible entre los factores ambientales que pueden causar inestabilidad y los deslizamientos es inadecuado y subjetivo, dependiendo de la experiencia del experto.

3. Métodos probabilísticos

Las aproximaciones probabilísticas se basan en las relaciones observadas entre cada factor y la distribución de deslizamientos actual y pasada (Carrara *et al.*, 1995). Se utilizan cuando se dispone de abundante información, tanto cualitativa como cuantitativa, aplicándose los modelos estadísticos que pueden ser univariantes y multivariantes. La principal ventaja es la objetividad del método. El costo de la

adquisición de algunos factores relacionados con la inestabilidad de laderas es el principal inconveniente. Son métodos indirectos cuyos resultados se pueden extrapolar a zonas distintas para estimar la susceptibilidad, con condiciones geológicas y climáticas homogéneas.

Los métodos estadísticos univariantes se dividen en dos grupos: los que utilizan el análisis condicional y los que no lo utilizan. El análisis condicional, trata de evaluar la relación probabilística entre diversos factores relevantes para las condiciones de inestabilidad y las ocurrencias de deslizamientos. Se basan en la superposición de uno o más factores con el mapa de distribución de deslizamientos, para obtener una probabilidad condicionada de cada factor a la presencia o ausencia de deslizamientos. Los resultados se interpretan en términos de probabilidad según conjuntos difusos (Zadeh, 1965), el teorema de Bayes (Morgan, 1968), plausibilidad (Shafer, 1976) o certeza (Heckerman, 1986).

Los métodos multivariantes analizan diversos factores condicionantes a la vez y determinan, mediante procedimientos estadísticos, el grado de influencia de cada uno de los factores condicionantes. Algunos ejemplos de este son la Regresión Logística (Carrara *et al.*, 1991), la Regresión Múltiple (Dai & Lee, 2002), y las Funciones Discriminantes (Santacana *et al.*, 2003). Con este se tienen buenos resultados que pueden ser expresados en áreas homogéneas o en áreas con sólo unos pocos tipos de inestabilidad. Una limitación importante es que se requieren grandes conjuntos de datos para obtener suficientes casos para producir resultados confiables.

4. Métodos geomorfológicos

Son métodos directos que se basan en la determinación de condiciones de inestabilidad de ladera mediante técnicas geomorfológicas, cartografía y zonificación. Mediante las observaciones de campo, el experto extrae criterios para la determinación de áreas potencialmente inestables y para la confección del mapa de susceptibilidad y/o peligrosidad final. Estos mapas exigen conocer la morfología y tipología de movimientos (Hansen, 1984 y 1991), por lo que resulta de vital importancia la experiencia del experto. La principal ventaja es la validez, detalle del

análisis y mapa resultantes (si se realizan por un buen experto), la desventaja el alto grado de subjetividad dependiente de la experiencia del autor.

1.4 Estado del arte

De forma general los deslizamientos de tierra son el producto de diversos elementos, donde la configuración morfológica y evolución de las laderas juegan un papel determinante (Brunsden, 2002). Como se mencionó antes, una de las primeras clasificaciones es la propuesta por Sharpe (1938), pero no fue hasta la aparición de las clasificaciones de Varnes (1958 y 1978) y de Hutchinson (1968 y 1988), que se empezaron a utilizar de manera generalizada, una vez que el tema cobraba interés mundial y se hacía interdisciplinar.

A nivel mundial los deslizamientos son conocidos históricamente debido a los daños que generan. Por tanto, la evaluación del peligro por deslizamientos y la capacidad de predecir dichos fenómenos, es un tema de gran importancia. En este orden, aunque se consideren otros elementos como la actividad antrópica o los sismos, las precipitaciones constituyen uno de los factores detonantes más comunes (González de Vallejo *et al.*, 2002; Reichenbach *et al.*, 2018; Castillo *et al.*, 2020).

Dentro de los ejemplos más notorios de dichos fenómenos, se ubican los sucesos de 1982, en San Francisco donde una lluvia intensa de 32 horas, desencadenó más de 18 000 deslizamientos superficiales. En tanto en la región del Piamonte, en 1984 intensas lluvias de dos días de duración provocaron más de 1 000 deslizamientos traslacionales de bloques rocosos, deslizamientos superficiales y flujos catastróficos. Asimismo, las intensas precipitaciones del huracán Mich causó más de 1 000 muertes y pérdidas incalculables solamente en la ciudad de Tegucigalpa; Honduras (Harp *et al.*, 2002; González de Vallejo *et al.*, 2002).

En resumen, la ocurrencia de estos eventos se basa la relación de las lluvias, con la topografía, la litología, la estructura geológica, el contenido de humedad del suelo y la influencia antrópica (Crozier, 1999; Glade *et al.*, 2000; González *et al.*, 2002). De ahí que los métodos para predecir las condiciones de precipitación que puedan ocasionar un deslizamiento, se basen en la en la caracterización de estas en

términos de intensidad, duración, acumulación, siendo las variables intensidad y duración las estimaciones más comunes (Crozier, 1999; Glade *et al.*, 2000; Aleotti, 2004; Guzzetti *et al.*, 2007; Huesca & Morales, 2021; Yan *et al.*, 2022).

Seguidamente se relacionan algunos trabajos recientes realizados a nivel mundial, concernientes a la aplicación de estos métodos:

Casale & Margottini (2000) muestran que el régimen pluviométrico alterado por el cambio climático global concentra las lluvias en un período más corto al presentado con anterioridad, lo cual es factor determinante en el incremento de deslizamientos y otros procesos gravitacionales. De acuerdo con los autores, en Italia más del 50 % de los movimientos de ladera son directamente provocados por fenómenos meteorológicos, en especial por lluvias torrenciales.

Mora (2004) emplea una metodología para el estudio de la susceptibilidad a deslizamientos que permite establecer los sectores con potencial de presentar inestabilidades en caso de lluvias de intensidad alta, sismos de magnitudes importantes o una combinación de ellos. Además, permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizarse, mediante la combinación de la valoración y peso relativo de diversos indicadores morfodinámicos, la cual es sencilla de implementar en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Moreno *et al.*, (2006) establecen una relación entre la cantidad de lluvia antecedente y la ocurrencia del deslizamiento, mediante análisis de la precipitación acumulada en estaciones cercanas a inestabilidades (georreferenciados para diferentes radios de búsqueda). El estudio demuestra que los dos períodos húmedos anuales tienen influencia directa sobre el número promedio de eventos ocurridos en cada mes, pero existe un efecto de rezago sobre el número de deslizamientos mensuales respecto al ciclo anual de la lluvia en Antioquia; dado por el almacenamiento de agua en el suelo.

Hidalgo & Assis (2011) proponen y aplica una metodología que permite estimar cualitativamente el riesgo por deslizamientos de taludes en carreteras de zonas tropicales montañosas. Evalúan la amenaza usando relaciones estadísticas entre la

precipitación y la ocurrencia de eventos de inestabilidad; obteniendo umbrales de falla que permiten identificar, con cierta confiabilidad la magnitud y duración de las lluvias que pueden causar dicho fenómeno. El método produce resultados consistentes que ayudan a definir los sitios donde es indispensable realizar estudios más detallados y sistemas de mitigación y aclarando que se hace necesario redefinir algunos parámetros ya que se tiende a subvalorar el riesgo.

Aristizábal *et al.*, (2015) presentan un análisis de la relación entre las lluvias antecedentes de hasta 90 días con los deslizamientos en la Región Andina Colombiana por medio de la determinación de probabilidades de ocurrencia de remociones de tipo deslizamientos para dichas lluvias y de los coeficientes de la regresión logística. Entre los resultados obtenidos se encuentran valores críticos de dichas variables antecedentes, los cuales son de utilidad para definición de alertas tempranas y crea bases para los estudios de susceptibilidad, amenaza y ordenamiento territorial.

Ruiz (2018) plantea que en la actualidad el ascenso del calentamiento global está relacionado con mayores efectos de lluvias torrenciales. Demuestra la relación entre los proxies geomorfológicos y los problemas de estabilidad en laderas; los cuales a su vez están relacionados con la lluvia, de cuya intensidad y duración dependerá la magnitud del cambio en el relieve.

Castillo *et al.*, (2020) presentan una breve reseña sobre eventos relacionados con deslizamientos de terreno superficiales, considerando a la lluvia como principal factor de detonación. Además, realizan un análisis sobre los impactos sociales, económicos y ambientales que pueden ocasionar los deslizamientos en las zonas más susceptibles de República Dominicana.

Aristizábal *et al.*, (2022) analizan un patrón de lluvia acumulada en los 90 días previos a la ocurrencia de 100 deslizamientos de tierra. El estudio demuestra que la acción de precipitaciones intensas es el principal desencadenante de deslizamientos. No obstante, resaltan la importancia de los niveles de humedad en el suelo, que en muchos casos ocupa mayor relevancia a los eventos de lluvia

detonantes. Además, proponen un Sistema de Alerta Temprana, en base a los resultados alcanzados y la granulometría de los suelos presentes en su área.

Antecedentes de la investigación

En Cuba las investigaciones sobre deslizamientos de tierra tienen sus orígenes en los años 70, con el incremento del potencial científico del país. Sin embargo, a partir de los 90 estas comienzan a cobrar auge, vinculado al desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica. En esta etapa se realizaron estudios encaminados en primera instancia a la evaluación del peligro, luego la vulnerabilidad y con ello la estimación de riesgos por deslizamientos del terreno (Castellanos, 2008 a). A continuación, se muestran algunos de los trabajos realizados en diferentes lugares del territorio nacional, así como en municipio Guamá en correspondencia con los objetivos planteados en la investigación.

Seisdedos *et al.*, (2001) destacaron la alta incidencia de los deslizamientos en el área y las condiciones que favorecen su presencia, además mostraron un estudio detallado de los sectores de mayor peligro en la carretera Granma - Santiago de Cuba. Dicho estudio se basó en la caracterización de las condiciones ingeniero - geológicas del terreno y evaluación geomecánicas de los taludes de mayor susceptibilidad. Aunque el estudio se orienta la evaluación del fenómeno por amenaza sísmica, subraya la acción de las lluvias como una de las causas fundamentales en la ocurrencia de deslizamientos en el municipio Guamá.

Reyes (2002) obtuvo el mapa de peligro por deslizamientos de la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores a escala 1: 25 000, además de la valoración del riesgo mediante el empleo de un SIG. La misma incluye a la lluvia en 24 horas para un período de retorno de 100 años como uno de los agentes desencadenantes del fenómeno. Sin embargo, no presenta un inventario de fenómenos, ni muestra las tipologías de deslizamientos presentes en el área. La influencia geológica no incluye aspectos ingeniero - geológicos. Igualmente, no se tiene en cuenta la influencia de la actividad antrópica en la generación de deslizamientos, sino de cómo estos pueden afectar objetivos socioeconómicos en el área.

Del Puerto & Ulloa (2003) realizaron la cartografía de la distribución espacial de los peligros naturales y la clasificación de la cuenca de Santiago de Cuba a partir del predominio de los tipos de peligros que pueden llegar a ocurrir en determinados sectores del mismo. La investigación se sustentó en la elaboración e interpretación de mapas morfométricos, obteniendo como resultado el mapa tipológico de peligros y de regionalización. La misma no incluye a las precipitaciones en la evaluación del peligro de deslizamientos, ni algún mapa de inventarios de fenómenos del área en cuestión que validen los resultados obtenidos.

Castellanos & Van Westen (2009) identificaron las áreas con mayor riesgo por deslizamientos de tierra de Cuba. En el estudio se destacó a la provincia Santiago de Cuba como una de las zonas de mayor índice de riesgo de deslizamientos de terreno, vinculado a la sismicidad de la zona y el régimen pluviométrico; especialmente al sistema montañoso Sierra Maestra. Aunque estos resultados no pueden utilizarse para estudio de detalle, debido a la escala de trabajo empleada, permiten establecer un orden de prioridades para la realización de estos en base a los niveles de peligro obtenidos por provincias y municipios.

AMA (2012) propuso la guía metodológica para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo (PVR) por deslizamientos de terreno a nivel municipal. La cual fue implementada en diferentes partes de Cuba, alcanzando resultados importantes para la toma de decisiones a diferentes niveles. Dentro de los cuales se tienen los alcanzados por Villalón *et al.*, (2012), para la provincia Santiago de Cuba. Entre los factores de disparo contiene las lluvias máximas en 24 horas para un período de retorno de 100 años. No obstante, no contiene los aspectos ingeniero - geológicos en la determinación de la susceptibilidad litológica.

Galbán & Guardado (2016) introdujeron y desarrollaron una nueva metodología para la modelación regional de los deslizamientos de tierra en Santiago de Cuba, basada en los niveles de importancia de las variables que influyen en el fenómeno. El peligro de deslizamientos total se compone de la suma de los modelos de deslizamientos por lluvias y sismos, mediante un SIG. Este no contiene las lluvias máximas en 24 horas, siendo empleada en el modelo de lluvias las precipitaciones

medias anuales. Al mismo tiempo, aunque ejemplifica las tipologías de deslizamientos en el municipio Santiago de Cuba no muestra un inventario de fenómenos.

Rosabal (2018) evaluó en Cuba suroriental la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por actividad sísmica, a partir de la integración de los métodos morfométricos, la tectónica activa y el análisis sísmológico. Como resultado obtuvo la caracterización de nueve bloques morfotectónicos, la zonación de la susceptibilidad a la licuefacción y deslizamientos en estos territorios, el análisis del carácter activo de las principales fallas, así como su clasificación de acuerdo con estos criterios. Aunque esta investigación constituye un antecedente para el municipio Guamá, el mismo no considera a las lluvias como agente catalizador.

Galbán *et al.*, (2021) demostraron que la ocurrencia de deslizamientos en la provincia Santiago de Cuba se dan de manera puntual y localizada, aunque la susceptibilidad al fenómeno es elevada por las condiciones ingeniero-geológicas presentes en el territorio. Entre las causas principales de su formación subrayaron las cargas hidrostáticas e hidrodinámicas y sísmicas. Además del debilitamiento de la resistencia de las rocas (al humedecerse en temporada lluviosa, hincharse, descompactarse o cambiar la constitución natural) y la acción antrópica, en particular los municipios costeros de Guamá y Santiago de Cuba. Estos resultados exponen la necesidad de la realización del estudio propuesto en esta en esta tesis.

1.5 Conclusiones parciales

- Las metodologías empleadas en la evaluación de deslizamientos inducidos por precipitaciones se basan principalmente en la intensidad y duración de las mismas, la influencia de las lluvias antecedentes y la modelación de la interacción de estas con las características geomorfológicas y geológicas del área.

- En Cuba y en el municipio Guamá se han realizado varias investigaciones sobre la evaluación del peligro de deslizamientos; sin embargo, la mayoría de estas no tiene en cuenta la influencia de la actividad antrópica en el medio y las características ingeniero - geológicas de las litologías presentes. Además, no incluyen métodos de comprobación de los resultados obtenidos, ni las tipologías de deslizamientos presentes en el área estudiada. Asimismo, son pocos los estudios que tienen en cuenta a las precipitaciones como agente catalizador principal.

CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES FÍSICO - GEOGRÁFICAS DE LA ZONA COSTERA DEL MUNICIPIO GUAMÁ

Introducción

El conocimiento de las condiciones del terreno es crucial en la evaluación del peligro por deslizamientos de tierra. Esto permite comprender los procesos involucrados en el fenómeno y predecir posibles áreas de desarrollo de inestabilidades. En este sentido en el presente capítulo se exponen las características físico - geográficas e ingeniero - geológicas de la zona costera del municipio Guamá.

2.1 Ubicación geográfica

El municipio Guamá se localiza al suroeste de la provincia Santiago de Cuba, en la vertiente sur del macizo montañoso de la Sierra Maestra. Limita al Norte con la provincia Granma y los municipios Tercer Frente y Palma Soriano, al Este con el municipio Santiago de Cuba, al Oeste con el municipio Pílon; provincia Granma y al Sur con el Mar Caribe (INOTU, 2021).

Con una densidad poblacional de 35,9 habitantes por km² para el año 2021, representa el segundo municipio menos poblado de la provincia después del municipio Tercer Frente. La principal vía de comunicación es la carretera Granma - Santiago de Cuba, la cual conecta dos asentamientos urbanos y 33 rurales. La línea de costa del municipio es de aproximadamente 179 km de largo desde el río Macío hasta la playa Rancho Cruz. Para los intereses de esta investigación la misma se enmarca hasta la cota de 120 m sobre el nivel del mar, ver Figura 3 (Colectivo de Autores, 2022).

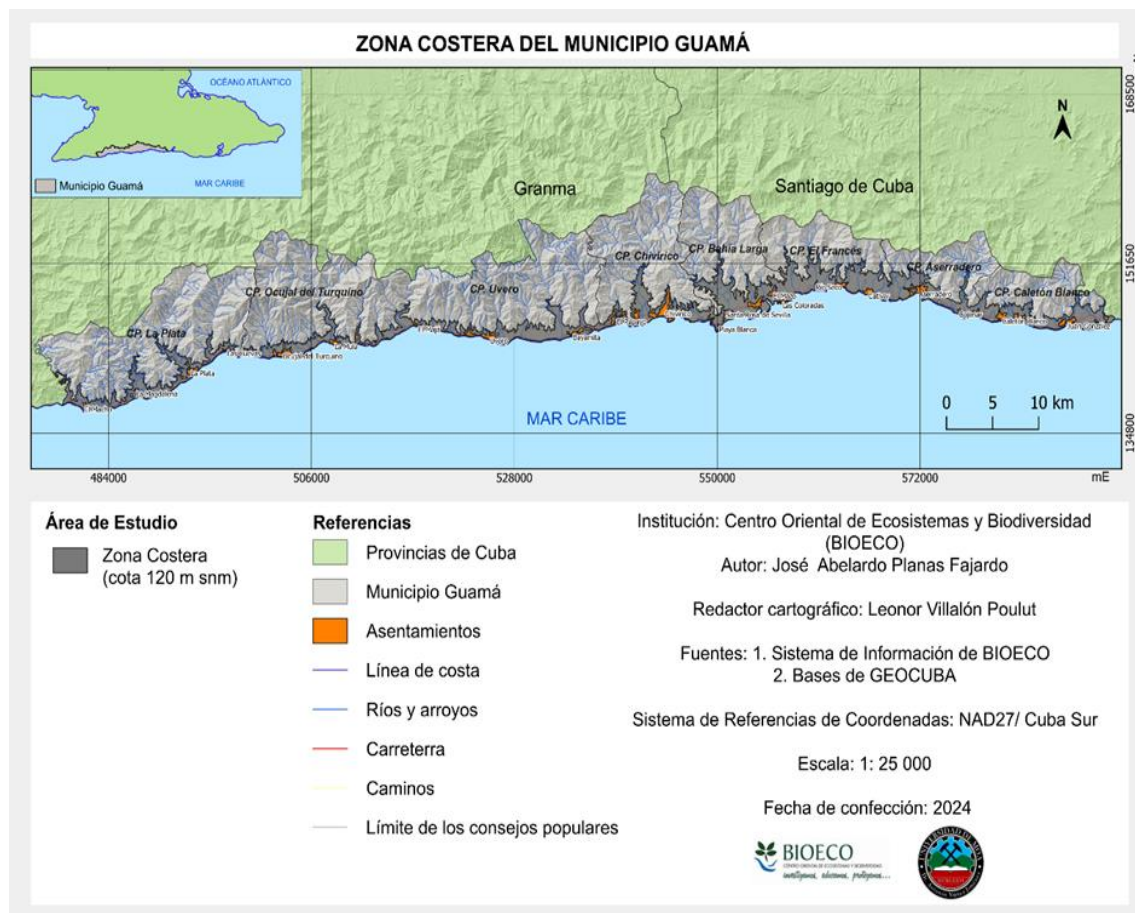


Figura 3. Mapa de ubicación geográfica de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Colectivo de Autores, 2022.

2.2 Geología

Geológicamente el área se caracteriza por la presencia de rocas de composición ígnea y metamórfica. Conjuntamente se ubican sedimentos del Cuaternario en la parte inferior próxima a la costa. A continuación, se describen las formaciones presentes a partir del mapa geológico del IGP (2003) y el léxico estratigráfico de Cuba (IGP, 2013), ver Figura 4.

Grupo El Cobre (ec): De edad Paleoceno - Eoceno Medio (parte baja) y espesor entre los 5000 m y 6000 m. Compuesto por rocas volcánicas, volcánico - sedimentarias y tufogénicas, cortado por cuerpos hipobisales y diques de diversa composición. Las litologías poseen una gran variabilidad facial con transiciones a

veces bruscas, otras graduales y en muchos casos, prácticamente imposible establecer delimitaciones entre ellas.

Formación Palma Mocha (pmc): De edad Cretácico Inferior - Cretácico Superior y un espesor mayor de 2 000 m. Se compone de rocas terrígeno - clásticas, vulcanógenas y en menor cantidad aparecen calizas. También se aprecian intercalaciones de argilitas. Está cubierta discordantemente por el Gr. El Cobre (parte indiferenciada), tectónicamente por la Fm. Manacal y se desconoce su subyacente.

Formación Manacal (mc): De edad Cretácico Superior y un espesor de aproximadamente 200 m. Se compone de rocas piroclásticas y sedimentarias de grano medio a fino, composición andesito - basáltica, tobas aglomeráticas, brechas volcánicas y raros mantos de lava andesito - basáltica. Subordinadamente se encuentran conglomerados, areniscas, limolitas, lutitas tobáceas y polimícticas, calizas y margas con procesos de skarnitización. Su ambiente sedimentario sugiere que se depositó en una cuenca de mediana profundidad, cercana o al pie del talud continental, con variaciones del nivel del mar.

Formación La Cruz (lcz): De edad Mioceno Superior - Plioceno Inferior y espesor que excede los 160 m. Se compone de una secuencia terrígeno - carbonática en la base y el techo, y carbonato - terrígena en su parte media. Su Mbros. Quinteros yace discordantemente sobre el Gr. El Cobre (parte indiferenciada) y los cuerpos de granitoides, además se encuentra discordantemente cubierta por las formaciones Jaimanitas y Río Maya.

Formación Jaimanitas (js): De edad Pleistoceno Superior (parte baja) y espesor que probablemente excede de los 10 m. Está constituida por calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas conteniendo principalmente conchas bien preservadas y corales de especies actuales y ocasionalmente biohermos.

Formación Río Maya (rm): De edad Plioceno Superior - Pleistoceno Inferior y espesor que oscila entre 30 m y 80 m. Se compone de calizas biohémicas

algáceas, coralinas y micríticas, muy duras, de matriz micrítica, frecuentemente aporcelanadas. Las calizas se encuentran frecuentemente dolomitizadas. El contenido de arcilla es muy variable. Contiene corales y abundantes clastos de material terrígeno. En ocasiones existen intercalaciones de conglomerados polimícticos de granulometría variable y cemento calcáreo.

