

UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO
“HNOS. SAÍZ MONTES DE OCA”
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS



**ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS EN
LA ANTIGUA PROVINCIA DE PINAR DEL RÍO**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Geología
(Mención Geología Ambiental)**

Autor: Ing. Carlos Javier Cueto Gil

Tutor: Dr. C. Elmidio Estévez Cruz

Pinar del Río

2015

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Los resultados que se exponen en la presente tesis se han alcanzado como consecuencia del trabajo realizado por el autor y asesorado y/o respaldado por el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) y la Universidad de Pinar del Río. Por tanto, los resultados en cuestión son propiedad del autor y de estas instituciones y solo ellas podrán hacer uso de los mismos de forma conjunta y recibir los beneficios que se deriven de su utilización.

Ing. Carlos Javier Cueto Gil

Autor

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia (mis padres, esposa y hermano) que han mostrado la suficiente paciencia y comprensión, para desarrollar esta investigación.

Agradecimientos

Agradezco a mi tutor por el apoyo brindado durante todo el trabajo.

A mis colegas del departamento por la comprensión y el ánimo ofrecido.

A todos los amigos, compañeros y colegas que de una forma me apoyaron en esta investigación.

RESUMEN

La presente investigación está dirigida a cartografiar las áreas más susceptibles a la ocurrencia de fenómenos gravitacionales en la antigua provincia Pinar del Río, considerando como punto de partida la propuesta metodológica del Grupo Nacional de Evaluación de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo.

Se realizó un inventario de deslizamientos a partir de la fotointerpretación, que complementa el ya existente y que se limitaba a registrar los movimientos de laderas asociados con las carreteras. El inventario permitió establecer la correlación entre los deslizamientos y los diferentes mapas de factores, lo cual resultó de mucha utilidad para ponderar las diferentes variables, conocer los controles de estos movimientos en el área de trabajo, identificar las diferentes tipologías que se manifiestan y entender su patrón de distribución espacial.

Los datos geocientíficos disponibles fueron usados para extraer y cartografiar los factores condicionantes o controladores, empleando distintas operaciones espaciales como reclasificación, filtrado, interpolación espacial, combinaciones lógicas, mapas de proximidad, etc.

En el trabajo se aplican diferentes métodos de modelación de la susceptibilidad en SIG, como la superposición indexada, la lógica booleana, el proceso analítico jerárquico (AHP), la lógica difusa, el análisis estadístico bivariado (BSA) y la ponderación de evidencias. Esto se realizó con vistas a evaluar los diferentes escenarios de susceptibilidad, e incorporar otras vías de ponderación de los factores integrados, de manera que los métodos aplicados reflejaran la realidad y las particularidades del área de trabajo.

La zonificación de la susceptibilidad reveló que aproximadamente el 40% del territorio de la antigua provincia de Pinar del Río es susceptible a la ocurrencia de los deslizamientos. De ellos casi el 15% posee alta susceptibilidad. Finalmente, se identifican las zonas susceptibles para la ocurrencia de fenómenos gravitacionales (Sierra del Rosario y franja de mogotes).

ABSTRACT

The present investigation aims at mapping the most susceptible areas to the occurrence of landslides phenomena in the former province Pinar del Río, considering as starting point the methodological proposal of the National Group of Evaluation of Hazard, Vulnerability and Risk.

A landslide inventory was carried out based on the photointerpretation, that improve the existing inventory, limited to record landslides associated with the roadways. The inventory allowed, establishing the correlation between the landslides and the different factors maps. This was very useful to weigh the diverse variables, to know the controls of these movements in the work area, to identify the different types of landslides that are manifested, and to understand its pattern of spatial distribution.

The available geoscientific data were used to extract and map the conditioning or controlling factors, using different spatial operations as reclassification, filtering, spatial interpolation, logical combinations, proximity maps, etc.

In this work, several methods of the GIS based susceptibility modelling are applied including, index overlay method, the boolean logics, the analytic hierarchy process (AHP), the fuzzy logics, the bivariate statistical analysis (BSA) and the weights of evidences. This was carried out to evaluate the different susceptibility scenarios, and to incorporate other ways of weighting the integrated factors, so that the applied methods reflected the reality and the particularities of the work area.

The susceptibility zoning revealed that approximately 40% of the territory of the former province Pinar del Río is susceptible to the occurrence of the landslides. About 15% of them show high susceptibility. Finally, the most susceptible areas for the landslide occurrence are identified (Sierra of the Rosario and belt).

INDICE

Introducción.....	1
Capítulo 1. Marco Teórico de la Investigación	5
1.1 Riesgos Geológicos	5
1.2 Definición de Movimientos en masa.	6
1.2.1Clasificación de los movimientos en masa.....	8
1.3Deslizamientos	9
1.3.1Características y tipos de deslizamientos.	11
1.4 Inventario de deslizamientos.	11
1.5 Mapas de deslizamientos.....	12
1.6 Métodos de modelación de la inestabilidad de las laderas	13
1.7Principales métodos de modelación de la susceptibilidad a deslizamientos.	14
1.7.1 Métodos basados en los datos.....	15
1.7.2Métodos basados en el conocimiento	16
1.8 Antecedentes.....	19
Capítulo 2. Características Físico Geográficas y Geológicas del área de estudio.....	24
2.1 Ubicación geográfica.....	24
2.2 Clima.	25
2.3 Relieve.....	25
2.4 Hidrografía	26
2.5 Vegetación.....	27
2.6Suelos	27
2.7 Vías de acceso	28
2.8Economía.....	28
2.9 Principales rasgos geológicos de la región	28
2.10 Geomorfología.....	30
2.11 Tectónica	30

Capítulo 3. Metodología para el análisis de la susceptibilidad a la ocurrencia de los fenómenos gravitacionales.	32
3.1 Modelo Conceptual de deslizamiento	32
3.2 Construcción de las bases de datos.....	37
3.3Procesamiento de los datos.....	39
3.4Integración y análisis	40
3.5Validación.....	41
Capítulo 4. Análisis y discusión de los resultados	42
4.1 Inventario de deslizamiento.....	42
4.2Factores de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos.....	46
4.2.1 Factor geológico	46
4.2.2Factor geomorfológico	50
4.2.3Factor Edafológico	53
4.2.4Factor red vial.....	55
4.3 Resultados de los métodos de modelación de la susceptibilidad.....	56
4.3.1 Método de superposición indexada por la metodología de la AMA	57
4.3.2 Método de superposición indexada por la metodología de la AMA utilizando pesos de análisis estadístico bivariado (BSA).	59
4.3.3 Método de superposición indexada aplicando pesos de los factores calculados a partir del Proceso Analítico Jerárquico (AHP).	60
4.3.4 Método de Lógica difusa	63
4.3.5 Método de ponderación de evidencias	65
4.4 Validación.....	67
CONCLUSIONES.....	69
RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFIA	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Mapa de localización del área de estudio, cuyos límites coinciden con la antigua provincia Pinar del Río	24
Figura 3.1: Diagrama de Flujo.....	33
Figura 4.1: Mapa de inventarios de deslizamientos revelando la densidad de los mismos en la parte oriental del occidente de Cuba.	46
Figura 4.2: Mapa que representa el factor geológico resultante de la integración de la susceptibilidad litológica y la distancia a los alineamientos tectónicos.	49
Figura 4.3: Mapa que representa el factor geomorfológico, resultante de la integración de los mapas morfométricos y el mapa de distancia a la red fluvial.	53
Figura 4.4: Mapa que representa el factor edafológico resultante de la integración de los mapas tipos de suelo y profundidad del suelo.	55
Figura 4.5: Mapa que representa el factor Red vial resultante de la reclasificación del mapa de proximidad a las principales carreteras.	56
Figura 4.6: Mapa de susceptibilidad a partir de la aplicación de la metodología de la AMA.....	58
Figura 4.7: Mapa de susceptibilidad aplicando la metodología de la AMA y empleando los Pesos obtenidos a partir de la aplicación del método BSA.....	60
Figura 4.8: Mapa de susceptibilidad aplicando la metodología de la AMA, pesos de las clases a partir de la aplicación del método BSA y pesos de las variables por AHP.....	62
Figura 4.9: Red de inferencia desarrollada para la integración a través de la lógica difusa	64
Figura 4.10: Mapa de susceptibilidad aplicando la lógica difusa para la integración de los factores.....	64
Figura 4.11: Mapa de susceptibilidad de la Sierra del Rosario, obtenido a partir de la aplicación del método de ponderación de evidencia.	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Características de los Métodos de susceptibilidad	14
Tabla 4.1: Inventario de fenómenos gravitacionales a partir de la fotointerpretación. ...	43
Tabla 4.2 Distribución de los deslizamientos por formaciones geológicas.....	47
Tabla 4.3 Clasificación de las formaciones geológicas según su susceptibilidad a los deslizamientos.	48
Tabla 4.4 Distribución de los deslizamientos por distancia a fallas.....	49
Tabla 4.5 Distribución de los deslizamientos en función de la pendiente.....	50
Tabla 4.6 Distribución de los deslizamientos en función de la disección vertical.	51
Tabla 4.7 Distribución de los deslizamientos en función del aspecto.	51
Tabla 4.8 Distribución de los deslizamientos en función de la distancia de los ríos.	52
Tabla 4.9 Distribución de los deslizamientos en función del tipo de suelo.	54
Tabla 4.10 Distribución de los deslizamientos en función de la profundidad del suelo.	54
Tabla 4.11 Distribución de los deslizamientos en función de la red vial.	56
Tabla 4.12: Criterios e indicadores para susceptibilidad por deslizamientos de terreno. (Guía PVR).....	58
Tabla 4.13: Escala de preferencia entre dos parámetros+	61
Tabla 4.14: Vector de pesos	61
Tabla 4.15: Pesos (WSI) calculados para la disección vertical	66
Tabla 4.16: Pesos (WSI) calculados para la pendiente.....	66
Tabla 4.17: Pesos (WSI) calculados para el tipo de suelo.....	67
Tabla 4.18: Pesos (WSI) calculados para la densidad de fallas	67
Tabla 4.19: Resultados de la validación de los mapas de susceptibilidad, obtenidos por los diferentes métodos.	68

ÍNDICE DE ANEXOS GRÁFICOS

Anexo 1: Mapa de las Redes Viales	78
Anexo 2: Modelo de elevación digital.....	78
Anexo 3: Mapa de Pendiente.....	79
Anexo 4: Mapa de Disección Vertical.....	79
Anexo 5: Mapa de Profundidad de suelo	80
Anexo 6: Mapa de Tipo de Suelo	81
Anexo 7: Mapa Geológico.....	82
Anexo 8: Mapa de densidad de deslizamientos.....	83
Anexo 9: Tabla de fenómenos gravitacionales como resultado del inventario de carreteras.....	84
Anexo 10: Mapa de distancia a fallas.....	86
Anexo 11: Gráficos de dispersión mostrando la curva de los valores de susceptibilidad contra el área acumulada (%) para los diferentes métodos de modelación.	87
Anexo 12: Mapa de relieve sombreado	89
Anexo 13: Mapa de susceptibilidad a partir de la metodología de la AMA tomado del trabajo de diploma (Bee 2012).	89

Introducción

Los fenómenos gravitacionales, entendidos como el desplazamiento de materiales en una ladera o talud impulsados por su propio peso (el principal factor es la fuerza de gravedad) así como por otros factores que favorecen el inicio del movimiento, se reconocen como el tercer tipo de desastre natural en orden de importancia (Zillman, 1999 en: Castellanos, 2008). Estos deben estudiarse y tenerse en cuenta en cualquier país, partiendo de que algunos de los mayores desastres a nivel mundial están vinculados a movimientos de remoción en masa, provocando muertes, severos daños en las ciudades, y serias pérdidas económicas.

Sin embargo, los daños ocasionados por estos fenómenos son habitualmente subestimados al ser erróneamente atribuidos a los procesos disparadores tales como los huracanes y terremotos (Schuster, 1996). La presión que ejerce el crecimiento poblacional y la expansión urbana hacia áreas con laderas inestables, unido al cambio climático, y al deterioro ambiental aumentan la probabilidad de ocurrencia de movimientos gravitacionales y consecuentemente incrementan los daños ocasionados por estos fenómenos.

En Cuba no existe un registro sistemático dirigido a evaluar el impacto que los procesos de inestabilidad de laderas provocan. Un estudio estadístico de este tipo de evento, que permita hacer inferencias sobre su impacto en la población y la infraestructura, no está disponible, aunque el país y la provincia han realizado acciones para revertir esta situación.

En muchos casos, los desastres como los deslizamientos de terreno alcanzan una magnitud que resulta imposible evitarlos o detener la actividad del proceso que los provoca, además es cierto que se pueden tomar medidas para evitar la exposición al riesgo (medidas preventivas), así como para mitigar los daños (medidas correctoras). En ese sentido, la ordenación de territorio y la protección civil se presentan como dos herramientas claves que, sin duda, son efectivas. Por otra parte, para poder mitigar los impactos ocasionados por estos procesos geológicos lo fundamental es conocer las áreas donde los mismos han ocurrido y donde es más probable que se manifiesten en el futuro. Esta tarea fundamental se resuelve construyendo mapas de zonificación de los deslizamientos o mapa de susceptibilidad, que intentan cartografiar los principales escenarios de susceptibilidad.

En la actualidad prácticamente todas investigaciones sobre la cartografía o zonificación de la susceptibilidad y el peligro a los deslizamientos hacen uso de herramientas digitales para el manejo y procesamiento de los datos espaciales tales como SIG, GPS y sensores remotos. Estas herramientas, especialmente los SIG, definen, el tipo de análisis que se puede realizar y determinan, en cierta medida, el estado del arte en los estudios de peligro y riesgo por deslizamientos.

La zonificación de la susceptibilidad (Landslide susceptibility zoning) y el peligro, incluyendo la cartografía del riesgo a los deslizamientos, ha experimentado un extenso desarrollo durante las últimas décadas. Esta siempre incluye cierto grado de interpretación, en ella se establece la distribución espacial y la jerarquización de las unidades del terreno de acuerdo a su disposición a la ocurrencia de deslizamientos. La inestabilidad de las laderas va a depender de la topografía, la geología, las propiedades geotécnicas, el clima, la vegetación, y los factores antropogénicos.

La literatura científica muestra el amplio desarrollo alcanzado en las últimas décadas en la zonificación de la susceptibilidad y el peligro, la cual constituye actualmente una poderosa herramienta para mejorar la planificación física del territorio y evitar el desarrollo constructivo en las áreas amenazadas. La cartografía de la susceptibilidad constituye una vía eficiente y económica para reducir futuros daños a la infraestructura y pérdida de vidas humanas (Cascini, 2002, 2005). Sin embargo, la ausencia de procedimiento estándar restringe la aplicabilidad de estos mapas. Además el uso de terminología y métodos diferentes, genera confusión y hace difícil la comparación entre diferentes contextos geoambientales, lo cual resulta muy importante al diseñar políticas de gestión del riesgo.

En el occidente del Cuba los deslizamientos han sido la causa del deterioro de viales, fundamentalmente las carreteras de montaña de la parte más oriental de la cordillera de Guaniguanico, en períodos de eventos meteorológicos extremos. La región montañosa posee un incalculable valor por la función ambiental de sus bosques, los dividendos de su economía silvícola y agrícola, sus atractivos turísticos y la importancia estratégica para la defensa del país. Sin embargo, no se cuenta con una valoración del peligro por los deslizamientos del terreno que permita una correcta planificación física del territorio, a la vez que posibilite diseñar las mejores estrategias para el desarrollo integral de la montaña.

El presente trabajo se inserta en los esfuerzos que hace el país y la provincia para ejecutar los Estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo (PVR) por deslizamientos del

terreno, los cuales son dirigidos por el Grupo Nacional de Evaluación de Riesgo de la Agencia de Medio Ambiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (AMA) y son coordinados provincialmente por el departamento de Geología de la Universidad de Pinar del Río. Esta investigación está dirigida a cartografiar las áreas más susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos en la antigua provincia de Pinar del Río, sobre la base de la propuesta metodológica de la AMA, e incorporando otros métodos de modelación de la susceptibilidad que han tenido un amplio uso en la bibliografía sobre el tema. Además en el trabajo se intenta completar el inventario de deslizamiento y caracterizar a escala regional, los principales factores condicionantes de estos procesos. De este modo, la investigación, da respuesta a la primera etapa de los estudios de PVR, facilitando los ulteriores trabajos de vulnerabilidad y riesgo.

Por lo antes expuesto se define como **problema científico**:

Aunque en la parte occidental de Cuba se han realizado diferentes estudios de peligros por deslizamientos del terreno no se cuenta con un valoración completa de los diferentes escenarios de susceptibilidad, obtenida de la aplicación de las diversas metodologías aceptadas y validadas a nivel nacional e internacional, que considere la incorporación de un inventario, lo más completo posible, de los movimientos de ladera y el empleo de metodo de integración en SIG de amplio uso en estos estudios.

El **Objeto** a investigar son los movimientos gravitacionales que se generan en el extremo más occidental de Cuba.

Como **Objetivo General** el autor se propone: Elaborar un mapa integral de susceptibilidad donde se revelen las áreas más propensas a la ocurrencia de fenómenos gravitacionales.

Para darle cumplimiento al objetivo general se diseñaron los siguientes **Objetivos Específicos**:

1. Realizar un inventario de fenómenos gravitacionales.
2. Determinar los factores geológicos que mayor control ejercen sobre la susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos gravitacionales en el área.
3. Evaluar la efectividad de la aplicación de diferentes metodologías, incluyendo la propuesta por la Agencia de Medio Ambiente, identificando sus debilidades y fortalezas.

4. Validar la confiabilidad del modelo de integración utilizado para evaluar la susceptibilidad, mediante el chequeo de su capacidad predictiva en el área de estudio.

La hipótesis en la que se sustenta el presente trabajo es la siguiente: si se logra inventariar los fenómenos gravitacionales en el área de estudio, se identifican y caracterizan los principales factores condicionantes de los procesos de laderas, y estos se cartografían a partir de mapas temáticos a una escala adecuada y se ponderan objetivamente e integran en un Sistema de Información Geográfica, se logrará una valoración más real de la susceptibilidad de un territorio a la ocurrencia de los deslizamientos.

El principal aporte de esta investigación consiste en completar y actualizar el inventario de los movimientos de ladera en la parte occidental de Cuba y su uso para identificar los principales factores controladores y ponderar convenientemente los mismos, de modo que las diferentes metodologías existentes se ajusten a las particularidades generales del área de estudio.

Estructura de la tesis

El trabajo se divide en introducción, cuatro capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos. El Capítulo 1 aborda un conjunto de generalidades relacionadas con los fenómenos gravitacionales, entre ellos la definición de los movimientos en masa, factores que influyen en su ocurrencia, así como sus características y tipos, mapas e inventarios de deslizamientos y los métodos de modelación en GIS. Se aborda además los antecedentes relacionados con el tema.

En el Capítulo 2 se realiza una descripción de la zona occidental de Cuba, haciendo énfasis en las características del medio físico, geológicas y socioeconómicas.

En el Capítulo 3 se describe la metodología a utilizar en el estudio de la zona, se incluye la descripción de los datos geocientíficos empleados en el trabajo y la caracterización exhaustiva del modelo conceptual de deslizamiento.

Finalmente, en el Capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos en la investigación, así como los mapas resultantes del procesamiento de los datos.

Capítulo 1. Marco Teórico de la Investigación

En el presente capítulo se abordan aspectos teóricos metodológicos relacionados con los movimientos de remoción en masa en sentido general y con los deslizamientos en particular, así como las definiciones de riesgo geológico, vulnerabilidad, peligro, y susceptibilidad. Se explican los principales métodos de cartografía o zonificación de la susceptibilidad, incluyendo los basados en SIG. Finalmente, se discuten los principales trabajos realizados sobre la temática en Cuba y en el extranjero.

1.1 Riesgos Geológicos

Los riesgos geológicos pueden ser entendidos como una circunstancia o situación de peligro, pérdida o daño, social y económico, debido a una condición geológica o a una posibilidad de ocurrencia de procesos geológicos, inducido o no.

Ayala-Carcedo (1988) entiende como riesgo geológico: “Todo proceso, situación u ocurrencia en el medio geológico, natural, inducida o mixta, que puede generar un daño económico o social para alguna comunidad, y en cuya previsión, prevención o corrección se emplearán criterios geológicos.

Los riesgos geológicos pueden ser subdivididos, de acuerdo a la naturaleza de los procesos, en dos tipos: los endógenos y los exógenos. Los riesgos geológicos endógenos son aquellos relacionados con la dinámica interna del planeta, como los terremotos, erupciones volcánicas, maremotos. Los exógenos son los asociados a procesos que se producen en la superficie de la tierra, como los deslizamientos y la erosión.

Entre los elementos que integran el riesgo cabe destacar: la peligrosidad del fenómeno, la vulnerabilidad del entorno y el grado de exposición o elementos de bajo riesgo. Dadas las diversas acepciones que existen en la literatura de cada uno de ellos, se hace necesario señalar exactamente los conceptos que se van a manejar en esta memoria, ya que se han publicado numerosos trabajos (Varnes (1984), Fell et al. (2008)), definiendo términos como: susceptibilidad, peligrosidad, amenaza natural, riesgo, vulnerabilidad etc., los cuales se utilizan con significados diferentes. La práctica de los estudios de susceptibilidad y peligros a los deslizamientos está profundamente afectada por las diferencias conceptuales (Yesilnacar y Topal, 2005).

En este trabajo se utilizan las siguientes definiciones:

Peligrosidad (amenaza Natural): El peligro natural definido por Varnes (1984) es la probabilidad de que un fenómeno potencialmente dañino suceda en una zona determinada y dentro de un periodo específico de tiempo.

La **Susceptibilidad** está muy relacionada con el aspecto espacial de la peligrosidad. En el caso de las inestabilidades de ladera hace referencia a la propensión del terreno a deslizarse. Según Brabb (1984) es la probabilidad de que suceda un evento en una zona específica en función de la correlación de los factores condicionantes de la inestabilidad con la distribución de los movimientos pasados. Se determina mediante el comparativo (cualitativo - cuantitativo) de factores condicionantes y/o desencadenantes con las áreas que han sido afectadas en el pasado (Olcina y Ayala –Carcedo, 2002).

La **Exposición** viene determinada por los **Elementos bajo Riesgo** es decir la población, sus propiedades, las actividades económicas, el patrimonio ambiental y cultural, etc., que están sometidos a un riesgo en un área dada. La exposición en un mismo lugar puede variar a lo largo del día, estacionalmente etc. (Olcina y Ayala – Carcedo, 2002).

La **Vulnerabilidad** es el porcentaje de pérdida esperable de un determinado bien expuesto, debido a la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada, toma valor 0 para ausencia de daño y 1 para pérdida total (UNDRO, 1979; Olcina y Ayala – Carcedo, 2002). Para su estimación se definen funciones de vulnerabilidad (Gonzales de Vallejo, 1999) que establecen la relación entre la intensidad del fenómeno y el grado de daño esperado y serán diferentes para cada tipo de elemento expuesto.

Dentro del **Riesgo** hay que diferenciar entre **riesgo específico** y **riesgo total**, el primero se puede expresar como el producto de peligrosidad por vulnerabilidad y hace referencia al grado de pérdidas esperadas para cada categoría de elementos bajo riesgo como consecuencia de la actuación de un fenómeno natural específico.

El **riesgo total** se expresa como el producto entre el riesgo específico y los elementos bajo riesgo. Representa el numero esperado de víctimas, heridos, propiedades dañadas o pérdidas por la interrupción en la actividad económica como consecuencia de un determinado fenómeno natural (UNDRO, 1979).

1.2 Definición de movimientos en masa.

Los movimientos en masa son parte de los procesos denudativos que modelan el relieve de la tierra. Su origen obedece a una gran diversidad de procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que se dan en la corteza terrestre y en la

interface entre esta, la hidrósfera y la atmósfera. Si por una parte, el levantamiento tectónico forma montañas, por otra, la meteorización, las lluvias, los sismos y otros eventos (incluyendo la acción del hombre) actúan sobre las laderas para desestabilizarlas y cambiar el relieve a una condición más plana. Esto implica que la posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa comienza desde el mismo momento en que se forma una ladera natural o se construye un talud artificial y que el análisis de tal posibilidad involucra distintas disciplinas de las ciencias de la tierra y del medio ambiente, así como de las ciencias naturales.

El término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de suelos por efectos de la gravedad (Cruden, 1991).

Algunos movimientos en masa, como la reptación de suelos, son lentos, a veces imperceptibles y difusos, en tanto que otros, como algunos deslizamientos pueden desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites claros, determinados por superficies de rotura (Crozier, 1999a, en Glade y Crozier, 2005).

En la literatura científica se describen diversas clasificaciones de movimientos en masa; la mayoría de ellas se basa en el tipo de materiales involucrado, los mecanismos de movimiento, el grado de deformación del material y el porcentaje de saturación.

Las clasificaciones de movimientos en masa dada por Varnes (1958, 1978) y Hutchinson, (1968, 1988) son en la actualidad, los sistemas más ampliamente aceptados en el mundo de habla inglesa e hispana. Varnes (1958 y 1978) emplea como criterio principal en la clasificación, el tipo de movimiento y en segundo lugar, el tipo de material. Este autor divide los movimientos en masa en cinco tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos. Además, clasifica los materiales en dos clases: rocas y suelos, estos últimos subdivididos en detritos y suelos. De esta manera, presenta definiciones para las posibles combinaciones de tipo de movimiento y material.

Es importante tener en cuenta que en la práctica es difícil asignar un tipo de movimiento en masa a una clase en particular, debido a que la mayoría de los procesos son bastante complejos y presentan diferentes comportamientos a lo largo de su trayectoria. Además, hay factores externos que influyen en el tipo de movimiento, por ejemplo, mientras que una determinada ladera pudiera fallar como deslizamiento traslacional en condiciones de humedad moderada, el mismo deslizamiento se puede transformar en una avalancha o un flujo de detritos en condiciones de mayor humedad, aumentando la longitud de su recorrido (Crozier y Glade, 2005).

1.2.1 Clasificación de los movimientos en masa.

Caídas: La caída es un tipo de movimiento en masa en el cual, uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable. Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento (Varnes, 1978). Dependiendo del material desprendido se habla de una caída de roca, o una caída de suelo.

Una característica importante de las caídas es que el movimiento no es masivo, ni del tipo flujo. Existe interacción mecánica entre los fragmentos individuales y su trayectoria, pero no entre los fragmentos en movimiento.

Volcamientos: Se denomina así a un tipo de movimiento en masa, en el cual hay una rotación generalmente hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior. Este movimiento ocurre por la acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978). El volcamiento puede ser en bloque, flexional (o flexural) y flexional del macizo rocoso.

Propagación lateral: La propagación o expansión lateral es un tipo de movimiento en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material.

La mayoría de los deslizamientos y los flujos involucran algún grado de expansión. Las propagaciones laterales pueden considerarse como la etapa final en una serie de movimientos donde la deformación interna predomina decididamente sobre otros mecanismos de desplazamiento como los que imperan en el deslizamiento o el flujo.

Varnes (1978) distingue dos tipos de propagación, uno en que el movimiento afecta a todo el material sin distinguirse la zona basal de cizalla, típico de masas rocosas y otro que ocurre en suelos cohesivos, que sobreyacen a materiales que han sufrido licuefacción o a materiales en flujo plástico.

Las propagaciones laterales pueden desarrollarse y evidenciar deformación plástica de materiales frágiles bajo el peso de una unidad competente.

Algunos autores señalan que hay una relación continua entre deslizamientos y expansiones laterales, dependiendo de la importancia de la deformación interna. De esta forma, muchos casos de propagación lateral podrían incluirse dentro de la categoría de deslizamientos compuestos, como lo propone (Hutchinson, 1988).

Flujo: Es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978). Hungret al.(2001), clasifican los flujos de acuerdo con el tipo y propiedades del material involucrado, la humedad, la velocidad, el confinamiento lateral y otras características que los hacen distinguibles; así mismo, aportan definiciones que enfatizan aspectos de uso práctico, útiles para el estudio de amenazas.

Reptación: La reptación se refiere a aquellos movimientos lentos del terreno en donde no se distingue una superficie de falla. La reptación puede ser de tipo estacional, cuando se asocia a cambios climáticos o de humedad del terreno, y verdadera cuando hay un desplazamiento relativamente continuo en el tiempo.

Dentro de este movimiento se incluyen la solifluxión y la gelifluxión, este último término reservado para ambientes periglaciales. Ambos procesos son causados por cambios de volumen de carácter estacional en capas superficiales del orden de 1 a 2 metros de profundidad, combinados con el movimiento lento del material ladera abajo.

La reptación de suelos y la solifluxión son importantes en la contribución a la formación de delgadas capas de suelo coluvial a lo largo de laderas de alta pendiente.

Deformaciones gravitacionales profundas: Hay una variedad de procesos que podrían describirse como deformaciones de laderas (slope deformations) (Hutchinson, 1988) o deformaciones gravitacionales profundas.

Estos tipos presentan rasgos de deformación, pero sin el desarrollo de una superficie de ruptura definida y usualmente con muy baja magnitud de velocidad y desplazamiento.

Algunas deformaciones de laderas deben ser consideradas como precursoras de deslizamientos en gran escala. Las mediciones de velocidades de este tipo de movimiento están en el rango de 10^{-8} a 10^{-9} mm/s, extremadamente lentas.

Deslizamiento: Es un movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante.

1.3 Deslizamientos

Después de presentadas las diferentes tipologías de los fenómenos de remoción en masa, en el presente epígrafe se hará un análisis más detallado de los deslizamientos por su importancia en la presente investigación. Estos pueden producirse por la lluvia, terremotos, la actividad volcánica, los cambios de volumen en los suelos, perturbación y

cambio de una pendiente de manera artificial producto a las actividades de la construcción, o cualquier combinación de estos factores.

Diversas han sido las definiciones de deslizamientos descritas por distintos autores a nivel mundial. Algunas de estas se presentan a continuación:

“El desplazamiento rápido de una masa de roca, suelo residual o sedimentos unidos a una pendiente en que el centro de gravedad de la masa en movimiento avanzan en una dirección descendente y exterior” (Terzaghi, 1950).

"Movimientos pendiente abajo de una masa de roca, tierra o relleno artificial." (Webster's 3rd International Dictionary, 1966).

"Los movimientos gravitacionales exteriores y descendentes de tierra sin la ayuda del arrastre de agua como agente transportador" (Crozier, 1986).

“Transporte pendiente abajo producto a la influencia de la gravedad, de suelos, materiales rocosos o masas. Normalmente los materiales desplazados están en una zona confinada o de fractura” TheGlossary of Geology (Bates and Jackson, 1987).

“Los movimientos de una masa de roca, restos o suelos pendiente abajo” (Cruden, 1991).

Los deslizamientos son un tipo de “masa que se erosiona” que marca cualquier movimiento pendiente abajo de un volumen de tierra y está sujeto a la influencia directa de la gravedad. Son fenómenos complejos, los cuales presentan una distribución en el tiempo-espacio y están sujetos a la interacción de numerosos factores: geológicos, geomorfológicos, físico, y humano” (Varnes, 1978; Crozier, 1986; Cruden y Varnes, 1996).

Al analizar los conceptos anteriores se muestran como elementos comunes que describen el fenómeno los siguientes:

- Movimientos de rocas, tierra o relleno
- La dirección del movimiento es descendente
- El agua no actúa como agente transportador
- Están sujetos a la interacción de diferentes factores

La ocurrencia de deslizamientos es atribuible a la fuerza de resistencia que ejerce la roca y el suelo que forman la pendiente contra la gravedad. El deslizamiento es el resultado de una pérdida de equilibrio del macizo a favor de la gravedad, la cual puede ser provocada por varias circunstancias naturales o artificiales (Varnes, 1984).

En la presente investigación se asume la definición dada por Cruden y Varnes (1996) los cuales plantean que “un deslizamiento se define como un movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de zonas relativamente delgadas con gran deformación cortante.

1.3.1 Características y tipos de deslizamientos.

En el sistema de Varnes (1978), se clasifican los deslizamientos, según la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material, en traslacionales y rotacionales. Los deslizamientos traslacionales a su vez pueden ser planares o en cuña. Sin embargo, las superficies de rotura de los movimientos en masa son generalmente más complejas que las de los dos tipos anteriores, pues pueden consistir de varios segmentos planares y curvos, caso en el cual se hablara de deslizamientos compuestos (Hutchinson, 1988).

Deslizamiento traslacional: Es un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada. En general, estos movimientos suelen ser más superficiales que los rotacionales y el desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual o transportado que yace sobre ella (Cruden y Varnes, 1996).

Deslizamiento rotacional: Es un tipo de deslizamiento en el cual, la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava. Los movimientos en masa rotacionales muestran una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y una contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal. La deformación interna de la masa desplazada es usualmente muy poca. Debido a que el mecanismo rotacional es auto-estabilizante, y este ocurre en rocas poco competentes, la tasa de movimiento es con frecuencia baja, excepto en presencia de materiales altamente frágiles como las arcillas sensitivas.

1.4 Inventario de deslizamientos.

Un inventario de deslizamientos no es más que un registro ordenado de la localización y características individuales de una serie de movimientos ocurridos en un área dada. Los elementos a registrar en un inventario dependen en gran medida del interés para el cual este se realice y no se cuenta hasta el momento con un esquema unificado del mismo. No obstante, se pretende contar con una información completa y precisa sobre todos los

aspectos involucrados en un movimiento en masa. Es importante destacar que el modelo de inventario no es en sí mismo un estudio detallado de estos aspectos, sino la recopilación de datos básicos para localizar en el espacio y el tiempo un conjunto de movimientos en masa y sintetizar sus rasgos más característicos de acuerdo con atributos de tipo geológico, geomorfológico, edafológico, geotécnico y de efectos causados. Con ello se pretende contribuir a la construcción de una base de datos confiable para la evaluación de la amenaza y riesgo, ya que usualmente la ausencia de estos datos suele ser crítica, particularmente cuando la intención es zonificar la amenaza y riesgo por movimientos en masa. La utilidad de un inventario es variada y vale la pena referirse a ella aunque sea brevemente. Varios autores manifiestan, por ejemplo, que un inventario es la aproximación más directa a una zonificación de la amenaza por movimientos en masa (ver por ejemplo: Soeters y Van Westen, 1996, Lee y Jones, 2004). Cascini (2005), por otra parte, destacan no solamente el rol que juega un inventario de deslizamientos como elemento para la zonificación de la amenaza, sino como herramienta necesaria para validar zonificaciones de amenaza realizadas por otros métodos. Los inventarios también pueden emplearse para análisis de sensibilidad o importancia de un cierto factor en la condición de estabilidad de una ladera: por ejemplo que una unidad geológica es más susceptible a los deslizamientos, o que altura y pendiente de ladera puede ser crítica en cierta unidad geológica. Otra utilidad de los inventarios también se encuentra en los análisis de frecuencia de deslizamientos, en los cuales se basan algunos métodos de evaluación de la amenaza. Igualmente, los inventarios son necesarios para establecer correlaciones tales como lluvia-deslizamiento, o sismo deslizamiento. En general y como lo manifiestan Soeters y Van Westen (1996), un inventario confiable de deslizamientos es esencial para cualquier análisis de ocurrencia de deslizamientos y el establecimiento de la relación entre estos y sus condiciones ambientales.

1.5 Mapas de deslizamientos.

El mapa de inventario proporciona información sobre un momento determinado de tiempo (fecha en que se realizó el mismo) y no aporta datos sobre los cambios temporales en la distribución de los mismos

Aunque los mapas de inventarios derivados de archivos históricos, trabajos de campo, entrevistas a la población local e interpretación de imágenes, resultan esenciales en

estos tipos de estudios, desafortunadamente con frecuencia están incompletos o no están disponibles (Van Westen et al., 2006).

El análisis de los inventarios permite predecir el patrón regional futuro de ocurrencia de deslizamiento a partir de la distribución pasada de estos fenómenos. El mapa de inventario brinda información sobre la inestabilidad de las laderas y taludes sobre la base de la cartografía de los antiguos deslizamientos. El estudio de la distribución espacial de los deslizamientos permite a la vez realizar extrapolaciones a otras áreas con características similares, donde se pueden presentar inestabilidades futuras en las laderas. Indiscutiblemente, los mapas de inventario constituyen un componente invaluable en la zonación de la susceptibilidad a los deslizamientos. El inventario se hace acompañar de mapas de densidad de deslizamiento, los cuales representan el porcentaje del área ocupada por estos fenómenos o la cantidad de ocurrencia por km² en una región (Guzzetti et al., 2004). En general y como lo manifiestan Soeters y Van Westen (1996), un inventario confiable de deslizamientos es esencial para cualquier análisis de ocurrencia de deslizamientos y el establecimiento de la relación entre estos y sus condiciones ambientales.

1.6 Métodos de modelación de la inestabilidad de las laderas

Los métodos de modelación de la inestabilidad de laderas han sido empleados por diferentes investigadores con amplia repercusión a nivel mundial. De acuerdo a la bibliografía consultada estos métodos pueden ser divididos en: (1) cualitativo o cuantitativo, y (2) directo o indirecto.

Los métodos cualitativos son subjetivos, valoran la susceptibilidad de forma heurística, y muestran los niveles de susceptibilidad en términos cualitativos o descriptivos. Los métodos cuantitativos producen estimaciones numéricas, es decir las probabilidades de la ocurrencia de los fenómenos en cualquier zona susceptible (Guzzetti et al., 2005). Los métodos de la cartografía directos son aquellos que identifican la distribución espacial de la inestabilidad, directamente de los deslizamientos existentes y/o el conocimiento específico de las áreas de inestabilidad potencial. Un método directo consiste en el mapeo o cartografía geomorfológica de la susceptibilidad de los deslizamientos en el campo de las fotografías aéreas (Verstappen, 1983) o de las imágenes satelitales (Nossin, 1989). Los métodos de la cartografía indirectos son aquellos que usan factores relevantes para estimar la inestabilidad potencial de los deslizamientos.

Los requerimientos determinados de estos métodos indirectos son (Thanh, 2008):

- el reconocimiento y la cartografía de los deslizamientos en una región designada o un subconjunto de ella (es decir el área de entrenamiento) que se obtiene para preparar un gran mapa del inventario.
- la identificación y cartografía de los factores físicos que están directa o indirectamente correlacionados con la inestabilidad de la pendiente (los factores inestables, o las variables independientes).
- establecer el estimado de como contribuyen los factores inestables a la estabilidad de las pendientes.
- la clasificación del área en diferentes dominios con distintos niveles de susceptibilidad (zonificación).
- la presentación del modelo final de susceptibilidad.

Los métodos más usados se agrupan en las siguientes cinco categorías:

1. Cartografía geomorfológica directa
2. Análisis de inventario de deslizamientos
3. Métodos indexados (método de superposición indexada) o heurísticos
4. Métodos estadísticos que incluyen redes neuronales, lógica fuzzy o difusa y sistema de expertos
5. Modelos conceptuales basados en procesos.

Tabla 1.1: Características de los Métodos de susceptibilidad

	Directo	Indirecto	Cualitativo	Cuantitativo
Cartografía geomorfológica directa	X		X	
Análisis de inventario de deslizamientos		X		X
Métodos heurísticos		X	X	
Modelos estadísticos		X		X
Modelos conceptuales		X		X

Fuente: Tomado de Van Westen et al.(1997a)

1.7 Principales métodos de modelación de la susceptibilidad a deslizamientos.

Los métodos indirectos de la modelación de la susceptibilidad en SIG pueden dividirse en dos grandes grupos: a) los métodos basados en los datos (modelos objetivos) y b) los métodos basados en el conocimiento (modelos subjetivos).

1.7.1 Métodos basados en los datos

- **Método de ponderación de evidencias (*weights of evidences*)**

El método de ponderación de evidencias (MPE) es un método estadístico adaptado fundamentalmente a estudios de potencial mineral (Bonham-Carter et al., 1988), ya que posibilita la predicción de yacimientos al obtener como resultado de la aplicación de la técnica, un mapa respuesta que integra todas las evidencias y que representa la probabilidad “a posteriori” de encontrar un yacimiento en una unidad de área, también ha sido utilizado para la confección de los mapas de susceptibilidad (Miller et al., 2007). Cada punto de entrenamiento ocupa un área pequeña (celda unitaria). Este valor es necesario para el cálculo de la probabilidad “a priori”, que no es más que la probabilidad de encontrar un punto dentro de cada celda y que se asume constante para toda el área de estudio. El área de la celda unitaria no está relacionada con las dimensiones físicas de los puntos, ni dependen del tamaño del píxel en los datos en formato raster (Kempet al. 2001; Bonham-Carter, 1994; Raines, 1999).

Para cada clase o mapa se calcula un peso positivo (w^+) y otro negativo (w^-). El peso positivo indica la asociación entre los deslizamientos conocidos (puntos) y el mapa de evidencias (polígonos), mientras que el peso negativo refleja la asociación entre los deslizamientos y las áreas donde la evidencia está ausente. La diferencia entre los pesos se conoce como contraste ($C = w^+ - w^-$) y expresa la correlación total entre los mapas de atributos y los deslizamientos considerados como patrones. La significación estadística de C se evalúa estimando la desviación estándar (Sc). Cuando el contraste normalizado (C/Sc) toma valores mayores que 1.0, entonces C se considera estadísticamente válido para un nivel de significación de 0.025 (Bonham-Carter, 1994).

La combinación de los mapas de evidencias usando el modelo bayesiano exige la independencia condicional de los atributos que se integran. Cuando no se logra cumplir esta condición, entonces la probabilidad “a posteriori” es sobreestimada y los resultados se consideran como valores relativos u ordinales de favorabilidad (Raines, 1999). Este supuesto constituye una de las debilidades fundamentales del método. En la literatura se describen varios procedimientos para chequear el cumplimiento o no de esta condición (Bonham-Carter, 1994; Agterberg y Cheng, 2002).

El método brinda los mejores resultados en áreas bien estudiadas donde existe un número significativo de fenómenos gravitacionales que permitan la evaluación estadística de la importancia relativa de las clases y mapas de evidencias.

A la amplia aceptación y uso que ha alcanzado este modelo de integración ha contribuido la facilidad de implementación en SIG y la existencia de una extensión libre para ArcGIS producido por Kemp et al. (2001) y Sawatzky et al. (2004).

- **Análisis Estadístico Bivariado**

La esencia del método consiste en determinar la densidad de deslizamiento dentro de cada clase de los mapas de factores o parámetros, y derivar los pesos atendiendo a la distribución y a la densidad (Süzen y Doyuran, 2004). Los mapas de pesos para cada factor se combinan para obtener el mapa resultante (mapa de peligro o susceptibilidad). Para aplicar el análisis bivariado los mapas de variables continuas tienen que ser reclasificados y convertidos en variables discretas o categóricas y así poder calcular el peso de cada clase. Sin embargo, este proceso de reclasificación es muy subjetivo y la mayoría de los autores usan criterios de expertos para la discretización en clases. Por otra parte, los resultados del método de análisis bivariado también dependen de la selección de los factores causales o condicionantes de la inestabilidad de laderas. Este aspecto, que introduce mucha subjetividad en la evaluación, es válido para todos los métodos indirectos.

En el análisis estadístico bivariado la variable dependiente (en este caso la ocurrencia de movimientos de remoción de masas) es comparada individualmente con cada factor condicionante y la importancia de cada factor se determina independientemente de los otros factores. También es posible evaluar la combinación de diferentes factores, usando una combinación de mapas en una nueva variable. En sentido general, el procedimiento está basado en suposición de que los factores causales de los movimientos de ladera pueden ser cuantificados a través del cálculo de la densidad de deslizamientos para cada clase de los mapas de los factores condicionantes o de sus combinaciones. En la literatura se describen diferentes métodos para llevar a cabo el análisis estadístico bivariado (Thanh, 2008).

1.7.2 Métodos basados en el conocimiento

- **Lógica booleana**

La lógica booleana es, posiblemente, el modelo de integración en SIG más simple y conocido. Se basa en la combinación lógica de mapas booleanos o binarios, obtenidos de la aplicación de operadores condicionales, a través de los operadores lógicos (and (y) y or (o)). El conocimiento que posee el geólogo sobre el tipo de depósito se representa a través de un conjunto de rígidas reglas binarias. La desventaja de este modelo está en

la asignación de igual importancia a todos los criterios que se combinan. Por otra parte, la salida o mapa final es binaria y extremadamente restrictiva si se emplea el operador “y”, o demasiado optimista si se utiliza el operador “o”.

- **Método de superposición indexada**

La superposición indexada es una técnica simple, donde la ponderación de los mapas de evidencias y sus clases, se basa en el conocimiento que posee el geólogo sobre el objeto geológico estudiado. El mapa resultante (mapa de susceptibilidad) es una combinación lineal ponderada de todas las variables estudiadas (Bonham-Carter, 1994; Harris et al., 2001). Este método se ha empleado en estudios de favorabilidad de yacimientos de arena y grava (Hickin et al., 2001 y Bichler et al., 2002).

La variante más simple resulta cuando se combinan mapas binarios y a cada uno de ellos se le asigna un peso diferente (Ecuación. 1.1). Un sistema más flexible se logra al ponderar no solo los mapas de evidencias (mapas multiclases) sino también cada una de las clases que los integran.

$$S = \frac{\sum_i^n S_{ij}W_i}{\sum_i^n W_i} \quad (1.1)$$

Donde: W_i -es el peso del mapa de evidencias i , S_{ij} -es el peso de la clase j en el mapa de evidencias i ,

S -mapa resultante

Las ventajas del método radican en: a) La ponderación de mapas y atributos permite una mejor representación del criterio de los expertos; ajustando los pesos de mapas y clases es posible evaluar diferentes escenarios, b) el mapa resultante posee varias clases o niveles de favorabilidad. La principal desventaja está en la naturaleza lineal aditiva del método.

- **Lógica difusa (Fuzzy logic)**

El método de la lógica difusa o borrosa se utiliza en aquellos casos donde se cuenta con un modelo confiable, que permite establecer la importancia relativa de cada variable.

En la teoría clásica de conjuntos, la membresía de un grupo se define como verdadero (1) o falso (0). Sin embargo, en un conjunto difuso la misma se expresa en una escala continua de 0 (no miembro) a 1 (membresía total). Las diferentes capas o mapas de atributos en SIG que contienen los datos primarios son convertidos a valores de membresía difusa, utilizando las funciones analíticas o algoritmos de codificación

(Fuzzification) (Masters, 1993; Tsoukalas y Uhrig, 1997), o de forma subjetiva (Bonham-Carter, 1994; Quadros et al., 2006).

Para integrar los mapas de evidencias difusas se emplean cinco operadores fuzzy (Fuzzy AND, Fuzzy OR, Producto Algebraico Fuzzy, Suma Algebraica Fuzzy, Operador Gamma Fuzzy), los cuales son descritos por Bonham-Carter (1994). Los mapas de evidencias convertidos a fuzzy se integran en una serie de pasos (red inferencial) que simulan el pensamiento lógico de los expertos y que le aportan una gran flexibilidad al método.

La flexibilidad en la asignación de los pesos y la combinación de operadores, unido a la posibilidad de trabajar con mapas multiclasas y continuos y la capacidad de manipular información imprecisa e incompleta, constituyen las principales ventajas de este importante método.

Los problemas de la lógica difusa radican en que los valores de membresía se asignan de forma subjetiva, considerando el grado de correspondencia de los valores de la variable al modelo conceptual del objeto que se estudia, el cual a su vez, puede ser incorrecto o incompleto. Aunque el análisis espacial puede usarse para de forma objetiva asignar los valores de membresía fuzzy (Brown et al., 2003), de todas maneras resulta subjetiva la estructura de la red de inferencia y la selección de los operadores. Para minimizar estos problemas se han ideado métodos híbridos que aprovechan las ventajas de los métodos objetivos como la ponderación difusa de evidencias (Cheng y Agterberg, 1999; Porwal, et al., 2006).

- **Proceso de análisis jerárquico (*analytic hierarchy process* AHP).**

El proceso de análisis jerárquico desarrollado por Thomas L. Saaty (The Analytic Hierarchy Process, 1980) está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. El proceso requiere que quien toma las decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que después especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio. El resultado del AHP es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión.

En un ambiente de certidumbre, el AHP proporciona la posibilidad de incluir datos cuantitativos relativos a las alternativas de decisión. La ventaja del AHP consiste en que adicionalmente permite incorporar aspectos cualitativos que suelen quedarse fuera del análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero que pueden ser relevantes en algunos casos.

El AHP, mediante la construcción de un modelo jerárquico, permite de una manera eficiente y grafica organizar la información respecto a un problema, descomponerla y analizarla por partes, visualizar los efectos de cambios en los niveles y sintetizar.

En la presente investigación se emplea el método AHP con el objetivo determinar el peso de cada uno las variables seleccionadas que controlan la ocurrencia de deslizamientos, a partir del criterio de los decisores, los cuales asignan valores entre 1 y 9 a cada una de las comparaciones, dos a dos, entre los criterios.

A partir de esta información se construye una matriz de comparaciones binaria de los criterios verificándose que $a_{ij} = 1/a_{ji}$.

A partir de los juicios de valor del centro decisor se conforma la matriz de comparaciones binarias correspondientes, a través de talleres con expertos y se aplica el programa ExpertChoice. El ratio de inconsistencia resultante debe ser inferior al 10% lo que indica una consistencia aceptable.

1.8 Antecedentes.

En la literatura consultada se registran numerosos estudios vinculados a los deslizamientos, tanto en Cuba, como en el resto del mundo, evidenciándose la carencia de estandarización en lo referente a los métodos de modelación y la selección de los factores causales o condicionantes. A continuación se hace referencia a algunas de estas experiencias.