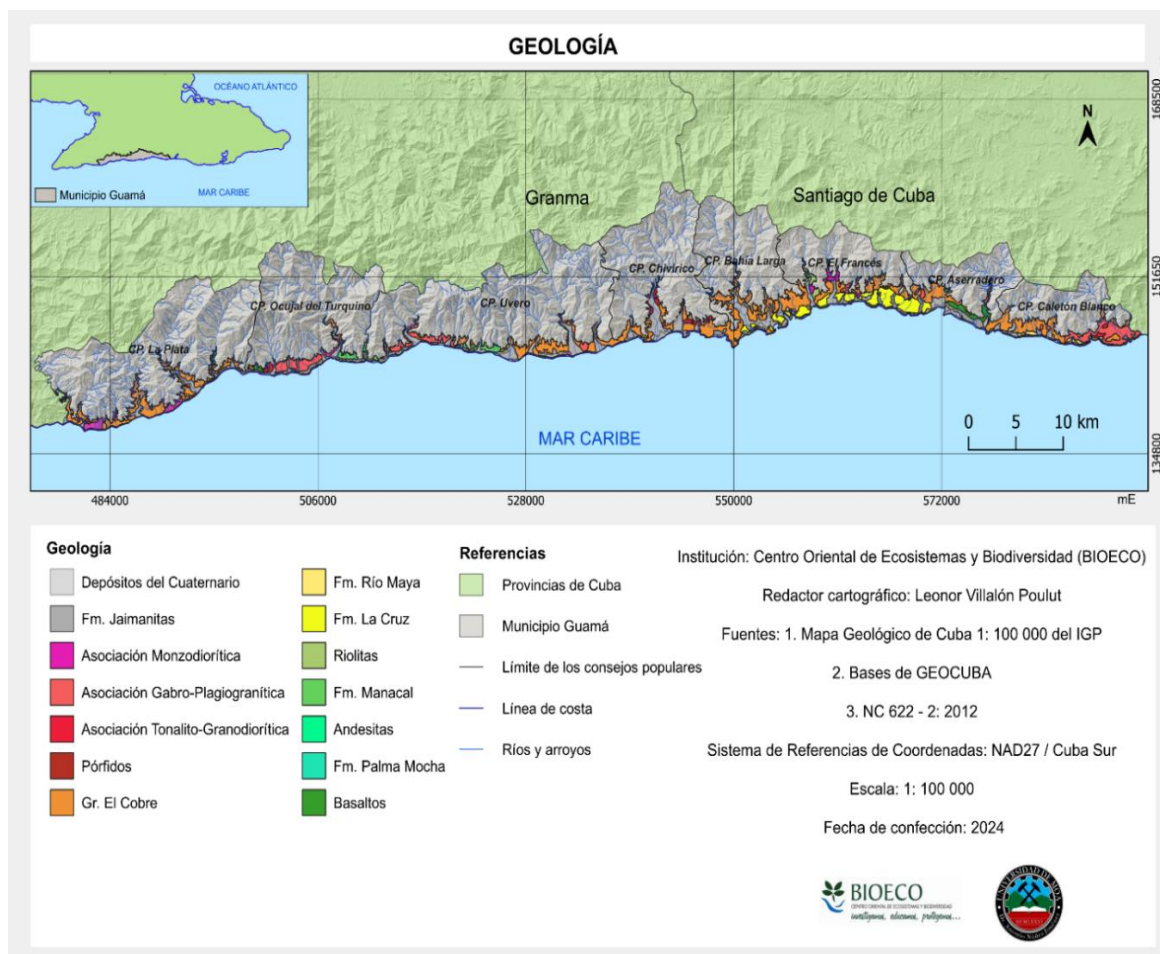


Figura 4. Mapa geológico de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: IGP, 2003.

2.3 Tectónica y Sismicidad

La tectónica del área es muy compleja; dada su ubicación dentro de la zona más activa región Sismogénica de Cuba y el Caribe Noroccidental, que comprende el límite entre la placa de Norteamérica y la microplaca de GONAVE (Arango, 2014). En ella se definen procesos de fallas activas de edad muy reciente que mantienen

fenómenos de apertura, formación de grietas y la presencia de movimientos verticales y horizontales que se combinan (Figura 5).

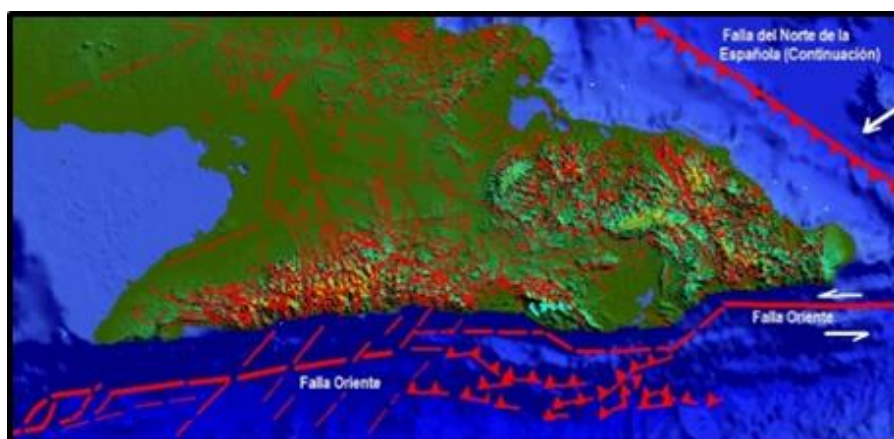


Figura 5. Principales fallas de la región oriental de Cuba. Fuente: Arango, 2014.

En esta región se destaca el tipo de sismicidad conocida como de “entreplacas”, vinculada a la estructura de Bartlett - Caimán (Zona Sismogénica Oriente), por la frecuencia de los terremotos que ocurren y los valores altos de magnitud e intensidad alcanzados históricamente (Chuy, 2010). Las principales afectaciones relacionadas con las fallas activas ante la ocurrencia de un sismo fuerte, están dadas por el hecho de que éstas constituyen zonas débiles en la superficie, en las que se producen incrementos de la intensidad sísmica (García *et al.*, 2002).

Desde el punto de vista sismotectónico, el segmento de falla situado al sur del territorio del municipio Guamá genera series o enjambres de terremotos, donde en algunas ocasiones ocurre un sismo principal y rara vez superan una magnitud de 5 (Figura 6). Lo que no significa que no puede ser afectada por eventos sucedidos en otro sector de la falla cercano al área. En este sentido se recuerda el terremoto que en 1976 produjo una intensidad sísmica de 8,0 grados MSK en la localidad de Pilón, provincia Granma. El cual afectó particularmente los taludes de la Carretera Granma - Santiago de Cuba, con deslizamientos de tierra en varios tramos (Seisdedos *et al.*, 2001; Colectivo de Autores, 2022).

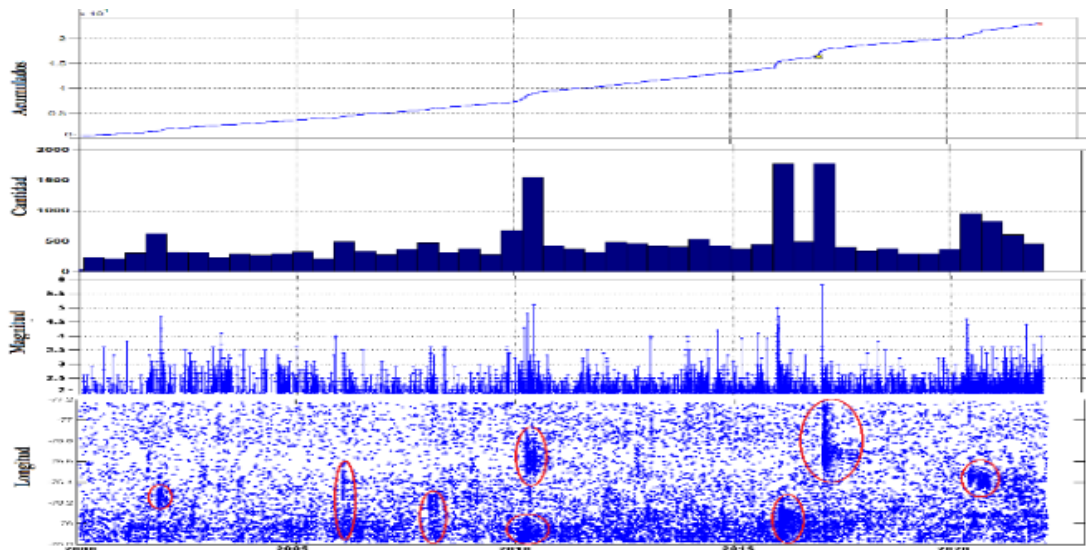


Figura 6. Comportamiento de la sismicidad en el sector de Guamá (año 2000 - febrero 2022 en función del tiempo, en cuanto a acumulados, número de terremotos, magnitud y secuencia en latitud. Fuente: CENAI, 2022 (Tomado de Colectivo de Autores, 2022).

2.4 Relieve

La zona costera corresponde a los restos de una morfología escalonada del neógeno de origen abrasivo de la franja meridional de la Sierra Maestra. Los fenómenos geomorfológicos más frecuentes están asociados al origen tectónico de la región y la continua actividad geodinámica externa, que ha determinado la disposición de las principales formas estructurales del relieve. Debido a esto el relieve presenta una considerable alteración geotectónica, con predominio de pendientes de elevado valor y estructuras falladas, lo que le atribuye un carácter muy complejo (Figura 7).

En esta área de interconexión entre las montañas bajas y la estrecha llanura costera, se desarrollan valles profundos que se ensanchan hacia sur a medida que disminuye la altura. En todos estos valles existen depósitos rocosos escalonados, dando paso a los planos aluviales más al sur que se ramifican hasta llegar a la línea costera en forma de abanicos aluviales. Además, aparecen de forma intercalada sectores de terrazas marinas sobre rocas carbonatadas e ígneas (Colectivo de Autores, 2022).

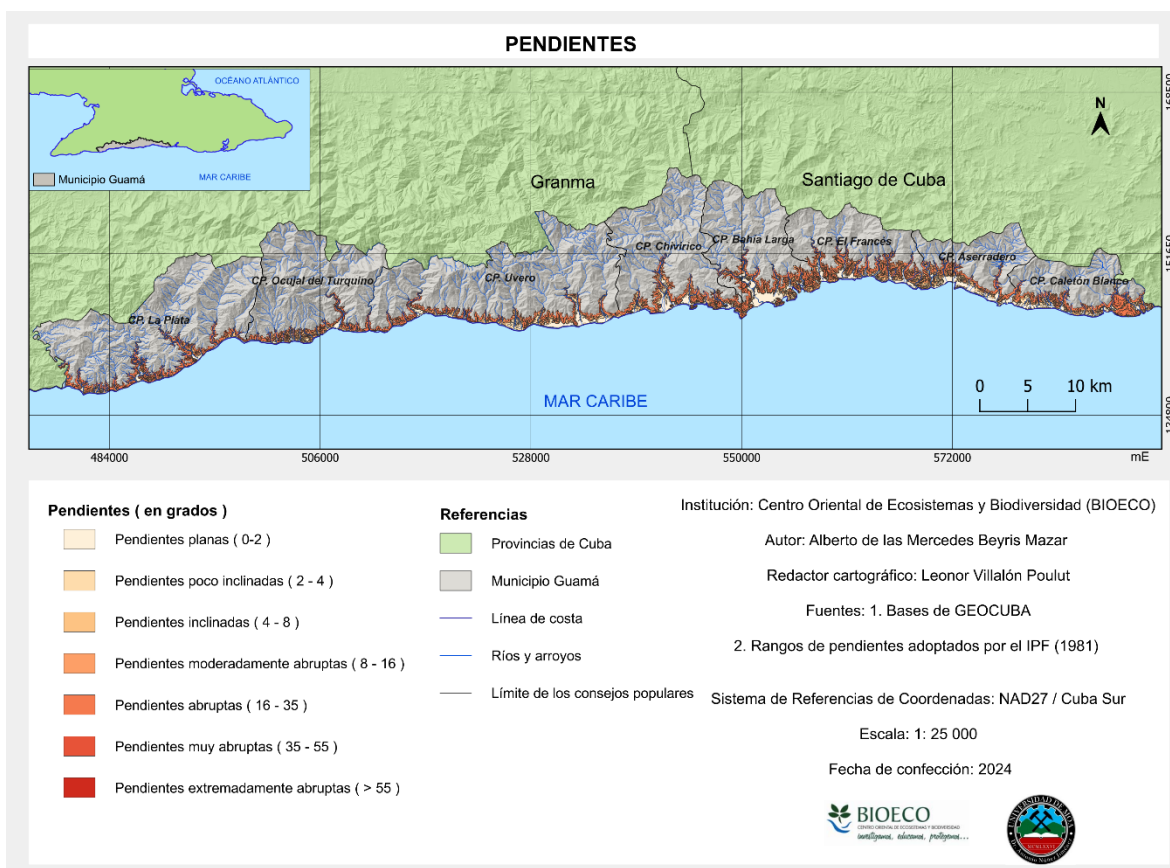


Figura 7. Mapa de pendientes de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por Alberto de las Mercedes Beyris Mazar en Colectivo de Autores, 2022.

2.5 Particularidades climáticas

La distribución espacial de las precipitaciones responde en gran medida a la configuración de la zona, la disposición del relieve, vientos predominantes y distancia de la costa al interior. El período poco lluvioso se caracteriza fundamentalmente por la influencia de los sistemas frontales, los que aportan mayor precipitación cuando se estacionan en el paso de los vientos. Mientras que en el período lluvioso las precipitaciones obedecen fundamentalmente a la combinación de eventos sinópticos como las tormentas tropicales, típicas de esta época del año y las ondas del este, las que al combinarse con el calentamiento diurno y la circulación de los vientos de la región favorecen su ocurrencia.

El análisis del comportamiento espacial de la precipitación media anual, muestra que los valores más elevados se ubican en el rango de los 1 800 - 2 000 mm (Figura

8). Por otro lado, la ocurrencia de intensas lluvias se asocia a fenómenos meteorológicos extremos, como ciclones y huracanes, los cuales tienen una alta incidencia en el área, registrándose para el período (2000-2021), el impacto 17 organismos tropicales (Brito *et al.*, 2021). Las afectaciones por estos eventos se localizan principalmente en la infraestructura de la vivienda, la red vial y la agricultura, como consecuencia de las inundaciones, penetraciones del mar, fuertes vientos y deslizamientos de tierra.

La temperatura media anual muestra variabilidad en su distribución, caracterizada por valores que oscilan entre 25°C y 27°C en la zona costera. Estos valores constituyen el rango máximo de temperatura de la región oriental de Cuba, produciéndose en toda la franja de menor altitud y zonas llanas costeras.

Los vientos locales predominantes son de componentes Norte y Sur, con velocidades entre 14 y 24 km/h para el período lluvioso y entre 20 y 37 km/h para el poco lluvioso. Además, se localizan los denominados Vientos del Norte, que alcanzar velocidades entre 50 y 90 km/h. Igualmente se reportan fuertes vientos en los valles fluviales de los ríos que desembocan directamente al mar, sobre todo en horas de la noche que son reforzados por terrales, principalmente entre los meses de noviembre y marzo (Colectivo de autores, 2022).

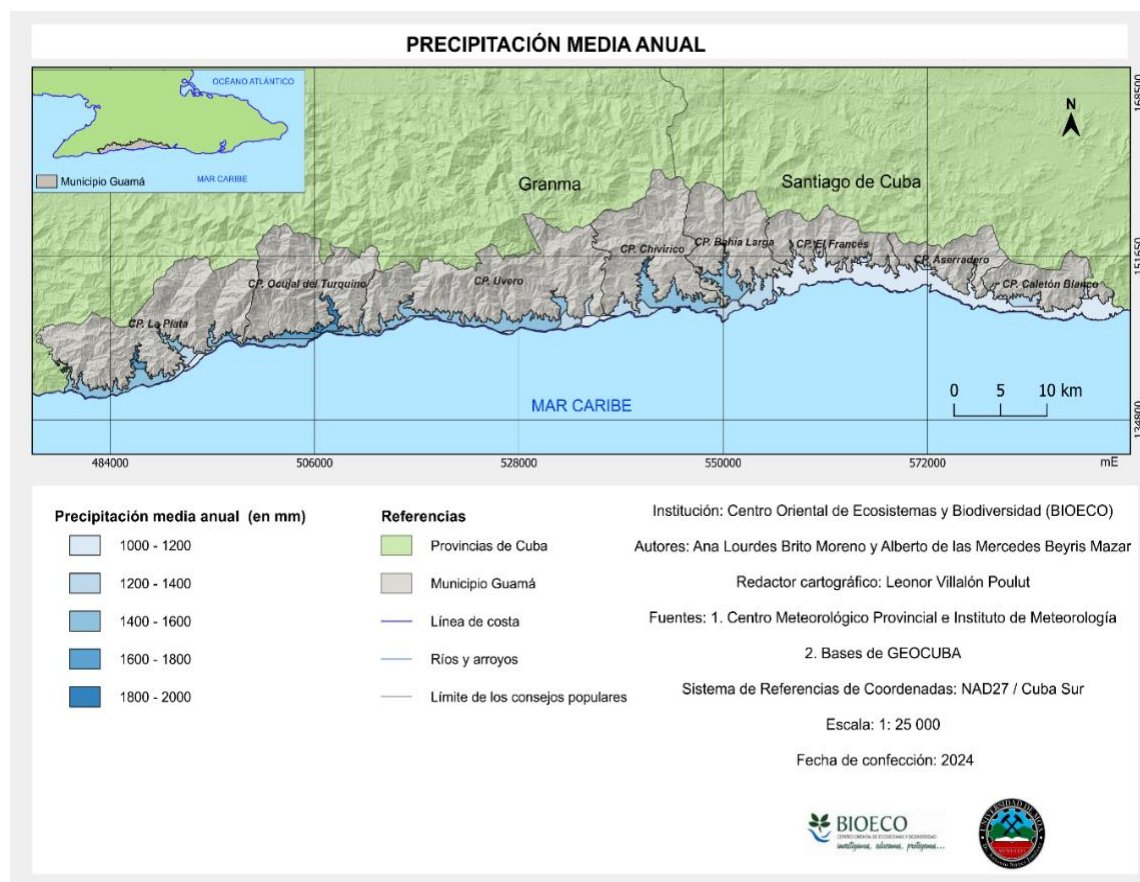


Figura 8. Mapa de precipitación media anual de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Brito & Beyris, 2016.

2.6 Suelos

En el área se ubica ocho tipos de suelos según la clasificación de Renda *et al.*, (1981). Los cuales se corresponden con los tipos Pardo Grisáceo, Pardo sin Carbonatos, Esquelético, Fersialítico Pardo Rojizo, Aluvial y Gley Amarillento Cuarcítico (Figura 9).

Los del tipo Pardo Grisáceo y Pardo sin Carbonatos, se presentan mayormente en los consejos populares (CP) Aserradero, La Plata, Ocuja del Turquino y El Francés. Los primeros son los de mayor representación en el área y presentan una textura limo - arcillosa que le confieren buen drenaje. Su principal uso es agrícola, pero se encuentra limitado por la topografía accidentada, la erosión y escasa profundidad efectiva. Por su parte los segundos presentan una textura arcilla y loam, con

predominio de la arcilla, la cual le ofrece mayor resistencia al impacto de las lluvias y el arrastre ocasionado por la escorrentía.

Ocupando el segundo lugar por distribución, se ubican los Esqueléticos, con mayor representación en los CP Caletón Blanco y La Plata. Estos suelos son producto de la acción erosiva y del mal manejo durante su explotación, que contribuye en gran medida a su baja o ninguna fertilidad. Se caracterizan por estar desnudos de capas de suelos, con abundantes piedras gravas y afloramientos rocosos. Se relacionan mayormente con los materiales geológicos de calizas y rocas efusivas.

El tipo Aluvial tiene gran desarrollo en el área debido a la abundancia de ríos y arroyos. Este es un suelo que no tiene un proceso de formación definido; así como la ausencia de horizontes genéticos. Se encuentra medianamente erosionado, debido en parte a factores antrópicos y presenta características diversas en correspondencia al material que le dio origen y las condiciones de sedimentación.

Los Fersialíticos Pardo Rojizo, medianamente erosionados se distribuyen ampliamente por toda la zona. Formados por procesos de fersialitización, se definen por la presencia de minerales arcillosos y óxidos de hierro. Poseen un bajo porcentaje de humedad natural y está muy mal dotado de los materiales esenciales para la obtención de altas cosechas agrícolas.

Por último, en el CP Caletón Blanco se encuentra el tipo Gley Amarillento Cuarcítico. Estos evolucionan a partir de sedimentos arcillosos ricos en minerales (montmorillonita) y de materiales aluviales y deluviales transportados de zonas de rocas metamórficas (esquistos). Se caracterizan por un mal drenaje superficial e interno. Pueden estar salinizados en diferentes valores según el grado de mineralización del manto freático.

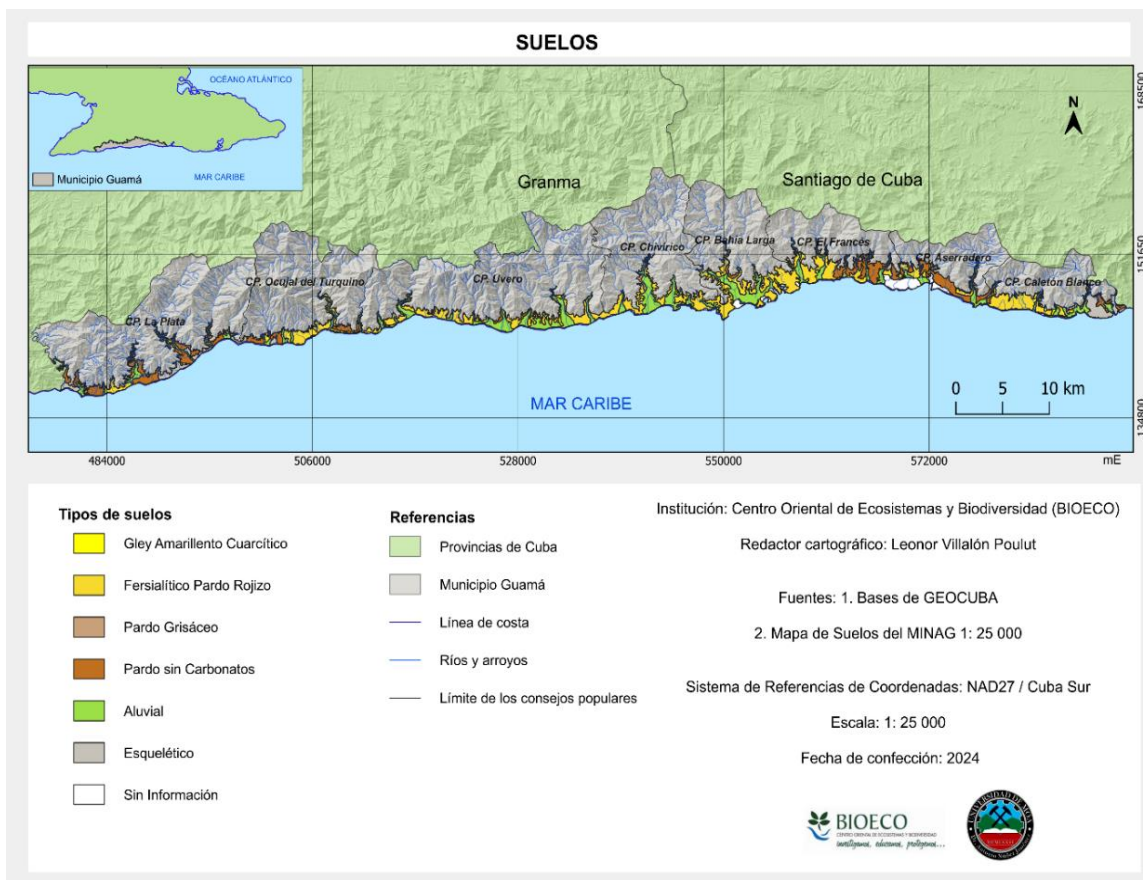


Figura 9. Mapa de suelos de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: MINAG, 1989.

2.7 Hidrografía

Las formaciones de los recursos hídricos de Cuba dependen varios elementos entre los que se destacan las precipitaciones, configuración del territorio, vegetación, relieve y los suelos (González & Domínguez, 2019). En general la red hidrográfica del municipio Guamá es cuantiosa por el gran número de cursos superficiales en toda su geografía, no obstante, son de poca longitud sus ríos y arroyos y baja la amplitud de sus cuencas.

Debido al alargamiento del municipio y a la presencia de la Sierra Maestra, las redes hidrográficas son pequeñas y en ocasiones aparecen diminutas cuencas pertenecientes a ríos intermitentes. Esto está dado por las apreciables diferencias no sólo en el gradiente del relieve, la extensión de los ríos, sino también en el diseño de sus cuencas, las cuales se ubican perpendiculares a la costa, donde vierten las

aguas todos sus ríos y arroyos. Estos poseen escaso caudal en época de seca y abundantes en épocas de lluvias; llegando a generar grandes daños en el área, como se pudo observar en la Figura 10 (Colectivo de Autores, 2022).



Figura 10. Destrucción del vial (a) e interrupción de la circulación por la carretera principal por la crecida del río Sevilla (b). Fotos: Euclides Fornaris Gómez (Tomadas de Colectivo de Autores, 2022).

2.8 Procesos geodinámicos y antrópicos

Erosión

Este es un proceso de alta incidencia en los suelos del municipio, donde según la delegación del Ministerio de la Agricultura para el año 2019 el 97,4 % de estos poseían algún grado de erosión. Dentro de las causas de origen se encuentran la aplicación incorrecta de normas agropecuarias, la sobreexplotación de tierras agrícolas y la actividad antrópica (INOTU, 2021). En la zona del litoral se manifiesta en laderas, influenciado por flujos de agua superficiales, la deforestación y los cortes producidos durante la construcción de la carretera Granma - Santiago de Cuba; además de la acción marina y el oleaje durante eventos meteorológicos (Figura 11).



Figura 11. Influencia de la erosión marina en el talud (a), compactación del suelo y pérdida de arena (b) y erosión en laderas y acumulación de material en el río (c). Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut, 2022.

Carso

En la zona costera se observan fenómenos cárscicos en formaciones carbonatadas aisladas de diferentes tamaños y de zonas de calizas arrecifales del Paleoceno Superior hasta el Eoceno Medio, producidos como bordes sublitorales de las islas volcánicas originales (Figura 12 a). Las calizas están en su mayoría metamorfizadas por contacto (Panoš, 1988).

Se observa también un carso joven asociado a relieves de mesetas cárscicas, escarpes tectónicos abrasivos ubicados en la parte costera (Figura 12 b). La dinámica de ascenso ha originado la conformación de terrazas marinas y fenómenos de erosión local, provocados por el escurrimiento superficial y deslizamientos de tierra ocasionando mayormente derrumbes y desprendimientos de capas menos duras (Colectivo de autores, 2022).

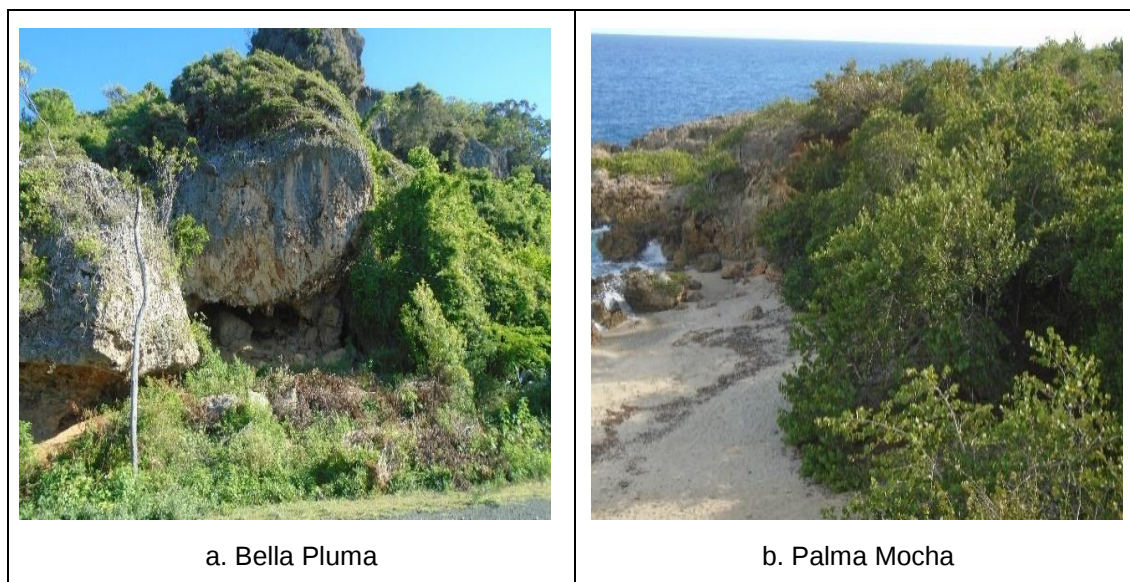


Figura 12. Formaciones carbonatadas aisladas de diferentes tamaños (a) y calizas lenticulares aisladas en costas acantiladas aterrazadas (b). Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut, 2022.

Cobertura vegetal

La cobertura vegetal tiene una función muy importante en la estabilidad de las laderas. Según Beyris (2003), la cobertura principal en el área se relaciona fundamentalmente con las áreas agrícolas y las destinadas al pastoreo del ganado. Se compone por pastizales sin estructuras arbustivas y arbóreas, las cuales inciden mayormente en la erosión de los suelos y acarreo de material hacia los ríos y zona costera.

Por su parte las zonas con mayores coberturas de árboles y arbustos, se incrementan en la medida que se asciende en altitud (Figura 13 a). Existen además otros tipos de coberturas adyacentes a la línea de costa, constituidas por bosques de diferentes tipos como: los manglares, uverales y matorrales costeros y de costas rocosas; afectados fuertemente por la actividad antrópica (Figura 13 b).

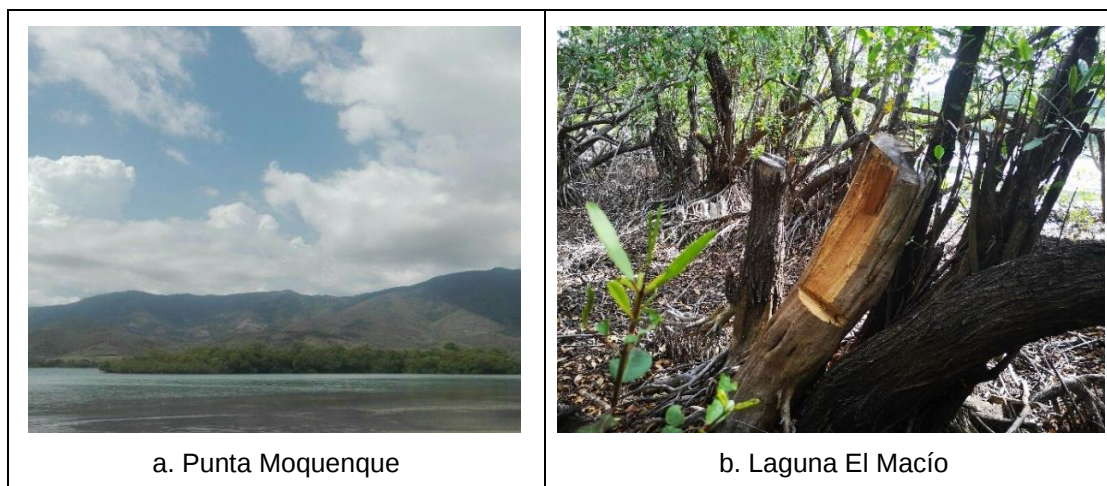


Figura 13. Estado de cobertura del área (a). Afectación al mangle por la actividad antrópica (b). Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut (a) y Elianne Calderón Montoya (b), 2022.

Actividad antrópica

En este sentido se destaca la deficiente o mala utilización de los elementos estructurales, tectónicos y características geomecánicas del macizo rocoso al confeccionar proyectos de voladuras durante la construcción de la carretera Granma - Santiago de Cuba, los cuales provocaron una retro fracturación de las rocas (Seisdodos *et al.*, 2001). Además de la ausencia de medidas de estabilidad de taludes en los sectores identificados como muy peligrosos (Figura 14).

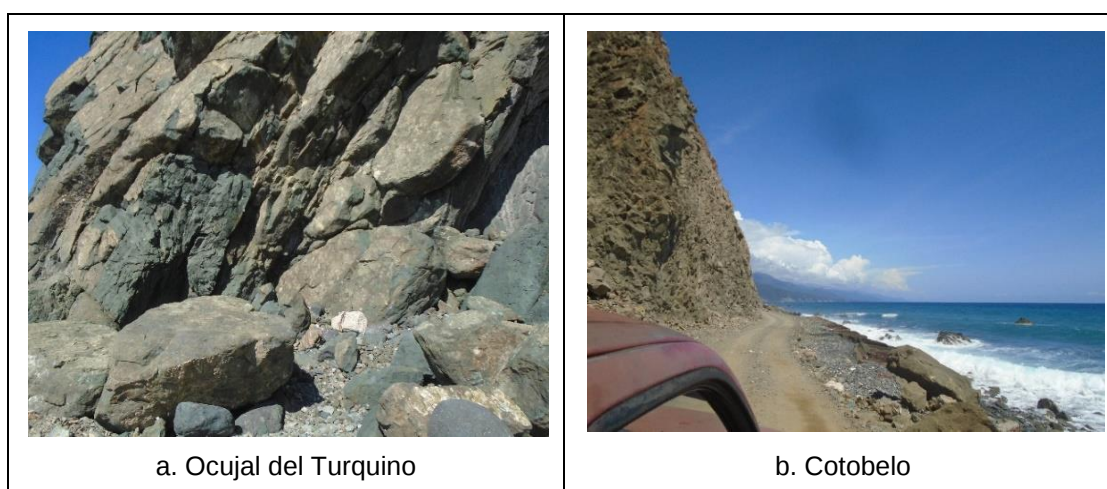


Figura 14. Rocas fracturadas, débilmente dispuestas y afectados por procesos de meteorización. Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut, 2022.

2.9 Conclusiones parciales

- La zona de estudio se caracteriza por la presencia de fenómenos cárnicos en formaciones carbonatadas aisladas de diferentes tamaños. Rocas piroclásticas, sedimentarias, terrígeno - clásticas y vulcanógenas de diferente composición y granulometría, afectadas indistintamente por procesos de intemperismo y la propia evolución geotectónica de la zona.
- Los procesos tectónicos de ascenso y movimientos geotectónicos recientes Influyen fuertemente en el área, lo que contribuye al predominio de pendientes de elevado valor y la presencia de estructuras falladas.
- La ocurrencia de abundantes precipitaciones es uno de los factores que ocasionan deslizamientos de tierra en el área de estudio.
- El área se ve afectada por el efecto de los sismos ocurridos en la región sur oriental, siendo otro de los factores que provocan deslizamientos.
- El medio se encuentra altamente influenciado por la actividad antrópica marcado primeramente por la construcción de la carretera Granma - Santiago de Cuba, cambios en la cobertura vegetal, la urbanización, la degradación de los suelos y la actividad agropecuaria.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL PELIGRO POR DESLIZAMIENTOS DE TIERRA INDUCIDOS POR LLUVIAS

Introducción

En este capítulo se expone el método empleado en la evaluación del peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias en la zona costera del municipio Guamá. Se describe metodología general de trabajo seguida para alcanzar los objetivos propuestos en la investigación. Posteriormente se presenta el procedimiento utilizado en la valoración de la influencia de las condiciones físico - geográficas e ingeniero - geológicas del área sobre el desarrollo de inestabilidad. Por último, se detallan los factores empleados en el análisis de la peligrosidad y la obtención del mapa final.

3.1 Metodología para la evaluación del peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias

A nivel provincial y local, como demuestra la revisión bibliográfica, se han llevado a cabo varios estudios sobre la evaluación del peligro de deslizamiento del terreno. Sin embargo, se concluye que la mayoría de estos no incluyen métodos de verificación de los resultados obtenidos, las tipologías de deslizamientos, ni las características ingeniero - geológicas de las litologías presentes. Además, no se tiene en cuenta la influencia de la actividad antrópica en la ocurrencia del fenómeno.

Por otro lado, estos se han enfocado en la evaluación de la amenaza por causas sísmicas, sobre todo en el área de la investigación. Es por ello que, definidas las lluvias como uno de los detonantes principales de deslizamientos (Seisdedos *et al.*, 2001, Castellanos, 2008 b; Galbán *et al.*, 2021) y teniendo en cuenta que la zona está expuesta a eventos hidrometeorológicos debido a su configuración geográfica (García *et al.*, 2017), se hace necesaria la valoración de las mismas como agente desencadenante primordial.

En Cuba actualmente existe la “Guía metodológica para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo por deslizamientos de terreno a nivel municipal”, para los estudios dirigidos por la Agencia de Medio Ambiente a nivel nacional (AMA, 2012).

La cual ha sido ejecutada en diferentes partes del país (Colectivo de autores, 2011; Villalón *et al.*, 2012; Savón *et al.*, 2017), alcanzando importantes resultados.

Esta metodología, en su primera fase comprende la evaluación de la susceptibilidad por dos variantes (A o B), dependiendo de la existencia o no del inventario de deslizamientos de terreno. La variante A (el inventario de deslizamientos de terreno no exista o sea mínimo) se basa en la selección de un conjunto de indicadores de peligro que son evaluados por asignación de pesos, teniendo entre sus precedentes a nivel internacional los trabajos realizados por Varnes (1984), Carrara *et al.*, (1991), Mora *et al.*, (1992) y Mora & Vahrson (1993). Además, contempla entre los factores de disparo las lluvias máximas caídas en 24 horas para un período de retorno de 100 años (1 % de probabilidad de ocurrencia).

No obstante, dado que el objetivo general de esta investigación es establecer los sectores con potencial para presentar deslizamientos en caso de lluvias de intensidad alta; se decidió emplear el método Mora & Vahrson (Mora *et al.*, (1992). Este permite obtener el grado de peligro del terreno a deslizarse, mediante la combinación de la valoración y peso relativo de los factores más significativos involucrados en la inestabilidad de laderas.

De forma general este método considera que el grado o nivel de peligro por deslizamientos, es el producto de los elementos pasivos y de la acción de los factores de disparo (ecuación 2):

$$H = EP * D \quad (2)$$

Donde:

H: grado o nivel de peligro por deslizamientos

EP: valor producto de la combinación de los elementos pasivos

D: valor de los factores detonantes

Por su parte el valor de los elementos pasivos se compone de los siguientes parámetros (ecuación 3):

$$EP = (S_l * S_p * S_h) \quad (3)$$

Donde:

S_l : valor del parámetro de susceptibilidad litológica

S_p : valor del parámetro de susceptibilidad por las pendientes

S_h : valor del parámetro de susceptibilidad por humedad del terreno

El factor detonante se compone de los siguientes parámetros (ecuación 4):

$$D = D_{ll} + D_s \quad (4)$$

Donde:

D_{ll} : valor del parámetro detonante por lluvias

D_s : valor del parámetro detonante por sismos

Sustituyendo los parámetros, la ecuación original se puede expresar como (ecuación 5):

$$H = (S_l * S_p * S_h) * (D_{ll} + D_s) \quad (5)$$

De esta ecuación se pueden derivar las siguientes relaciones (ecuaciones 6 y 7):

$$H_{ll} = (S_l * S_p * S_h) * (D_{ll}) \quad (6)$$

$$H_s = (S_l * S_p * S_h) * (D_s) \quad (7)$$

Donde H_{ll} : nivel de peligro por lluvias y H_s : nivel de peligro por sismos, siendo la ecuación 6 la empleada en esta investigación.

Entre las ventajas del método se destaca su simplicidad, facilidad de implementación en un SIG y que su modelo final predice con certeza las áreas de deslizamientos (Barrantes *et al.*, 2011). Es por ello que resulta valiosa en la identificación de zonas críticas, además de resultar muy útil a la hora de orientar

prioridades en cuanto al destino de los recursos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las áreas obtenidas constituyen solamente zonas de referencias, por lo que no sustituyen los estudios geotécnicos de detalles o las labores de campo.

3.2 Metodología general de trabajo

La metodología general de la investigación se compone de tres etapas principales, las cuales se resumen en la Figura 15 y se explican a continuación:

➤ Etapa I. Recopilación de la información

En esta etapa se ejecutó la búsqueda, selección y revisión bibliográfica, a través de sitios web especializados, bases de datos, revistas y otros documentos disponibles, relacionados con la temática abordada en esta investigación. De esta forma se estableció el marco teórico - conceptual de la investigación y los antecedentes sobre la peligrosidad por deslizamientos de tierra, así como del fenómeno inducidos por lluvias.

Conjuntamente se consultaron los trabajos precedentes de la investigación, lo que permitió recopilar la información primaria del área y realizar la caracterización físico - geográfica de la misma. Además, se obtuvo una primera idea sobre los factores que intervienen en la ocurrencia de los deslizamientos.

➤ Etapa II. Procesamiento de la Información

Dentro de esta etapa se efectuaron recorridos de campo que permitieron corroborar las condiciones generales del área y los factores que influyen en las inestabilidades. Asimismo, se comprobaron las tipologías de movimientos de laderas presentes en el área y se obtuvieron inventarios de deslizamientos.

En otro orden se adquirió y proceso toda la base digital a emplear. Para la generalización espacial se tuvo en cuenta el área mínima cartografiable según la escala de trabajo de acuerdo con la metodología de Priego *et al.*, (2008), ver Anexo 1. Como herramienta cartográfica se utiliza el SIG QGIS (Figura 16), mediante este se procesaron los factores identificados, a través de mapas temáticos, empleando la siguiente base de datos primaria:

- Modelo digital del terreno (MDT) de la empresa GeoCuba a escala 1: 25 000.
- Mapa Geológico de Cuba del Instituto de Geología y Paleontología (IGP, 2003) a escala 1: 100 000.
- Mapa de precipitación media anual de la provincia Santiago de Cuba (Brito & Beyris, 2016) a escala 1: 25 000.
- Mapa de lluvias máximas diarias caídas en 24 horas, para el 2 % de probabilidad de ocurrencia (50 años) de la provincia Santiago de Cuba (Bermúdez & Beyris, 2016) a escala 1: 25 000.

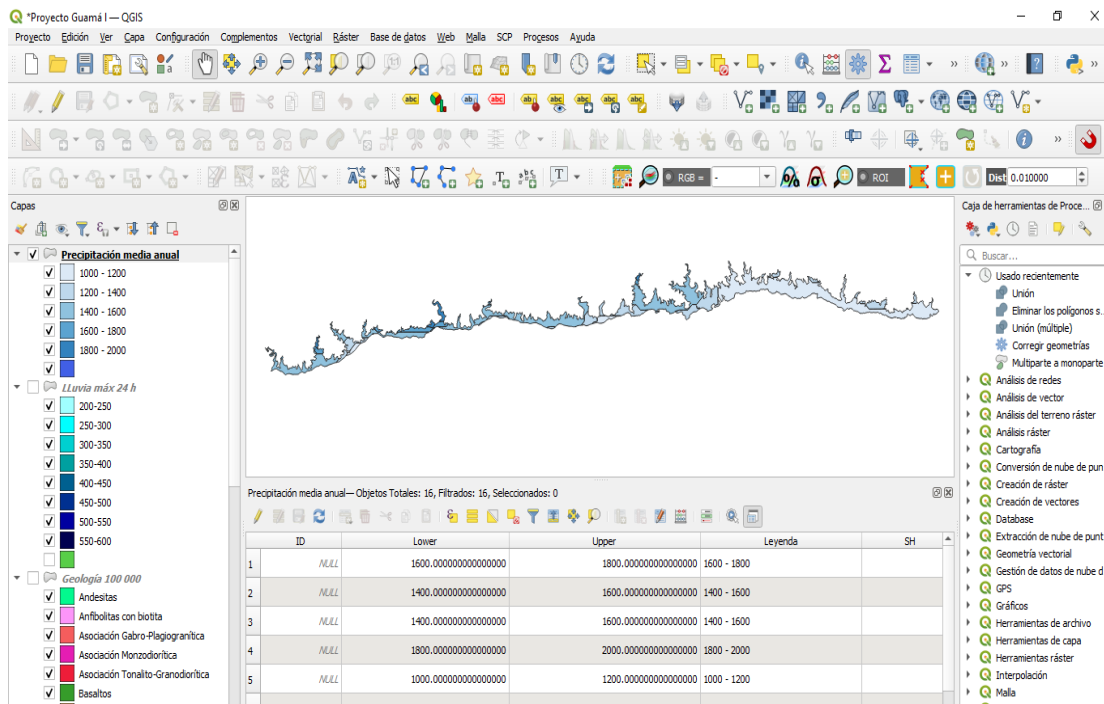


Figura 16. Visualización del Sistema de Información Geográfica. Fuente: Elaborado por la autora.

➤ **Etapas III. Trabajo de gabinete**

En esta etapa se caracterizaron los factores que influyen en la generación de deslizamientos en la zona de estudio; se determinaron los mecanismos y tipologías de deslizamientos presentes. Se aplicó el método Mora & Vahrson (Mora *et al.*, 1992), lo que concluyó con la salida cartográfica del mapa de peligro a la ocurrencia de deslizamientos de tierra inducidos por lluvias en la zona costera del municipio

Guamá. Luego se interpretaron los resultados obtenidos y en base a estos se propusieron medidas para prevenir o mitigar los deslizamientos. Finalmente se alcanzaron las principales conclusiones y recomendaciones de la investigación.

3.3 Factores condicionantes y desencadenantes de deslizamientos en la zona de estudio

La susceptibilidad de que se produzcan movimiento en las laderas está condicionada por las características del medio en que se desarrollen. Una variación en alguna de estas condiciones puede traducirse en un incremento o disminución del esfuerzo de corte cuyo efecto inmediato desencadena la inestabilidad de una masa de terreno. De ahí que el conocimiento de estos elementos permite realizar una evaluación del peligro existente y tomar las medidas necesarias para evitar o corregir los posibles eventos, según los componentes de mayor control en los movimientos.

Luego de realizar la caracterización general del área se identificaron las condiciones en que se desarrollan los deslizamientos. A partir de la cual, se logró una valoración de los principales factores condicionantes y desencadenantes de deslizamientos. Los mismos están dados por las características geotectónicas, geológicas y geomorfológicas del área, de conjunto con la antropización del medio como factores condicionantes, mientras que las condiciones climáticas actúan como uno de los desencadenantes del fenómeno.

3.4 Factores utilizados en el análisis de la peligrosidad

Al combinar los factores de susceptibilidad y disparado se obtienen los lugares de mayor probabilidad de desarrollar deslizamientos. Los factores utilizados en esta investigación según la metodología de Mora *et al.*, (1992), constan de tres elementos condicionantes o intrínsecos de susceptibilidad: litología, pendientes y humedad de suelo, además de la precipitación como factor desencadenante o de disparo. Seguidamente se describe el procedimiento utilizado en el análisis de estos factores.

Factores condicionantes

- Litologías

Las características de los suelos y los tipos de rocas tienen un papel fundamental en el comportamiento de las laderas. El grado de alteración, la capacidad de retención de humedad, el estado de fracturamiento o composición mineralógica, son algunos de los elementos que relacionan la composición geológica con la incidencia de deslizamientos (Mora *et al.*, 1992).

Para la determinación de las litologías presentes en el área se tomó como base el Mapa Geológico de Cuba a escala 1: 100 000 (Figura 4). La descripción de las mismas se basó en la información del léxico estratigráfico de Cuba (IGP, 2013). El análisis del factor litológico, se trabajó a partir de la propuesta de Mora & Vahrson (1993), teniendo en cuenta las características geológicas, además se incorporó la clasificación ingeniero - geológica realizada por Lomtadze (1977) y Pérez (1976), ver Tabla 2.

Tabla 2. Características ingeniero - geológicas de las rocas y formaciones geológicas. Fuente: Elaborado por la autora.

Rocas/Formaciones	Características ingeniero - geológicas
Fm. Manacal	Rocas piroclásticas y sedimentarias con bajo grado de afectación
Asociación gabro - plagiogranítica, Asociación monzodioríticas, Asociación tonalito - granodiorítica, Rolitas, Andesitas, Basaltos, Pórfidos	Rocas duras - semiduras. Afectadas por procesos de intemperismo y agrietamiento
Fm. Palma Mocha	Rocas terrígeno - clásticas y vulcanógenas; en menor cantidad aparecen calizas. Estratificación fina. Alternancia o intercalaciones de rocas duras y débiles, en ocasiones con margas. Presencia de carso
Fm. La Cruz	Secuencia terrígeno - carbonática. Intercalaciones de arcillas esmectíticas. Alternancias de calizas biotriticas. Resistencia al corte medio. Fracturas cizallables. Procesos de erosión
Fm. Río Maya	Calizas biohémicas algáceas y coralinas muy duras. Frecuentemente dolomitizadas con matriz micrítica. Intercalaciones de clastos muy variables. Afectadas por procesos de intemperismo y agrietamiento
Gr. El Cobre	Rocas vulcanógenas, vulcanógeno - sedimentarias. Rocas duras-semiduras. Presencia de carso. Debilitadas tectónicamente. Estratificadas. Alternancia de rocas duras y débiles. Intenso agrietamiento. Yacencia de estratos paralelos o subparalelas a la orientación de los sistemas de grietas principales
Depósitos del Cuaternario	Sedimentos no consolidados derivados de la erosión fluvial y regional. Afectados por procesos de erosión. Estratificación. Granulometría diversa
Fm. Jaimanitas	Calizas biotriticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas. Estratificación fina. Alternancia o intercalaciones de rocas duras y débiles, en ocasiones con margas. Presencia de carso. Rocas duras - semiduras

- Ángulo de las pendientes

Se refiere al efecto que tiene la inclinación del terreno como agente pasivo en la susceptibilidad a deslizamientos, se supone que conforme se incrementa la pendiente, la probabilidad de que ocurra un deslizamiento aumenta también (Mora, 2004). En el análisis de este parámetro, se partió del mapa de pendientes de la zona costera del municipio Guamá, realizado a partir del MDT de la empresa GeoCuba, en formato ráster de 25 m (Figura 7). En la Tabla 3, se describen las condiciones topográficas del terreno, los procesos característicos y esperados, de acuerdo al grado de inclinación de terreno, según los rangos adoptados por el Instituto de Planificación Física (IPF) en el año 1981.

Tabla 3. Caracterización por el ángulo de las pendientes. Fuente: IPF, 1981.