Cruden y Varnes (1996), describen procedimientos de estudio para distintos tipos de movimientos de masas y formulan una serie de posibles soluciones de mitigación. En particular, sus estudios son realizados para grandes deslizamientos en áreas montañosas de gran altura.

Cruden y Fell (1997), destacan la importancia que tiene un inventario mundial de deslizamientos, llaman la atención sobre la relación que existe, entre sismos, erupciones volcánicas, incendios forestales y lluvias torrenciales, como agentes desencadenantes de deslizamientos catastróficos, a lo cual añaden el factor antrópico; considerado en muchos casos el factor desencadenante más importante. Ellos consideran que los estudios de deslizamientos sólo se han limitado a interpretar algunos factores locales. Tchegodanov (2000), propone una metodología para la evaluación de la susceptibilidad y la amenaza por fenómenos de remoción de masas, en la que tiene en cuenta los siguientes factores: condiciones geomorfológicas, erosión, sismicidad, condiciones hidrológicas e hidrogeológicas, grado de fracturación y de recubrimiento de

la superficie por vegetación. Además propone algunos criterios para la valoración de la amenaza por movimientos de masa. Las propuestas realizadas son valiosas, en particular para el estudio de movimientos de masa en macizos rocosos, sin embargo los análisis efectuados no abarcan todas las condiciones de estudio.

En la provincia de ThuaThienHue, Vietnam, en el año 2002 fueron reportados y estudiados 181 deslizamientos los cuales ocasionaron serios problemas a los pobladores de dicha región, varios factores aceleraban estos fenómenos, todos relacionados con la geología, geomorfología, la pendiente, el uso de la tierra, la cercanía de los ríos, los suelos, el total de precipitaciones anuales entre otros. En este estudio se aplicaron diferentes métodos heurísticos para conformar el mapa de susceptibilidad tal es el caso de los métodos basados en el conocimiento como son la superposición indexada, proceso analítico jerárquico y métodos estadísticos como fue el análisis estadístico bivariado los cuales fueron claves para ponderar cada variable, así como evaluar la influencia de ellas en el control de los deslizamientos (Thanh, 2008).

En el litoral ecuatoriano en el año 2004 se realizó una investigación dirigida al estudio de los fenómenos gravitacionales, pues la mayoría de los desastres que ocurren en esta región son provocados por los deslizamientos, tanto es así que aproximadamente el 60% de estos fenómenos han ocasionados innumerables pérdidas económicas en vías y viales, generando ello la suspensión total del tráfico automotor, el 25% han ocurrido en poblaciones y el cinco por ciento restante ha ocurrido en laderas naturales donde con antelación se ha producido algún tipo de intervención antrópica; así por ejemplo, la deforestación y el mal uso de los terrenos en cultivos inapropiados. En este estudio se realizó una caracterización geomecánica de los diferentes materiales que conforman el talud y posteriormente se desarrolló un análisis de los factores que inciden en el proceso de pérdida de estabilidad (Chávez 2004).

Yesilnaca (2005) en la investigación titulada “Cartografía de la susceptibilidad de los deslizamientos, en la región de Hendek, Turquía, desarrolla una comparación entre la regresión logística y los métodos basados en redes neuronales, demostrando que el análisis basado en las redes neuronales aportaba mayor confiabilidad para la cartografía de estos fenómenos.

Ayalew (2005) en su investigación “Cartografía de la susceptibilidad basado en Sistema de Información Geográfica” en la isla Sado, Japón, realizó una comparación y verificación de dos metodologías “Proceso Analítico Jerárquico” y “Regresión Logística”, aunque es bueno aclarar que las ponderaciones de los factores se realizó a

través del método (AHP) y el peso de las clases fue a partir del análisis estadístico bivariado (BSA).

Kanungo (2006) desarrolló un estudio de susceptibilidad, apoyándose en un inventario de deslizamientos a partir de la interpretación de imágenes mediante, el empleo de sensores remotos, basando su análisis en características espectrales, forma, contraste, expresión morfológica, etc.

Neaupane (2006) en su investigación titulada “Zonación de peligro de deslizamientos” para el estudio de la susceptibilidad y el peligro emplea una metodología basada en lastécnicas de decisión multicriterio mediante el método Proceso de Redes Analíticas (ANP), este método es muy similar al (AHP), el mismo consiste en el control jerárquico de las variables o factores, a partir de la interrelación entre las variables y entre los clusters. La ponderación o los pesos de las variables se designan de forma similar en ambos métodos mediante un análisis jerárquico.

Kanungo (2006) realizó un estudio de susceptibilidad y riesgos para deslizamientos en Darjeeling, Himalayas, utilizó varios métodos para la ponderación de los factores, como fueron los métodos convencionales, los cuales están basados en análisis de expertos, teniendo en cuenta el control de estas variables en la ocurrencia de los deslizamientos, lógica fuzzy, redes neuronales, realizando combinaciones de todos los métodos y desarrollando comparaciones entre los mismos.

Saboya (2006) realizó una valoración de la susceptibilidad a la inestabilidad de las pendientes para ello empleó la lógica fuzzy, con el objetivo de identificar deslizamientos en un área urbana considerada como una zona caótica, ciudad de Río de Janeiro, Brasil.

Sali(2007), en su estudio nombrado “Sistema de clases para riesgos de deslizamientos” en la localidad de Bagio, Philipinas, desarrolló un sistema, el cual describe los factores que contribuyen al peligro y al riesgo como son el caso de la roca de caja o composición geológica del macizo, gradiente y pendiente, el uso del suelo, para el mismo se realizó un estudio detallado de todos estos atributos en el área estudiada, sin dejar de tener en cuenta los llamados factores disparadores en especial las lluvias.

En el año 2008, Fell realizó un inventario de deslizamiento, analizando estos, a partir de la utilización de variables tales como localización, clasificación y volumen de los deslizamientos, datos que obtuvo a partir de la fotointerpretación de imágenes aéreas.

Por otra parte, en el área de Olvera, provincia Cádiz, España se realizó un estudio geomorfológico usando sistemas de información geográfica, procesando todos los datos

e interpolándolos en una red, los estudios geomorfológicos permitieron determinarlas diferentes formas de desarrollo de los deslizamientos: deslizamientos con características estructurales, antropogénicas, fluviales, cárnicas, formas de la pendiente. Cuando la forma de la pendiente es abrupta ocurren deslizamientos rotacionales y cuando es una pendiente suave ocurren flujos de lodo. Concluyó que esto depende también de la litología que posea el macizo.

Willemborg en el año 2008 realizó una evaluación de riesgo en el poblado de Randa perteneciente a Suiza, debido al incremento poblacional de este territorio y lo vulnerable del área. Para llevar a cabalidad la investigación se emplearon técnicas de monitoreo y sensores remotos, ampliando el conocimiento para el control de los deslizamientos en las zonas más abruptas o de mayor pendiente.

Westen (2008), realizó un estudio en la ciudad de Tegucigalpa, estado de Honduras, apoyado en datos espaciales relacionados con los deslizamientos para el análisis de la susceptibilidad, riesgo y vulnerabilidad del territorio, para ello se tomó como punto de partida un inventario de deslizamientos, el cual fue factible para conocer cuantitativamente las variables y factores que controlaban los deslizamientos y así comenzar el análisis del riesgo y la vulnerabilidad del territorio. El estudio estuvo apoyado en herramientas digitales como es el uso de sistemas de información geográfica y el procesamiento de imágenes satelitales.

Castellanos (2008) ha descrito el estrecho vínculo entre los huracanes, las tormentas tropicales, los períodos prolongados de lluvia, los sismos y los deslizamientos en las zonas elevadas, tema que ha sido tratado por otros autores en diferentes años.

En el año 2009 fueron llevados a cabo trabajos ingeniero-geológicos para la reproyección de un tramo de la carretera que conduce a la Comunidad de Montaña “Las Terrazas” (De la Torre, P. de Guevara, Chávez, 2009b) y de la carretera extendida entre los términos “Entronque de Fierro” y la comunidad de montaña “Niceto Pérez” (De la Torre y Chávez, 2009a) interrumpidas al deslizarse la masa de suelos con la carpeta asfáltica dejando al descubierto la superficie cóncava de falla. Los trabajos consistieron en perforación, ensayos de laboratorio para evaluar granulometría, hidrómetro, límites de consistencia, resistencia al corte, peso específico relativo entre otros y estudios geofísicos. La investigación identificó las zonas como potenciales para la ocurrencia de movimientos de masa. Por otro lado el CITMA ha desarrollado guías metodológicas para la realización de estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo (PVR) en conjunto con la Defensa Civil para la reducción de pérdidas económicas y humanas en los sectores

con riesgo de deslizamientos. Basado en estas propuestas se han desarrollado estudios de PVR en diferentes provincias del país como Guantánamo, Holguín, Cienfuegos, etc.(Gómez et al, 2011; Gómez et al, 2013).

García (2006) realizó un estudio de susceptibilidad en la provincia de Pinar del Río limitado a las redes viales del territorio, el cual se tomó como base para el presente estudio. La información gráfica de esta investigación confirma la predisposición de la región a generar movimientos gravitacionales y justifica la necesidad de realizar estudios detallados.

Santos (2012) realizó un trabajo de los movimientos de masa en la región central de la Sierra de los Órganos, en el mismo se realizó un análisis detallado de la geomorfología así como las cuestiones estructurales de la Sierra vinculando la ocurrencia de estos fenómenos a movimientos tectónicos basados en la composición litológica y estratigráfica de esta zona.

Bee (2013) en su investigación,” Estudio de susceptibilidad a los deslizamientos de terrenos en el distrito geográfico de Pinar del Río”, emplea una metodología tomada a partir de la Guía metodológica para el estudio de PVR por deslizamientos de terreno (Grupo Nacional de evaluación de riesgo, 2009).

Vásquez (2013) en su trabajo titulado “Movimientos de ladera en el extremo oriental de la Sierra del Rosario”, obtuvo mediciones y observaciones de la zona las que fueron procesadas a partir del empleo de un SIG, obteniéndose un mapa de peligro. Se usó la metodología propuesta por la guía PVR de deslizamiento del terreno de Cuba.

Cueto et al.(2014) en su artículo titulado “Inventario de fenómenos gravitacionales” desarrolló un inventario de estos fenómenos en la zona más occidental de Cuba, a partir de la fotointerpretación, generando una base de datos más completa de la tipología de estos fenómenos.

Capítulo 2. Características Físico Geográficas y Geológicas del área de estudio.

En el presente capítulo se presenta un breve resumen de las principales características físico geográfico y geológico de la zona más occidental de Cuba.

2.1 Ubicación geográfica.

El distrito geográfico de Pinar del Río, ubicado en el extremo más occidental del territorio nacional, limita al norte con las aguas del estrecho de la Florida, al noroeste con el Golfo de México, al Sur con el mar Caribe, al Sureste con el golfo de Batabanó y al Este con las cuencas de los ríos San Francisco, al Norte y Pedernales, al Sur. Entre las coordenadas X: 119 100 m, 320 000 m y Y: 340 000 m y 220 000 m (según la Proyección Cónica Conforme de Lambert) (Figura 2.1).

La extensión superficial del distrito es de unos 13 835 km² aproximadamente, y ocupa toda la provincia político-administrativa de Pinar del Río, así como una parte de la actual provincia Artemisa (Figura 2.1).

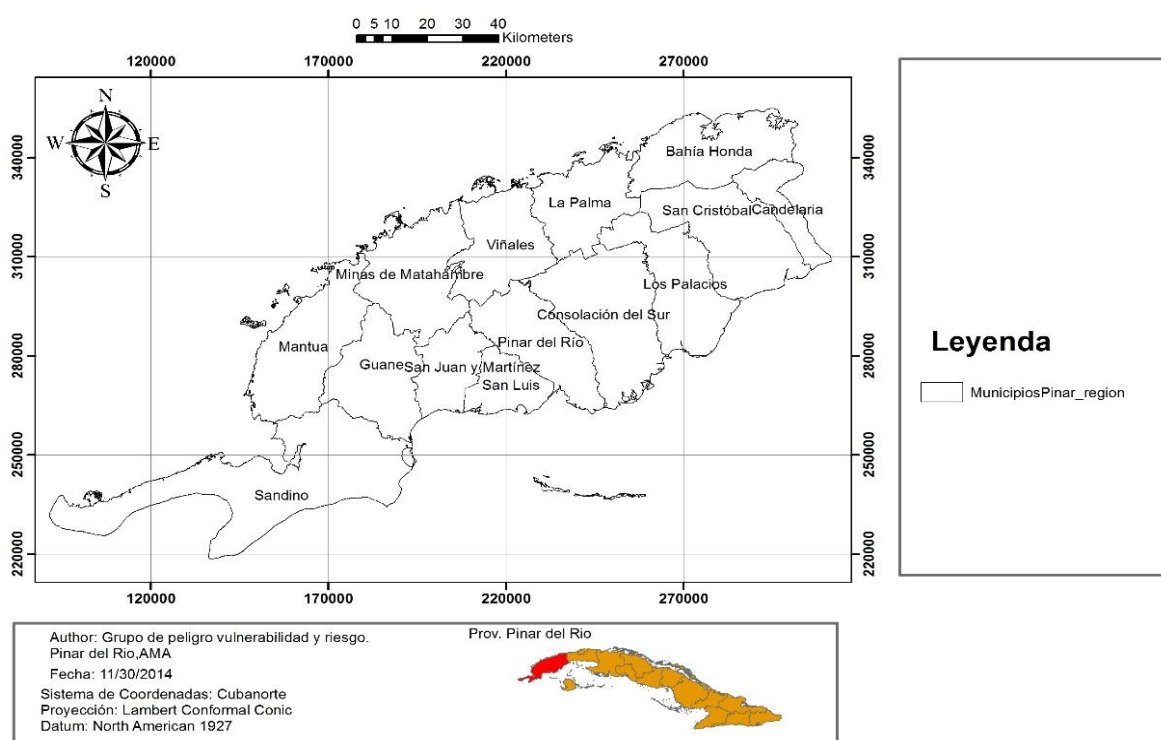


Figura 2.1: Mapa de localización del área de estudio, cuyos límites coinciden con la antigua provincia Pinar del Río

2.2 Clima.

La provincia, al igual que el resto del país, se encuentra ubicada en la zona intertropical, muy cerca del Trópico de Cáncer, límite entre dicha zona y la zona templada del norte. Esta ubicación y la acción de las corrientes marinas de aguas cálidas que la bordean por el norte y el sur determinan que el invierno, de manera general, sea poco acentuado, con clima húmedo de sabanas sin invierno. La distribución de la temperatura obedece a un clima semicontinental, por lo que la diferencia de esta entre el día y la noche es menos intensa en regiones costeras que en su región central. La temperatura media anual del aire es de 25 °C y en toda la franja cerca de la costa es de 26 °C. En las zonas aisladas más al centro las temperaturas disminuyen a 23 °C, coincidiendo con áreas de considerable altitud. La temperatura máxima absoluta del aire durante el año llega a alcanzar los 37 °C y la mínima hasta 10 °C. En la etapa de invierno la media mensual es de 22 °C y en algunos puntos interiores desciende a 21 °C. En el verano la media mensual es de 28 °C y en puntos interiores aislados llega a 26 °C (Colectivo de autores, 1989). Esta variable al igual que las lluvias son monitoreadas diariamente por las estaciones meteorológicas y red de pluviómetros de la provincia.

Existen dos estaciones bien definidas, una lluviosa que se extiende de mayo a octubre, y otra de seca que comprende de noviembre a abril. Durante el periodo lluvioso las máximas precipitaciones en el territorio alcanzan los 1400 mm en las zonas más elevadas y 1200 mm como mínimo en la mayor parte del territorio. Dentro del área las precipitaciones anuales se encuentran entre las más altas del país, con un máximo de 1894 mm y un mínimo de 1 113mm. La humedad relativa media anual es del 80% (Colectivo de autores, 1989). Una representación de su distribución a partir de los datos aportados por los pluviómetros de la red de monitoreo de sequías.

2.3 Relieve

En sentido general el relieve de la región es el resultado de un incesante desarrollo y de la compleja intervención de factores internos y externos; es por ello que se destacan claramente los elementos correspondientes a las morfoestructuras y morfoesculturas. Una gran llanura se extiende a todo lo largo y ancho de la parte sur de la Falla Pinar, constituida fundamentalmente por depósitos terrígenos recientes de diferentes génesis. Al oeste y coincidiendo con la Península de Guanahacabibes se localiza la llanura cársica más amplia de este territorio. Por el norte se localiza a todo lo largo de la línea costera una llanura alargada y estrecha de carácter erosivo principalmente. En la porción

central se localizan los relieves más altos, claramente representados por la Cordillera de Guaniguanico, que constituye la morfoestructura más interesante del área. Dentro de esta última están delimitadas dos grandes estructuras: la Sierra de los Órganos y la Sierra del Rosario, separadas entre sí por el río San Diego. La Sierra de los Órganos la componen varias cadenas más o menos paralelas de calizas que, con las aledañas colinas pizarrosas, encierran valles intramontanos llamados poljas o llanuras cársicas marginales; las cadenas de calizas forman interesantes elevaciones denominadas mogotes, los que presentan forma de cúpulas de laderas verticales y cimas redondeadas. La Sierra del Rosario agrupa un conjunto de elevaciones típicas, constituyendo una intrincada sección orográfica que presenta distintos tipos morfológicos de elevaciones como cuchillas, cimas más o menos aplanadas y colinas; esta representa una cadena de montañas casi paralelas con grandes depresiones longitudinales y valles fluviales transversales. Las montañas también se evidencian en las Alturas Pizarrosas del Norte y del Sur (Colectivo de autores, 1989).

2.4 Hidrografía

La red hidrológica de la zona más occidental de Cuba es fundamentalmente dendrítica, tanto hacia el litoral norte como el sur, existiendo dos cuencas hidrológicas principales: la norte y la sur, limitadas por una parte aguas natural, representado por la Cordillera de Guaniguanico. La cuenca sur se extiende desde la misma ladera sur de dicha cordillera hasta la línea costera del mismo sector; los cursos fluviales de esta cuenca son mucho más largos, teniendo perfiles longitudinales y transversales más suaves y aplanados, lo que evidencia que las aguas se mueven a velocidades no muy altas, favoreciéndose la sedimentación. Dentro de esta cuenca se puede señalar como río principal el Cuyaguaje que, a su vez, es el más importante de la provincia, bañando con sus aguas las llanuras de Guane, Isabel Rubio, San Julián y Cortés, entre otras. Además, aparecen otros ríos significativos como son el San Juan y Martínez, Río Feo, San Diego, Guamá, Hondo, Herradura, San Diego, Los Palacios y San Cristóbal por citar algunos, los que irrigan junto con otros cursos menos significativos toda la llanura sur de Pinar del Río.

La cuenca norte de Pinar del Río es más estrecha y abrupta que la cuenca sur; es por esta razón que los cursos fluviales que se desarrollan en esta cuenca son más cortos y caudalosos, sobre todo en los períodos de las grandes riadas, presentando un perfil longitudinal y transversal de sus lechos más abruptos y accidentados, con cauces generalmente profundos y orillas semibarrancosas. Entre los ríos más importantes de

esta cuenca se pueden señalar: Mantua, Buenavista, Macurije, Malas Aguas, Bejuquero, San Marcos y San Miguel, entre otros.

En el territorio, además de las corrientes fluviales, existe una cantidad significativa de lagunas y embalses, que tanto por su número como por sus dimensiones ejercen una gran influencia en la hidrología de este territorio.

2.5 Vegetación

La vegetación en el área está en correspondencia con el tipo de suelo predominante. En casi toda la costa, los complejos de vegetación corresponden a áreas en gran parte inundadas (manglares y herbazales de ciénagas), a excepción de algunos lugares como la costa sur de la península de Guanahacabibes y sectores de la costa nororiental, donde se existe un bosque semideciduo desarrollado sobre carso. La vegetación de pinares, encinares y herbazales, se encuentra compartida principalmente en el bosque de pinares en arenas blancas del istmo de Guanahacabibes, pinares de las Alturas de Pizarras y sus suelos derivados (en las llanuras) y Cajalbana, donde están desarrollados sobre suelos latosoles (ferríticos).

En las elevaciones calcáreas prima el complejo de vegetación de mogote, con un elevado endemismo, mientras los poljes se encontraban originalmente ocupados por diversos tipos de bosques, en especial el semideciduo y de pinares.

Hay que destacar que si bien el distrito geográfico de Pinar del Río es hoy una de las zonas más forestadas del país, la tala de árboles, los incendios forestales, el uso de tierras para cultivos, la liquidación de la franja hidrorreguladora en ríos y embalses, aceleran de forma constante y creciente la erosión de los suelos.

2.6 Suelos

En la región pinareña predominan las acumulaciones cuarzosas – ferralíticas. En la cordillera de Guaniguanico se encuentran suelos cuarzosos calcáreos (mogotes), rojos ferralíticos y amarillos pseudopodsólicos, bordeados al norte y al sur por suelos amarillos pseudopodsólicos arenosos formados sobre arcilla laterizada.

En las penínsulas del Cabo y de Corrientes, en Guanahacabibes se localizan suelos de calizas carsificadas y pantanos; en las fajas costeras septentrional y meridional de Pinar del Río existen suelos húmicos-pseudopodsólicos, con frecuencia sobre material laterizado.

2.7 Vías de acceso

Después del triunfo de la Revolución las vías de comunicación alcanzaron un amplio desarrollo en toda la provincia, sobre todo en lo relacionado a carreteras y telefonía. En la actualidad se cuenta con una amplia red de carreteras pavimentadas que garantizan la comunicación interna del territorio y su enlace con la capital del país, pudiéndose considerar la Autopista Nacional conjuntamente con la Carretera Central y la Vía Férrea Nacional como las principales vías de comunicación de la provincia (Anexo 1) sin dejar de mencionar el modesto aporte proporcionado por las vías marítimas y aéreas existentes.

2.8 Economía

Ocupan un lugar significativo en el distrito las producciones tabacaleras, azucareras, cafetaleras, forestales y de cultivos varios (arroz, viandas, hortalizas, cítricos, frutales entre otros), así como el desarrollo de la ganadería. La industria presenta un desarrollo incipiente, sobre todo hacia el este de la región. El turismo aunque no ha alcanzado el desarrollo de los grandes polos turísticos del país, contribuye notablemente a la economía de este territorio.

2.9 Principales rasgos geológicos de la región

Según García et al (2003), el territorio de la provincia Pinar del Río se divide en tres diferentes regiones geológicas o zonas tectono-estratigráficas bien reconocidas: Guaniguanico, Bahía Honda (al norte) y San Diego de Los Baños (al sur), las cuales aparecen separadas entre sí por fallas regionales abruptas o subverticales de primer orden. La falla Pinar separa las zonas Guaniguanico y San Diego de Los Baños, mientras que la falla Consolación del Norte separa las zonas Guaniguanico y Bahía Honda. Ambas fallas fueron originadas durante la orogenia vinculada con la colisión entre las placas caribeña y norteamericana, probablemente con la etapa más tardía de la misma durante el Eoceno Inferior.

La Zona San Diego de Los Baños: se caracteriza por afloramientos de los depósitos de la cobertura neoplatafórmica, siendo solo en las estribaciones de la Falla Pinar donde se exponen sedimentos de la etapa orogénica. Su parte norte constituye un bloque independiente (Bloque Los Palacios) donde se desarrolló la Cuenca o Depresión Los Palacios, de carácter esencialmente postorogénico, con una gran potencia de los depósitos neoplatafórmicos, manifestándose en su substrato diversas fallas escalonadas

sub – paralelas a la Falla Pinar. Los depósitos preorogénicos (a partir del Albiano) y orogénicos que componen el substrato de la Cuenca Los Palacios son de carácter terrígeno y terrígeno – carbonático, aparecen menos dislocados que las secuencias de las zonas Guaniguanico y Bahía Honda, estando siempre dispuestos en una sucesión estratigráfica normal (J.O. López et al. 1987; García et al. 1989 en García et al, 2003).

La Zona Bahía Honda se caracteriza por exposiciones de rocas ofiolíticas de suprasubducción, así como de secuencias cretácicas de una presunta cuenca de retroarco y, en menor grado, de la parte axial del arco volcánico; formando un conjunto rocoso muy dislocado y desmembrado tectónicamente (Pszczółkowski et al. 1975; Pszczółkowski y Albear 1982; Martínez et al. 1994, Cruz-Gámez 1998, Iturralde-Vinent 1998). Además afloran depósitos orogénicos deformados (Fms. Vía Blanca, Peñalver) relacionados genéticamente con la fase tectónica del Campaniano-Maastrichtiano y también sedimentos terrígenos menos deformados del Paleógeno Inferior (Grupo Mariel), depositados discordantemente sobre los complejos anteriores en una cuenca de piggy back (Pszczółkowski et al. 1975; Martínez et al. 1991; Iturralde-Vinent 1998 en García et al, 2003).

La Cordillera de Guaniguanico está constituida por las elevaciones del Norte de Cuba occidental, que se extienden desde el NO de Pinar del Río, hasta el NO de La Habana. Se distinguen 4 macizos montañosos: las Alturas de Pizarras del Norte y del Sur, la Sierra de los Órganos y la Sierra del Rosario. La cordillera está formada esencialmente por capas del Jurásico y Cretácico del Paleomargen de la América del Norte, sobre las que yacen sedimentos de una cuenca de antepaís del Terciario inferior. Todas ellas están cortadas por nappes o mantos tectónicos, trasladados en general de sur a norte, que forman una estructura de varios kilómetros de espesor. El corte estratigráfico de la región se caracteriza, en general, por el desarrollo de formaciones del Jurásico Superior al Eoceno Medio parte baja representadas en su interior por depósitos terrígenos que hacia arriba en el corte se van tornando cada vez más carbonatados, hasta volver a tornarse terrígenos olistostrómicos hacia el final del corte (Cobiella et al, 2006). Su estructura geológica está representada por mantos cabalgados, y la superposición de diferentes eventos tectónicos que agudizan la complejidad del corte.

En el extremo más occidental y separada del resto del territorio por una zona de fallas con rumbo E-W, coincidiendo con el istmo La Fe – Cortés, se encuentra la llanura cársica pantanosa de la Península de Guanahacabibes, caracterizada por rocas calizas organógenas, fundamentalmente arrecifales, calcarenitas, conglomerados calcáreos,

arenas y sedimentos turbo-cenagosos del Neógeno-Cuaternario, que a partir del Plioceno Superior – Pleistoceno Inferior y hasta la actualidad se ven afectadas por movimientos neotectónicos en forma de basculamientos. Este fenómeno ha generado la subsidencia de la costa norte, cubierta por ciénagas y pantanos que se orienta sobre una ancha plataforma submarina de poca profundidad y el ascenso de la costa sur con acantilados, seborucos costeros y playas arenosas, donde la plataforma insular es sumamente estrecha.

2.10 Geomorfología

Según Acevedo (1982), este complejo territorial natural denominado distrito Pinareño, formado por tres subdistritos: llanura costera meridional occidental, montañas de Guaniguanico, llanura costera y alturas septentrionales occidentales, consta de un eje montañoso de estructura alpinotípica afectada por procesos orogénicos. Su desarrollo morfogenético comenzó a partir de finales del Eoceno medio y debe los rasgos de su relieve actual a la interacción de los procesos neotectónicos, a la influencia del paleoclima regional con sus fluctuaciones cuaternarias y a las variaciones glacioeustáticas del nivel del mar. El eje montañoso está rodeado por llanuras costeras y de pie de monte, plana y suavemente onduladas hasta colinosas, que fueron afectadas sincrónicamente por procesos equivalentes. Las partes más bajas de estas llanuras costeras quedaron cubiertas por el mar a partir de procesos transgresivos y constituyen actualmente porciones de la plataforma insular.

2.11 Tectónica

El territorio insular de Cuba ha sido afectado por varios eventos tectónicos desde el Jurásico (Triásico?) hasta el Eoceno.

Son muchos los trabajos que desde diferentes puntos de vista han abordado las particularidades tectónicas de este territorio (Hatten, 1957; Furrázola y Judoley, 1964; Khudoley, 1967; Pushcharovski et al., 1967; Gutiérrez, 1968; Judoley y Furrázola, 1968; Judoley y Furrázola, 1971; Khudoley y Meyerhoff, 1971; Pietrowska, 1972, 1987; Danilewski, 1972; Pszczolkowski, 1975; Pardo, 1975; entre otros y, muy recientemente, Iturralde–Vincent, 1998).

En Cuba se han reconocido los llamados Terrenos sudoccidentales (Guaniguanico, Escambray y Pinos; Iturralde–Vincent, 1994), que tienen en común su aloctonía, un

cierto grado de metamorfismo, y contienen elementos tectonoestratigráficos desprendidos del margen continental del bloque Maya (Península de Yucatán).

El Terreno Guaniguanico está situado en Cuba Occidental, como un extenso afloramiento de compleja estructura interna. Las rocas expuestas se han dividido en varios cortes estratigráficos (Cangre, Los Órganos, Rosario Sur, Rosario Norte y Quiñones–Guajaibón), que afloran como fajas deformadas de rumbo NE a SW. Estas deformaciones tienen vergencia N y NW y son el resultado de la superposición de varias unidades de mantos de corrimientos empujados hacia el N-NW, que posteriormente fueron deformados como una cúpula periclinal cuyo eje se hunde hacia el E. Los mantos tectónicos en Guaniguanico, tienen poca inclinación (Bralower e Iturralde-Vinent, 1997).

Capítulo 3. Metodología para el análisis de la susceptibilidad a la ocurrencia de los fenómenos gravitacionales.

El éxito de los estudios de susceptibilidad radica básicamente en la disponibilidad de información geocientífica regional de calidad adecuada, la existencia de un modelo conceptual confiable donde se reflejen los principales factores condicionantes y disparadores y la existencia de un inventario actualizado y completo de los movimientos de ladera.

Este capítulo está dirigido a describir la metodología general empleada para el análisis de la susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos gravitacionales, que tenga en cuenta: las características geológicas del área, la información geocientífica disponible y los métodos de integración más adecuados. La metodología utilizada propone estimar la susceptibilidad a los deslizamientos utilizando métodos cuantitativos de integración, además se tienen en cuenta las recomendaciones dadas en la guía metodológica para el estudio de PVR por deslizamientos de terreno (Grupo Nacional de Evaluación de Riesgo, 2009).

En este trabajo, se establecen 6 etapas fundamentales: características del modelo conceptual de deslizamiento, revisión de trabajos anteriores, elaboración de los inventarios de deslizamientos, construcción de las bases de datos digitales, procesamiento de datos, integración y análisis y validación de los resultados. El diagrama de flujo, que refleja los pasos esenciales de la metodología, se muestra en la figura 3.1.

El análisis espacial de los mapas temáticos, su procesamiento e integración se realizó en un ambiente SIG, empleando las potencialidades del ArcGIS 10.0.

3.1. Modelo Conceptual de deslizamiento

Los modelos confiables de deslizamientos donde se reflejen los factores controladores y disparadores son esenciales en los estudios de deslizamientos de terrenos ya que determinan el marco teórico de la evaluación, permiten seleccionar los datos que se integran, derivar los mapas de factores y asignar los pesos correspondientes a cada uno de ellos.

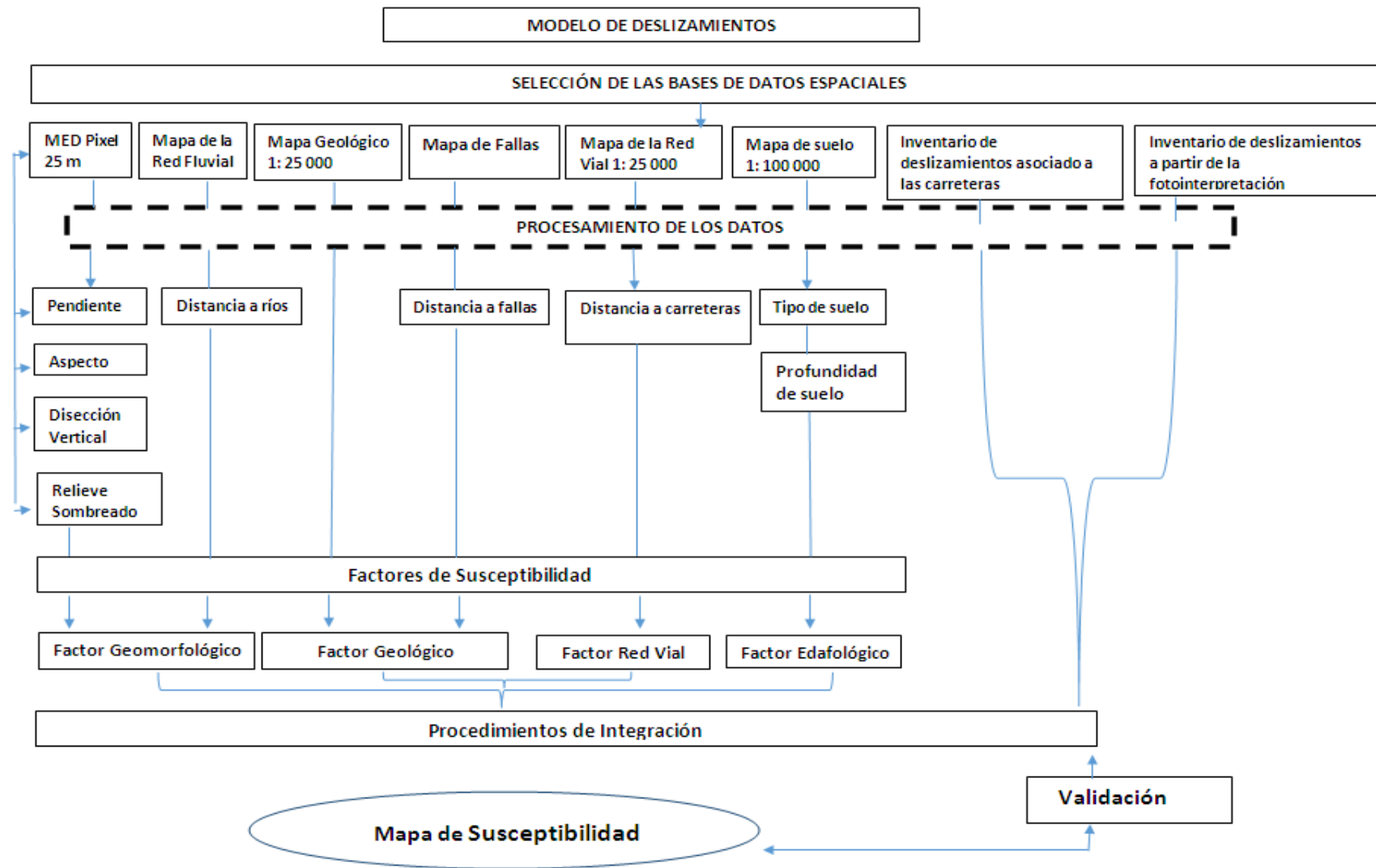


Figura 3.1: Diagrama de Flujo.

En términos generales se puede decir que los factores que propician el fenómeno de deslizamientos o de inestabilidad de laderas se dividen en condicionantes y disparadores; y tienen que ver directa o indirectamente con los esfuerzos cortantes actuantes y resistentes que se desarrollan en la potencial superficie de falla o de deslizamiento. En no pocas ocasiones dichos factores se combinan, resultando difícil distinguir la influencia de cada uno de ellos durante la falla de una ladera. Los cambios en el ambiente y las perturbaciones al entorno natural por actividades humanas, son causas que también pueden desencadenar los deslizamientos de laderas.

Los factores controladores están directamente relacionados con el origen y las propiedades de los suelos que componen la ladera, así como por su distribución espacial y de manera muy particular, por la presencia de agua; la presión que ejerce dentro de la masa de suelo, provoca la disminución de su resistencia al esfuerzo cortante. El agua, ya sea por lluvias o cualquier otra fuente, es la principal causa que provoca una disminución de la resistencia de los suelos en la potencial superficie de falla.

Las características de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos y de las rocas que forman las laderas son variables que dependen principalmente de las condiciones geológicas y climáticas de una región, y varían en el espacio y en el tiempo.

Las debilidades inherentes en las rocas y en los suelos frecuentemente se combinan con uno o más eventos desestabilizadores (factores disparadores o externos) tales como lluvias intensas, cambios en el nivel del agua dentro del terreno, actividad sísmica o actividad volcánica. La lluvia, por ejemplo, produce un aumento en la saturación del terreno y en el aumento del peso del suelo; y de manera más trascendente, en la elevación del nivel del agua, lo que se traduce en el incremento de su presión.

Las condiciones estratigráficas y geológicas del área condicionan la susceptibilidad de una ladera a los deslizamientos. Los planos de estratificación, discontinuidades o zonas de contacto de estructuras geológicas, se convierten con frecuencia en potenciales superficies de falla en una ladera, principalmente cuando los planos de estratificación están en la misma dirección del buzamiento de las rocas aumentando así la probabilidad de ocurrencia del deslizamiento.

En cada ladera ocurren fluctuaciones en los niveles del agua del terreno, de acuerdo con las variaciones estacionales y cambios climáticos a los que año tras año está expuesta. Así, en la temporada de sequía el suelo se mantiene parcialmente saturado, generándose incluso tensión o presión negativa en el agua, lo que define temporalmente una resistencia cortante relativamente alta del material. Al ocurrir precipitaciones intensas y

prolongadas esa succión se pierde e incluso se genera una presión positiva en el agua (también conocida como presión de poro). El aumento de presión de poro en la superficie potencial de falla va en detrimento de la resistencia del suelo.

Los factores externos que propician la inestabilidad de laderas son aquellos sistemas ajenos a la ladera que perturban su estabilidad; usualmente producen un incremento de los esfuerzos cortantes actuantes, aunque de manera indirecta pueden producir un cambio en la resistencia al esfuerzo cortante del material que compone el talud. Los factores disparadores pueden ser originados ya sea por fenómenos naturales, tales como las lluvias intensas y prolongadas, los sismos fuertes y la actividad volcánica; o bien por actividades humanas.

Los sismos ocupan un lugar muy importante dentro de las causas naturales o factores disparadores que activan o disparan la inestabilidad de laderas. Cuando ocurre un evento sísmico se generan fuerzas inerciales dentro de la ladera, las cuales determinan el aumento de los esfuerzos cortantes actuantes en la potencial superficie de deslizamiento. La aplicación de cargas sobre la ladera, ya sea por la construcción de obras o por la acumulación de materiales, es un factor determinante en los incrementos de los esfuerzos cortantes actuantes en la potencial superficie de falla. El desarrollo de asentamientos humanos en el talud y en la corona de una ladera tiene consecuencias negativas en la estabilidad, ya que además del peso que transmiten a la ladera por la construcción de viviendas y las fugas de agua ya mencionados, se realizan cortes y terrazas para la construcción de obras y se agregan cargas accidentales producidas por tránsito de vehículos y por la vibración de maquinaria

A partir de las características generales de los movimientos de laderas se pueden identificar los principales factores condicionantes y disparadores de estos fenómenos e identificar las áreas más proclives para la ocurrencia de los mismos:

- **Composición litológica**

La composición litológica determina las propiedades físicas mecánicas de roca y por consiguiente su susceptibilidad al desarrollo de los deslizamientos. La presencia de rocas muy foliadas con planos de debilidad facilita la inestabilidad de las laderas. De igual forma cuando la rocas aparecen estratificadas con capas impermeables de composición arcillosa que dificultan el movimiento del agua, incrementando la presión de poros y reduciendo la resistencia al corte, dichas condiciones favorecen el deslizamiento de las rocas y suelos .

- **Grado de fracturación y fallamiento de las rocas**

Las rocas sometidas a un intenso proceso de fracturación y fallamiento se debilitan considerablemente y los planos de fractura son aprovechados para la ocurrencia de los movimientos de laderas. Por otra parte, la meteorización será más intensa en la misma medida en que la roca esté más fracturada, pues la fracturación favorece la infiltración de las aguas y el aire atmosférico y con ellos los agentes químicos que a la postre, serán los causantes de su descomposición (O_2 , CO_2 , ácidos orgánicos, etc). La ocurrencia de movimientos tectónicos provoca el cizallamiento y la fracturación de las rocas, por ende estas pierdan buena parte de su cohesión y resistencia inicial. Mientras mayor sea el grado de tectonización de las rocas, mayor probabilidad habrá de que estas tiendan a deslizarse si se produce una vibración del suelo, puesto que el deslizamiento tiene lugar por las superficies de debilitamiento que caen hacia el borde de talud o sea, por las fracturas de la falla o diaclasas y los planos de estratificación y exfoliación que buzan hacia un valle u otra depresión, con un ángulo peligroso.

- **Grado de alteración de las rocas**

El grado de meteorización de un macizo rocoso, es un reflejo de cuanto se ha debilitado el mismo, y de cuanta resistencia podrá ofrecer a los movimientos descendentes. Es de todos conocido que en climas tropicales húmedos, como el cubano predomina, por amplio margen, la meteorización química sobre la física; que todas las rocas no se comportan igual; y que su mayor o menor resistencia al intemperismo, está directamente relacionada con su composición mineralógica. En esencia, tendremos que mientras más hierro (Fe) y menos sílice (SiO_2) tengan las rocas en su composición, más susceptible serán al debilitamiento, aunque debemos tener en cuenta también los contenidos de carbonatos y feldespatos, minerales que por sus propiedades tienden a descomponerse en Ca^{2+} , CO_3^{2-} el primero, y en arcillas los segundos.

- **Distancia a la red fluvial**

Los ríos en su movimiento y desarrollo de la llanura aluvial van socavando la base de las laderas y vertientes lo que provoca una reducción de la estabilidad y crea las condiciones para el desarrollo de los procesos de remoción de masas.

- **Rasgos geomorfológicos del territorio**

El relieve del área de estudio constituye una de los factores fundamentales pues los procesos de laderas están controlados por la fuerza de gravedad y mientras mayor sea la

pendiente y la posición hipsométrica del cuerpo rocoso mayor será la susceptibilidad a deslizarse.

- **Lluvias**

La lluvia produce un aumento en la saturación del terreno y en el aumento del peso del suelo; y de manera más trascendente, en la elevación del nivel del agua, lo que se traduce en el incremento de su presión.

- **Sismos**

Cuando ocurre un evento sísmico se generan fuerzas inerciales dentro de la ladera, las cuales determinan el aumento de los esfuerzos cortantes actuantes en la potencial superficie de deslizamiento. Sobre la base de la revisión realizada se puede concluir que las áreas más susceptibles a la ocurrencia de este tipo de proceso geológico son:

- **Zonas montañosas y escarpadas**
- **Zonas de relieve con procesos erosivos y de meteorización intensos**
- **Laderas de valles fluviales**
- **Acantilados costeros**
- **Zonas sísmicas**
- **Zonas de precipitación elevadas**
- **Zonas con materiales blandos y sueltos**

3.2 Construcción de las bases de datos.

En un primer momento se revisaron los informes de los trabajos de investigación, dedicados al estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo a los deslizamientos, ejecutados en la zona de estudio. Se prestó especial atención a aquellos de carácter regional donde se describen los criterios empleados para la selección de las áreas más proclives a la ocurrencia de estos fenómenos, así como la metodología empleada en cada caso. También se estudiaron exhaustivamente los trabajos realizados en el sector más oriental del occidente de Cuba (Sierra del Rosario), con el objetivo de recopilar sus características geológicas generales y las ideas que se han manejado sobre los fenómenos gravitacionales en esta región.

Sobre la base de los elementos anteriores, considerando la experiencia previa en las investigaciones de los deslizamientos en el área de estudio y los factores controladores y disparadores de estos procesos, de modo que los mismos pudieran ser cartografiados a partir del procesamiento de los mapas temáticos se recopilaron todos los datos

espaciales de carácter regional que pudieran aportar al estudio de la susceptibilidad. Los principales datos que se emplearon, sus características y uso se detallan a continuación:

- Modelo digital de terreno (MDT) 1:25,000

- Mapa de la red fluvial (línea)

- Mapa geológico 1:100,000

- Mapa de falla o alineamiento tectónicos

- Mapa de la red vial 1:25,000

- Mapa de suelo 1: 25 000

Las bases de datos espaciales fueron cedidas por diferentes instituciones provinciales y nacionales involucradas en los estudios de PVR para deslizamientos. Los datos fueron convertidos a formatos compatibles al SIG utilizado en el trabajo, al mismo tiempo fueron corregidas las incongruencias y errores detectados. Se elaboraron dos inventarios de deslizamientos, el primero obtenido a través de trabajo de campo desarrollado en toda la cordillera de la zona más occidental de Cuba y el segundo elaborado a partir de la interpretación de imágenes satelitales del Google Earth.

Como base para la conformación de los inventarios de deslizamientos utilizados en la investigación se tuvieron en cuenta todos los trabajos realizados con anterioridad en la parte más occidental de Cuba como fueron: inventario de deslizamiento confeccionado por la Empresa Provincial de Vialidad, trabajos de campo realizado por profesores del departamento por las principales vías de comunicación de la provincia, como parte de los estudios de PVR del territorio, trabajos de campo llevados a cabo en la Sierra del Rosario para la realización del trabajo de diploma titulado "Movimientos de Ladera en Sierra del Rosario" (Vázquez 2013), trabajos de campo en la Sierra de los Órganos como parte del estudio "Movimientos de masa en la región central de la Sierra de los Órganos (Santos 2012), trabajos de campo para el estudio de la estabilidad de taludes (García 2006), trabajo de campo para el estudio de susceptibilidad a los deslizamientos de terrenos (Bee 2013).etc. Finalmente, se incorporaron los deslizamientos identificados a través de las imágenes satelitales.

Los movimientos de laderas fueron agrupados en dos inventarios independientes, el primero está básicamente vinculado a la red de carreteras, para ello se tuvo en cuenta los siguientes elementos: tipo de movimiento, escala, coordenadas, tipo de material deslizado, formación, morfometría, actividad, entre otros, mientras que el segundo incorpora los deslizamientos que no están vinculados con los viales. Este último inventario refleja más las características naturales del macizo rocoso, al no estar

influenciado por factores antropogénicos. En su confección se tomaron en cuenta elementos como: geomorfología, escarpes, cicatrices del terreno, verticalidad de las pendientes, taludes abruptos y falta de vegetación en las laderas. Se prestó especial atención a las vertientes de las cuencas hidrográficas de los ríos más caudalosos. Los deslizamientos identificados en las imágenes fueron validados en los mapas topográficos, a partir de la existencia de elementos morfológicos que denoten su presencia. Para ello se trabajó con la hojas cartográficas escala 1:25 000 de la zona, además se superpusieron otros mapas o factores con estos inventarios como son el mapa geológico, esclareciendo las formaciones geológicas más propensas a la ocurrencia de estos fenómenos en la cordillera.

3.3 Procesamiento de los datos

En esta etapa se procesan los datos primarios con vistas a extraer las evidencias críticas para el pronóstico de los deslizamientos. La idea subyacente es cartografiar a partir de los mapas primarios los factores condicionantes o controladores, empleando distintas operaciones espaciales como reclasificación, filtrado, interpolación espacial, combinaciones lógicas, mapas de proximidad (buffer), etc.

Como se conoce no existen criterios universales para la selección de los parámetros o factores que influyen en los deslizamientos y que pueden ser usados en la zonación de la susceptibilidad. A pesar de la existencia de dependencia espacial entre los parámetros condicionantes, en la literatura es común encontrar casos de estudio donde se consideran un número considerable de factores condicionantes, aparentemente buscando mayor detalle en la cartografía.

Algunos trabajos combinan mapas temáticos areales (pendiente, litología) con lineales (alineamientos, red fluvial). El resultado es que el mapa de susceptibilidad está determinado por factores con una alta representación local, lo cual provoca la generación de artefactos que reducen su confiabilidad. Se han llevado a cabo estudios donde se emplean de forma conjunta factores naturales (litologías, alineamientos, etc.) y artificiales (distancia a carreteras o estructuras ingenieriles) o condicionantes (causales) y disparadores (lluvia, sismicidad, etc.) de forma conjunta.

La selección de los factores condicionantes está en función de la naturaleza del área de estudio y la disponibilidad de datos. Sin embargo, en los estudios basados en SIG, los factores seleccionados deben cumplir los siguientes requerimientos: operacionales (muestran cierto grado de afinidad o relación con los deslizamientos), completos o

totales (cubre la totalidad de área de estudio), no uniformes (varían espacialmente), medibles en cualquiera de las escalas de medición (categórica, ordinal, intervalo y razón) y no redundantes. En este trabajo los factores (geológico, geomorfológico, edafológico, y red vial) se seleccionaron en base a los trabajos anteriores, las recomendaciones que aparecen en la literatura y la los datos regionales disponibles.

Al modelo de elevación digital (MED), (Anexo 2), se le aplicaron filtros estándares para obtener los mapas morfométricos (pendiente, disección vertical (Dv) (Anexos 3y4)), aspecto y el mapa de relieve sombreado. Este último se utiliza para superponer los mapas resultantes y mejorar la visualización y la interpretabilidad.

Los mapas profundidad de suelo (Anexo 5) y tipo de suelo (Anexo 6) constituyen mapas de atributos generados del mapa de suelo. Estos fueron reclasificados para agrupar, por un lado, las unidades que poseen interés para zonificación, y por otro, las que son poco susceptibles.

El mapa geológico (Anexo 7) fue generalizado en un número limitado de clases manteniendo la información relevante para el estudio, o sea, las formaciones geológicas fueron agrupadas atendiendo a su susceptibilidad con respecto a los deslizamientos.