Rango de pendientes (°)	Características
0 - 4	Pendientes planas a poco inclinadas, se desarrollan procesos de inundación, empantanamiento, encharcamiento, erosión
4 - 16	Pendientes inclinadas a moderadamente abruptas, erosión severa
16 - 35	Pendientes abruptas, erosión intensa, procesos de denudación intensos, peligro de deslizamientos
35 - 55	Pendientes muy abruptas, erosión intensa, peligro de caída de rocas
> 55	Pendientes extremadamente abruptas, erosión intensa, peligro de caída de rocas

- Humedad del Suelo

Este factor cuantifica la influencia de la humedad acumulada en el suelo en la incidencia de deslizamientos de tierra. Cuando el terreno se humedece al máximo, el suelo obtiene un peso adicional, el cual puede producir la disminución de la resistencia e incluso causar que este se comporte como un fluido, de ahí la importancia de este elemento en la inestabilidad de laderas (Mora, 2004).

En esta investigación se trabajó con la precipitación media anual; la cual se considera como un indicativo de la humedad antecedente del suelo en el momento que se dan las lluvias máximas diarias (SGC, 2012). Para ello se empleó el mapa de precipitación media anual de la zona costera (Figura 8). En su análisis se consideraron los cambios que genera el aumento del contenido de agua en las laderas en la ocurrencia de deslizamientos. La asignación de un valor de susceptibilidad se realizó acorde a la metodología de Mora & Vahrson (1994), por lo que no se asigna la categoría de muy baja susceptibilidad (Tabla 4).

Tabla 4. Valoración del factor de precipitación media anual. Fuente: Mora & Vahrson, 1994.

Nivel de Susceptibilidad	Rangos de precipitación media anual (mm)
Baja 2	1 000 – 1 400
Moderada 3	1 400 – 1 800
Alta 4	1 800 – 2 200
Muy Alta 5	> 2 200

Factor desencadenante

- Lluvias máximas en 24 horas

En este factor se considera la influencia de las precipitaciones potencialmente generadoras de deslizamientos. Se emplearon las lluvias máximas diarias caídas en 24 horas, para el 2 % de probabilidad de ocurrencia (50 años), calculado a partir de la estadística de datos históricos de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Santiago de Cuba (Figura 17). Para su clasificación se utilizó la valoración del parámetro de disparo por lluvias propuesto por Mora *et al.*, (1992), ver Tabla 5.

Tabla 5. Valoración del factor de disparo por lluvias máximas en 24 horas. Fuente: Mora et al., 1992.

Nivel de Susceptibilidad	Lluvias máximas en 24 h (mm)
Muy bajo 1	< 100
Bajo 2	100 - 200
Moderado 3	200 - 300
Alto 4	300 - 400
Muy Alto 5	> 400

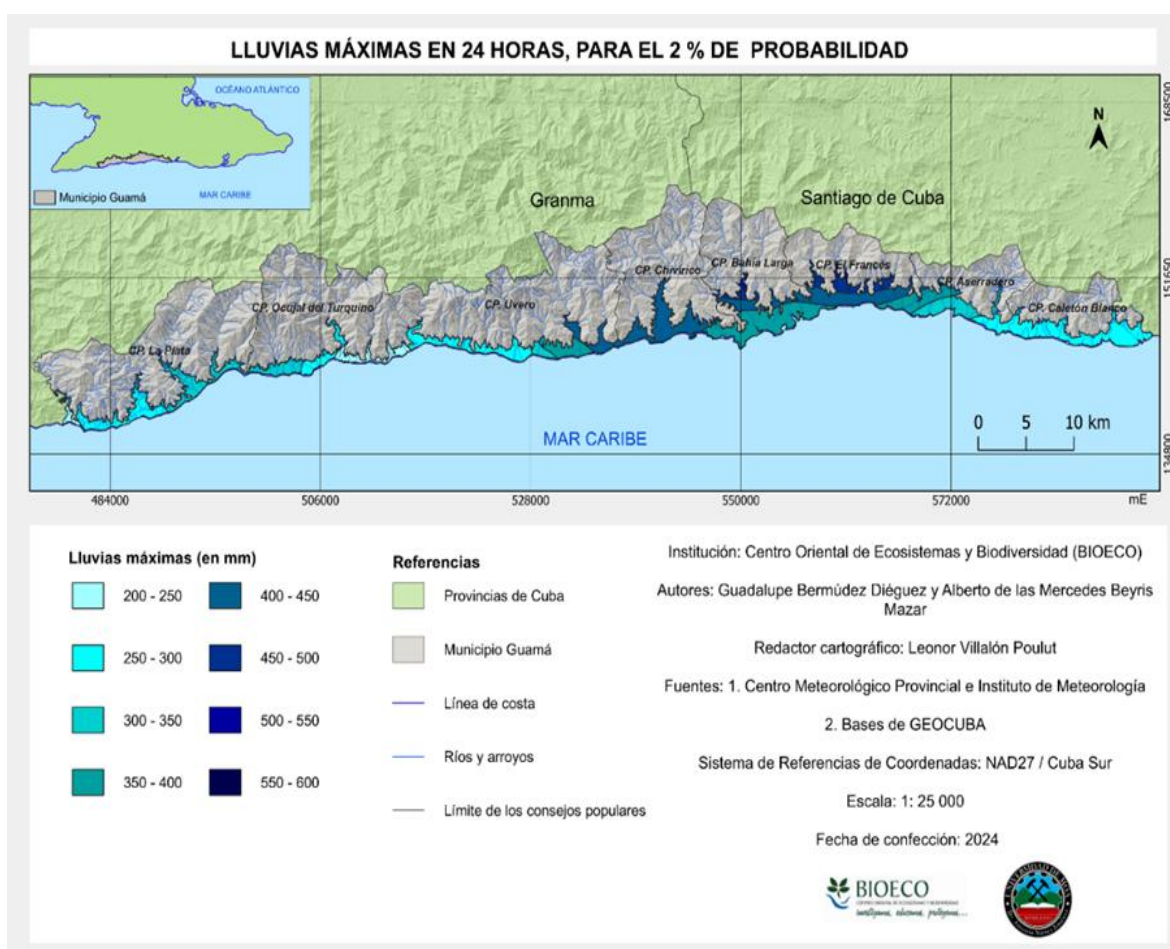


Figura 17. Mapa de lluvias máximas en 24 horas, para el 2 % de probabilidad de ocurrencia (50 años) de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Bermúdez & Beyris, 2016.

3.5 Valoración de los factores utilizados en el análisis de la peligrosidad

Siguiendo con la metodología se asignó a cada factor un valor de susceptibilidad cualitativo y cuantitativo, en función de cinco niveles: (1) Muy Baja, (2) Baja, (3) Moderada, (4) Alta y (5) Muy Alta. Esta valoración se efectuó teniendo la influencia de las condiciones del área de estudio y su capacidad de favorecer o reducir la posibilidad de roturas de los taludes y laderas.

Una vez valorados todos los factores empleados en el análisis, se procedió a su reclasificación a través de mapas temáticos de factores condicionantes (litologías, pendientes y humedad del suelo) y un desencadenante (lluvias máximas en 24 horas). Posteriormente mediante las técnicas de elaboración cartográfica que brinda el SIG se aplicó la ecuación 6 y se obtuvo el mapa de peligro de deslizamientos de tierra inducidos por lluvias.

Dado que durante la combinación de los factores no se crean valores únicos, para la interpretación de los resultados finales, se establecieron rangos como se plantea en los trabajos de Mora *et al.*, (1992), Mora (2004), Barrantes *et al.*, (2011). Asimismo, se valoraron las condiciones geomorfológicas, geotectónicas, geológicas, hidrogeológicas y climáticas del área, en la interpretación y análisis final. Por otro lado, resulta imprescindible chequear la confiabilidad de la zonificación obtenida, es por ello que se emplearon 12 inventarios de deslizamientos para la validación del mapa de peligrosidad.

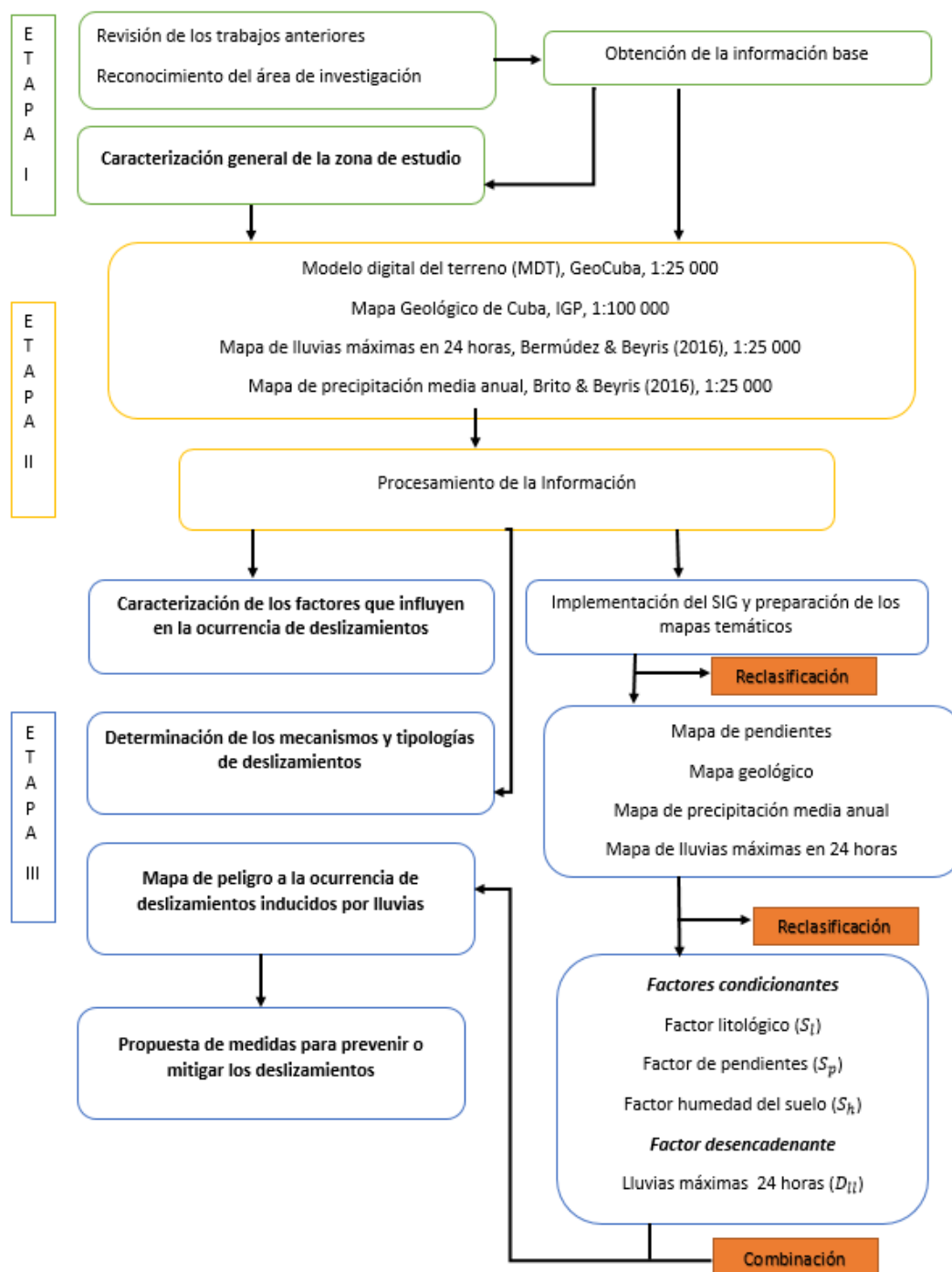


Figura 15. Metodología empleada en la evaluación del peligro de deslizamientos de tierra inducidos por lluvias en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

3.6 Conclusiones parciales

- La investigación parte de la caracterización físico - geográfica del área, a través de la cual se identifican y caracterizan los factores que originan y condicionan la ocurrencia de deslizamientos.
- Los factores que condicionan la ocurrencia de deslizamientos en la zona de estudio están dados por las características geotectónicas, geomorfológicas, geológicas y la antropización del medio, en tanto las precipitaciones destacan como factor desencadenante.
- La metodología empleada, permite obtener las áreas de mayor peligro a la ocurrencia de deslizamientos, así como la caracterización de los escenarios en que se desarrolla el fenómeno.

CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DEL PELIGRO POR DESLIZAMIENTOS DE TIERRA INDUCIDOS POR LLUVIAS EN LA ZONA COSTERA DEL MUNICIPIO GUAMÁ

Introducción

En este capítulo se reflejan los resultados obtenidos según la metodología propuesta en la investigación. Primeramente, se describen los tipos de deslizamientos que tienen lugar en el área de estudio y los factores que inciden en su generación. En segundo lugar, se aplica el método seleccionado para la evaluación de la peligrosidad y se realiza la interpretación de la cartografía obtenida. Por último, se presenta un conjunto de medidas para prevenir o mitigar la ocurrencia de inestabilidades en el área.

4.1 Mecanismos y tipologías de deslizamientos identificados en el área de estudio

La inestabilidad de taludes se traduce en una serie de movimiento, que pueden ser clasificados en base a distintos conceptos. Tal como se explica en el capítulo anterior una de las primeras tareas realizadas, con vista a la evaluación del peligro, fueron los recorridos de campo. Como resultado de estos trabajos, se obtuvieron 12 inventarios de deslizamientos (Figura 18 y Anexo 2), lo cual, permitió establecer criterios para la caracterización de los diferentes mecanismos y tipologías de deslizamientos que tienen lugar en la zona costera del municipio Guamá, a partir de su descripción, formaciones geológicas en que se presentan y los factores intervienen en el surgimiento de las inestabilidades.

El conocimiento de estos parámetros es de gran importancia ya que permite, entre otros aspectos, entender la física del proceso y elegir medidas adecuadas de control y estabilización de deslizamientos (Almaguer & Guardado, 2006). Seguidamente se describen estos mecanismos y tipologías, tomando como base las propuestas de Varnes (1978), Hutchinson (1988), WP/WLI (1993) y Cruden & Varnes (1996).

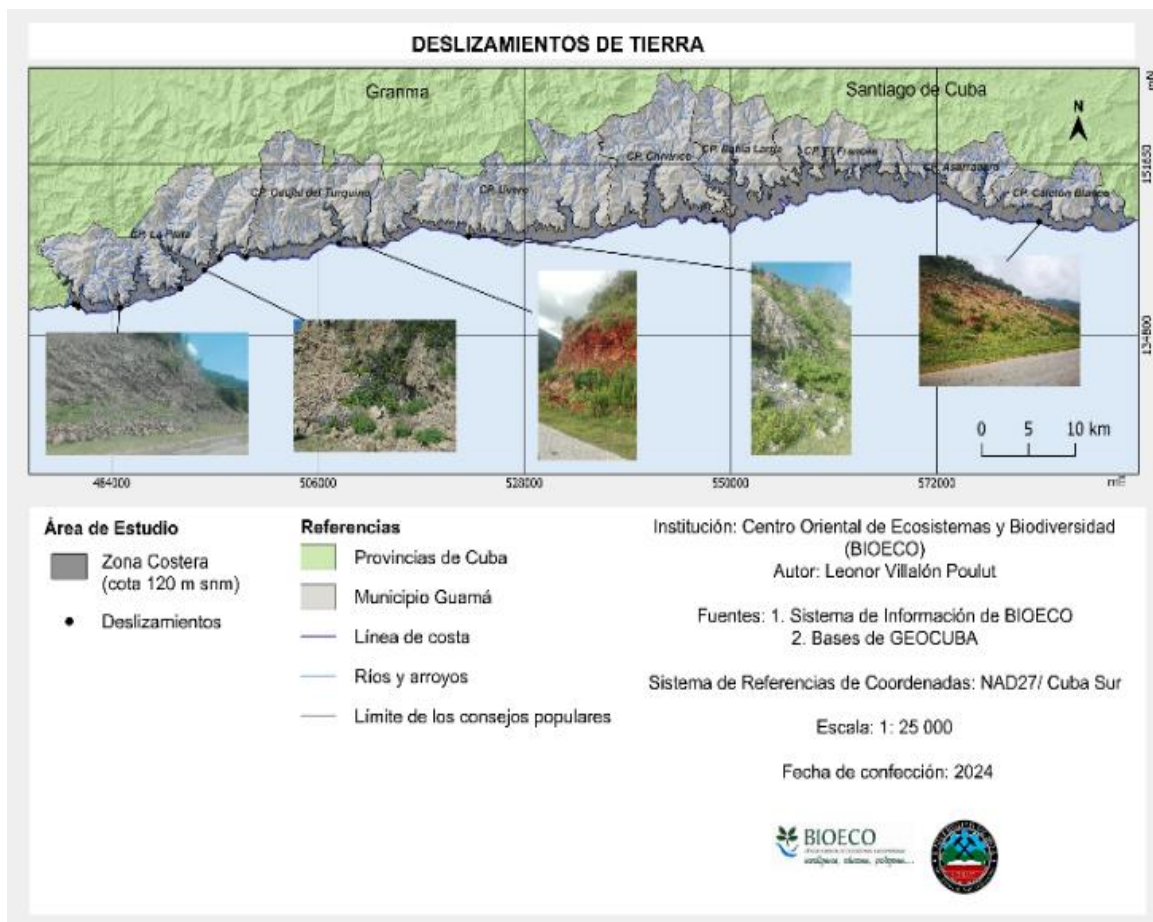


Figura 18. Mapa de inventario de deslizamientos de tierra de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

- **Mecanismos relacionados con desprendimientos o caídas libre de rocas**

Constituyen el movimiento rápido, de ruptura y caída sorpresiva de rocas o rocas / suelos desde laderas y taludes abruptos. En el área se ubicaron caídas propiamente dichos y desprendimientos de rocas, suelo o ambos (Figura 19). Estos mecanismos tienen lugar en laderas y taludes por encima de los 35°, con material suelto en la parte superior, rocas fuertemente intemperizadas, deformadas tectónicamente y procesos de desecación y erosión del terreno. No obstante, en la zona se registraron movimientos en pendientes entre los 16° y 35°, lo cual se relaciona con la intensa meteorización y agrietamiento de las litologías.



Figura 19. Ejemplos de caídas (a) y desprendimientos (b, c) en el área. Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut, 2022.

Uno de los factores que benefician la ocurrencia de estos movimientos, es la morfología del terreno, con pendientes abruptas a extremadamente abruptas que favorecen la acción de la gravedad. A ello se suma los cortes realizados durante la construcción del vial, que acentuaron dichas pendientes, así como la erosión marina debido a la estrechez de la franja costera. Conjuntamente, se presentan sistemas de grietas bien definidas aproximadamente en el mismo sentido de los taludes y laderas, a través de las cuales se infiltran las aguas superficiales, rompiendo el equilibrio del sistema. Además, incide la ocurrencia de precipitaciones máximas en 24 horas, por encima de los 200 mm, movimientos sísmicos y los fenómenos cársticos.

En la zona de estudio estos mecanismos se localizan en sectores muy específicos de la carretera Granma - Santiago de Cuba, donde afloran rocas sedimentarias, volcánicas y vulcano - sedimentarias. El tamaño de los bloques y volumen del material desprendido es variado (desde grandes a pequeños), por lo que representan un peligro latente para transeúntes y vehículos. Los lugares más representativos son La Plata, Cotobelo, La Magdalena y Babujal.

Por otro lado, se asocian de forma secundaria a pequeños flujos detríticos debido al grado de alteración y fracturación que presentan las rocas que lo forman. Con relación a los desprendimientos, Seisdados *et al.*, (2001), los ubican como la principal causa de incomunicación en los caminos hacia las comunidades montañosas.

- **Mecanismos a través de una superficie de rotura**

De amplio desarrollo en el área de estudio, los deslizamientos constituyen el desplazamiento, ladera abajo de una masa de suelo o roca a través de una o más superficies de rotura, que siguen una dirección determinada según los planos de deslizamientos. Este tipo de movimiento se relaciona con procesos de fallamiento, en contactos de roca / suelo, durante movimientos sísmicos; así como, por la ocurrencia de precipitaciones, debido a la disminución de la resistencia de los materiales y el aumento de sobrecarga en las laderas.

En la zona costera se ven favorecidos por la estratificación de las litologías, la presencia de rocas intensamente agrietadas, llegando incluso a presentarse muchas veces en estado prácticamente suelto, en pendientes abruptas (16° - 35°). Otro de los factores influyentes son la ausencia de vegetación protectora en las laderas y el desarrollo de procesos de erosión intensos, por causas naturales o antrópicas.

Estos movimientos se manifiestan en los taludes y laderas de los viales y valles aluviales en rocas sedimentarias, volcánicas o vulcano - sedimentarias en tamaños y granulometría variable, donde la yacencia de los estratos se orienta, aproximadamente en el mismo sentido de la ladera. Siendo los lugares más representativos, El Macho, La Plata, Palma Mocha, Las Llanas, El Macío, Las Cuevas, Cotobelo y La Magdalena (Figura 20).

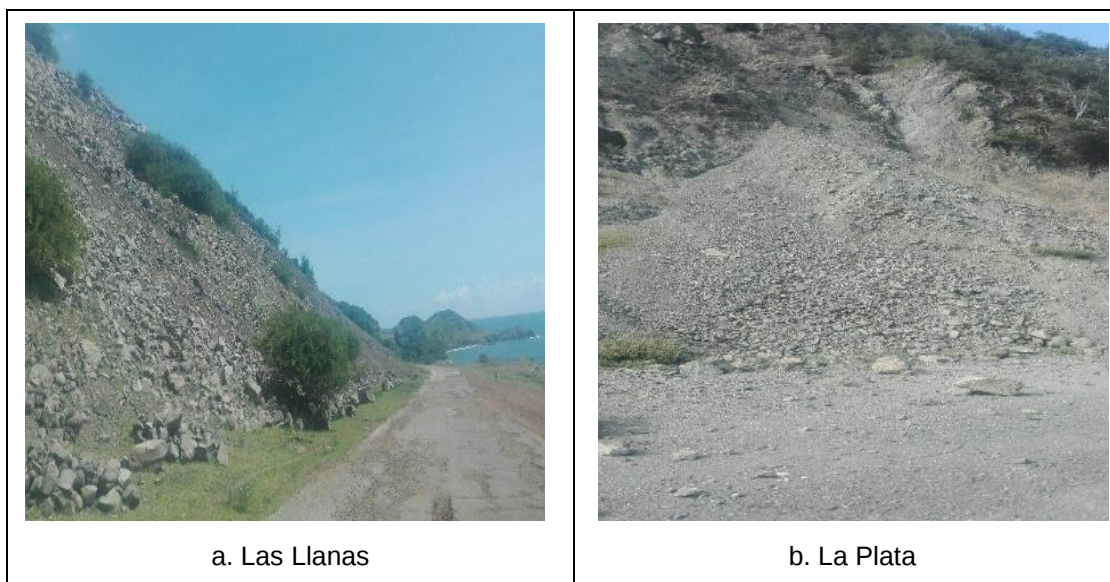


Figura 20. Ejemplos de deslizamientos en el área. Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut, 2022.

- **Movimientos de masas de manera desorganizada (flujos)**

Los flujos son movimientos relativos de las partículas, o bloques pequeños, dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie. En la zona costera, originados por fuertes precipitaciones o durante períodos prolongados de estas, se reportan flujos prácticamente en todos los taludes del vial como tipología predominante o secundaria, constituyendo el sector de Palma Mocha - La Plata un área de fuerte presencia del movimiento.

Entre los elementos que intervienen en su generación se encuentran los cambios en la cobertura vegetal, la presencia de material muy erosionado y el intenso tectonismo que afecta a las rocas del área. Se desarrollan en materiales sedimentarios y vulcanógeno - sedimentarios, con diversas granulometrías. En cuanto a la velocidad con que ocurre el movimiento varía en función de la naturaleza del material transportado y de la topografía, asociados a laderas de pendientes moderadas a muy abruptas (Figura 21).