A partir de los mapas de fallas, carreteras y ríos se construyeron los mapas de distancia o proximidad (buffer), los cuales fueron reclasificados en 5 clases según los diferentes cuantiles, siguiendo las recomendaciones de la AMA.

3.4 Integración y análisis

Esta etapa consiste en la integración de los mapas de evidencias y el posterior análisis del mapa de susceptibilidad obtenido. Antes del proceso de fusión o combinación de los mapas se determina la importancia o peso relativo de cada uno de ellos y de las clases que lo conforman con el empleo de los métodos objetivos y subjetivos.

En este caso, los métodos de integración utilizados son aquellos que mayor atención han recibido en la literatura científica y que además se adaptan a las particularidades del área de estudio.

En el trabajo se integran los modelos basados en el conocimiento (superposición indexada, lógica booleana, Proceso Analítico Jerárquico (AHP), lógica difusa, etc.); modelos basados en los datos (ponderación de evidencias, Análisis Estadístico Bivariado (BSA) etc.) o modelos híbridos (mixtos), teniendo en cuenta el grado

adecuado de formalización del modelo de deslizamiento y número significativo de deslizamientos conocidos.

Se parte de la utilización del método propuesto por la Agencia de Medio Ambiente (AMA) “Método de superposición indexada” o evaluación multicriterio. El método es una técnica simple, donde la ponderación de los mapas de factores y sus clases, se basa en el conocimiento que posee el geólogo sobre el fenómeno estudiado. El mapa resultante (mapa de susceptibilidad) es una combinación lineal ponderada de todas las variables estudiadas (Bonham-Carter, 1996; Harris et al., 2001, en Grupo Nacional de evaluación de riesgo, 2009). En la propuesta de la AMA para los estudios de PVR se recomiendan pesos para los diferentes factores y el especialista que aplica la metodología decide los pesos de las clases en las que se reclasifican los mapas de factores.

También se aplicaron otras variantes para estimar los pesos de las clases y los mapas de factores, de modo que se pudiera acomodar las ponderaciones a las particularidades del área de trabajo. En este sentido fueron utilizados los métodos de Análisis estadístico bivariado y Procesos jerárquicos analíticos (AHP).

Como alternativa a la integración empleando combinaciones lineales (aditivas) de mapas de factores se aplicó la lógica difusa, la cual posee flexibilidad en la asignación de los pesos y la combinación de operadores, permite trabajar con mapas multiclases y continuos, sin que exista necesidad de reclasificación de las variables cuantitativas continuas.

Como último método se utiliza la ponderación de evidencia en áreas donde existe un número significativo de fenómenos gravitacionales que permitan la evaluación estadística de la importancia relativa de las clases y los mapas de evidencias.

3.5 Validación

En los trabajos de evaluación de la susceptibilidad resulta imprescindible chequear la validez de la zonificación obtenida. La validación permite evaluar la confiabilidad del modelo y tomar las medidas necesarias para corregir el estudio. Para esto se analiza la capacidad predictiva de los mapas de susceptibilidad. En sentido general, los modelos deben asignar valores elevados de susceptibilidad a las áreas donde se localizan los deslizamientos conocidos y revelar nuevas áreas propensas a la ocurrencia de deslizamientos.

Capítulo 4. Análisis y discusión de los resultados

En este capítulo se exponen los principales resultados de la aplicación de la metodología propuesta en el tercer capítulo, se discute la influencia de los diferentes factores en la ocurrencia de fenómenos gravitacionales sobre la base de la asociación con el inventario de deslizamiento y se analiza e interpretan los mapas de susceptibilidad obtenidos a partir de cada método aplicado.

4.1 Inventario de deslizamiento

Como se explica en el capítulo anterior una de las premisas para el desarrollo de la investigación, fue la conformación de una base de datos o inventario de fenómenos gravitacionales lo más completa posible, el cual se representa en la Tabla 4.1, donde se clasifique tipológicamente cada fenómeno gravitacional, estableciendo su caracterización, las formaciones geológicas a las que se asocian y la relación que tienen con las variables o factores condicionantes, lo que permitió establecer criterios para ponderar su influencia.

Por otra parte, se completó el inventario, incluyendo los movimientos de ladera que no estaban asociados a las redes viales, aspecto novedoso en este estudio, pues las bases de datos anteriores solo contenían deslizamientos en las carreteras, lo cual introducía un sesgo en el análisis y la ponderación de los factores condicionantes al sobrevalorar la influencia de los viales (factor artificial, no natural).

Finalmente, el inventario fue un primer acercamiento a la susceptibilidad del territorio, pues a partir del mismo se logran mapas de densidades de estos deslizamientos por consejo popular (Anexo 8), representando el punto de partida para el empleo de métodos basados en el conocimiento y en los datos para la conformación de un mapa de susceptibilidad más confiable e integral. El análisis del inventario se centra básicamente en el obtenido por la fotointerpretación al considerarse que refleja mucho mejor las características naturales intrínsecas del macizo rocoso y estar menos influenciado por las intervenciones antropogénicas.

Tabla 4.1: Inventario de fenómenos gravitacionales a partir de la fotointerpretación.

	X	Y	Formación	Tipos de movimientos	Clasificación	Material	Escala
1	201962.5	299143.3	Guasasa	Desprendimiento	caída	roca	grande
2	205349.2	300982.1	Guasasa	Desprendimiento	caída	roca	grande
3	210964.8	316120.2	Guasasa	Desprendimiento	caída	roca	grande
4	216025.3	318471.7	Guasasa	Desprendimiento	caída	roca	grande
5	257300.7	331218.5	Guajaibón	Deslizamiento	rotacional	detritos	grande
6	261214.7	319096.2	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
7	261386.3	319707.3	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
8	268778.5	320331.2	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
9	279748.3	323917.2	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
10	280001.0	324183.1	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
11	279891.2	324347.1	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
12	279166.2	325453.7	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
13	287171.3	327214.4	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
14	291408.6	329291.6	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
15	284686.6	328811.8	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
16	285339.5	330143.6	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
17	286917.1	330143.6	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	grande
18	287383.7	331490.0	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	grande

Como se puede apreciar en la Tabla 4.1 la formación más susceptible a la ocurrencia de fenómenos gravitacionales es la Fm Artemisa donde se registran 13 deslizamientos de los 18 fenómenos identificados para un 72.2%, se considera que esto pudiera estar condicionado por la composición litológica de esta formación, constituida por calizas micríticas bien estratificadas, calcilutitas, calcarenitas y algunas calciruditas. Por otra parte, los desprendimientos se asocian fundamentalmente a las formaciones carbonatadas de estratificación gruesa o masiva (Formación Guasasa). Además se cartografiaron movimientos de gran magnitud, que involucran el desplazamiento de grandes volúmenes de rocas como es el caso del deslizamiento identificado en la vertiente norte de Pan de Guajaibón y el descrito en la cuenca hidrográfica de Río Hondo, los cuales se pueden observar en las fotos 1 y 2. Por las características que poseen estos deslizamiento es posible que los mismos hayan sido provocados por movimientos sísmicos (paleodislocaciones) (Ordaz, 2013) asociados a fallas regionales

activas (falla Pinar y falla Consolación del Norte). Aunque resulta difícil determinar el momento en el cual los mismos ocurrieron, si se puede afirmar que no son movimientos recientes de laderas.



Foto 1: Deslizamiento rotacional, perteneciente a la Fm Artemisa. Cuenca del Rio Hondo, San Cristóbal.



Foto 2: Deslizamiento rotacional perteneciente a la Fm Guajaibón, localizado en la ladera norte del Pan de Guajaibón.

El inventario también permitió esclarecer algunos elementos de la distribución espacial de los movimientos de la laderas. Se demostró la presencia de fenómenos gravitacionales en todo el área, revelando que el sector más propenso al desarrollo de los mismos es la zona más oriental de la cordillera de Guaniguanico (Sierra del Rosario), con una elevada densidad de estos movimientos, lo que puede estar asociado a la composición litológica, las particularidades de las formaciones geológicas que afloran (formaciones Artemisa y Manacas) y a los movimientos neotectónicos, que se manifiestan en la zona.

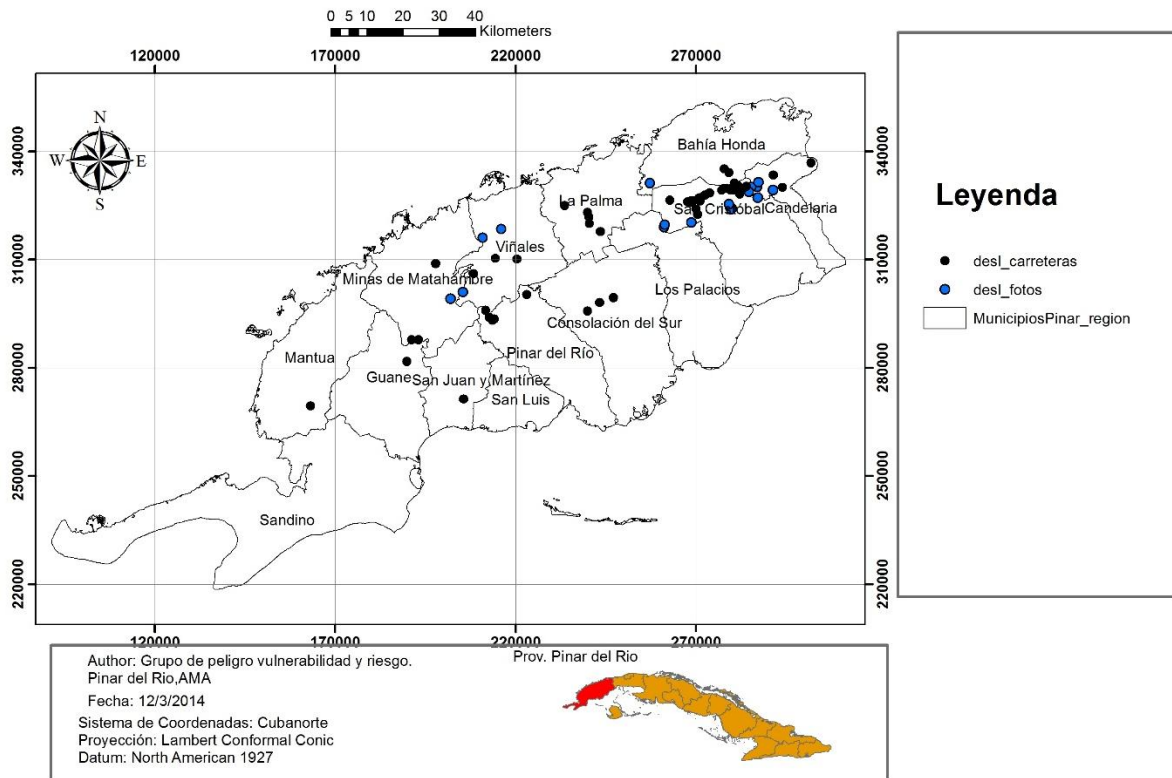


Figura 4.1: Mapa de inventarios de deslizamientos revelando la densidad de los mismos en la parte oriental del occidente de Cuba.

4.2 Factores de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos

4.2.1 Factor geológico

✓ Unidades Geológicas

La geología influye decisivamente en la estabilidad de las pendientes puesto que la mayor parte de los movimientos de ladera son de carácter poco profundos o sea en depósitos cercanos a la superficie (materiales débiles, no consolidados y poco estables), además el buzamiento de los estratos y las deformaciones tectónicas condicionan la inestabilidad de las vertientes.

El factor geología está integrado por dos indicadores: La composición litológica de las formaciones geológicas y la distancia a las principales fallas.

Las diferentes unidades geológicas que afloran en la provincia fueron clasificadas en 5 grupos de susceptibilidad para lo cual se tuvieron en cuenta diferentes elementos:

- Composición litológica de la formación
- Grado de tectonismo y alteración superficial
- Cantidad de deslizamientos reportados en las formaciones geológicas

Tabla 4.2 Distribución de los deslizamientos por formaciones geológicas

Intervalos	Área, Km²	% Área	Desliz	% de desliz.	Susc* (AMA)	BSA* (pesos)	Membresía fuzzy
Artemisa	309.11	2.83	13	72.22	Muy Alta	0.72	0.9
Guajaibón	10.13	0.09	1	5.55	Alta	0.05	0.8
Guasasa	499.52	4.58	3	16.66	Moderada	0.16	0.8
Manacas	271.50	2.49	1	5.55	Moderada	0.05	0.8
Restantes formaciones					Baja	0	0.4 y 0.2

*Métodos aplicados para el análisis de susceptibilidad

Como puede observarse en la Tabla 4.2 las formaciones más proclives al desarrollo de los procesos de laderas son las formaciones Artemisa, Guasasa, Guajaibón y Manacas. En el caso de la Fm Manacas su alto grado de tectonismo y cizallamiento, unido a la composición limo arcillosa de la matriz heterolítica facilitan el desarrollo de estos procesos.

Si se tiene en cuenta el área que cubren los afloramientos de las diferentes formaciones, donde se reportan al menos un evento de deslizamiento se comprueba que las rocas de la Fm Artemisa son indiscutiblemente las más sensibles a la ocurrencia de estos procesos. Por otra parte, al analizar los deslizamientos asociados a las principales vías de comunicación se identifica otro grupo de deformaciones susceptibles (formaciones San Cayetano, Polier, Arroyo Cangre, etc.)(Anexo 9). En el caso de la Formación San Cayetano es necesario tener en cuenta al analizar su susceptibilidad, su amplia extensión areal, aflorando en las Alturas Pizarrosas y Sierra del Rosario y por consiguiente poca capacidad predictiva.

Por otra parte, la mayor cantidad de deslizamientos asociados a esta formación se registra en la parte más oriental de la cordillera, lo que puede estar vinculado a la composición litológica de la misma, pues los cortes que afloran en la Sierra del Rosario poseen un alto contenido arcilloso.

Tabla 4.3 Clasificación de las formaciones geológicas según su susceptibilidad a los deslizamientos.

Susceptibilidad (Pesos)	Formaciones Geológicas
Muy Alta (0.46)	Artemisa, Guasasa, Serpentinitas Doleríticas, Tectonitas
Alta (0.26)	Pons, Paso Real, Universidad, Vedado, Guane + Guevara, Guajaibón, Guane
Moderada (0.16)	Guiñes, Jaruco, Jabaco, Los Negros, Mariel, Manacas, Manuelita, Moreno, Panilla, Peñalver, Quiñones, Santa Teresa, Vía Blanca, Depósitos eluvio coluviales, Arroyo Cangre
Baja (0.09)	Arroyo Cangre, Cojimar, Loma Candela, Madruga, Orozco, Polier, San Cayetano, Transición Cúmulos Diabasas.
Muy Baja (0.04)	Cocodrilo, Camacho, El Sábalo , Jaimanitas, Depósitos de Arenas Gravasas, Depósitos de Arenas Limosas, Depósitos Marinos, Depósitos de Gravas Arenosas, Depósitos de Limos Arenosos, Depósitos de Limos Arcillosos, Depósito de Arena Fina, Depósitos de Limos, Depósitos de Arena Media, Depósitos de Limo Fino, Depósitos de Limo Grueso, Depósitos de Arenas, Depósitos de Grava Fina (25-10.mm), Depósitos de Grava Media (5-25mm), Depósitos de Arena Gruesa (10-0.5mm), Depósitos Palustres, Basaltos, Basaltos y Diabasas, Diabasas, Gabros, Metavulcanitas, Sigüanea.

Indudablemente que el uso de mapas geológicos con unidades litoestratigráficas, en lugar de un mapa litológico introduce incertidumbres a la hora de evaluar la influencia del factor geológico, especialmente en aquellas formaciones geológicas que no poseen homogeneidad litológica.

✓ **Distancia a Fallas**

Sin lugar dudas las zonas que presenten alta densidad de fallas, son por lo general más propensas a la inestabilidad de sus pendientes. Un alto grado de tectonismo y fracturación del macizo rocoso (grietas, estructuras de foliación, fallas, etc.) debilitan considerablemente su resistencia, y facilitan la ocurrencia de los fenómenos

gravitacionales. Por otra parte, las fallas activas constituyen zonas de elevada actividad sísmica, la cual es un mecanismo disparador de los deslizamientos.

Para considerar la influencia de las fallas o alineamientos tectónicos sobre los procesos de laderas se construyó un mapa de proximidad a estas estructuras (Anexo 10).

Tabla 4.4 Distribución de los deslizamientos por distancia a fallas.

Intervalos(m)	Área Km ²	% Área	Desliz.	% Desliz.	Susc (AMA)	BSA(pesos)
0 - 136	1415.78	12.98	7	38.88	Muy Alta	0.38
136 - 390	957.08	8.78	4	22.22	Alta	0.22
390-957	833.29	7.64	4	22.22	Moderada	0.22
957-2617	617.64	5.66	3	16.66	Baja	0.16

En la Tabla 4.4, se puede apreciar la relación entre la cantidad de deslizamientos y la distancia a fallas. En las proximidades de estas estructuras se localiza el mayor número de movimientos de ladera.

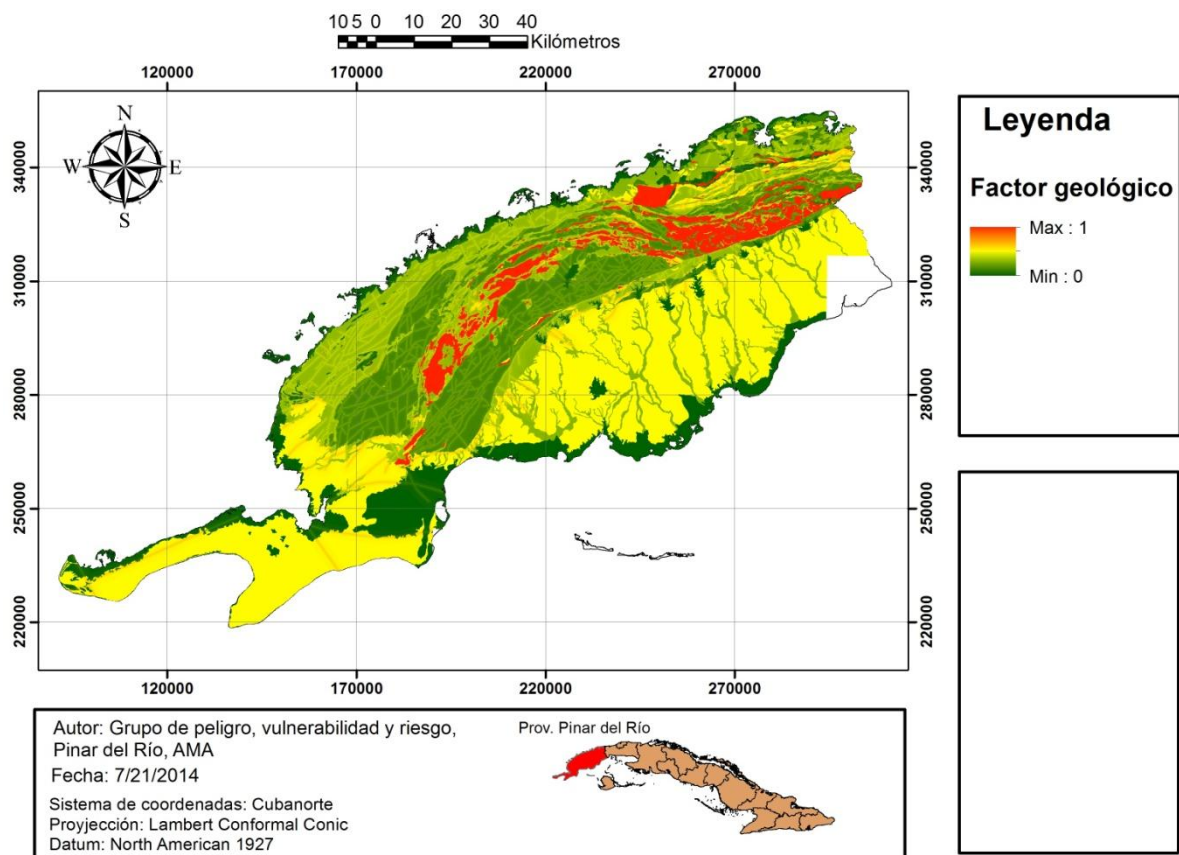


Figura 4.2: Mapa que representa el factor geológico resultante de la integración de la susceptibilidad litológica y la distancia a los alineamientos tectónicos.

En el mapa que representa el factor geológico, producto de la combinación de las unidades litológicas y las fallas, se puede observar que las zonas más sensibles a la ocurrencia de estos eventos coinciden con los afloramientos que conforman la parte axial de la cordillera de Guaniguanico (cinturón de mogotes) y la zona oriental de la región (Sierra del Rosario).

4.2.2 Factor geomorfológico

Para caracterizar la influencia de la geomorfología se integran tres mapas morfométricos derivados de MED (pendiente, disección vertical y aspecto) (Figura 4.3) y el mapa de distancia a la red fluvial.

✓ Pendiente

Está claro que la pendiente es uno de los principales factores que controlan la ocurrencia de los deslizamientos. Los procesos de laderas están controlados por la fuerza de gravedad y mientras mayor sea la pendiente y la posición hipsométrica del cuerpo rocoso mayor será la susceptibilidad a deslizarse.

Tabla 4.5 Distribución de los deslizamientos en función de la pendiente.

Intervalos (grados)	Área Km ²	% Área	Desliz.	% Desliz.	Susc(AMA)	BSA(pesos)
0 - 0.8	4.98	0.04			Muy Baja	0
0.8 - 2.63	5333.58	49.36			Baja	0
2.63 - 6.15	1959.98	18.13			Moderada	0
6.15 - 12.8	1759.83	16.28			Alta	0
12.8 - 75.0	1746.38	16.02	18	100	Muy Alta	1

Como se muestra en la Tabla 4.5 el 100 % de los deslizamientos se localizan en la clase de mayor pendiente que abarca el rango entre 12.8⁰ y 75.0⁰, lo que demuestra la fuerte influencia que ejerce la inclinación de las laderas sobre los fenómenos gravitacionales. En el área estudiada el 16.02 % de la misma corresponde a pendientes superiores a 12.8⁰, lo que debe tenerse en cuenta en los análisis de susceptibilidad.

✓ Disección Vertical

El mapa de disección vertical (relieve interno) muestra una clara diferenciación de este parámetro dentro de la cordillera de Guaniguanico. Los valores más elevados se manifiestan en la Sierra del Rosario y en la franja de Mogote de la Sierra de los Órganos, probablemente esto es reflejo de una mayor intensidad de los movimientos

neotectónicos en esta zona de la cordillera y por la tanto constituyen zonas más proclives al desarrollo de los procesos de laderas. Este patrón es muy similar al descrito por el mapa de pendiente.

Tabla 4.6 Distribución de los deslizamientos en función de la disección vertical.

Intervalos (m/ha)	Área Km ²	% Área	Desliz.	% Desliz.	Susc(AMA)	BSA(pesos)
0 - 5.14	11.35	0.09			Muy Baja	0
5.14 - 18.0	4442.69	37.83			Baja	0
18.0 - 41.1	2644.47	22.51			Moderada	0
41.1 - 102.8	2372.45	20.20			Alta	0
102.8 - 653.2	2272.23	20.84	18	100	Muy Alta	1

En la Tabla 4.6 se evidencia que la mayoría de los deslizamientos reportados se asocian a zonas de elevada pendiente y disección vertical lo que corrobora la influencia que tiene el relieve sobre la manifestación de los deslizamientos en el área de estudio. Estas dos variables son dependientes y tienen un similar impacto en la ocurrencia de estos fenómenos.

✓ Aspecto

Esta variable se diseña con el objetivo de conocer como las diversas direcciones de las vertientes influyen en la ocurrencia de deslizamientos. El aspecto controla la distribución y densidad de los fenómenos gravitacionales al determinar la concentración de humedad en el suelo, considerando la dirección fundamental de proveniencia de las precipitaciones y la incidencia directa de la radiación solar.

Tabla 4.7 Distribución de los deslizamientos en función del aspecto.

Intervalos(grados)	Área Km ²	% Área	Desliz.	% Desliz.	Susc(AMA)
0 - 45	7.7	0.07	3	16.6	Muy Baja
45 - 90	1158.6	10.6	3	16.6	Baja
90 - 135	1247.0	11.4	3	16.6	Alta
135 - 180	1600.7	14.6	3	16.6	Alta
180 - 225	1859.0	17.0	2	5.5	Muy Alta
225 - 270	1517.8	13.9	1	11.1	Moderada
270 - 315	1269.1	11.6	1	11.1	Muy Alta
315 - 360	1245.5	11.4	2	5.5	Muy Alta

A partir de los deslizamientos registrados en el área de estudio y su distribución en función del aspecto, se puede concluir que esta variable no ejerce control sobre estos fenómenos, pues existe una distribución casi uniforme en cada una de las clases, al estar todas las pendientes expuestas a las mismas variaciones de la humedad de los suelos. Este mapa se utiliza únicamente en la variante que sigue las recomendaciones de la AMA y donde los pesos se asignaron considerando la dirección predominante de las precipitaciones en la cordillera de Guaniguanico (Tabla 4.7).