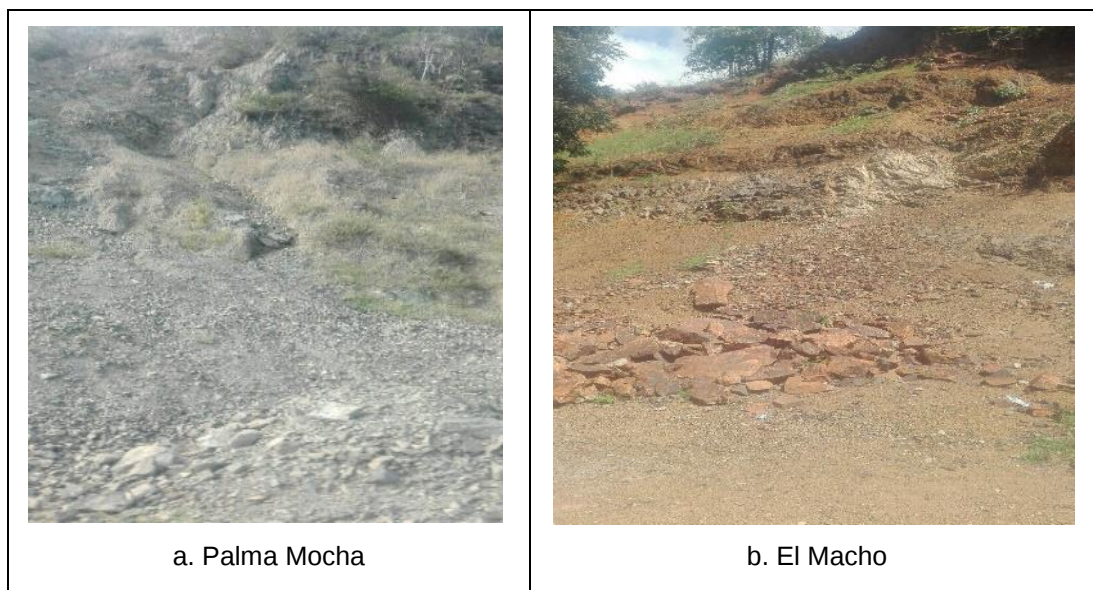


Figura 21. Ejemplos de flujos detríticos. Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut, 2022.

4.2 Descripción de los principales factores que intervienen en la ocurrencia de deslizamientos en el área

La evaluación del peligro por deslizamientos en el área de estudio, se basa en la combinación de la valoración y peso relativo de factores de inestabilidad. Teniendo en cuenta las condiciones del área en que se desarrolla el fenómeno, estableciendo estimaciones particulares para el sitio, tal cual plantea Mora *et al.*, (1992), se presentan los principales factores implicados en la generación de deslizamientos en la zona costera del municipio Guamá.

- Condiciones geomorfológicas, geológicas y geotectónicas

La zona se caracteriza por una topografía muy compleja conformada por llanuras en transición a las zonas más elevada, con cambios bruscos de pendientes. Igualmente, los materiales que componen los taludes y laderas, en su mayoría yacen en estratos con direcciones preferenciales en el mismo sentido del talud, lo cual favorece la ocurrencia de deslizamientos, a través de estas superficies.

A ello se suma la presencia de litologías susceptibles a ser movilizadas, dadas sus características ingeniero - geológicas, principalmente de rocas vulcanógeno -

sedimentarias del grupo El Cobre, cuya característica en la zona es de una considerable estratificación, gran agrietamiento e intemperización (Figura 22 a). Igualmente se resalta la presencia de material no consolidado depositados en valles aluviales; afectados por procesos de erosión, la alteración del carso y la alternancia o intercalaciones de rocas duras y débiles (Figura 22 b).

Por otro lado, los taludes y laderas están expuestos a eventos sísmicos consecuencia de su cercanía a la estructura Bartlett - Caimán (García *et al.*, 2002). La ocurrencia de estos movimientos, como plantea Hack *et al.*, (2007) genera un aumento del esfuerzo cortante, disminución de la resistencia por aumento de la presión de poros y deformación, asociados con la onda sísmica. Estas condiciones inciden sobre las litologías, haciéndolas aún más susceptibles, pudiéndose llegar a la falla al cortante (deslizamiento) y hasta la licuación en el caso de los suelos granulares saturados.

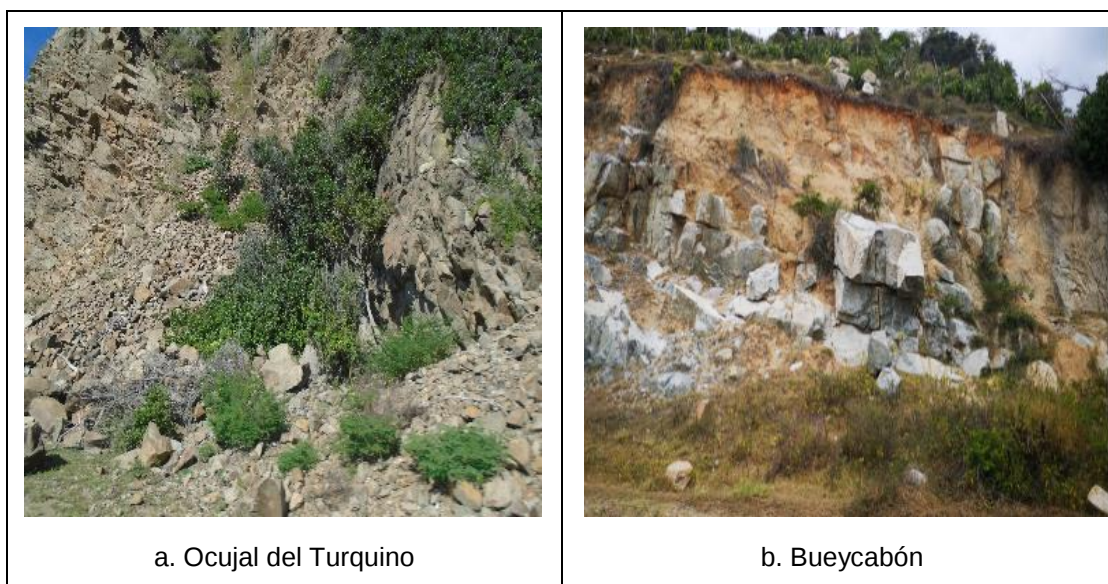


Figura 22. Ejemplos de las condiciones geológico - tectónicas de los taludes y laderas del área de estudio. Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut (a) y Elianne Calderón Montoya (b), 2022.

- Acciones antrópicas

En esta franja se ubican los principales asentamientos humanos del municipio, por lo que la incidencia de la actividad antrópica es alta, vinculado al uso inadecuado e

intensivo del suelo (Figura 23), teniendo entre sus orígenes la urbanización acelerada en el litoral, la alteración de la vegetación natural y el desarrollo de actividades agropecuarias, lo cual ha sido mencionado en los trabajos de ONEI (2015), García, *et al.*, (2017), INOTU (2021) y Colectivo de Autores (2022). Todos estos procesos desembocan o agudizan procesos de degradación en las laderas, generando cambios en los materiales que la conforman, lo que, unido a los fuertes cambios de pendientes en el área, provocan deslizamientos.

Otro de los elementos, que contribuyen potentemente en el fenómeno de deslizamiento, es la construcción de la carretera Granma - Santiago de Cuba. El cual rompió con el equilibrio natural de las laderas y agudizó situaciones de inestabilidad (agrietamiento, fallamiento y meteorización), intrínsecas del área, dado su complejo origen geotectónico, generando zonas muy peligrosas, en coincidencia con lo expuesto por Seisdedos *et al.*, (2001).

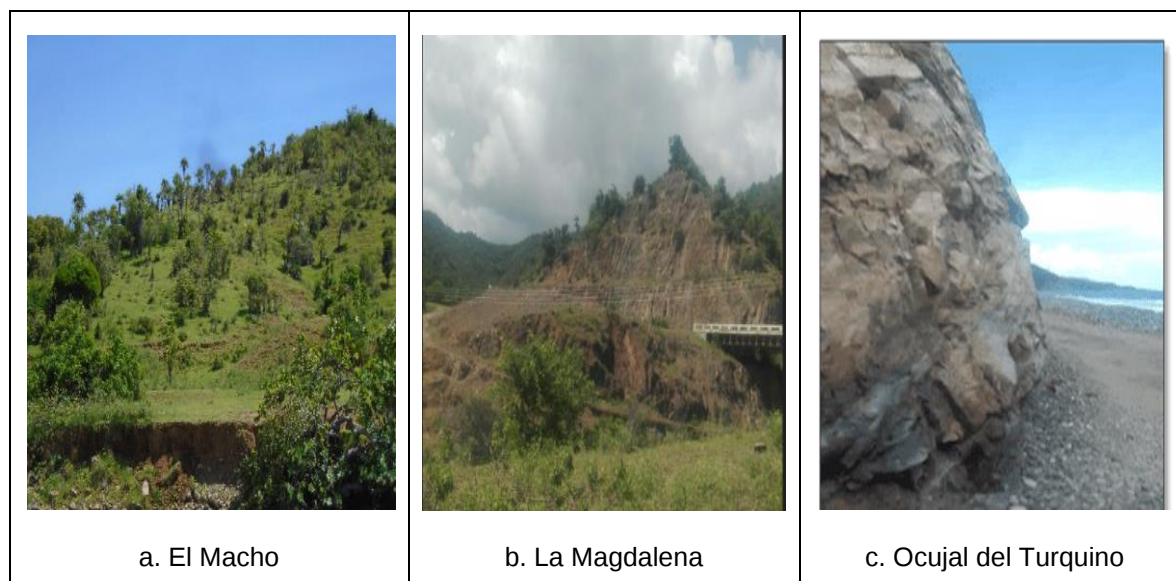


Figura 23. Vista del estado de la cobertura vegetal (a) y de los taludes de la carretera Granma - Santiago de Cuba (b, c). Fotos tomadas por Leonor Villalón Poulut, 2022.

- Clima e Hidrogeología

Entre los factores climáticos asociados a las roturas de los taludes, se encuentran las precipitaciones, siendo la mayor parte de los deslizamientos que ocurren en el área de estudio originados por este factor y así lo ponen de manifiesto los trabajos de Seisdedos *et al.*, (2001); Castellanos (2008 b) y Galbán *et al.*, (2021). Las lluvias

aumentan la acción del agua en el suelo, además de los agentes de meteorización, lo que promueven los problemas de saturación y con ello el colapso de la ladera.

En el caso del área de estudio la ocurrencia de lluvias intensas con regularidad, asociadas a eventos hidrometeorológicos extremos, siendo registrados valores máximos de precipitación en 24 horas por encima de los 200 mm, contribuye notablemente en problema. Conjuntamente, la zona posee una red hídrica densa en forma de V, relieve con fuertes cambios de pendientes y litologías muy agrietadas e intemperizadas, elementos que favorecen la infiltración del agua en el suelo y alteran la estabilidad de las laderas.

4.3 Caracterización de los factores utilizados en el análisis de la peligrosidad

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización de los factores empleados en el análisis de la peligrosidad, teniendo en cuenta las características del área, descritas anteriormente.

➤ Factores condicionantes

Susceptibilidad por el factor litológico (S_l)

En la zona de estudio existen litologías, que de acuerdo a sus características ingeniero - geológicas, expresan determinados niveles de susceptibilidad ante la ocurrencia de deslizamientos. Para el análisis de este factor, se partió de la identificación y descripción de las litologías del área, según el mapa geológico del IGP (2003) y el léxico estratigráfico de Cuba (IGP, 2013), ver Figura 4 y Tabla 2.

De acuerdo al análisis realizado a cada uno de los grupos litológicos, se asignaron cuatro niveles de susceptibilidad: baja, moderada, alta y muy alta (Tabla 6), teniendo en cuenta la propuesta de Mora & Vahrson (1993) y la clasificación ingeniero-geológica de Lomtadze (1977) y Pérez (1976). Esta valoración se basó en las condiciones del área y las características de las litologías presentes frente al desarrollo de deslizamientos, por lo que se excluye la categoría de muy baja susceptibilidad (Figura 24).

Tabla 6. Valoración del nivel de susceptibilidad de las rocas y formaciones geológicas.

Fuente: Elaborado por la autora.

Nivel de Susceptibilidad	Rocas / Formaciones
Baja 2	Fm. Manacal
Moderada 3	Asociación gabro - plagiogranítica, Asociación monzodioríticas, Asociación tonalito - granodiorítica, Rolitas, Andesitas, Basaltos, Pórfidos, Fm. Palma Mocha, Fm. La Cruz
Alta 4	Fm. Río Maya
Muy Alta 5	Gr. El Cobre, Depósitos del Cuaternario, Fm. Jaimanitas

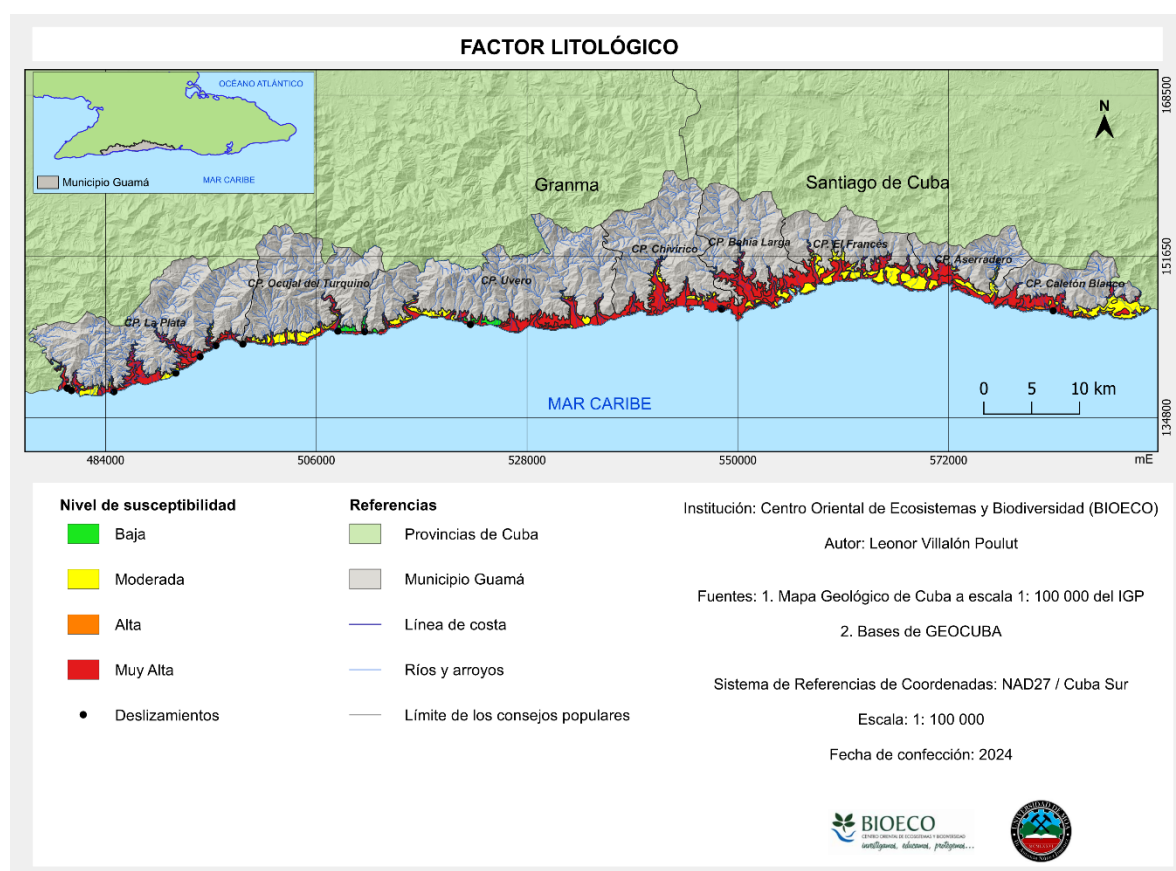


Figura 24. Mapa de susceptibilidad por el factor litológico de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

Como puede observarse en la Figura 25, las litologías con muy alta susceptibilidad, a la que pertenece la formación Jaimanitas, el grupo El Cobre y los Depósitos del Cuaternario, son las de mayor distribución, con el 41 % del área total. En el caso del Gr. El Cobre su potente estratificación aproximadamente en el mismo sentido del talud, unido su alto grado de agrietamiento contribuyen al desarrollo de superficies de deslizamientos. Igualmente, se resalta la alta incidencia de procesos de meteorización en las rocas de la Fm. Jaimanitas y sedimentos del Cuaternario, que favorecen la presencia de este fenómeno.

Por su parte la susceptibilidad alta, ubicada en el consejo popular Caletón Blanco, ocupa el 25 % (tercera en distribución). Este nivel, se corresponde con la Fm. Río Maya que, a pesar de constituirse por calizas duras, en la zona se afectadas por procesos de intemperización y agrietamiento, por lo que presenta una alta susceptibilidad a deslizarse.

En cuanto a la susceptibilidad moderada, abarca el 32 % del área, lo que la ubica en el segundo lugar por distribución, teniendo mayor representación en los CP Caletón Blanco, El Francés y Ocuja del Turquino. Su influencia en desarrollo de deslizamientos está dada por la presencia de rocas intemperizadas, de dureza media – alta, así como de material terrígeno de las formaciones La Cruz y Palma Mocha. Igualmente afecta la acción de agentes erosivos (naturales y antrópicos), procesos cársicos, alternancia de materiales de diferente dureza y la existencia de material arcilloso.

Por último, se encuentra en los CP Uvero y Ocuja de Turquino, la susceptibilidad baja, con tan solo el 2 %. Se asocia con rocas piroclásticas y sedimentarias de la formación Manacal. En estas litologías el impacto de los agentes de meteorización es bajo, sin embargo, debido a las características ingeniero – geológicas del área de estudio, no se descarta la ocurrencia de deslizamientos.

Por otro lado, al analizar las litologías con el inventario de deslizamientos (Anexo 2), se concluye que la más afectada es el Gr. El Cobre. En este grupo se registraron la mayor cantidad de deslizamientos, lo cual se vincula con sus características

ingeniero - geológicas en la zona (potente estratificación, gran agrietamiento e intemperización).

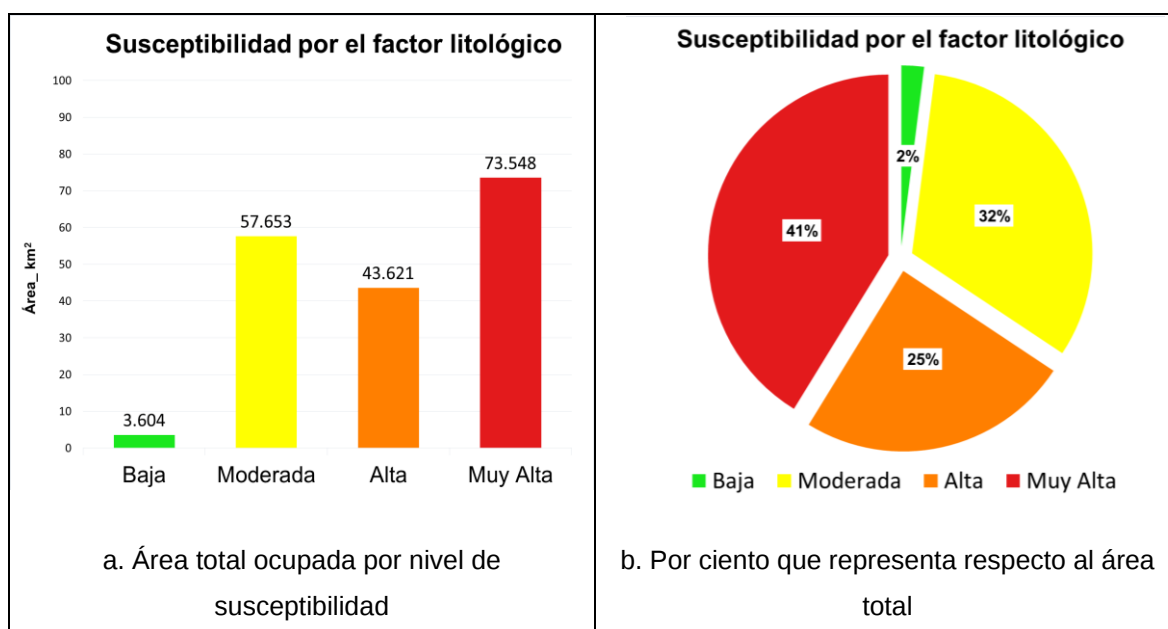


Figura 25. Distribución del nivel de susceptibilidad del factor litológico en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

Susceptibilidad por el factor ángulo de las pendientes (S_p)

Este factor valora las condiciones topográficas del terreno en la generación de deslizamientos. El mapa de pendientes se obtuvo a partir del MDT, de la empresa GeoCuba, en formato ráster de 25 m (Figura 7). El mismo se clasificó en cinco niveles de susceptibilidad: muy alta, alta, moderada, baja y muy baja (Figura 26). La valoración de los niveles de susceptibilidad descritos en la Tabla 7, se basó en los procesos característicos esperados por rangos, las condiciones del terreno (Tabla 3), según el IPF (1981) y la propuesta de Mora & Vahrson (1993).

Tabla 7. Valoración del nivel de susceptibilidad por el ángulo de las pendientes. Fuente: IPF, 1981; Mora & Vahrson, 1993.

Nivel de Susceptibilidad	Rango de pendientes (°)	Características
Muy Baja 1	0 - 4	Pendientes planas a poco inclinadas
Baja 2	4 - 16	Pendientes inclinadas a moderadamente abruptas
Moderada 3	16 - 35	Pendientes abruptas
Alta 4	35 - 55	Pendientes muy abruptas
Muy Alta 5	> 55	Pendientes extremadamente abruptas

Según puede apreciarse en la Figura 27, el área presenta una alta complejidad geomorfológica, con pendientes planas (o poco inclinadas) a extremadamente abruptas. La susceptibilidad muy alta ($>55^\circ$), se vincula con los sectores más elevados de los valles fluviales, aunque se pueden encontrar próximo a la costa, en las localidades de Cotobelo, Palma Mocha y La Magdalena. En estas zonas se acumula mayor cantidad de energía, por lo que los deslizamientos que se suscitan son de tipo gravitatorio. En cuanto a su distribución, representan una superficie insignificante respecto al área total (0 %), sin embargo, hay que prestarles mucha atención, dado el carácter súbito de los deslizamientos gravitacionales.

La susceptibilidad alta, con pendientes muy abruptas ($35^\circ - 55^\circ$), se puede localizar a lo largo de todo el sector. Este nivel, en el cual se desarrollan fenómenos de desprendimientos y caídas libre rocas (o rocas y suelos), abarca el 18 % del área. Por su parte la susceptibilidad moderada ($16^\circ - 35^\circ$), relacionada con mecanismos de deslizamientos a través de una superficie de rotura, presenta la mayor distribución en el sector costero, con el 33 % del área total. Se corresponde con las regiones de transición entre las zonas de alta y baja pendiente, en donde los procesos denudativos ocurren de manera intensa.

La categoría de baja susceptibilidad, ocupa el 31 %, lo que la ubica en el segundo lugar por superficie ocupada. Esta clase se desarrolla en pendientes inclinadas a moderadamente abruptas (4° - 16°), muy afectadas por procesos erosivos. Finalmente, se ubican en las zonas de menor pendientes de los valles fluviales, las zonas de muy baja susceptibilidad, la cual, al igual que susceptibilidad alta, representa el 18 % del área. Esta categoría se prestan pendientes muy poco inclinadas (0° - 4°), en donde se desarrollan procesos de inundación y empantanamiento, de ahí que la posibilidad de que ocurra un deslizamiento sea baja.

En otro orden, al comparar este factor con el inventario de los deslizamientos, se demostró el control importante que ejercen sobre el fenómeno, lo que se evidencia con que la mayoría de las inestabilidades se presentaron en los niveles bajos (4° - 16°) y moderados (16° - 35°) de susceptibilidad, siendo registrados solamente dos eventos en el rango de los 35° a 55° . Estos resultados demuestran que la influencia de este factor, en el sector costero, no se vincula necesariamente a grandes pendientes.

Igualmente, se concluye que, la ocurrencia de deslizamientos por encima de los 35° , se encuentra condicionada por la elevada meteorización que presentan las laderas y la actividad antrópica, como consecuencia de la construcción de la carretera Granma - Santiago de Cuba. Por otro lado, en la susceptibilidad baja, la fuerte erosión de las litologías, los cambios bruscos de pendientes y la incidencia de la actividad humana, producto del establecimiento de asentamientos humanos y la actividad agropecuaria en los terrenos aluviales, propician el surgimiento de inestabilidades.