✓ **Red Fluvial**

Los ríos que fluyen por la base de las laderas provocan el socavamiento de las mismas y por consiguiente el debilitamiento del macizo rocoso.

Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos de la superposición del mapa reclasificado de distancia a ríos (Tabla 4.8) se puede concluir que el control que ejerce este factor no es determinante ya que el 88.8 % de los fenómenos gravitacionales se localizan a distancias superiores a 400m, solo dos deslizamientos se registran entre 216.8 - 433.7m de los ríos. Estos resultados indican que el control que ejerce la erosión fluvial actual sobre los movimientos de ladera en el área de trabajo es limitado, o el inventario de los deslizamientos en las cuencas hidrográficas es incompleto.

Tabla 4.8 Distribución de los deslizamientos en función de la distancia de los ríos.

Intervalos(m)	Área Km²	% Área	Desliz	% Desliz.	Susc(AMA)
0 - 216.8	1892.0	17.35	0	0	Muy Alta
216.8 - 433.7	2545.0	23.34	2	11.11	Alta
433.7 - 867.50	2301.7	21.11	5	27.77	Moderada
867.50 - 3036.25	2292.2	21.02	7	38.88	Baja
3036.25- 55520.10	2183.8	20.03	4	22.22	Muy Baja

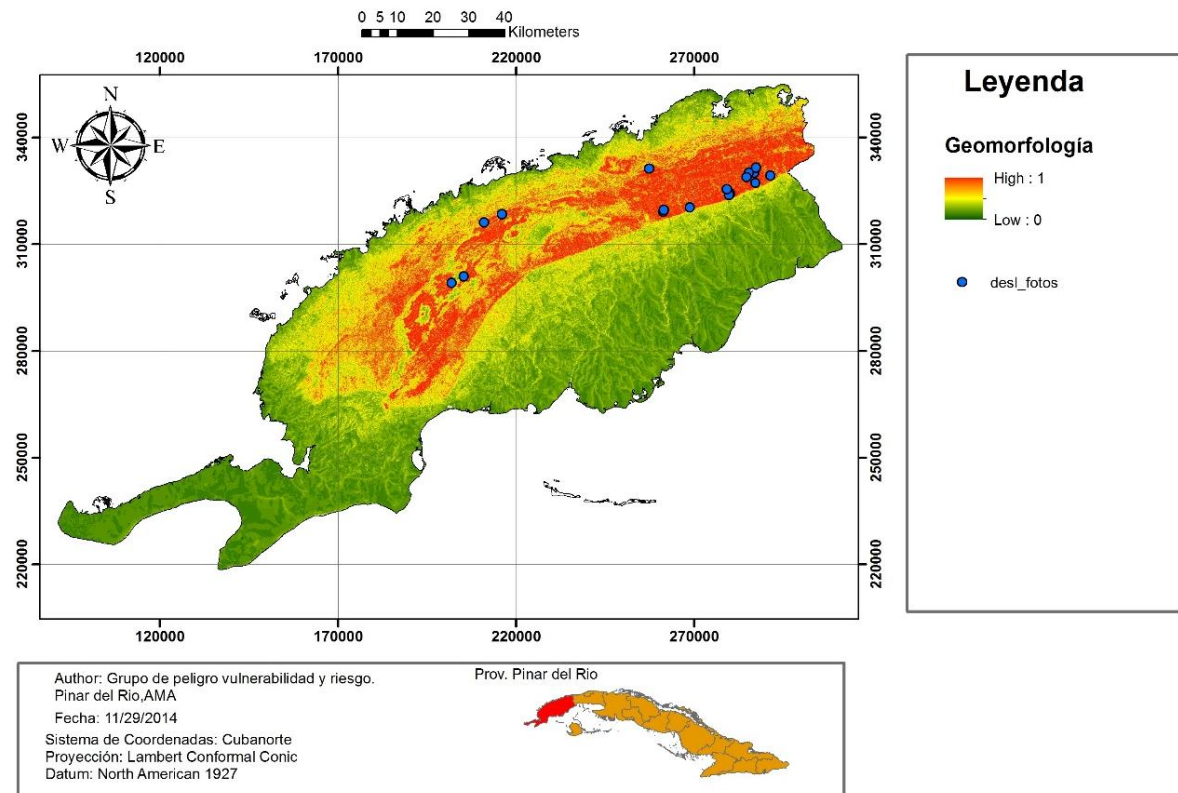


Figura 4.3: Mapa que representa el factor geomorfológico, resultante de la integración de los mapas morfométricos y el mapa de distancia a la red fluvial.

Atendiendo al factor geomorfológico las zonas más susceptibles a los deslizamientos se localizan a lo largo de toda la cordillera de Guaniguanico, siendo la Sierra del Rosario más propensa que la Sierra de los Órganos y las Alturas de Pizarras. Esto es resultado de una mayor cota o elevación, mayores pendientes y mayor relieve interno.

4.2.3 Factor Edafológico

El desarrollo de un potente perfil edafológico es un factor importante para el desarrollo de los procesos de laderas, los cuales aprovechan la zona de contacto de la roca fresca y la corteza de intemperismo como superficie de rotura, especialmente en aquellas zonas donde el espesor de los sedimentos friables es considerable.

✓ Tipo de suelo

A partir del análisis de la evidencia la cual se resume y relaciona en la Tabla 4.9 se puede verificar que el 66.6 % de los deslizamientos registrados ocurren en suelo de tipología “Macizos Rocosos” los que representa el 3.2% de la superficie total estudiada y el resto de los deslizamientos (33.3 %) en suelos de tipo VIII (suelos fersialíticos pardo rojizos).

Tabla 4.9 Distribución de los deslizamientos en función del tipo de suelo.

Intervalos	Área Km ²	% Área	Desliz.	% Desliz.	Susc. (AMA)	BSA (pesos)	Membresía (pesos)
Fersialítico Pardo Rojizo,	582.17	5.34	6	33.33	Alta	0.33	0.8
Macizos Rocosos	348.69	3.19	12	66.66	Muy Alta	0.66	0.9
El resto de los suelos					Baja		0.4 y 0.2

✓ **Profundidad del suelo**

La Tabla 4.10, muestra que el 66.6% de los deslizamientos ocurren en suelos con menos de 1.7m de espesor, lo que permite afirmar que mientras menor es la profundidad de suelo mayor es la probabilidad a la ocurrencia de estos fenómenos. Esta contradicción se puede explicar si se considera que los deslizamientos ocurren en las zonas más elevadas del relieve y de mayor pendiente, precisamente los sectores donde los espesores del perfil edafológico deben disminuir producto de la erosión, por tal motivo la mayor cantidad de estos movimientos se concentran en las primeras clases.

Tabla 4.10 Distribución de los deslizamientos en función de la profundidad del suelo.

Intervalos(m)	Área Km ²	% Área	Desliz.	% Desliz.	Susc(AMA)	BSA(pesos)	Membresía (pesos)
0 - 1.7	2048.78	18.79	12	66.66	Muy Alta	0.66	0.6
1.7 - 3.8	2044.58	18.75	2	11.11	Alta	0.11	0.3
3.8 - 5.0	2554.31	23.43	2	11.11	Moderada	0.11	0.3
5.0 - 6.6	1706.68	15.65	1	5.55	Baja	0.05	0.3
6.6 - 3.60	1671.51	15.33	1	5.55	Muy Baja	0.05	0.3

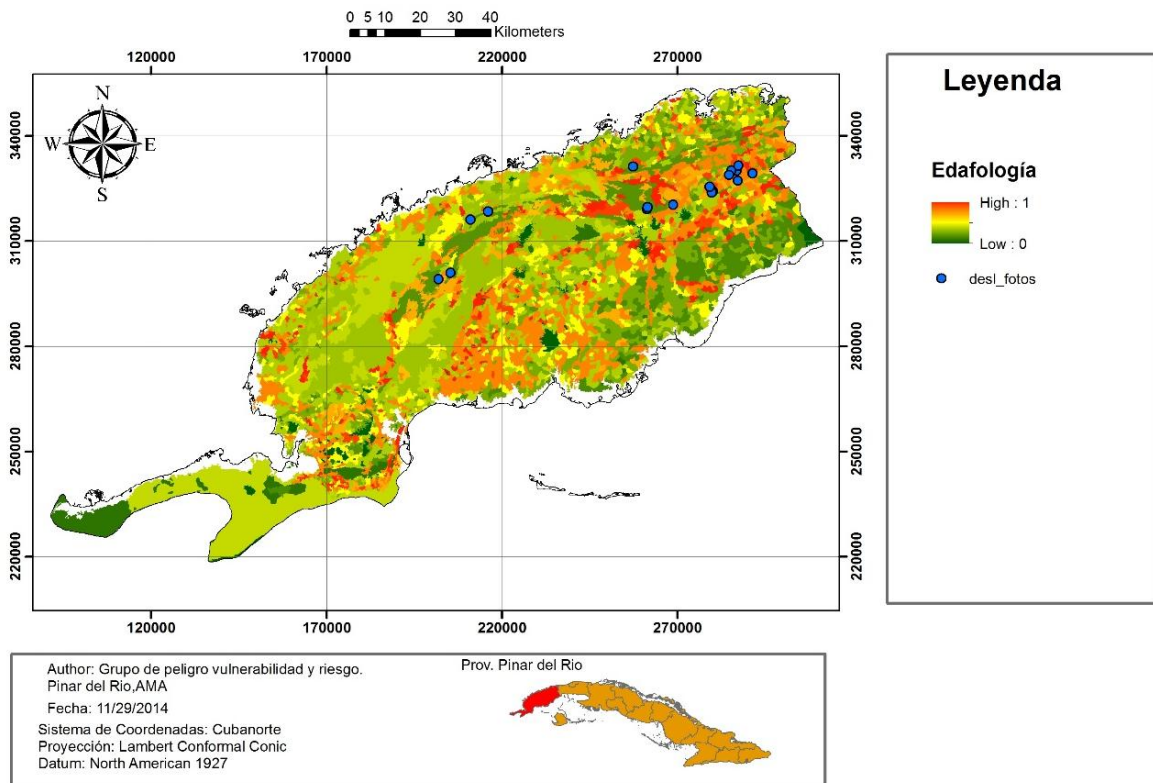


Figura 4.4: Mapa que representa el factor edafológico resultante de la integración de los mapas tipos de suelo y profundidad del suelo.

Atendiendo a este factor las zonas de mayor potencial para el desarrollo de los procesos de laderas se manifiestan hacia la Sierra del Rosario y al sur de la falla Pinar. Por el contrario las Alturas de Pizarrosas y la Faja de Mogotes poseen baja susceptibilidad dado el poco desarrollo del suelo (suelos esqueléticos).

4.2.4 Factor red vial

La red vial es un factor antrópico que ejerce una gran influencia sobre el desarrollo de los deslizamientos, los cortes de laderas y los taludes generados provocan la disminución sustancial de la resistencia del macizo rocoso. Este proceso se acentúa producto a la circulación de vehículos pesados que someten a las laderas a una carga excesiva que provoca el rompimiento del equilibrio y el desarrollo de los deslizamientos. Es importante aclarar que algunos autores desaconsejan mezclar factores artificial (red vial) con naturales en los estudios de susceptibilidad (Ayalew et al., 2005).

Como el análisis se desarrolló a partir del inventario que no está influenciado por las carreteras, las clases con mayor densidad de deslizamientos son las más alejadas de las carreteras (Tabla 4.11).

Tabla 4.11 Distribución de los deslizamientos en función de la red vial.

Intervalos(m)	Área Km ²	% Área	Desliz	% Desliz.	Susc. (AMA)
0 - 122.4	2183.06	20.02	0	0	Muy Alta
122.4 - 489.8	1928.27	17.69	0	0	Alta
489.8 - 979.6	2613.45	23.97	1	5.5	Moderada
979.6 - 1714.3	2257.88	20.71	4	2.2	Baja
>1714.3	1928.96	17.69	13	72.2	Muy Baja

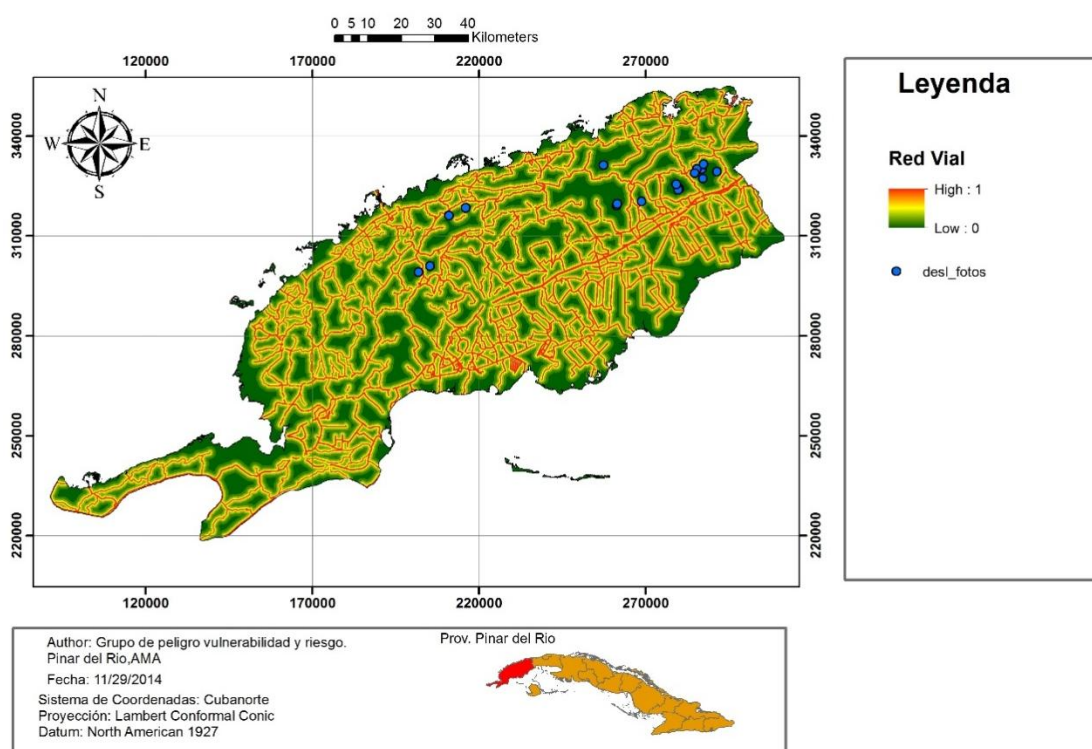


Figura 4.5: Mapa que representa el factor Red vial resultante de la reclasificación del mapa de proximidad a las principales carreteras.

4.3 Resultados de los métodos de modelación de la susceptibilidad

Para la obtención de los mapas (zonificación) de susceptibilidad, como se explicó en el capítulo anterior, se utilizaron diferentes métodos de modelación, tomando como caso base el empleo de la metodología y las recomendaciones de la Agencia de Medio Ambiente (AMA), los diferentes factores internos o condicionantes fueron integrados en el mapa de susceptibilidad, utilizando diferentes variantes:

- Método de superposición indexada por la metodología de la AMA (pesos de los factores y las clases según AMA)

- Método de superposición indexada por la metodología de la AMA (pesos de las clases según BSA y pesos de los factores según AMA)
- Método de superposición indexada (pesos de los factores según Proceso analítico jerárquico y de las clases según BSA)
- Método de lógica difusa (membresía calculada según algoritmos de fuzificación para las clases de las variables cuantitativas continuas y según BSA para las cualitativas)
- Método de ponderación de evidencias para la zona de mayor densidad de deslizamiento.

4.3.1 Método de superposición indexada por la metodología de la AMA

En el mapa preliminar de susceptibilidad se emplearon los siguientes nueve mapas de factores: mapa geológico, disección vertical, pendiente, aspecto, distancia a ríos, distancia a fallas, distancia a carreteras, tipo de suelo y profundidad de suelo. Los pesos utilizados son los definidos en la metodología de la AMA (Tabla 4.12).

Según el mapa geológico empleado en este estudio y el inventario elaborado a partir de la fotointerpretación, todos los fenómenos gravitacionales identificados se asocian a las formaciones Artemisa, Guasasa, Guajaibón y Manaca, este factor es el que mayor peso recibe según la metodología de la AMA.

La superposición del mapa de suelo con el de fenómenos gravitacionales, revela que los deslizamientos se asocian espacialmente con los suelos ferralíticos rojizos y macizos rocosos, mostrando con estos últimos la máxima correlación.

En el caso de los mapas morfométricos (disección vertical y pendiente) se demostró que los deslizamientos aparecen en áreas con disección vertical mayores de 102.8 m, correspondiendo con la última clase definida para este factor y con pendientes superiores a $>12^\circ$.

Tabla 4.12: Criterios e indicadores para susceptibilidad por deslizamientos de terreno.(Guía PVR).

Criterio	Peso	Indicador	Peso	Estandarización
Geología	0.5	Unidades geológicas	0.9	5 clases de susceptibilidad
		Distancia a las fallas	0.1	5 cuántiles
Geomorfometría	0.3	Ángulo de pendiente	0.6	5 cuántiles
		Relieve interno	0.2	5 cuántiles
		Distancia a la red fluvial	0.1	5 cuántiles
		Orientación de la pendiente	0.1	9 clases por orientación
Edafología	0.08	Profundidad de los suelos	0.5	5 cuántiles
		Tipos de suelo	0.5	5 clases de susceptibilidad
Uso de la tierra	0.07	Tipos de usos de la tierra	1.0	5 clases de susceptibilidad
Red vial	0.05	Distancia a carreteras	1.0	5 cuántiles

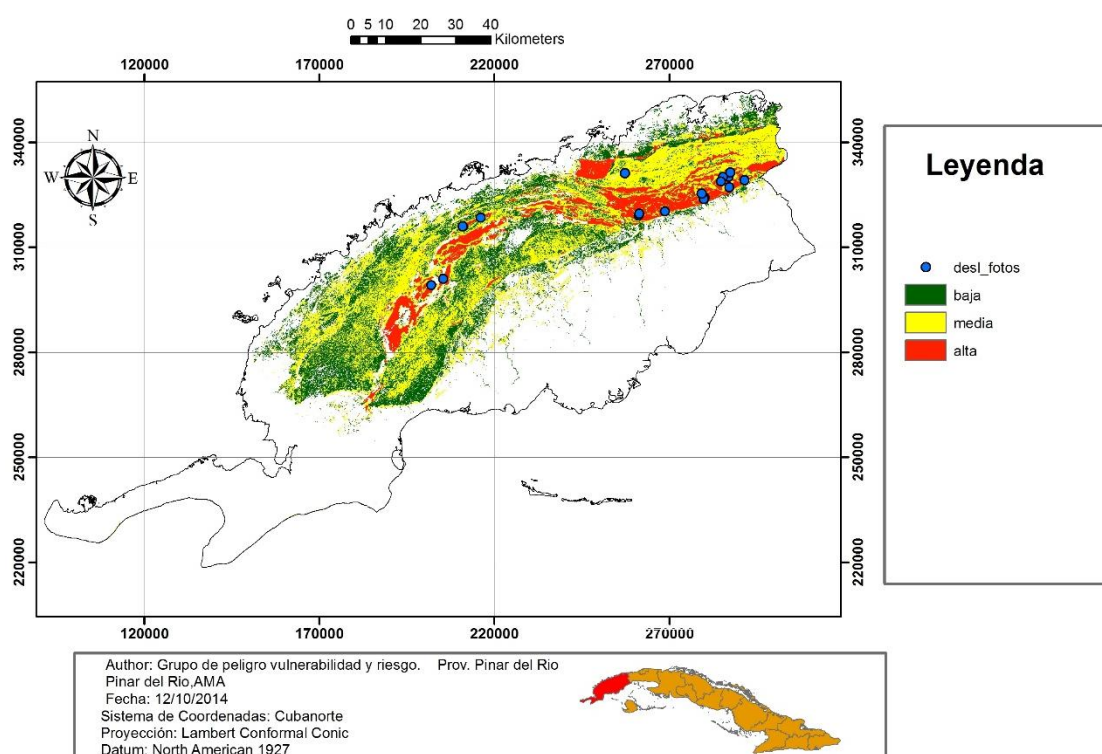


Figura 4.6: Mapa de susceptibilidad a partir de la aplicación de la metodología de la AMA

El mapa que se muestra en la Figura 4.6, se obtiene a partir de utilizar los resultados del inventario de la fotointerpretación para asignar niveles de susceptibilidad a las diferentes formaciones geológicas que afloran en el área. Los diferentes factores fueron integrados y ponderados de la siguiente manera:

Mapa de susceptibilidad = 0.5*Factor geológico + 0.37*Factor geomorfológico + 0.08 Factor edafológico + 0.05*Factor red vial.

El mapa de susceptibilidad se reclasifica en 3 niveles atendiendo a los valores umbrales de 0.4 y 0.7. También se construyen los gráficos de dispersión de susceptibilidad contra

el porcentaje de área acumulada, lo cual facilita la valoración de los resultados obtenidos (Anexo 11).

Las zonas más sensibles a la ocurrencia de los procesos de ladera se localizan hacia la parte axial de la cordillera de Guaniguanico, e incluyen la Sierra del Rosario. Los deslizamientos conocidos se concentran básicamente en las áreas, donde se obtuvieron altos valores de susceptibilidad, lo que en cierta forma valida el procedimiento utilizado. Si se contrasta este mapa con el obtenido por Bee (2012), quien fundamentó la asignación de los pesos en la distribución de los movimientos de ladera del inventario de carretera, en las diferentes formaciones geológicas, se puede constatar que las zonas de alta susceptibilidad se reducen considerablemente y se incorpora el cinturón de mogote por ser muy proclive a los desprendimientos.

Bee (2012) consideró a la Formación San Cayetano como de alta susceptibilidad, la cual al ocupar una gran extensión en la región, provoca que prácticamente toda la cordillera muestre alta susceptibilidad a la inestabilidad de laderas, además no se tienen en cuenta los fenómenos gravitacionales como desprendimientos, caídas, etc. que se manifiestan en las Sierra de los Órganos resultando la misma poco susceptible.

4.3.2 Método de superposición indexada por la metodología de la AMA utilizando pesos de análisis estadístico bivariado (BSA).

La metodología y las recomendaciones de la AMA son de gran importancia para los estudios de PVR a nivel nacional, pues mediante la misma se logra unificar los resultados y establecer patrones a seguir en la zonificación de la susceptibilidad. La estandarización de los métodos y los pesos permite la comparación de los resultados en los diferentes territorios, facilitando la toma las decisiones sobre la gestión del riesgo asociado a estos fenómenos. Por otro lado, la generalización a nivel de país también implica debilidades, pues en la geología nada es homogéneo y cada región o provincia tiene sus particularidades. Para considerar los rasgos distintivos del área y estimar los pesos usando un procedimiento basado en los datos se decidió aplicar el método (BSA). Esta modificación a la guía metodológica permite adaptar el procedimiento al área de trabajo.

Los pesos calculados para las diferentes clases se muestran en las (Tablas 4.2, 4.4, 4.5, 4.6, 4.9 y 4.10). Los mapas de distancia a las carreteras y ríos, se excluyeron del análisis, pues la mayor asociación espacial de los deslizamientos se manifiesta en las

clases más alejadas, no en las proximidades como lo establece el modelo conceptual. Los pesos de los factores no sufrieron cambios significativos.

El mapa de susceptibilidad obtenido (Figura 4.7), reclasificado en tres niveles, muestra una buena asociación espacial de la clases “alta susceptibilidad” con el inventario empleado. Las zonas de mayor probabilidad de ocurrencia se localizan en la parte más oriental de la cordillera, mientras que la zona de mogotes posee susceptibilidad media.