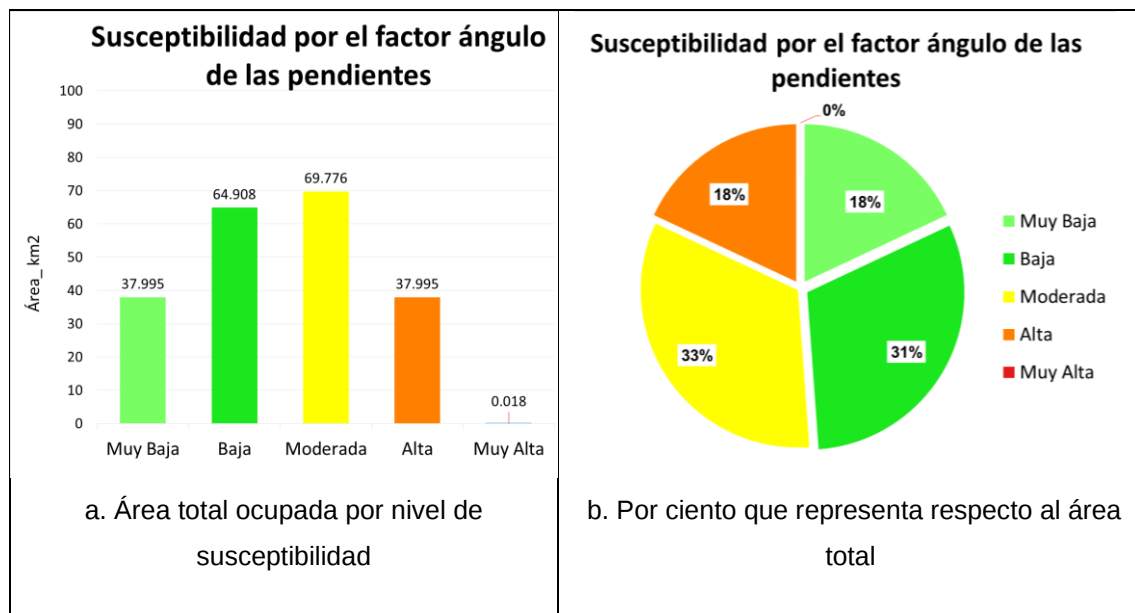


Figura 26. Distribución del nivel de susceptibilidad del factor ángulo de las pendientes en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

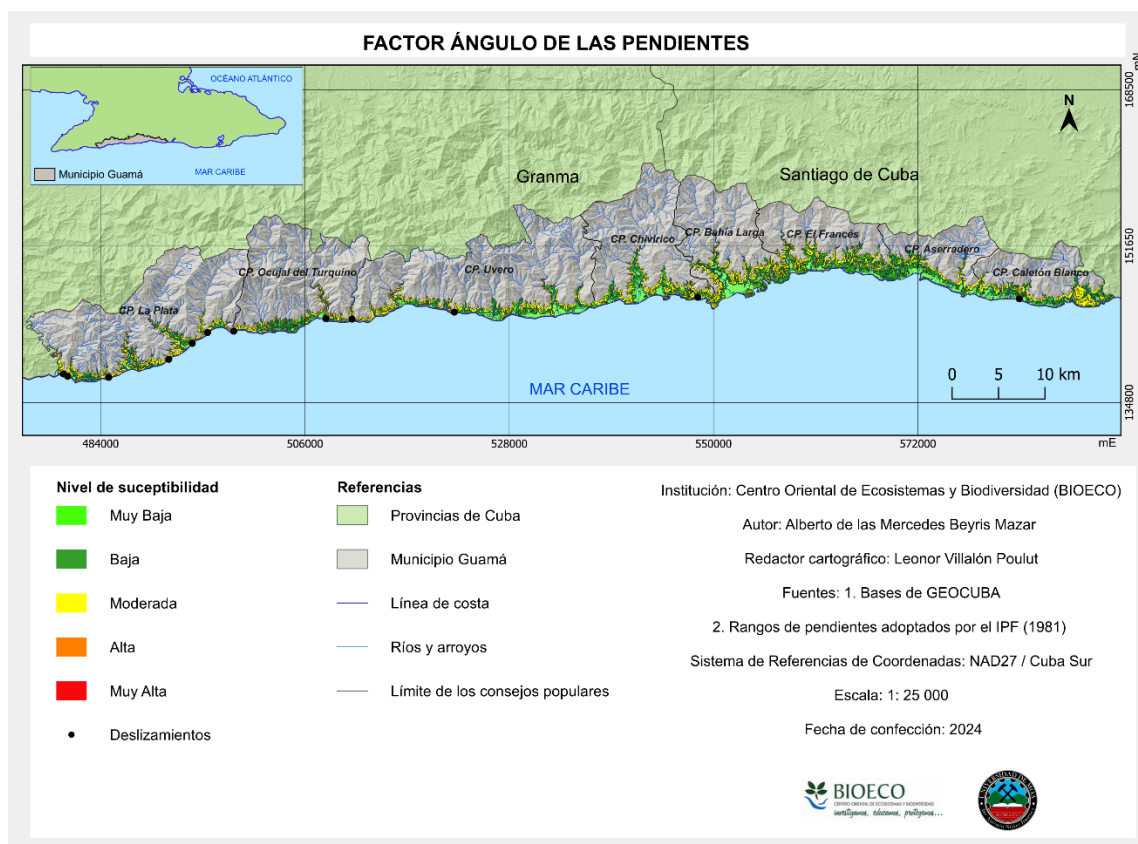


Figura 27. Mapa de susceptibilidad por el factor ángulo de las pendientes de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

Susceptibilidad por el factor humedad del suelo (S_h)

Este factor es de gran importancia debido a la influencia que ejerce el agua sobre los taludes, al aumentar la presión de poros y provocar los deslizamientos. El análisis se realiza a partir de la precipitación media anual; la cual se considera como un indicativo de la humedad antecedente del suelo en el momento que se dan las lluvias máximas diarias (SGC, 2012). Para ello se tomó como base el mapa de precipitación media anual de la zona costera del municipio Guamá (Figura 8).

En esta valoración se tuvo en cuenta los cambios que genera el aumento del contenido de agua en la estabilidad de las laderas, por lo que no se asigna la categoría de muy baja susceptibilidad (ver Tabla 4). De acuerdo al análisis del comportamiento de la distribución espacial en el sector, se obtienen tres niveles de susceptibilidad: baja, moderada y alta, descritos en la Tabla 8.

Tabla 8. Clasificación del factor de precipitación media anual. Fuente: Mora & Vahrson, 1994.

Nivel de Susceptibilidad	Rangos de precipitación media anual (mm)
Baja 2	1 000 – 1 400
Moderada 3	1 400 – 1 800
Alta 4	1 800 – 2 000

El nivel de susceptibilidad baja con valores entre los 1 000 - 1 400 mm, representa la mayor distribución, con el 56 % del área total. Se ubica principalmente al este entre los CP Bahía Larga y Caletón Blanco. Los valores moderados de susceptibilidad (1 400 - 1 800 mm) segundos en distribución, ocupan el 42 %, distribuida al oeste entre los CP Bahía Larga y La Plata. Mientras que la susceptibilidad alta (1 800 - 2 000 mm) constituye solamente el 2 %, concentrada en las partes altas de los valles fluviales de los CP Chivirico y Ocuja del Turquino (Figuras 28 y 29).

Tal como se aprecia en las Figuras 28 y 29, en el sector predomina la susceptibilidad baja, sin embargo, la mayor parte de los deslizamientos registrados tienen lugar en estas áreas. Estos resultados indican que el control del factor de humedad en suelo en la generación de deslizamientos, se encuentra muy relacionado con las condiciones ingeniero - geológicas de las litologías (intenso agrietamiento, presencia de carso y material arcilloso), que favorecen la infiltración del agua.

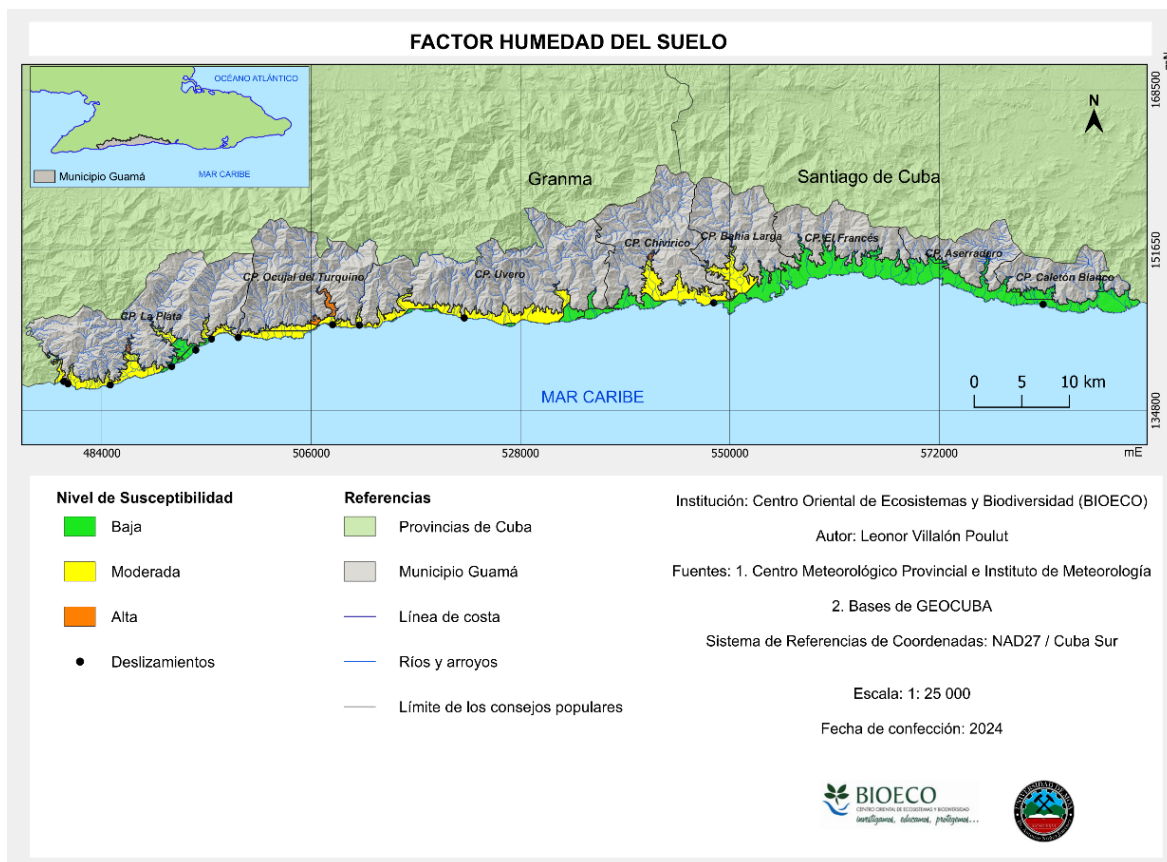


Figura 28. Mapa de susceptibilidad por el factor humedad del suelo de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

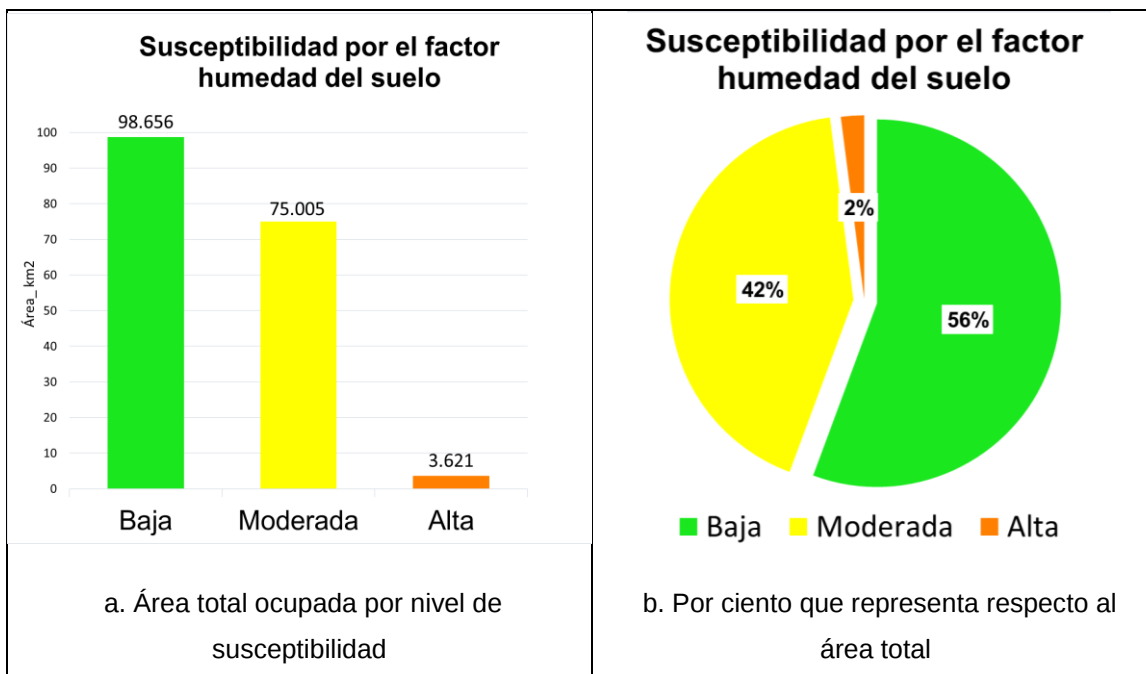


Figura 29. Distribución del nivel de susceptibilidad del factor humedad del suelo en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

Influencia del factor de disparo por lluvias máxima en 24 horas (D_{ll})

Este factor ejerce gran influencia en el desarrollo de deslizamientos. Las lluvias de gran intensidad en períodos cortos de tiempo producen un incremento en la presión de poros sobre una superficie de falla. Para la clasificación de este factor se emplea el mapa de lluvias máximas diarias caídas en 24 horas, para el 2 % de probabilidad de ocurrencia (50 años), ver Figura 17. Conforme a la valoración propuesta por Mora *et al.*, (1992), ver Tabla 5, se obtienen tres valores del parámetro: moderado, alto, muy alto (Tabla 9).

Tabla 9. Clasificación del factor de disparo por lluvias máximas en 24 horas. Fuente: Mora *et al.*, 1992.

Valor del parámetro	Lluvias máximas en 24 h (mm)
Moderado 3	200 - 300
Alto 4	300 - 400
Muy Alto 5	> 400

Según se aprecia en las Figuras 30 y 31, los valores muy altos, son los de mayor representación en la zona, con el 36 % de la superficie total. Esta categoría con precipitaciones por encima de los 400 mm, abarca los CP Uvero y Aserradero. Por su parte, constituyendo el 32 % del área, se ubican los valores altos (300 - 400 mm), se localiza en el CP Aserradero hasta el CP Bahía Larga y entre los CP Chivirico - Uvero. Por último, los valores moderados, al igual que la anterior categoría, ocupan el 32 % del sector. Estas zonas se hayan al Este, en el CP Caletón Blanco y parte del CP Aserradero y al Oeste, entre los CP Uvero - Ocuja del Turquino, además incluye un tramo del CP La Plata.

Conjuntamente, como se puede observar en la Figura 30 el comportamiento de los valores máximos de precipitación en un lapso de 24 horas se realiza de forma muy regular en el área, además, estos valores se encuentran por encima de los 200 mm (Tabla 7). Por lo que se concluye que, la probabilidad de que ocurran deslizamientos de tierra inducidos por precipitaciones es alta, en toda la zona costera del municipio Guamá.

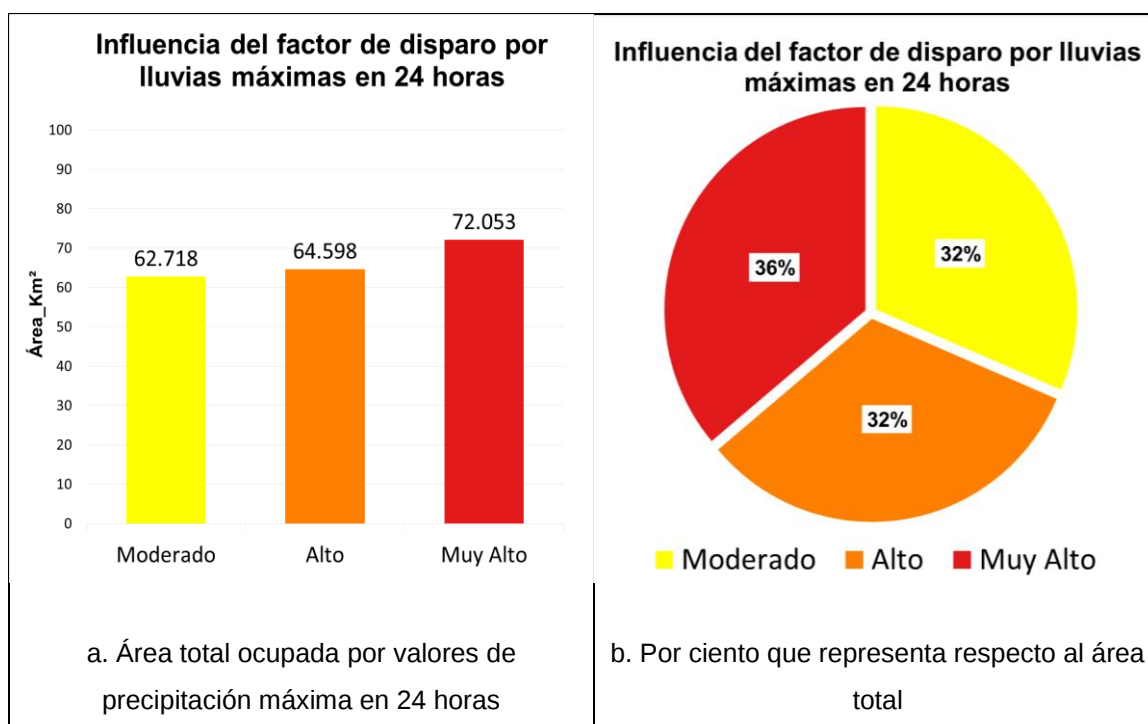


Figura 30. Distribución del factor de disparo por lluvias máximas en 24 horas en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

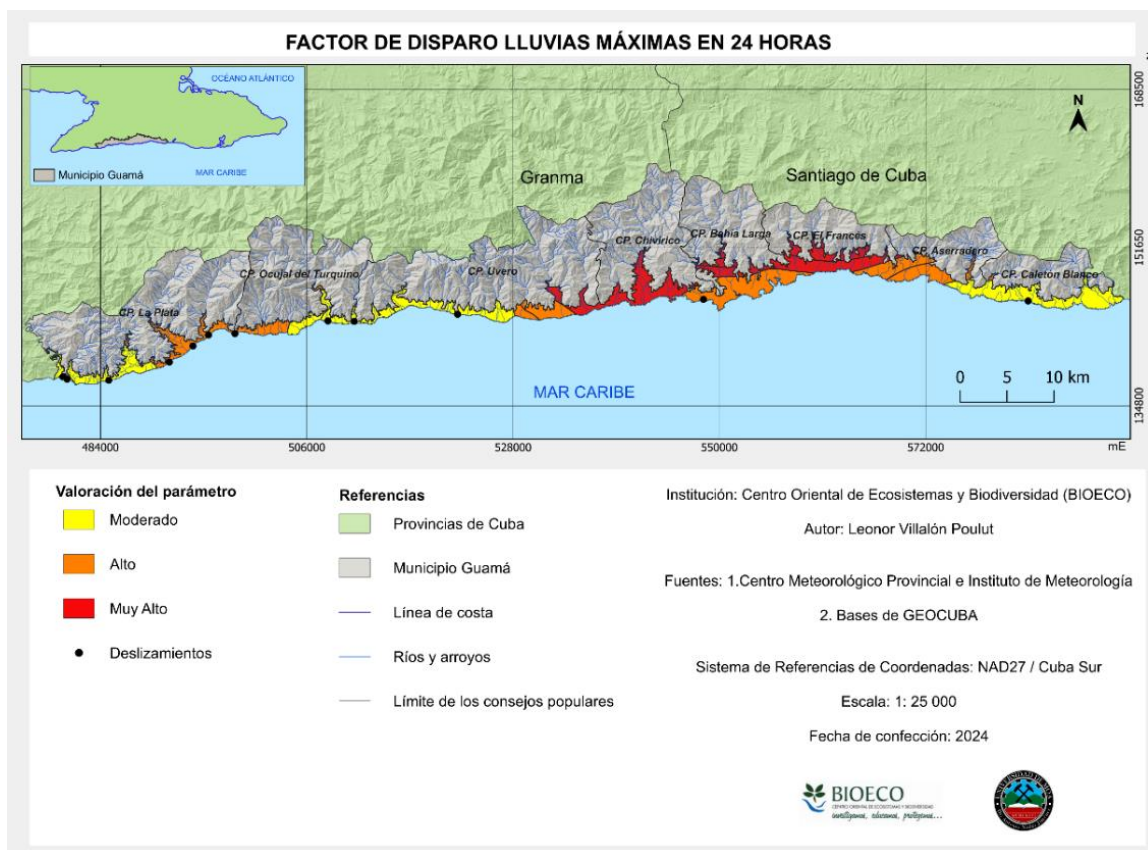


Figura 31. Mapa de susceptibilidad por el factor de disparo por lluvias máximas en 24 horas de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

4.4 Caracterización del mapa de peligrosidad por lluvias

Como resultado de la combinación de los factores condicionantes (litologías, pendientes y humedad del suelo) y el factor desencadenante (lluvias máximas en 24 horas), a través de las técnicas de elaboración cartográfica que brinda el SIG, se obtuvo el mapa de peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias de la zona costera del municipio Guamá (Figura 32). Para la interpretación y análisis del peligro en el sector de estudio, se establecieron categorías de peligrosidad, a partir de los pesos asignados a cada factor (Tabla 10).

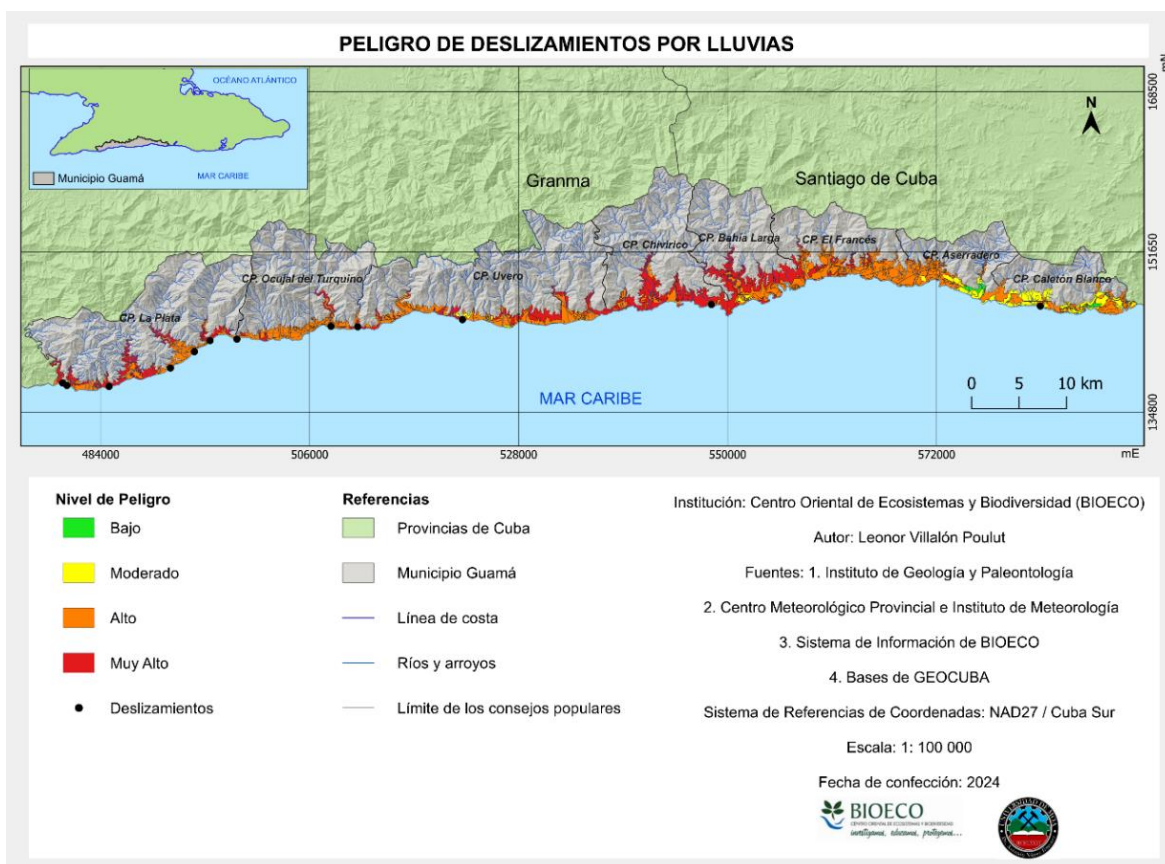


Figura 32. Mapa de peligro a la ocurrencia de deslizamientos inducidos por lluvias de la zona costera del municipio Guamá (para el 2 % de probabilidad). Fuente: Elaborado por la autora.

Según los resultados no se obtuvieron valores muy bajos de peligrosidad. Las áreas de peligro bajo, son las de menor distribución, con 1 % de la superficie total, presentándose de manera localizada en los CP Aserradero y Caletón Blanco.

Las zonas de peligro moderado, ocupando el 9 %, se distribuyen a largo de toda la costa, teniendo mayor representación en los CP Aserradero y Caletón Blanco. Por su parte la categoría de alta peligrosidad, en donde se localizaron seis deslizamientos, abarca la mayor extensión del sector costero, con el 54 %. Finalmente, las regiones catalogadas con peligro muy alto, se corresponden principalmente con las zonas más elevadas de los valles fluviales en los CP Bahía Larga, La Plata y Chivirico. En esta categoría se hallan el resto de las inestabilidades inventariadas, ver Figuras 32 y 33.

Este mapa posee un alto valor práctico para el territorio, al delimitar las áreas por niveles de peligrosidad, que, durante eventos de precipitaciones intensas, pueden desarrollar deslizamientos, lo que constituye una herramienta para el desarrollo de estrategias locales de gestión y mitigación de los impactos ante este fenómeno (Anexos 3 - 6). Conjuntamente posibilita el establecimiento de planes de prevención, hacer un uso adecuado de los recursos materiales, financieros y la realización de actividades de educacional ambiental sobre los peligros por inestabilidad de laderas en la zona costera.

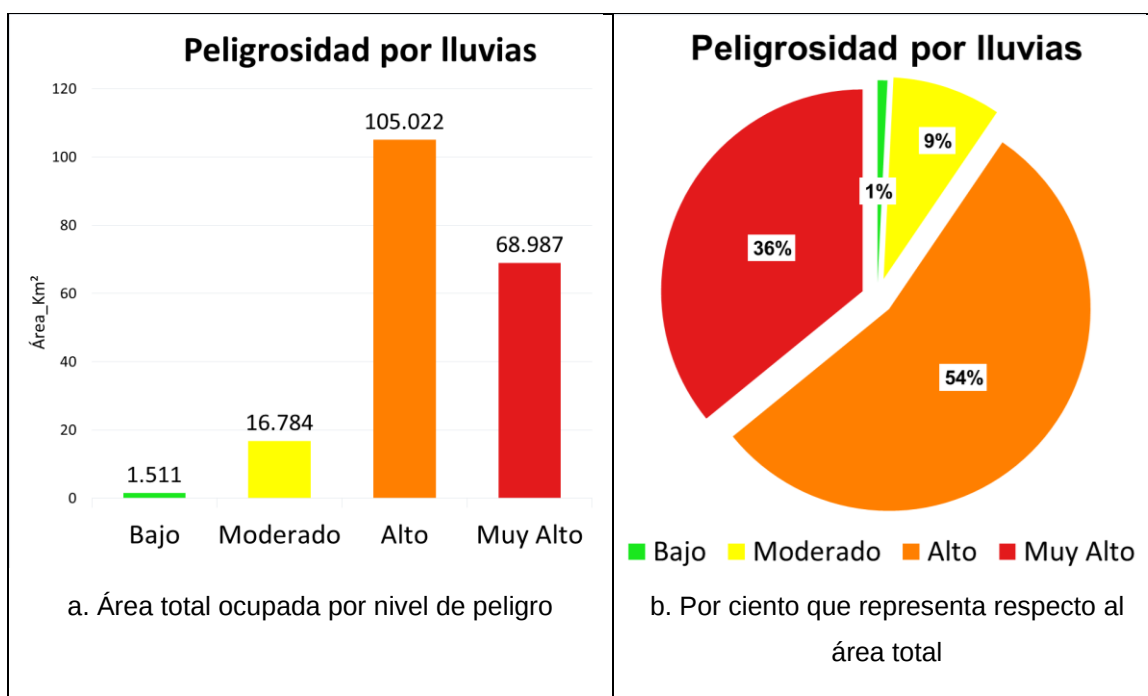


Figura 33. Distribución de la peligrosidad a la ocurrencia de deslizamientos inducidos por luvias (2 % de probabilidad) de la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

Tabla 10. Consideraciones del peligro por deslizamientos de tierras inducidos por lluvias, en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

Nivel de peligro	Descripción
Bajo (D_u): 0 - 18	Zonas de bajo grado de peligro a la ocurrencia de deslizamientos. En estas áreas la incidencia de la actividad agropecuaria es alta. Pueden ocurrir pequeños deslizamientos en las laderas de los márgenes de los ríos, por acción fluvial y/o procesos de erosión. Se relaciona con pendientes inclinadas a moderadamente abruptas. Litologías estables sin o muy poco afectadas por la meteorización y agrietamiento. Los valores de precipitación media están en el rango de 1 000 - 1 200 mm e intensidad máxima en 24 horas de 250 - 300 mm.
Moderado (D_u): 19 - 36	Zonas de peligrosidad moderada a la ocurrencia de deslizamientos. Los acumulados de precipitación media están en el orden de los 1 000 -1 800 mm. Se corresponde con las formaciones Manacal y La Cruz y rocas de diferente dureza, moderadamente afectadas por procesos de intemperismo. Además de las formaciones Jaimanitas, Río Maya, depósitos del Cuaternario y el grupo El Cobre, en pendientes inclinadas a moderadamente abruptas. Se desarrollan procesos antrópicos relacionados con la actividad forestal y la urbanización de la zona. Los valores de lluvia máxima en 24 horas oscilan entre 200 - 450 mm.
Alto (D_u): 37 - 120	Zonas de alta peligrosidad a la ocurrencia de deslizamientos. Se presenta en rocas debilitadas tectónicamente, con alternancia de rocas de diferente dureza, muy intemperizadas. Representada por rocas del grupo El Cobre, depósitos del Cuaternario, la formación Río Maya y Jaimanitas con pendientes abruptas a muy abruptas. Dentro de los procesos antrópicos con mayor incidencia se encuentra, la actividad agroforestal y la construcción de la carretera Granma - Santiago de Cuba. Los valores de precipitación media anual varían entre los 1 000 - 2 000 mm e intensidades máximas en 24 horas entre 200 - 550 mm.
Muy Alto (D_u): > 120	Zonas de muy alta peligrosidad a la ocurrencia de deslizamientos. Se compone por rocas del grupo El Cobre, la formación Jaimanitas y sedimentos no consolidados, afectados por procesos de erosión. Pendientes abruptas a extremadamente abruptas. En ella inciden notablemente la actividad agropecuaria. Los valores de precipitación se ubican en el rango de los 1 000 - 2 000 mm e intensidad máxima en 24 horas entre 200 - 600 mm.

4.5 Propuesta de medidas para la prevención y mitigación de deslizamientos de tierra en el área de estudio

Como lo muestran los resultados obtenidos la zona costera del municipio Guamá posee una alta peligrosidad a la ocurrencia de deslizamientos inducidos por lluvias, lo cual concuerda con los trabajos realizados por Seisdedos *et al.*, (2001), Castellanos (2008 b), Galbán *et al.*, (2021). Es por ello que se hace necesario la aplicación de medidas, con el fin de mitigar y reducir los escenarios de peligro por estos fenómenos. A continuación, se exponen algunas de estas medidas.

Medidas no estructurales: se tratan de medidas que no incluyen la construcción de obras ingenieriles (políticas urbanas, planeamiento urbano, legislación, planes de defensa civil, educación), con el objetivo de disminuir el peligro actual, tomando en cuenta escenarios futuros.

Dentro de estas se proponen:

- Monitorear el comportamiento de las precipitaciones y las condiciones hidrometeorológicas del territorio.
- Asignar medidas de protección de los suelos en las áreas de identificadas como de alto peligro a la ocurrencia de deslizamientos.
- Capacitar a los órganos de gobierno locales, directivos, líderes comunitarios y población en general sobre los factores que intervienen en la generación de deslizamientos en áreas, a fin de evitar la reproducción de escenarios de peligro y/o agravar los ya existentes.
- Divulgar los resultados de esta investigación para la adquisición de una mayor comprensión del nivel de peligro en la zona.
- Señalizar los sectores de mayor peligro con el objetivo de impedir la circulación de vehículos y personal en estas áreas, especialmente durante periodos de intensas lluvias.

Medidas Estructurales: son medidas de corrección o estabilización de laderas, encaminadas a prevenir los procesos y mitigar los daños (Anexo 7). Su aplicación depende principalmente de la tipología, magnitud y velocidad de los deslizamientos y pueden realizarse antes (en casos de laderas potencialmente inestables) o durante el movimiento, siempre que su velocidad y características lo permita.

Dentro de estas se proponen:

- Modificar la geometría de los taludes con el objetivo de disminuir la pendiente y dar mayor estabilidad en correspondencia con el buzamiento de las capas.
- Construir zanjas colectoras con el fin de contener el material removido para que el mismo no afecte las estructuras cercanas y evitar las caídas de fragmentos de roca como es el caso de taludes junto a vías de transporte.
- Implementar obras de contención (muros) para estabilizar deslizamientos y reforzar el talud, de forma tal que no sucedan nuevas rupturas. En general, la construcción de un muro es una operación cara (empleo de cemento y acero), sin embargo, en muchos casos son la única solución viable. No obstante, existen opciones, que son de fácil construcción y bajo costo (muros de gaviones, tierra armada, piedras, mampostería, entre otros materiales).
- Edificar obras de drenaje con la finalidad de eliminar o disminuir el agua presente en el talud. Estas medidas son, generalmente, las más efectivas, ya que el agua es el principal agente que desencadena los problemas de inestabilidad de taludes.
- Instalar mallas metálicas para estabilizar zonas de talud que se encuentran muy fracturadas o erosionadas.
- Aplicar métodos de revegetación y reforestación en los taludes y laderas, para disminuir la energía cinética de los fragmentos de rocas y reducir los procesos de erosión del suelo.

4.6 Conclusiones parciales

- En la zona costera del municipio Guamá, la ocurrencia de deslizamientos por lluvias se encuentra favorecido por la presencia de litologías susceptibles a ser movilizadas, la complejidad tectónica de la zona, el clima y la antropización del medio.
- En el área se desarrollan diferentes mecanismos y tipologías de deslizamientos, siendo registrados desprendimientos, caídas, deslizamientos y flujos detríticos.
- Se obtuvieron los niveles de susceptibilidad de los factores condicionantes (litología, ángulo de las pendientes y humedad del suelo) y la valoración del factor desencadenante (lluvia máxima en 24 horas), siendo la litología, las pendientes y las precipitaciones en un lapso de 24 horas, los factores de mayor influencia.
- Con la aplicación del método Mora & Vahrson (Mora *et al.*, 1992), a través de un SIG, se obtuvo el mapa de peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias de la zona costera del municipio Guamá, en función de cuatro niveles de peligrosidad: Bajo, Moderado, Alto y Muy Alto.

CONCLUSIONES

1. Los factores de mayor influencia sobre las inestabilidades en la zona de estudio son el geológico, geomorfológico y climático. El factor geológico, diferenciada por su composición litológica y características ingeniero-geológicas, es el que mayor control ejercen sobre los movimientos de ladera, desarrollándose la mayor cantidad de deslizamientos en rocas volcánicas, volcánico - sedimentarias, debilitadas tectónicamente y muy alteradas del grupo El Cobre.
2. En relación a la geomorfología, sobresale la complejidad del relieve, con pendientes planas a extremadamente abruptas, en donde los cambios de niveles son bruscos y los procesos de erosión intensos. Por su parte, la intensidad de lluvias representa un factor de gran dominio debido que alcanzan valores por encima de los 200 mm. Además, se destaca la fuerte antropización del medio, marcada principalmente por la urbanización y la actividad agropecuaria.
3. A partir de la aplicación del método Mora – Vahrson, a través de un Sistema de Información Geográfica, se obtuvo el mapa de peligro por deslizamientos de tierra inducidos por lluvias de la zona costera del municipio Guamá, categorizado en cuatro niveles: Bajo, Moderado, Alto y Muy Alto; en base a las condiciones intrínsecas del terreno. Las áreas de peligro alto, son las de mayor distribución, con el 54 % de la superficie total, vinculadas principalmente a las rocas del grupo El Cobre y pendientes abruptas a muy abruptas.
4. Se propusieron medidas estructurales y no estructurales, las cuales permitirán diseñar acciones de mitigación adaptadas a las características de los mecanismos y tipologías de deslizamientos identificadas en la zona costera, disminuyendo con ello los escenarios de peligro por este fenómeno.

RECOMENDACIONES

- Implementar programas de educación ambiental y riesgo de desastres para lograr una mayor conciencia sobre el entorno y el peligro por deslizamientos de tierra en el sector de estudio.
- Sociabilizar los resultados obtenidos en esta investigación con los órganos de la Defensa Civil, Gobierno, Planificación Física y otros interesados tanto a nivel municipal como provincial.
- Intensificar los trabajos de campo, con el fin de profundizar en el conocimiento de los movimientos y tipologías de deslizamientos que tienen lugar en la zona, así como de las condiciones en que se desarrollan, especialmente después de eventos de lluvias.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguller, M. (2010). *Evaluación del peligro por desprendimientos de rocas en taludes y laderas del tramo de la carretera La Plata - Punta Babujal, municipio Guamá, Santiago de Cuba* (Tesis de Maestría). Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.
- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall - induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73 (3 - 4), 247 - 265.
- Almaguer, Y. (2005). *Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento de Punta Gorda* (Tesis Doctoral). Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguín, Cuba.
- Almaguer, Y. & Guardado, R. (2006). Tipología de movimientos de masas desarrollados en el territorio de Moa, Cuba. *Minería y Geología*, 22 (1).
- Agencia de Medio Ambiente (AMA). (2012). *Guía metodológica para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo por deslizamientos de terreno a nivel municipal*. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA).
- Arango, E. (2014). *Análisis sismotectónico del territorio oriental de Cuba a partir de la integración del modelo de corteza 3D de datos gravimétricos con datos sísmológicos y geodésicos* (Tesis Doctoral). Centro de Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada. Baja California. México.
- Aristizábal, E., García, E., & Martínez, C. (2015). Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains. *Natural Hazards*, 78 (1), 621- 634.
- Aristizábal, E., Riaño, F., & Jiménez, J. (2022). Umbrales de lluvia como detonante de movimientos en masa en el piedemonte de la cordillera Central en los Andes colombianos. *Boletín de Geología*, 44 (2), 183 - 197.
- Barrantes, G., Barrantes, O., & Nuñez, O. (2011). Efectividad de la metodología Mora - Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por

- el terremoto de Chinchona, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 42 (2), 141 - 162.
- Barredo, J., Benavidez, A., Hervhl, J., & Van Westen, C. (2002). Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International J. Appl. Earth Observ. Geoinform.*, 2 (1), 9 - 23.
- Beyris, M. (2003). *Bases de manejo Integrado de Zonas Costeras para el ordenamiento ecológico del uso del suelo del sector costero desde Punta Tabacal a Bahía del Mazo* (Tesis de Maestría). Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.
- Bermúdez, G. & Beyris, M. (2016). Mapa de lluvias máximas diarias caídas en 24 horas, para el 2 % de probabilidad de ocurrencia (50 años) de la provincia Santiago de Cuba. Inédito.
- Bosi, C. (1978). Considerazioni e proposte metodologiche sulla elaborazione di carte di stabilità. *Geol. Appl. Ed Idrogeol.* 13, 246 - 281.
- Brito, A. & Beyris, M. (2016). Mapa de precipitación media anual de la provincia Santiago de Cuba. Inédito.
- Brito, A., Naranjo, L., & Chuy, T. (2021). Impacto de ciclones tropicales en la zona costera de la provincia Santiago de Cuba. Período 2000 - 2016. *Ciencia en su PC*, 1 (2).
- Brunsden, D. (2002). The fifth Glossop Lecture. Geomorphological roulette for engineers and planners: some insights into a old game. *Quart. J. of Engng. Geol.* 35, 101-142.
- Cardona, A., Carreño T., Mendes A., Alcántara, A., & Saito, M. (2020). Inestabilidad de laderas - deslizamientos. En: Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos – Informe RIOCCADAPT. Madrid, España. pp. 419 - 458.

- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth surface processes and landforms*, 16 (5), 427 - 445.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. *Geographical information systems in assessing natural hazards*. pp.135 - 175.
- Casale, R., & Margottini, C. (2000). Floods and landslides: Integrated Risk Assessment, Springer, Berlin.
- Castellanos, E. (2008 b). *Evaluación multiescala de riesgo por deslizamientos de terreno en Cuba* (Tesis Doctoral). International Institute for Geo - information Science and Earth Observation.Enchede,The Netherlands.
- Castellanos, E. (2008 a). Riesgo por deslizamientos de terreno en Cuba. Estado actual y perspectivas. Instituto de Geología y Paleontología. MINBAS.
- Castellanos, E., & Van Westen, C. (2009). Descripción y uso del mapa nacional de índice de riesgo por deslizamientos de terreno.
- Castillo, P., Vergara, L., Chalas, J., Vicioso, F. (2020). Revisión histórica de los deslizamientos de terreno superficiales causados por lluvias, casos: México y República Dominicana. *Aqua-LAC*,12 (1), pp 108 -117.
- Cuevas, O., Polo, I., Pedroso, J., Fundora, L., Díaz, J., Alcaide, E., Jaimez, M.,... Hernández, W. (2005). *Estimación y Zonación de Escenarios de Peligros y la Vulnerabilidad por procesos gravitacionales e hidrometeorológicos extremos, en el Macizo Montañoso de Guamuha, Cuba: Una Metodología de Estimación para Zonas Montañosas*. Memorias GEOCIENCIAS 2005, La Habana, 5-8 Abril, ISBN 959-7117- 03- 7, GEO2, pp 31 - 24.
- Chuy, T. (2010). Modelo de peligro sísmico de la provincia Santiago de Cuba. *Inédito*. CENAI.
- Colectivo de Autores. (2011). Estudios de peligros, vulnerabilidad y riesgos de deslizamientos de tierra. Informe final. Holguín.

- Colectivo de Autores. (2022). Proyecto Gestión de Riesgos de Desastres para la adaptación y la reducción de la vulnerabilidad en la zona costera del municipio Guamá, Santiago de Cuba. BIOECO. Informe Anual. Inédito.
- Colmenero, E. (2015). *Análisis del peligro por deslizamientos de los principales viales de la provincia de Santiago de Cuba* (Tesis de Diploma). Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguín, Cuba.
- Corominas, J. (1987). Criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera. Riesgos Geológicos. *Serie Geología Ambiental*. IGME, Madrid. pp.193 - 201.
- Corominas, J. (1992). *Movimientos de ladera: predicción y medidas preventivas*. 1r Congreso Iberoamericano sobre Técnicas aplicadas a la Gestión de emergencias para la Reducción de Desastres Naturales, Valencia. pp. 55-77.
- Corominas, J., & García, A. (1997). *Terminología de los movimientos de ladera*. Paper presented at the IV Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables. Granada, (2), 320 - 329.
- Crozier, M. (1986). *Landslides: causes, consequences & environment*. Ed. Routledge. London & New York. pp. 252.
- Crozier, M. (1999). Prediction of rainfall - triggering landslides: a test of the antecedent water status model. *Earth surface processes and landforms*, (24), 825 - 833.
- Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43 (1).
- Cruden, D., & Varnes, D. (1996). Landslide types and processes .In: Turner,A.K.,Schuster,R.L.(Eds.), pp. 36 - 75.
- Dai, F., & Lee, C. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42 (3 - 4), 213-228.
- Dai, F., Lee, C., & Ngai, Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64 (1), 65 - 87.

- Decreto Ley 212. Gestión de la zona costera. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Edición Ordinaria No. 68. La Habana, Cuba. 14 de agosto de 2000, 1373 - 1378.
- Del Puerto, J., & Ulloa, D. (2003). *Identificación de los peligros geólogo-geomorfológicos de la cuenca de Santiago de Cuba*. Memorias del V Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. GEOMIN' 2003.
- Directiva 1/2010. Para la gestión de la reducción del riesgo de desastre en la Republica de Cuba. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Edición Ordinaria No.130. La Habana, Cuba. 20 de diciembre de 2022.
- Ferrera H., Morejón, G., Candebat, D., Márquez, I., Arango, E., Zapata, J., Chuy, T. (2008). Evaluación de la vulnerabilidad de las carreteras de interés nacional de la provincia Santiago de Cuba ante la ocurrencia de eventos naturales. *Ciencia en su PC* (4), 66 - 76.
- Galbán, R. (2012). Geología básica aplicada. Elementos básicos de la ingeniería geológica aplicados a la ingeniería civil e hidráulica. Editorial Académica Española. Madrid, España. pp. 304.
- Galbán R., & Guardado, R. (2016). Modelación del peligro a deslizamientos en el Municipio Santiago de Cuba considerando el peso de las variables determinantes. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 18 (1), 89 - 99.
- Galbán, R., Guardado, R., & Chuy, T. (2021). Principales procesos y fenómenos geológicos conducentes a riesgos en la provincia Santiago de Cuba, Cuba. *Boletín de Ciencias de la Tierra* (49), 13 - 23.
- García, B., & Restrepo, A. (2016). *La integración de las medidas estructurales y no estructurales para la gestión del riesgo de desastres por deslizamiento en Colombia* (Tesis de Maestría). Universidad Católica de Manizales.
- García, J., Arango, E., Zapata, J., Oliva, J., González, B., Fernández, B., Monnar, O. (2002). Mapa de Riesgo Sísmico de la ciudad de Santiago de Cuba. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas.

- García C., Vinajera S., & Machado, L. (2017). Gestión Integrada del Riesgo por inundaciones en la Zona Costera del municipio Guamá.
- Glade, T., Crozier, M. & Smith, P. (2000). Applying probability determination to refine landslide - triggering rainfall thresholds using an empirical antecedent daily rainfall model. *Pure Appl Geophys* 157. pp. 1059 -1079.
- Gostelow, P. (1991). Rainfall and landslides en *Prevention and Control of landslides and other mass movements*, editado por Almeida-Teixeira, M.; Fantechi, R., Oliveira, R., Gomez Coelho, A. Commis. European Communities, Brucelas. pp.139 -161.
- Gökceoglu, C., & Aksoy, H. (1996). Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology*, 44 (1 - 4), 147-161.
- González, J., & Domínguez, H. (2019). Distribución espacial de los recursos hídricos en Cuba. *Proyección*. XIII: 136 -156. Inédito.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorog Atmos Phys* 98. pp. 239 - 267.
- Hansen, A. (1984). *Landslide hazard analysis. Slope instability*.
- Hansen, A. (1991). *Characterization and mapping of earthquake triggered landslides for seismic zonation*. Paper presented at the Proceed. IV Int. Conf. Seismic Zonation, Stanford, California, August 26 - 29, 1991.
- Harp, E., Castaneda, M., & Held., M. (2002). Landslides triggered by Hurricane Mitch in Tegucigalpa, Honduras. USGS Open - File Report 02 - 0033.

- Hártlen, J., & Viberg, L. (1988). *Evaluation of Landslide Hazard-Genaral Report*. Paper presented at the Proceedings of 5th International Symposium on Landslides Lausanne.
- Hack, R., Alkema, G., Kruse, N., Leenders, L., Luzi. (2007). Influence of earthquakes on the stability of slopes. *Engineering Geology*, 91 (1), 4 -15.
- Heckerman, D. (1986). Probabilistic Interpretation of Mycin's Certainty Factors w Pracy Kanal In, Lemmers jf (Eds): Uncertainty in Artificial Intelligence. In: Elsevier: Amsterdam, the Netherlands.
- Hidalgo, C., & Assis, A. (2011). *Evaluación cuantitativa del riesgo por deslizamientos detonados por lluvia en una carretera del noroeste de Colombia*. Paper presented at the Memorias de la XII Conferencia Panamericana de Geotecnia.
- Huesca, A., & Morales, L. (2021). Análisis de umbrales de lluvia en municipios de alta marginación, expuestos a inestabilidad de laderas. Casos de Chiapas y Oaxaca.
- Hutchinson, J. (1968). Mass movement. En: Fairbridge, R. D. (Ed.): Encyclopedia of Geomorphology. Reinhold Book Corporation, pp. 688 - 695. Nueva York.
- Hutchinson, J. (1988). *Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. Paper presented at the Proc., Fifth international symposium on landslides.
- Instituto de Geología y Paleontología (IGP). (2003). Mapa Geológico Digital de la República de Cuba a escala 1: 100 000. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- Instituto de Geología y Paleontología (IGP). (2013). Léxico Estratigráfico de Cuba. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- Instituto de Planificación Física (IPF). (1981). Rangos de pendientes y características más significativas.