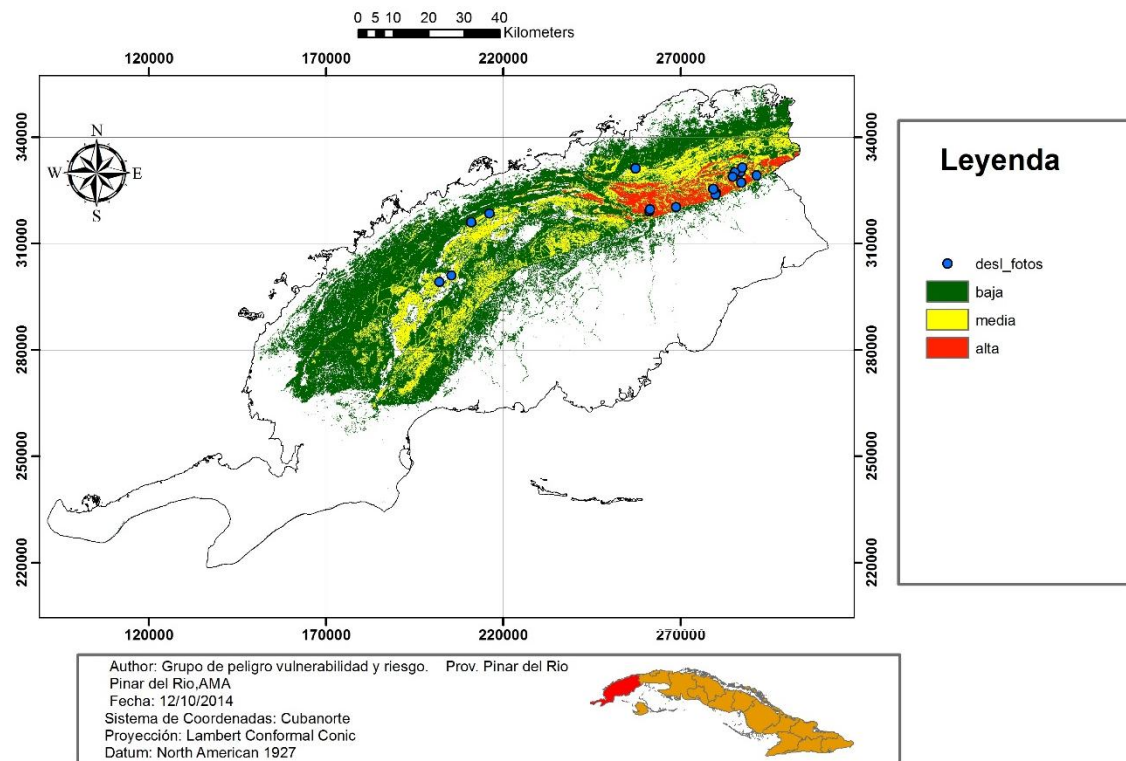


Figura 4.7: Mapa de susceptibilidad aplicando la metodología de la AMA y empleando los Pesos obtenidos a partir de la aplicación del método BSA.

4.3.3 Método de superposición indexada aplicando pesos de los factores calculados a partir del Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

Con el objetivo de ampliar el análisis y continuar modificando las recomendaciones de la AMA para adaptarla a las condiciones del área de trabajo y considerar los criterios del autor sobre la génesis de estos fenómenos se decidió recalcular los pesos de las variables que controlan la ocurrencia de deslizamientos, por el método AHP. En este método, sobre la base del criterio de los decisores (Tabla 4.13), se conforma la matriz de comparaciones binarias entre variables correspondientes (Gráfico 4.1), asignando valores entre 1 y 9 a cada una de las comparaciones, dos a dos, entre los criterios, verificándose que $a_{ij} = 1/a_{ji}$.

Tabla 4.13: Escala de preferencia entre dos parámetros

IIR	Definición
1	Igual a
3	Moderadamente más importante que
5	Más importante que
7	Mucho más importante que
9	Significativamente más importante que
2,4,6,8	Valores intermedios

Fuente: Saaty, (1980) IIR: Intensidad de la Importancia Relativa

Gráfico 4.1: Matriz de comparaciones binarias

[Rest Fit]	dv	slop	fallas	TS	PF
Geología	← 3,0	2,0	5,0	2,0	8,0
dv		3,0	2,0	4,0	5,0
slop			4,0	3,0	6,0
fallas				5,0	4,0
TS					9,0

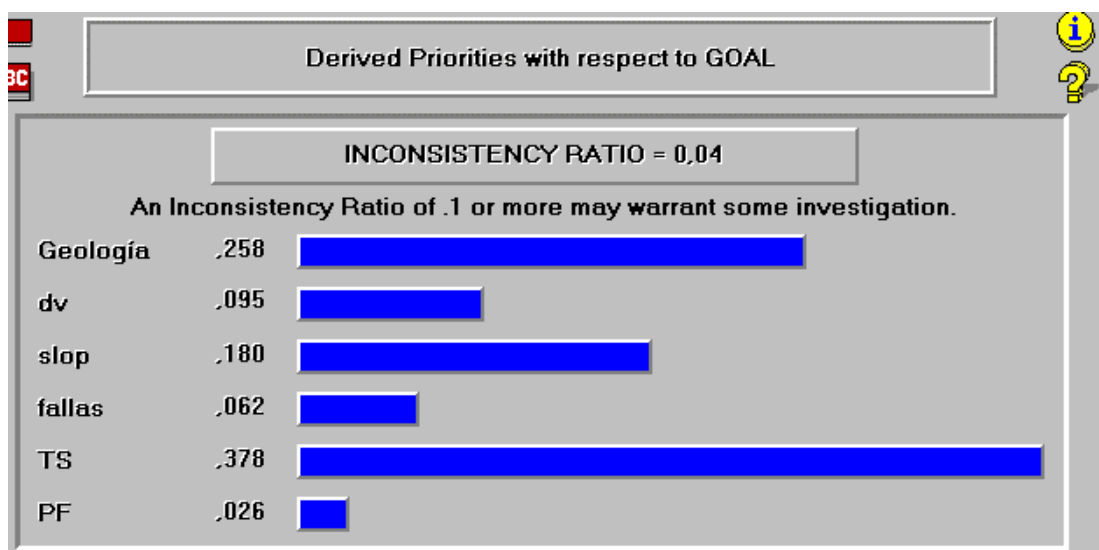
Después de obtenida la matriz de comparaciones binarias se utiliza el programa Expert Choice para calcular los pesos. El ratio de inconsistencia resultante es 0,04, inferior al 10% lo que significa que la consistencia es aceptable (Gráfico 4.2) y los pesos correspondientes son:

Tabla 4.14: Vector de pesos

	Geología	Disección Vertical	Pendiente	Dist. Fallas	Tipos de suelos	Profundidad de suelos
w	0.258	0.095	0.180	0.062	0.378	0.026

Como se puede apreciar en la Tabla 4.14, las variables Tipos de Suelos, Geología y Pendiente son las que recibieron las mayores ponderaciones.

Gráfico 4.2. Comparación de los pesos de las variables que inciden



El mapa obtenido (Figura 4.8) mantiene el mismo patrón de susceptibilidad aunque eleva la favorabilidad de la faja de mogotes. Las zonas susceptibles tienen correlación espacial con los fenómenos gravitacionales conocidos lo que valida el resultado obtenido.

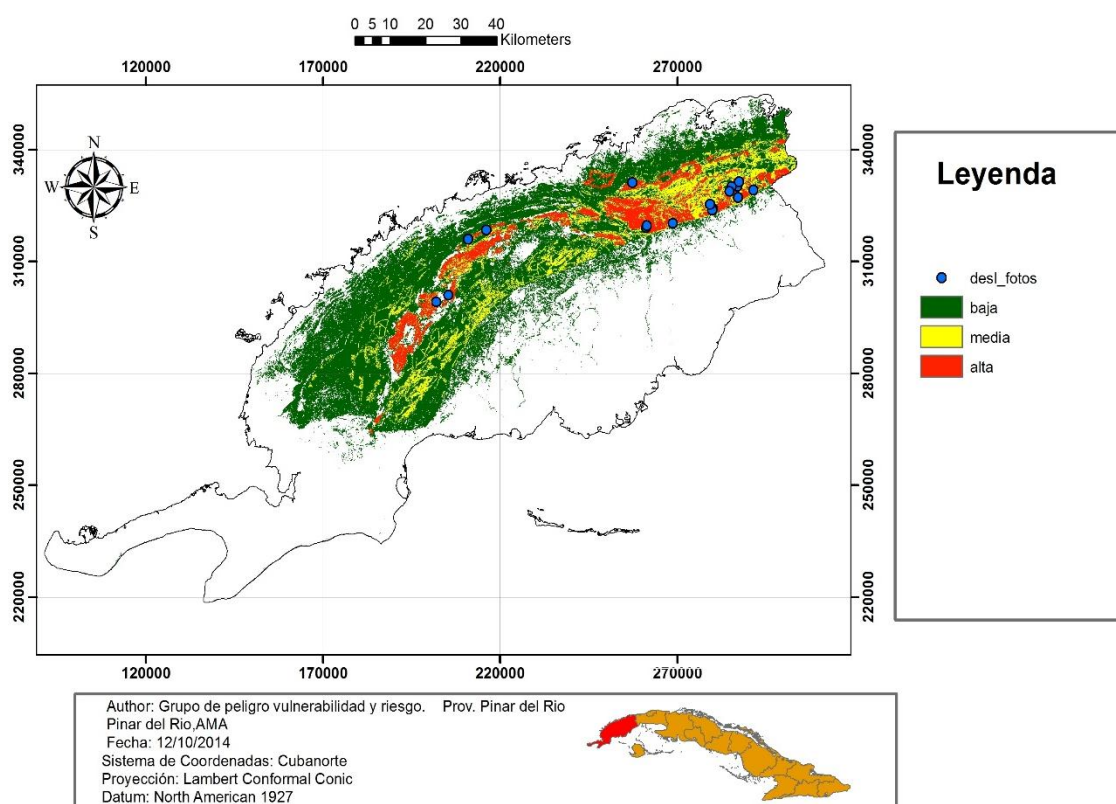


Figura 4.8: Mapa de susceptibilidad aplicando la metodología de la AMA, pesos de las clases a partir de la aplicación del método BSA y pesos de las variables por AHP.

Mapa de susceptibilidad = $0.37 \cdot \text{Tipo de suelo} + 0.25 \cdot \text{geología} + 0.18 \cdot \text{pendiente} + 0.09 \cdot \text{disección vertical} + 0.06 \cdot \text{distancia a fallas} + 0.02 \cdot \text{profundidad de suelo}$.

4.3.4 Método de Lógica difusa

Se recurre a la lógica difusa para superar el carácter lineal y aditivo de los procedimientos anteriores, además el método evita la reclasificación de las variables cuantitativas continuas. La codificación (fuzzification) de ocho mapas primarios se realizó por 2 vías diferentes: valoración subjetiva y funciones analíticas. Los valores de membresía se asignaron de forma subjetiva sobre la base del conocimiento del modelo conceptual de deslizamiento y la importancia relativa de cada una de las clases en los mapas correspondientes (Tabla 4.2, 4.9 y 4.10).

Para los mapas en escala continua (intervalo), los valores de membresía se estimaron a través de las funciones analíticas “Large fuzzification algorithm” y “Small fuzzification algorithm” (Tsoukalas y Uhrig, 1997).

Como un mapa de evidencia puede indicar la presencia o ausencia de más de un factor controlador o un mismo factor puede ser cartografiado por varios mapas de evidencias, la red de inferencia diseñada (Figura 4.9) refleja las relaciones existentes entre los fenómenos gravitacionales, los factores controladores y los mapas de evidencias disponibles.

Inicialmente se realizan las combinaciones de los mapas DV con el de pendiente, tipo de suelo con el de profundidad de suelo y distancia a fallas con el geológico a través del operador difuso OR.

Finalmente, los mapas resultantes fueron procesados utilizando el operador GAMMA, con un valor del parámetro $\gamma = 0.75$.

El mapa final (Figura 4.10) revela un patrón de zonas susceptibles similar al resultante de la aplicación de la superposición indexada por cada una de las variantes de ponderación. Se destacan en ellos las zonas localizadas a lo largo de la parte oriental de la Sierra del Rosario y la parte axial de la cordillera de Guaniguanico. La principal diferencia con los anteriores mapas de susceptibilidad presentados, radica en la extensión más amplia e intensa de las zonas con valores intermedios de susceptibilidad (Pizarras del Sur). En sentido general se puede considerar que la lógica difusa, en comparación con la superposición indexada, brinda resultados más ajustados a la realidad.

Figura 4.9: Red de inferencia desarrollada para la integración a través de la lógica difusa

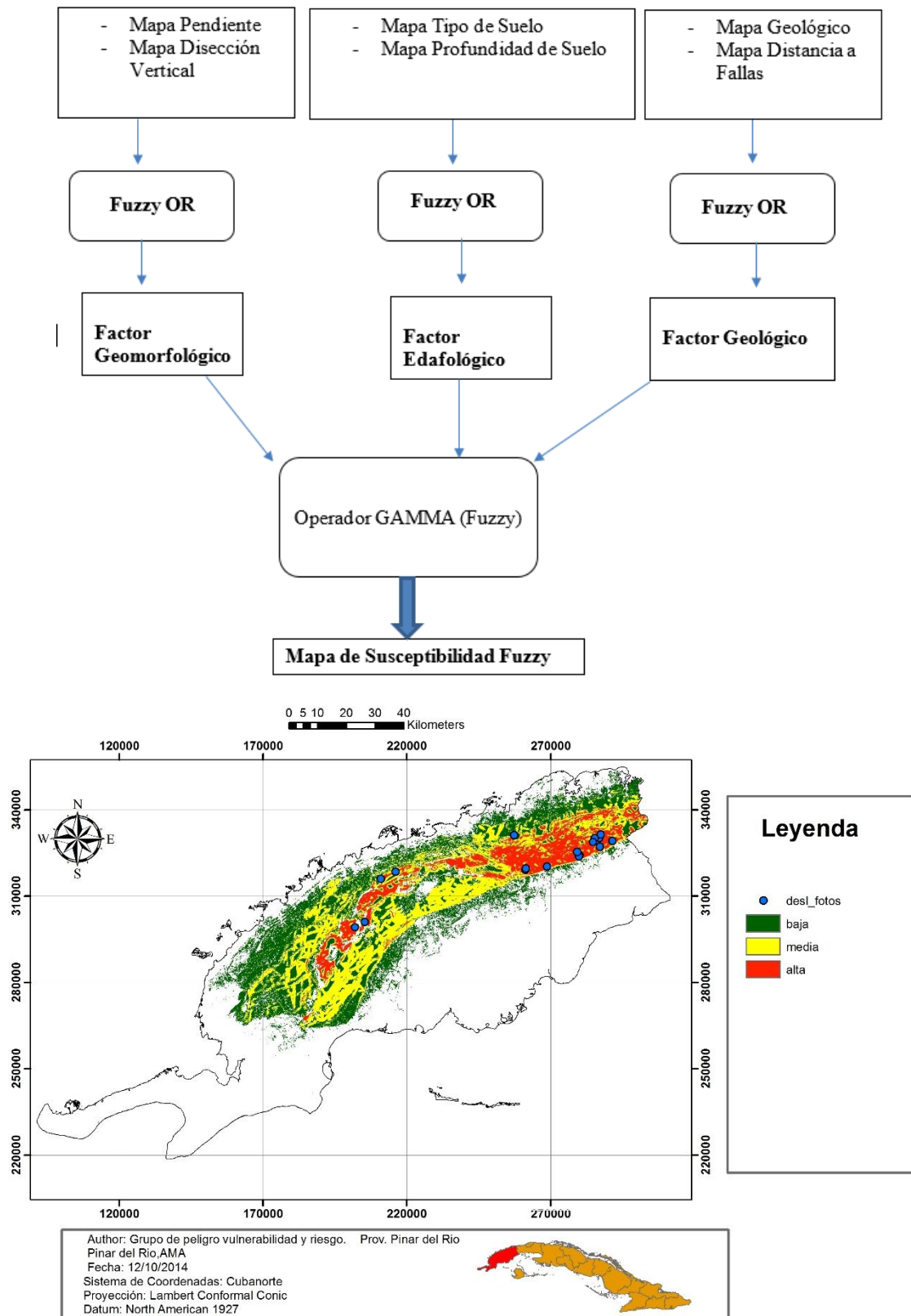


Figura 4.10: Mapa de susceptibilidad aplicando la lógica difusa para la integración de los factores.

4.3.5 Método de ponderación de evidencias

A partir de los resultados obtenidos de la aplicación de cada método desarrollado anteriormente, se decidió emplear el método de ponderación de evidencias para el sector de mayor susceptibilidad y densidad de deslizamientos (Sierra del Rosario).

Los distintos mapas de atributos fueron superpuestos (cruzados) con el mapa de inventario de fenómenos gravitacionales, con el objetivo de cuantificar la asociación espacial entre los deslizamientos y cada una de las evidencias, y disponer de criterios para convertir los mapas multiclases en binarios. Para cada clase se calcularon los pesos positivo y negativo, sus desviaciones estándar y el contraste normalizado (Tablas 4.15_4.18). En este análisis se introdujo la variable densidad de fallas, pues para un área pequeña este parámetro refleja mejor la fracturación y fragmentación del macizo rocoso que el mapa de distancia a fallas.

La significación estadística del contraste se valoró a partir del valor normalizado de este parámetro (C/S (c)). En este trabajo se asumió como límite permisible un contraste normalizado de 1.96 (nivel de significación de 0.025). Por lo tanto, un contraste positivo, que es significativo atendiendo al criterio adoptado, indica la existencia de relación espacial entre los deslizamientos conocidos y las clases de los mapas de evidencias. Para cada mapa, las clases con contrastes positivos y significativamente distintos de cero fueron combinados en la clase 1 (favorables), el resto se asignó a la clase 0 (no favorable).

El análisis de los pesos de cada evidencia se desarrolló solo con cuatro variables, pues eran estas las que cumplían con los parámetros requeridos por el método, ellas fueron pendiente, disección vertical, tipo de suelo y densidad de fallas. En el análisis no se consideró el factor geológico pues todos los deslizamientos se asocian a una única formación (Fm. Artemisa), ni la profundidad del suelo dada la poca variabilidad que muestra este factor.

Los pesos y contrastes estimados muestran cuales son los mapas y clases de mayor asociación espacial con los deslizamientos revelados. En este caso la pendiente del terreno y la disección vertical son los factores que mayor control ejercen sobre la ocurrencia de los movimientos de ladera.

El mapa de susceptibilidad (probabilidad a posteriori) se muestra en la Figura 4.11 el mismo identifica varios sectores con alta probabilidad de ocurrencia como las cuencas

hidrográficas de los ríos Bacunagua y Los Colorados, y las elevaciones en las proximidades del Pan de Guajabón.

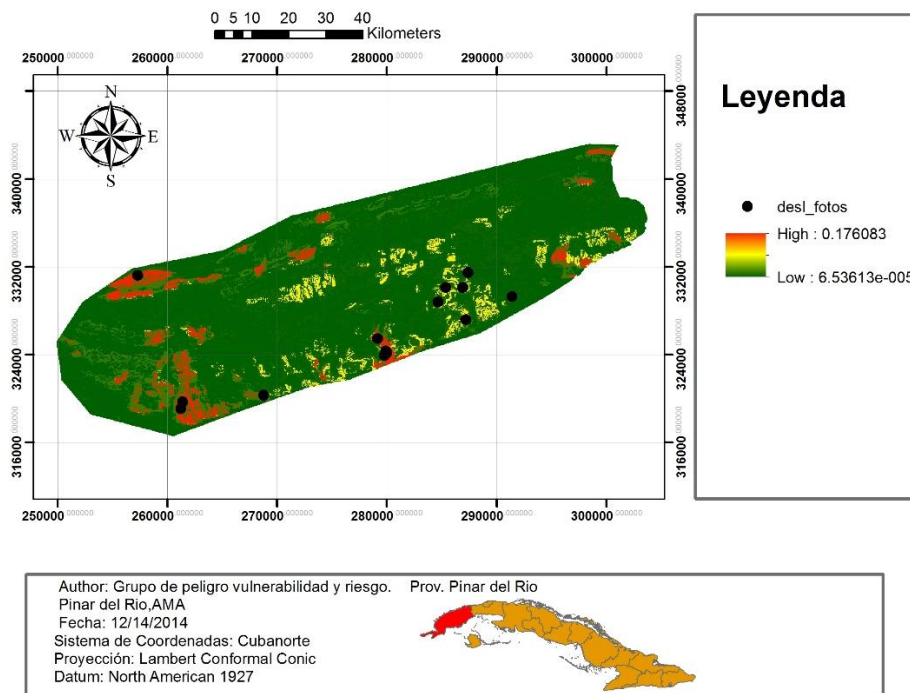


Figura 4.11: Mapa de susceptibilidad de la Sierra del Rosario, obtenido a partir de la aplicación del método de ponderación de evidencia.

Tabla 4.15: Pesos (WSI) calculados para la disección vertical

Intervalos	Área, Km ²	No de puntos	W(+)	W(-)	Contraste	Contraste estandarizado	stud CNT
31.22 - 148.80	149.0	0	0	0	0	0	0
148.80 - 192.90	149.7	0	0	0	0	0	0
192.90 - 239.44	156.3	1	-1.0725	0.16	-1.2325	1.0417	-1.1832
239.44 - 290.88	153.5	1	-1.0542	0.1553	-1.2094	1.0417	-1.161
290.88 - 658.34	149.6	12	1.5337	-1.7415	3.2752	0.7696	4.2559

Tabla 4.16: Pesos (WSI) calculados para la pendiente

Intervalos	Área Km ²	No de puntos	W(+)	W(-)	Contraste	Contraste estandarizado	stud CNT
0.0 - 9.44	144.8	0	0		0	0	
9.44 - 15.27	154.0	0	0		0	0	
15.27 - 20.82	152.7	1	-1.04	0.15	-1.20	1.04	-1.15
20.82 - 27.75	155.6	1	-1.06	0.15	-1.22	1.04	-1.17
27.75 - 71.05	151.0	12	1.52	-1.73	3.26	0.76	4.23

Tabla 4.17: Pesos (WSI) calculados para el tipo de suelo

Intervalos	Área Km ²	No de puntos	W(+)	W(-)	Contraste	Contraste estandarizado	stud CNT
	0.33	0	0	0	0	0	0
	24.92	0	0	0	0	0	0
Fersialítico pardo rojizos	335.86	6	-0.0727	0.0582	-0.1309	0.5452	-0.2401
Macizos Rocosos	165.31	8	0.9555	-0.5991	1.5546	0.5476	2.8391
	48.96	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.18: Pesos (WSI) calculados para la densidad de fallas

Intervalos	Área Km ²	No de puntos	W(+)	W(-)	Contraste	Contraste estandarizado	stud CNT
0.0-2.71	367.0175	5	-0.3087	0.2243	-0.5331	0.5626	-0.9475
2.71-4.52	259.735	9	0.6463	-0.6189	1.2652	0.5631	2.2468
4.52-5.12	120.23	0	0	0	0	0	0
5.12-5.72	165.31	0	0	0	0	0	0

4.4 Validación

Los mapas de susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos gravitacionales y el modelo conceptual de deslizamiento aplicado, se validan comprobando si las zonas de alta susceptibilidad son capaces de revelar los deslizamientos conocidos e identificar nuevos sectores que no aparecen en el inventario. El análisis se realizó a partir de la combinación de cada mapa de susceptibilidad con los mapas de inventarios, de esta forma la cantidad de fenómenos y la distribución de los mismos en cada clase, fue estimada.

Tabla 4.19: Resultados de la validación de los mapas de susceptibilidad, obtenidos por los diferentes métodos.

Métodos	Inventario Carretera						Inventario Foto		
	Clases						Clases		
	Bajo	Área (%)	Medio	Área (%)	Alto	Área (%)	Bajo	Medio	Alto
AMA	6	36.51	23	48.64	16	14.83	0	2	16
BSA	17	70.75	18	23.51	10	5.72	0	5	13
AHP	17	65.81	23	22.64	5	11.54	0	0	18
Fuzzy	5	46.71	15	36.32	24	16.96	0	0	18

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.19. En sentido general, la clases de alta susceptibilidad en todos los métodos ocupan un área relativamente pequeña (<20%) mientras que revelan un alto porcentaje de los deslizamientos no asociados a las carreteras. Los métodos de la lógica fuzzy y AHP brindan los mejores resultados al asignar el 100 % de los deslizamientos a esta clase. También resulta muy significativo que la lógica difusa revela la mayor cantidad de deslizamientos asociados alas carreteras en la clase alta susceptibilidad. Esto demuestra la consistencia del método y su capacidad predictiva.

CONCLUSIONES

1. Los inventarios de fenómenos gravitacionales representan una herramienta útil como punto de partida para los estudios de susceptibilidad y riesgo de un territorio, su uso en este trabajo demostró que el sector más propenso al desarrollo de los mismos es la zona más oriental de la cordillera, con una vasta densidad de estos movimientos, lo que puede estar asociado, por una lado, a la composición litológica y las particularidades de las formaciones geológicas que afloran y por otro, a los movimientos neotectónicos que se manifiestan.
2. Los factores que mayor control ejercen sobre los movimientos de laderas son el edafológico, geomorfológico y geológico. El factor edafológico representado por el mapa “tipo de suelo” mostró la mayor capacidad predictiva (mayor asociación espacial) al revelar un número significativo de los deslizamientos conocidos y poseer una extensión areal, relativamente limitada, de los tipos de suelo más susceptibles.
3. La integración del inventario con los diferentes mapas de factores condicionantes permitió establecer que las áreas más propensas a la inestabilidad de laderas se manifiestan donde; a) afloran las formaciones Artemisa, Guasasa y Guajaibón b) se desarrollan suelos de los tipos “Ferralíticos rojizos” y “macizos rocosos”, c) la disección vertical alcanza valores superiores 102.8 m/ha y las pendientes supera los 12°,
4. La zonificación de la susceptibilidad por los diferentes métodos empleados reveló que aproximadamente el 40% del territorio de la antigua provincia de Pinar del Río es susceptible a la ocurrencia de los deslizamientos. De ellos aproximadamente el 15% posee alta susceptibilidad.
5. La aplicación de los métodos de modelación de la susceptibilidad en SIG arrojó que las zonas susceptibles para la ocurrencia de fenómenos gravitacionales son: a) la Sierra del Rosario que presenta un relieve más accidentado y los valores de disección vertical indican un levantamiento más intenso de territorio, b) la parte axial de la Sierra de los Órganos (franja de mogotes), donde la estratificación de la roca y el amplio desarrollo de los escarpes favorecen las caídas y desprendimientos.
6. La validación demostró que, en este caso, la lógica difusa brinda resultados superiores si se considera su capacidad predictiva en los dos inventarios utilizados.