- Instituto Nacional de Ordenamiento Territorial y Urbanismo (INOTU). (2021). Plan Municipal de Ordenamiento Territorial municipio Guamá. Cuba. Inédito.
- Leroi, E. (1996). *Landslide hazard - risk maps at different scales: objectives, tools and developments*. Paper presented at the Landslides.
- Lomtadze, V. (1977). Geología aplicada a la ingeniería. Geodinámica aplicada a la ingeniería. *Pueblo y Educación*.
- Lucini, P. (1973). The potential landslides forecasting of the "Argille Varicolori Scagliose" complex in IGM 174 IV SE Map, Savignano di Puglia (Compania). *Geol. App. e Hidrogeol*, 8, 311- 316.
- Ministerio de la Agricultura de la República de Cuba (MINAG). (1989). Mapa de uso del Suelo 1: 25 000.
- Mora, R. (2004). Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de San José, provincia de San José, Costa Rica. *Universidad de Costa Rica*.
- Mora, R., Vahrson, W., & Mora, S. (1992). Mapa de amenaza de deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. *Centro de Coordinación para la prevención de desastres naturales en América Central (CEPRENAC)*.
- Mora, S., & Vahrson, W. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. *Tecnología ICE*, 3(1), 32 - 42.
- Mora, S., & Vahrson, W. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 31(1), 49 - 58.
- Morejón, G., Candebat, D., Márquez, I., Ferrera, H., Arango, E., Zapata, J.,Díaz, L. (2006). Evaluación de la vulnerabilidad ante la ocurrencia de eventos naturales de las carreteras de interés nacional de la provincia Santiago de Cuba: Autopista Nacional (Informe científico - técnico). Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS). Santiago de Cuba.

- Moreno, H., Vélez, M., Montoya, J., & Rhenals, R. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, (5), 59 - 69.
- Morgan, B. (1968). *An introduction to Bayesian statistical decision processes*. Prentice - Hall Englewood Cliffs, NJ, 196.
- Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI). (2015). Anuario Estadístico de Cuba 2014 (2015 ed.).
- Panoš, V. (1988). Carsos de Cuba. Regionalización tipológica. Academia de ciencias de Checoslovaquia. pp. 70 - 74.
- Pérez, N. (1976). Aspectos ingeniero - geológicos de Cuba Oriental. En texto explicativo del mapa geológico de la provincia de Oriente.
- Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M., & Garrido, A. (2008). Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes. Fundamentos y métodos.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 60 - 91.
- Renda, A., Calzadilla, E., Bouza, J., & Valle, M. (1981). Estudio sobre las condiciones edafológicas, fisiográficas y agrisilviculturales de la Sierra Maestra. Provincia Santiago de Cuba. MINAG, CIF. pp. 95.
- Reyes, C. (2002). *Peligro geológico por deslizamientos en la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores. Escala 1: 25 000*. (Tesis de Maestría). Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguín, Cuba.
- Reyes, P., Ríos, Y., Vega, N., & Arango, E. (2005). *Peligro geológico de la red vial de las provincias orientales para casos de sismos de gran intensidad*. Paper presented at the VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos.

- Rosabal, Y. (2018). *Evaluación de peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica, en Cuba Suroriental* (Tesis Doctoral), Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguín, Cuba.
- Ruiz, R. (2018). El clima hacia 2030. La geomorfología como proxy en el cambio climático. *Tekhné*, 21(3).
- Santacana, N. (2001). *Análisis de la susceptibilidad del terreno a la Formación de deslizamientos superficiales y Grandes deslizamientos mediante el uso de Sistemas de información geográfica*. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat (Tesis Doctoral). UPC. Barcelona.
- Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., De Paz, A., & Marturiá, J. (2003). A GIS - based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards*, 30 (3), 281.
- Savón, Y., Mesa, A., Matos, L., Castillo, L., Odilio, M., & Delgado, R. (2017). *Las precipitaciones como elemento disparador de movimientos gravitacionales en la provincia Guantánamo*. Paper presented at the Memorias de XII Congreso de Geología. VI Simposio de riesgos geológicos, procesos costeros. VII Convención de Ciencias de la Tierra. La Habana.
- Seisdedos, G., Reyes, C., Guasch, F., & Avich, B. (2001). Atlas de Peligros Naturales del municipio Guamá, provincia de Santiago de Cuba. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS). *Editorial Academia*.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC).(2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.
- Shafer, G. (1976). A mathematical theory of evidence. Princeton university press,42.
- Sharpe, C. (1938). Landslides and their control. *Academia & Elsevier, Prague*.
- Stevenson, P. (1977). An empirical method for the evaluation of relative landslip risk. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 16 (1).
- Suárez , J. (1998). Manual de Taludes en zonas Tropicales. In: Venezuela.

- Van Westen, C. (1993). Application of geographic information systems to landslide hazard zonation.
- Van Westen, C. (1994). GIS in landslide hazard zonation: a review, with examples from the Andes of Colombia. *Mountain environments & geographic information systems*.pp. 135 - 166.
- Varnes, D. (1958). Landslides types and processes. En: Eckel, E. B. (Ed.): Landslides and engineering practice. Special Report. Washington, 28, 20 - 47.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11 - 33.
- Varnes, D. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Commission on landslides of the IAEG. *Natural Hazards*, 3, 61.
- Villalón, M., Reyes, C., Aguller, M., Trejo, R., Nápoles, S., Despaigne, G., . . . Domínguez, A. (2012). Informe sobre los estudios de PVR deslizamientos provincia Santiago de Cuba.[Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS)]. Santiago de Cuba.
- Wang, G., Sassa, K. (2003). Pore pressure generation and movement of rainfall - induced landslides: effects of grain size and fine particle content. *Engineering Geology* Vol. 69, Pág. 109 - 125.
- WP/WLI. (1993). International Geotechnical societies UNESCO Working Party on World Landslide Inventory. Multilingual landslide glossary.
- Yan, J., Zou, Z., Mu, R., Hu, X., Zhang, J., Zhang, W., Su, A., Wang, J., & Luo, T. (2022). Evaluating the Stability of Outang Landslide in the Three Gorges Reservoir Area Considering the Mechanical Behavior With Large Deformation of the Slip Zone.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8 (3), 338 - 353.

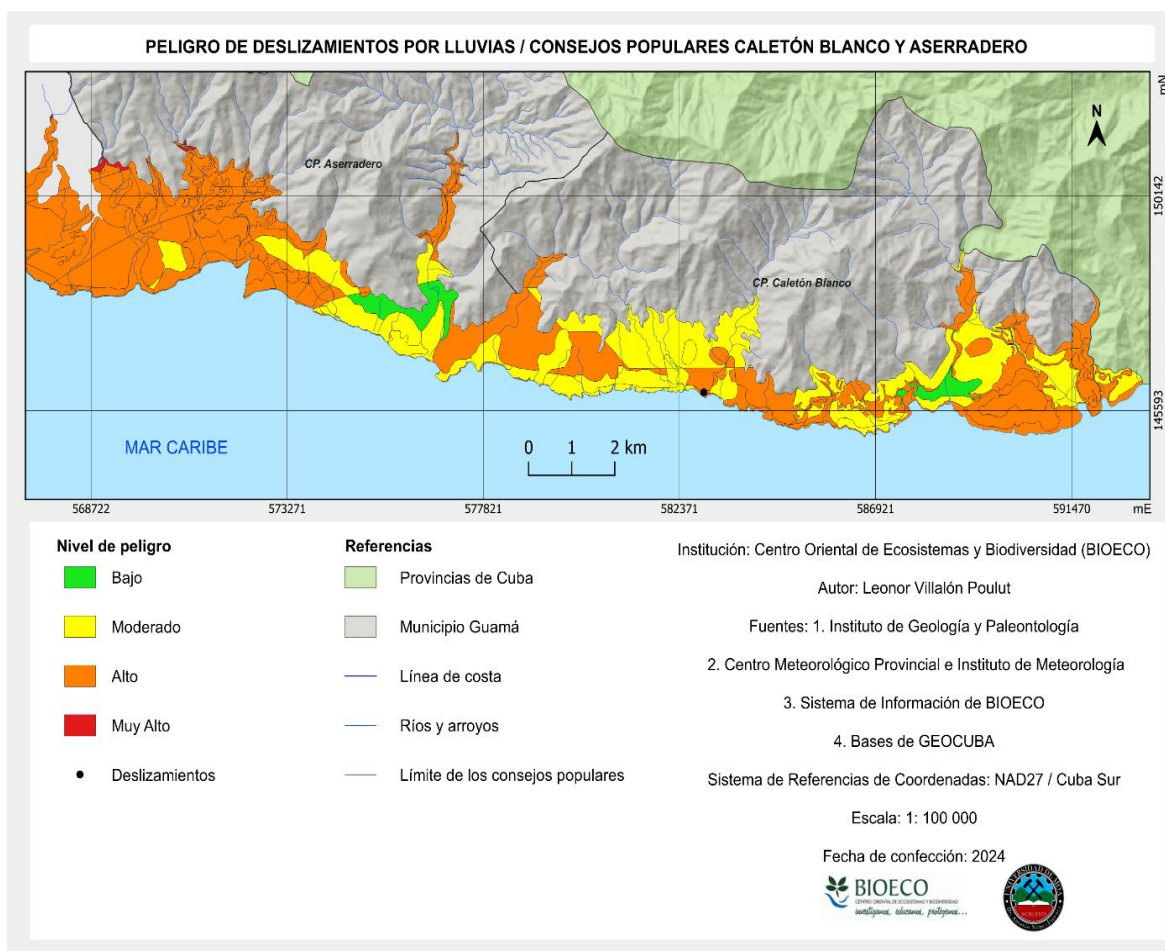
ANEXOS

Escala	1 cm igual a		1 mm igual a		Área mínima cartografiable (4 x 4 mm)	
	m	km	m	km	m ²	km ²
1:500	5	0.005	0.5	0.0005	4	0.000004
1:1000	10	0.01	1	0.001	16	0.000016
1:2000	20	0.02	2	0.002	64	0.000064
1:5000	50	0.05	5	0.005	400	0.0004
1:10 000	100	0.1	10	0.01	1 600	0.0016
1:20 000	200	0.2	20	0.02	6 400	0.0064
1:25 000	250	0.25	25	0.025	10 000	0.01
1:50 000	500	0.5	50	0.05	40 000	0.04
1:100 000	1000	1	100	0.1	160 000	0.16
1:250 000	2500	2.5	250	0.25	1000 000	1
1:500 000	5 000	5	500	0.5	4000 000	4
1:1000 000	10 000	10	1000	1	16 000 000	16
1:6000 000	60 000	60	6000	6	576 000 000	576

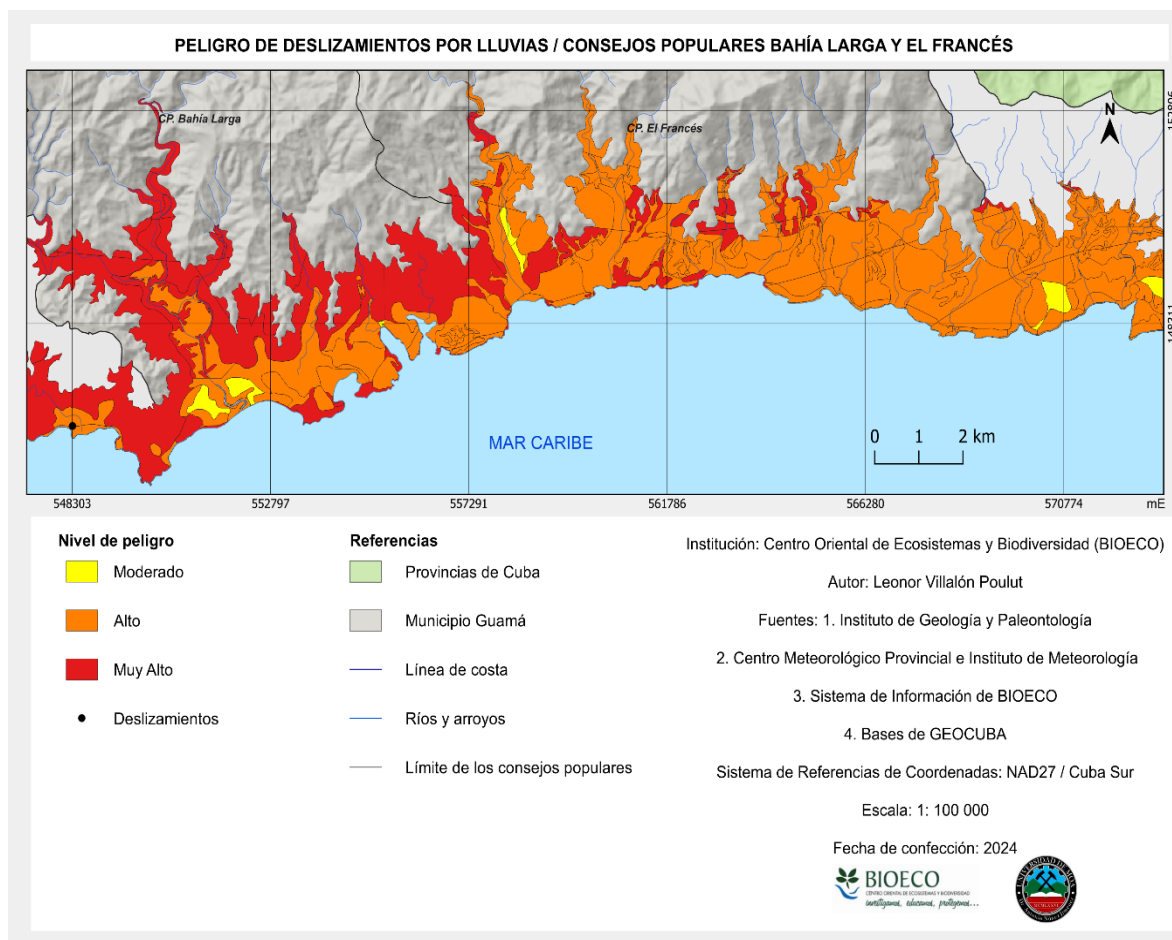
Anexo 1. Área mínima cartografiable para diferentes escalas. Fuente: Priego *et al.*, 2008.

Anexo 2. Caracterización general de los deslizamientos inventariados en la zona costera del municipio Guamá. Fuente: Elaborado por la autora.

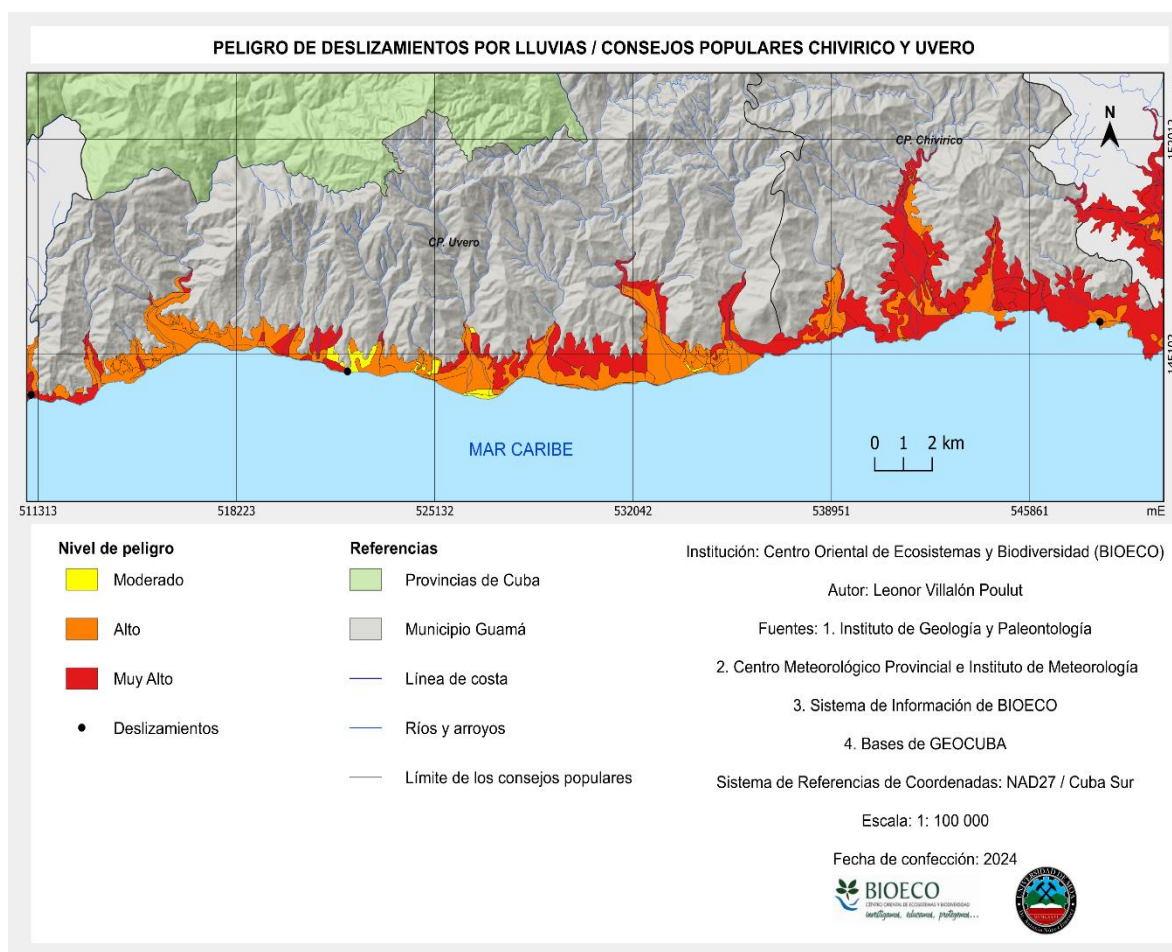
No	X	Y	Geología	Tipo de movimiento	Material	Rango de pendiente (°)	Precipitación media anual (mm)
1	479 986	137 894	Gr. El Cobre	Deslizamiento	Suelo / Roca	16° - 35°	1 400 - 1 600
2	480 436	137 638	Gr. El Cobre	Deslizamiento / Flujo	Suelo / Roca	16° - 35°	1 400 - 1 600
3	484 879	137 526	Gr. El Cobre	Caída	Roca	4° - 16°	1 200 - 1 400
4	548 307	146 146	Gr. El Cobre	Deslizamiento	Roca	4° - 16°	1 200 - 1 400
5	495 513	142 348	Gr. El Cobre	Deslizamiento	Roca	16° - 35°	1 200 - 1 400
6	508 253	143 847	Fm. Jaimanitas	Deslizamiento / Flujo	Roca	4° - 16°	1 400 - 1 600
7	511 062	143 797	Fm. Jaimanitas	Desprendimiento	Suelo / Roca	4° - 16°	1 400 - 1 600
8	491 339	139 464	Gr. El Cobre	Caída / Deslizamiento / Flujo	Roca	16° - 35°	1 200 - 1 400
9	522 088	144 552	Fm. Jaimanitas	Desprendimiento	Roca	35° - 55°	1 400 - 1 600
10	582 934	145 979	Gr. El Cobre	Deslizamiento	Suelo / Roca	4° - 16°	1 000 - 1 200
11	493 863	141 182	Fm. Jaimanitas	Deslizamiento	Suelo / Roca	4° - 16°	1 000 - 1 200
12	498 337	142 500	Fm. Jaimanitas	Caída	Suelo / Roca	35° - 55°	1 400 - 1 600



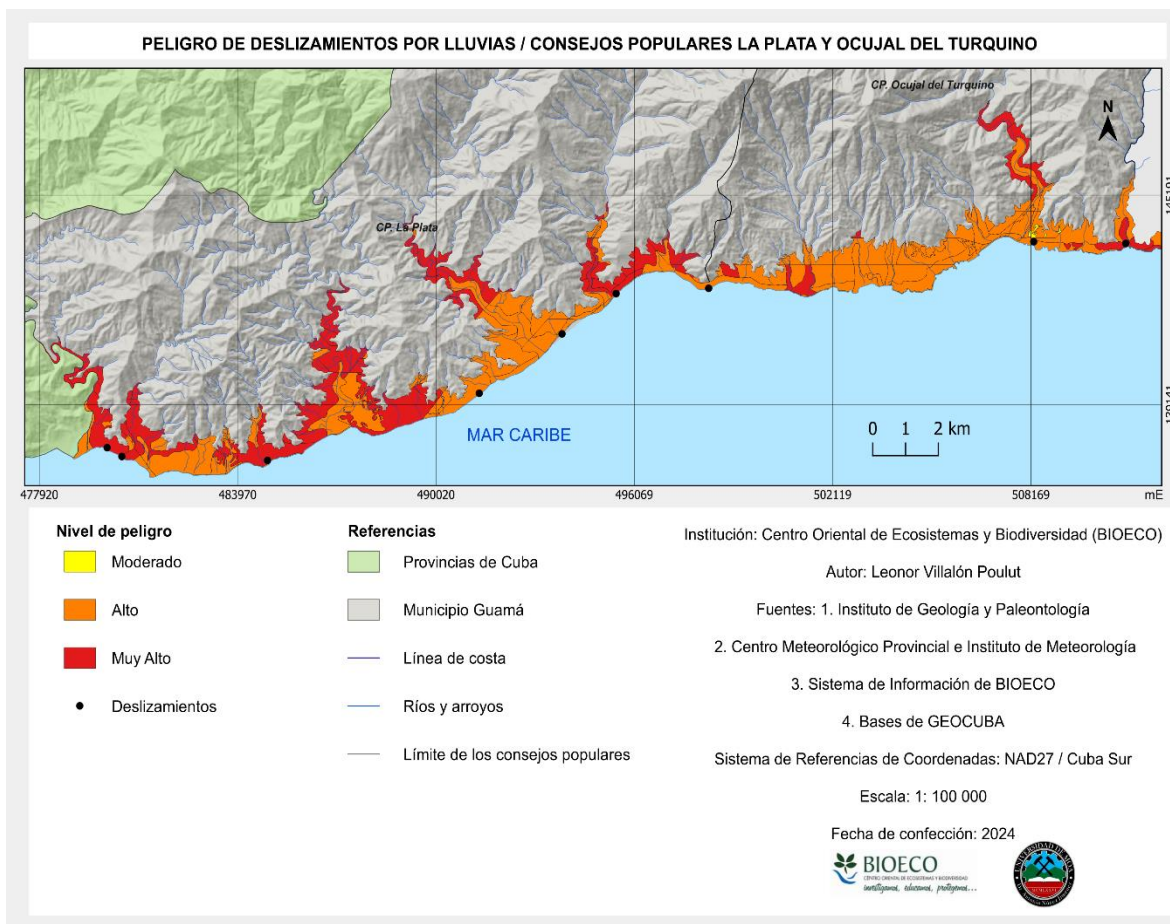
Anexo 3. Mapa de peligro a la ocurrencia de deslizamientos inducidos por lluvias de los consejos populares Caletón Blanco y Aserradero. Fuente: Elaborado por la autora.



Anexo 4. Mapa de peligro a la ocurrencia de deslizamientos inducidos por lluvias de los consejos populares Bahía Larga y El Francés. Fuente: Elaborado por la autora.



Anexo 5. Mapa de peligro a la ocurrencia de deslizamientos inducidos por lluvias de los consejos populares Chivirico y Uvero. Fuente: Elaborado por la autora.



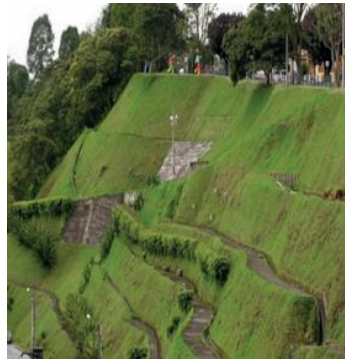
Anexo 6. Mapa de peligro a la ocurrencia de deslizamientos inducidos por lluvias de los consejos populares La Plata y Ocuajal del Turquino. Fuente: Elaborado por la autora.



Medidas estructurales. Fuente: García & Restrepo, 2016.



Muro Ecológicos. Fuente: Castillo et al., 2020.



Obras de estabilidad y control de la erosión (revegetación, reforestación, disminución de la pendiente). Fuente: Cardona et al., 2020.



Sistema de estabilización con mallas flexibles. Fuente: www.geobrugg.com

Anexo 7. Ejemplos de medidas estructurales para la prevención y mitigación de deslizamientos de tierra.