RECOMENDACIONES

- Realizar un trabajo de campo que corrobore, valide y complemente el inventario desarrollado a partir de la foto interpretación.
- Continuar recopilando información sobre los movimientos de ladera para garantizar la actualización permanente del inventario.
- Desarrollar trabajos de campo de detalle en los grandes deslizamientos cartografiados con vistas a establecer las condiciones locales que los propiciaron y su vinculación con la actividad sísmica.
- Trasladar a la AMA las recomendaciones que permitan mejorar la metodología existente para los PVR por deslizamientos de terreno.

BIBLIOGRAFIA

1. Acevedo, M., 1982: Geografía Física de Cuba. Facultad de Geografía. Universidad de La Habana. Cuba. Edición provisional. 297 pp.
2. Arenas, M. (2006): Lineament extraction from digital Terrain Models. Case Study San Antonio del Sur Area, South-Eastern Cuba.
3. Ayala Carcedo, F.J. (1988): Introducción a los Riesgos Geológicos. En: F.J. Ayala Carcedo y J.J. Durán Valsero (Coords): Riesgo Geológico. I.G.M.E. Serie Geológica Ambiental. Madrid. 3-19.
4. Bee, C. (2013): Estudio de susceptibilidad a los deslizamientos de terrenos en el distrito geográfico de Pinar del Río. Tesis en opción al título de Ingeniero en Geología, Universidad Hermanos Saiz, Pinar del Río.
5. Bichler, A.J., Brooks, E.D., Bobrowsky, P.T. 2002. Sunshine Coast Aggregate Potential Mapping Project (parts of NTS 092F08,09,10,15,16, 092F15,16; 092G05,06,11,12,13, 092J04, 092K01,02,03,06,07,08,09). B.C. Ministry of Energy and Mines, Fieldwork 2001, Paper 2002-1, p. 403-408.
6. Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F. 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. vol. 54, no. 11, p. 1585-1592.
7. Bonham-Carter, G.F. 1994. Geographic Information Systems for Geoscientists, Modelling with GIS. Pergamon, Ontario, 398 pp.
8. Brown, W., Groves, D., Gedeon, T. 2003. Use of fuzzy membership input layers to combine subjective geological knowledge and empirical data in a neural network method for mineral-potential mapping. Natural Resources Research, vol. 12, no. 3, p. 183-199.
9. Brabb, E.E. (1984): Innovative approaches to Landslide Hazard and Risk Mapping. IV International Symposium on Landslide, Toronto. Proceedings, Volume 1: 307- 324.
10. Castellanos E (2008). "Multi-scale landslide risk assessment in Cuba", Disertación Doctoral, Universidad de Utrecht, Utrecht, Normandía, p 273.

11. Cobiella Reguera J. L., et al. (2000). Estratigrafía y tectónica de la Sierra del Rosario, Cordillera de Guaniguanico, Cuba Occidental, Minería y Geología, Vol. XVII, No 1, 5-15.
12. Cobiella Reguera J. L. (2008). Reconstrucción palinspástica del paleomargen mesozoico de América del Norte en Cuba occidental y el sudeste del Golfo de México. Implicaciones para la evolución de SE del Golfo de México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 25, No 3, p 382-401.
13. Crozier, M.J., and Glade, T., 2005. Landslide Hazard and risk: Issues, concepts, and approach. In: Glade, T., Anderson, M., and Crozier, M. (eds): Landslide hazard and risk. Wiley, Chichester: 1-40.
14. Crozier, M.J., 1986. Landslides: causes, consequences and environment. Croom Helm, London. 252 pp.
15. Cruden, D.M., 1991. A simple definition of a landslide. Bulletin of the International Association Engineering Geology, 43: 27-29.
16. Cruden, D.M., and Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes. In: Turner, A.K., and Schuster, R.L. (eds), Landslides investigation and mitigation, special report 247. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington D.C: 36-75.
17. Cruden, D. and Fell, R., 1997. Landslide risk assessment A.A. Balkema, Rotterdam, 371 pp.
18. Cheng, Q., Agterberg, F. P. 1999. Fuzzy Weights of Evidence Method and Its Application in Mineral Potential Mapping. Natural Resources Research, vol. 8, no. 1, p. 27-35.
19. Cueto, C., Estévez, E., Guanche, C. 2014. Revista Avances, No. 1893.
20. De la Torre, P., Chávez, O. (2009, a). "Informe ingeniero-geológico deslizamiento CARR. A "Niceto Pérez", INVESCONS, Pinar del Río, p21.
21. De la Torre, P., de Guevara, E., Chávez, O. (2009, b). "Informe ingeniero-geológico deslizamiento vial Las Terrazas, INVESCONS, Pinar del Río, p16.

22. ESRI, 2006. ArcGIS 8.1 help. Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI) at <http://www.esri.com/>.
23. Estévez, E. (2011). Metodología para la evaluación del potencial mineral de áridos naturales. Caso de estudio-Ilanura sur de Pinar del Río. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río, Cuba, pp 17- 20.
24. Fábregas Amaya J. D. (2009). Paleogeografía del Paleomargen de América del Norte en Cuba occidental, durante el intervalo Aptiano-Cenomaniano (Formaciones Santa Teresa y Carmita en Sierra del Rosario), Tesis en opción al título de Ingeniero en Geología, Universidad Hermanos Saiz, Pinar del Río, p 88.
25. Fulgencio J., Cordobés J.M., Peña A., Perigó E., Laborde N., Mesa A.M., Hernández C., Peña R., Brizuela C. B, Beltrán L., Alvares E., 2011. Estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo de desastres por afectaciones de fuertes vientos, inundación por intensas lluvias, inundación por penetración del mar y afectaciones por deslizamientos en la provincia de Guantánamo.
26. García, D., Gil, S., Delgado, R., Millán, G., Peñalver, L., Cabrera, M., Denis, R., Chang, J. L., Fuentes, M., Díaz, C., Suárez, V., Llanes, A.I, Pérez, R., Torres, M., Pérez, C., Díaz, L., 2003: Mapa geológico de la provincia de Pinar del Río a escala 1: 100 000 en base digital.
27. Guía metodológica para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo por deslizamientos de terreno a nivel municipal (2009), Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, p 31.
28. Guzzetti, F., Cardinali, M., and Reichenbach, P., 1994. The AVI project: a bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy. *Environmental Management*, 18: 623-633.
29. Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F., 2005. Landslide hazard assessment in the Staffora basin, Northern Italian Apennines. *Geomorphology*, 72: 272-299.

30. Hickin, A.S., Brooks, E.D., Dixon-Warren, A.B., Bobrowsky, P.T. 2001. Sea to Sky aggregate potential study, B.C. Ministry of Energy and Mines, Open File 2001-12.
31. Hutchinson, J.N., 1988. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology. 5th International Symposium on Landslides, Balkema, Rotterdam, 1: 3-35.
32. Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., and Hutchinson, J.N., 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(3): 221-238.
33. Iturralde-Vinent, M. 1978. Los movimientos tectónicos de la etapa de desarrollo platafórmico de Cuba *Geolllgie en Mijnbow*, Holanda, vol. 57, no.2, p. 205-212.
34. Iturralde-Vinent, M. 1998. Sinopsis de la constitución geológica de Cuba. En Melgarejo J.C. y Proenza J.A., *Geología y Metalogénia de Cuba: Una introducción*. *ActaGeológicaHispanica* vol. 33, no. 1-4, p. 9-56
35. Kanungo, D.P., Arora, M.K., Sarkar, S., Gupta, R.P., 2006. A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation In Darjeeling Himalayas. *Engineering Geology*, 85: 347-366.
36. Kartashov I.P., Mayo, N.A., Cherniajoski, A.G., Peñalver, L.L. 1976. Algunas formaciones geológicas del sistema Cuaternario reconocidas recientemente. La Habana. *SerieGeológica*. No 26 ACC.
37. Kemp, L., Bonham-Carter, G.F., and Raines, G.L., 1999. Arc-Wofe: Arcview extension for weights of evidence mapping: <http://gis.nrcan.gc.ca/software/arcview/wofe>.
38. Kemp, L.D., Bonham-Carter, G.F., Raines, G.L., Looney, C.G. 2001. Arc-SDM: Arcview extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis. <http://www.ntsर्व.gis.nrcan.gc.ca/sdm/>

39. Martínez, D., Fernández de Lara, R. 1988. Informe sobre los trabajos del levantamiento Geológico y Búsqueda a escala 1:50 000 en la parte central de la provincia de Pinar del Río. Inv. 3642, ONRM, La Habana, Cuba.
40. Martínez, D., Fernández de Lara, R., Peláez, R., Vásquez, M., Barrios, E., Valido, A., Reinoso, R., Chang, J.C., Fernández, O., Denis, R., Gómez, L., García, D., Gil, S., Pérez, P. H., Reyes, R., Valdivia, M.; Núñez, R., Pérez, R. y Piz, J. 1991. Informe Sobre los Resultados del Levantamiento Geológico y Búsqueda Acompañante a escala 1: 50 000 en la parte Central de la Provincia de Pinar del Río. ONRM, La Habana, Cuba.
41. Martínez, D., Fernández de Lara, R., Peláez, R., Vásquez, M., Barrios, E., Valido, A., Reinoso, R., Chang, J.C., Fernández, O., Denis, R., Gómez, L., García, D., Gil, S., Pérez, P.H., Reyes, R., Valdivia, M., Núñez, R., Pérez, R. y Piz, J., (1994). Informe sobre los resultados del Levantamiento Geológico y Prospección a Escala 1: 50 000 Pinar – Habana. Arch. ONRM.
42. Nossin, J.J., 1989. Aerospace survey of natural hazards. ITC Journal, 3-4: 183-188.
43. Orcina, J. y Ayala Carcedo-Carcedo, F.J. (2002): Riesgos naturales. Conceptos fundamentales y clasificación. En: F.J.Ayala-Carcelo y J. Orcina Cantos (Coords.): Riesgos naturales. Ed. Ariel, 41-73.
44. Pszczółkowski, A., Piotrowska, K., Myczynski, R., Piotrowski, J., Skupiński, A., Grodzicki, J., Danilenwski, D, Haczewski, G., 1975. Texto Explicativo al Mapa Geológico a escala 1:250 000 de la provincia de Pinar del Río. Informe inédito I.G.P, A.C.C, O.N.R.M., MINBAS.
45. Porwal, A.K., Carranza, E.J.M., and Hale, M., 2006. Tectonostratigraphy and base - metal mineralization controls, Aravalli province, western India: new interpretations from geophysical data analysis. Ore geology reviews, 29(3-4): 287-306.
46. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de

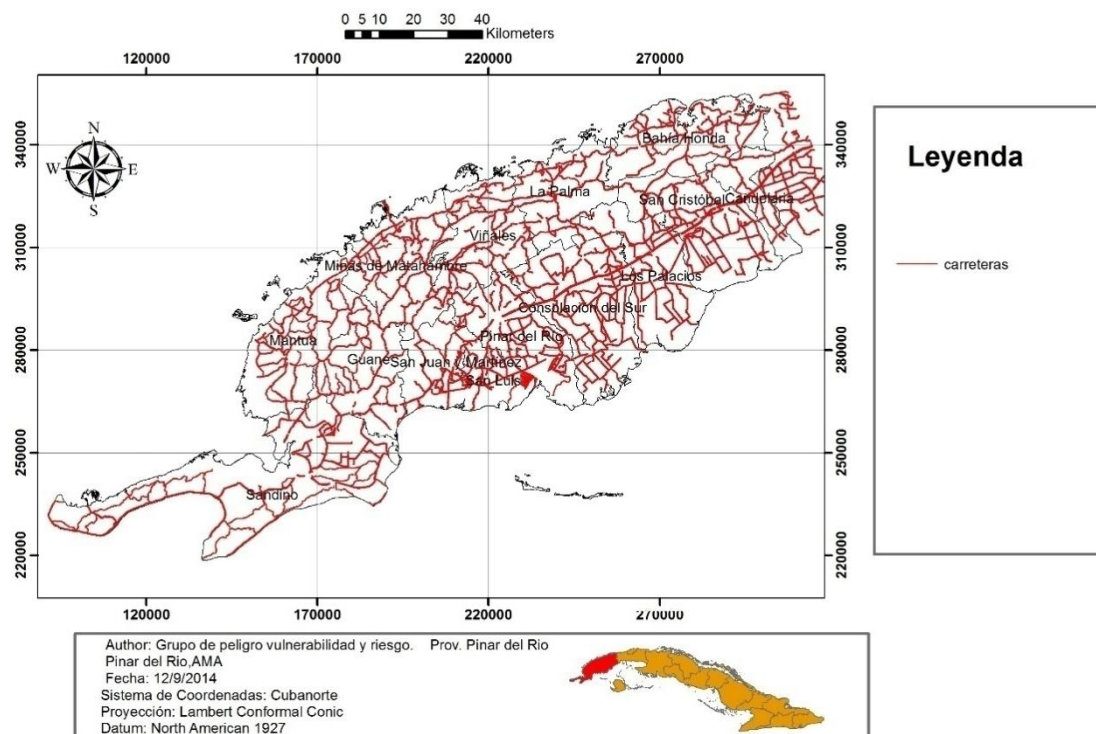
amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, no. 4, p 432.

47. Quadros, T. F. P., Koppe, J. C., Strieder, A. J., Costa J.F. 2006. Mineral-Potential Mapping: A Comparison of Weights-of-Evidence and Fuzzy Methods. *Natural Resources Research*, vol. 15, no. 1, p. 49-65.
48. Rocamora, E. (2013). Criterios para la caracterización de factores interventores de la estabilidad de taludes en zonas de montaña. *Anuario de la Sociedad Cubana de Geología*, No 1, 2013, p 145-150, ISSN 2310-0060.
49. Sawatzky, D.L., Raines, G.L., Bonham-Carter, G.F., Looney, C.G. 2004. ArcSDM2: ArcMAP extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis. <http://ntserv-gis.nrcan.gc.ca/sdm/ArcSDM2/>
50. Soeters, R and van Westen, C.J., 1996. Slope Instability Recognition, analysis and zonation. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (Editors), *Landslide, Investigation research Board National research Council*. National Academy Press, Washington, D.C, pp.129- 177.
51. Thanh N (2008). “Landslide susceptibility mapping of the mountainous area in Loui district, ThuaThien Hue Province, Vietnam”, Disertación doctoral, Universidad Libre de Bruselas, Bruselas, Bélgica.
52. Tsoukalas, L.H., Uhrig, R.E. 1997. Fuzzy and neural approaches in engineering. New York, John Wiley and Sons, Inc., 587 pp.
53. UNDRO (1979): Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Repotr of Experts Group Meeting, Geneva, July 1979.
54. Van Westen, C.J., Rengers, N., Terlien, M.T.J., Soeters, R., 1997a. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau*, 86(2): 404-414.
55. Van Westen, C.J., Van Asch, T.W.J., Soeters, R., 2006. Landslide hazard and risk zonation - why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65: 167–184.

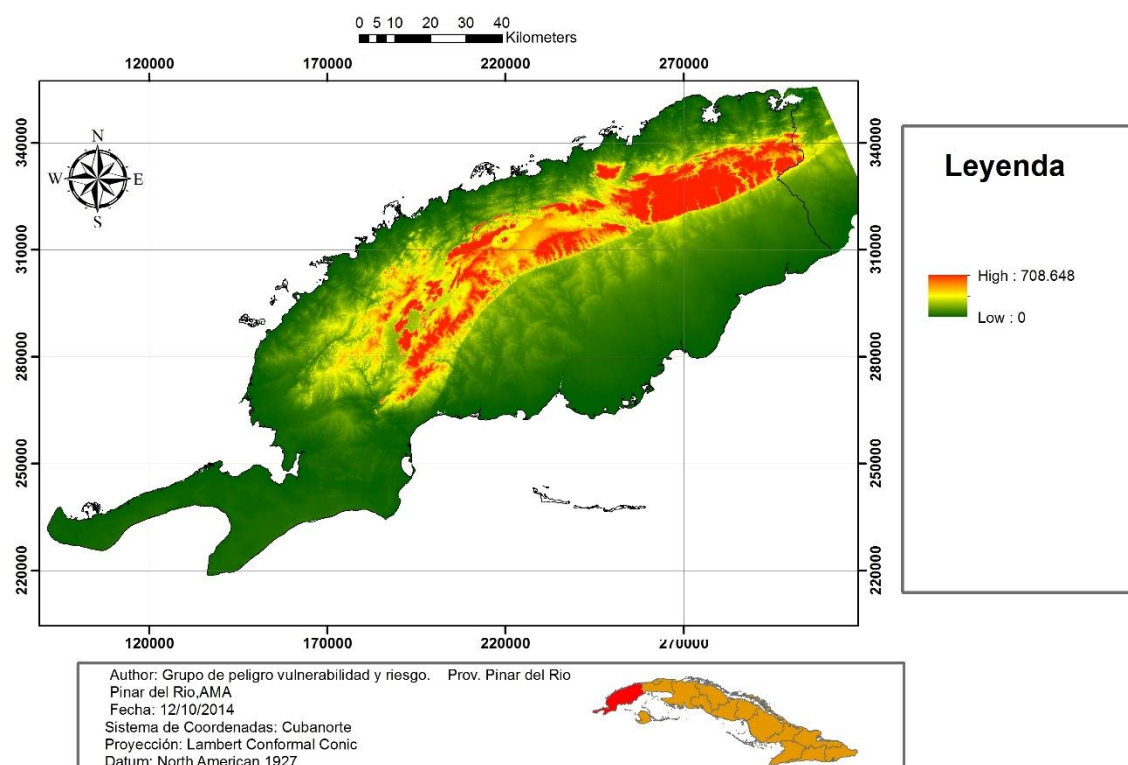
56. Varnes, D.J., 1978. Slope movements, types and processes. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (eds), *Landslide analysis and control*, National Academy Sciences, Washington DC: 11-33.
57. Varnes, D.J., 1984. International Association of Engineering Geology Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes: *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*, UNESCO, Paris. 63 pp.
58. Vázquez, T. (2013). *Movimientos de ladera en el extremo Oriental de la Sierra del Rosario*. Tesis en opción al título de Ingeniero en Geología, Universidad Hermanos Saiz, Pinar del Río.
59. Verstappen, H.T., 1983. *Applied geomorphology: geomorphological surveys for environmental development*. Elsevier, Amsterdam.
60. Webster's 3rd New International Dictionary, 1966.

ANEXOS GRÁFICOS

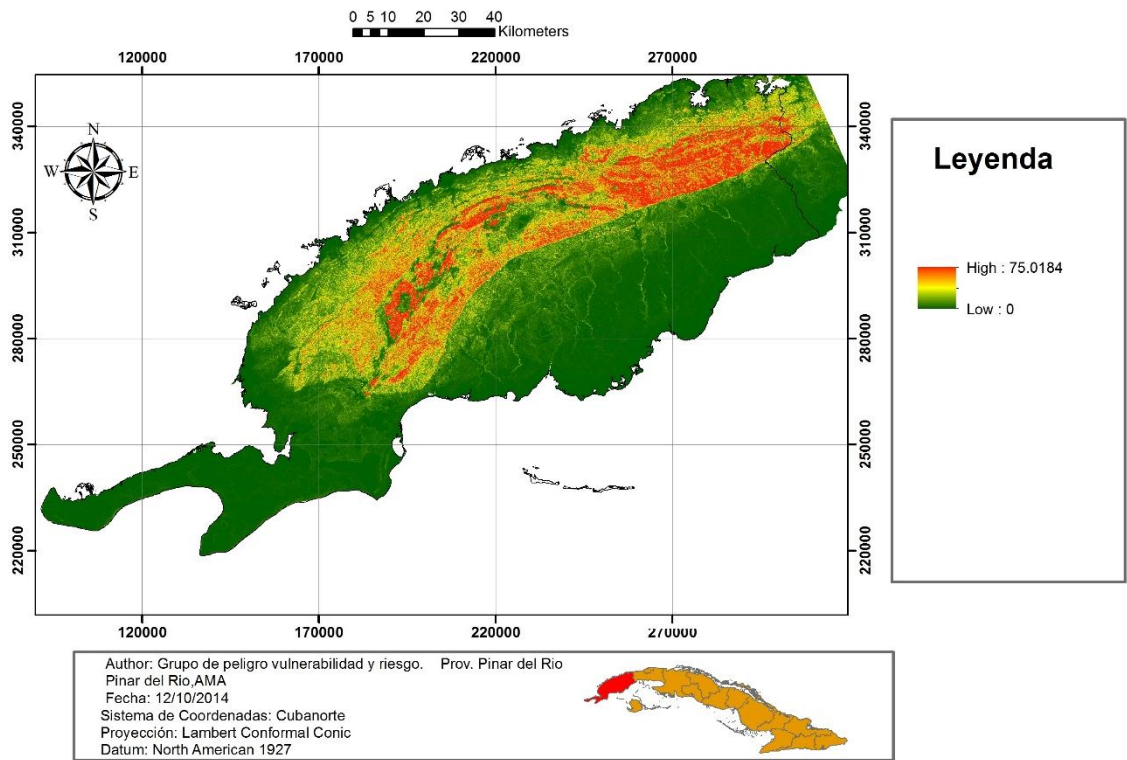
Anexo 1: Mapa de las Redes Viales



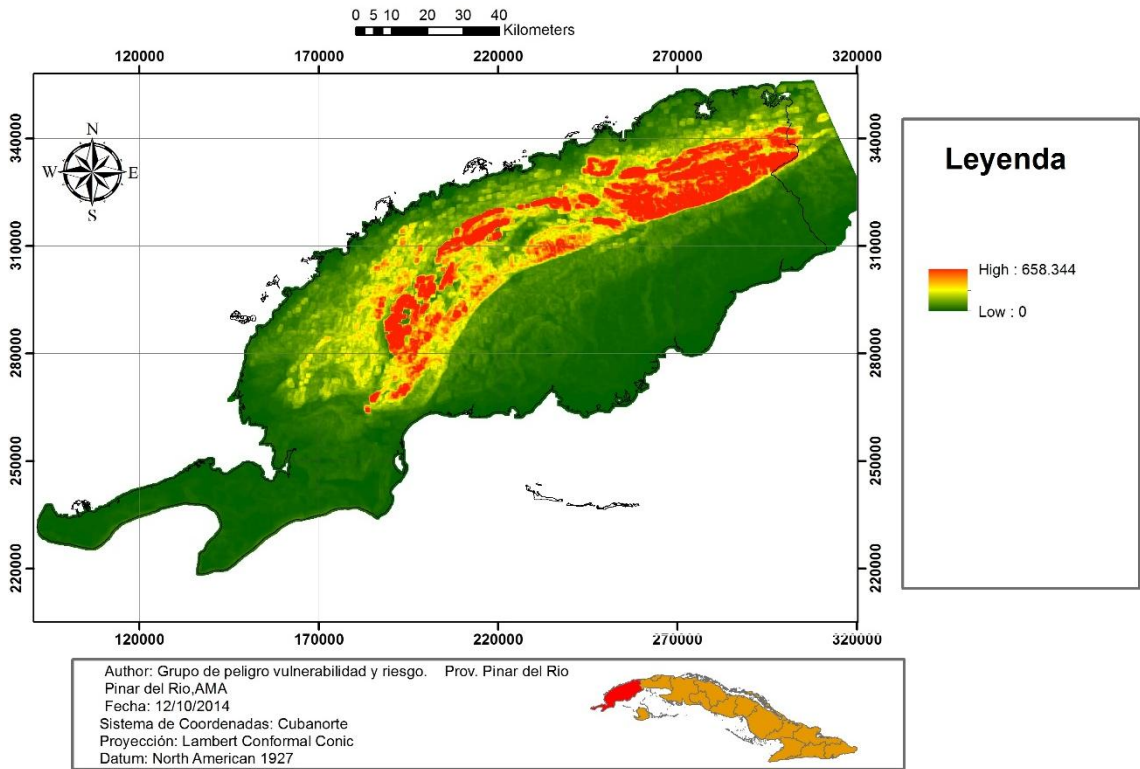
Anexo 2: Modelo de elevación digital



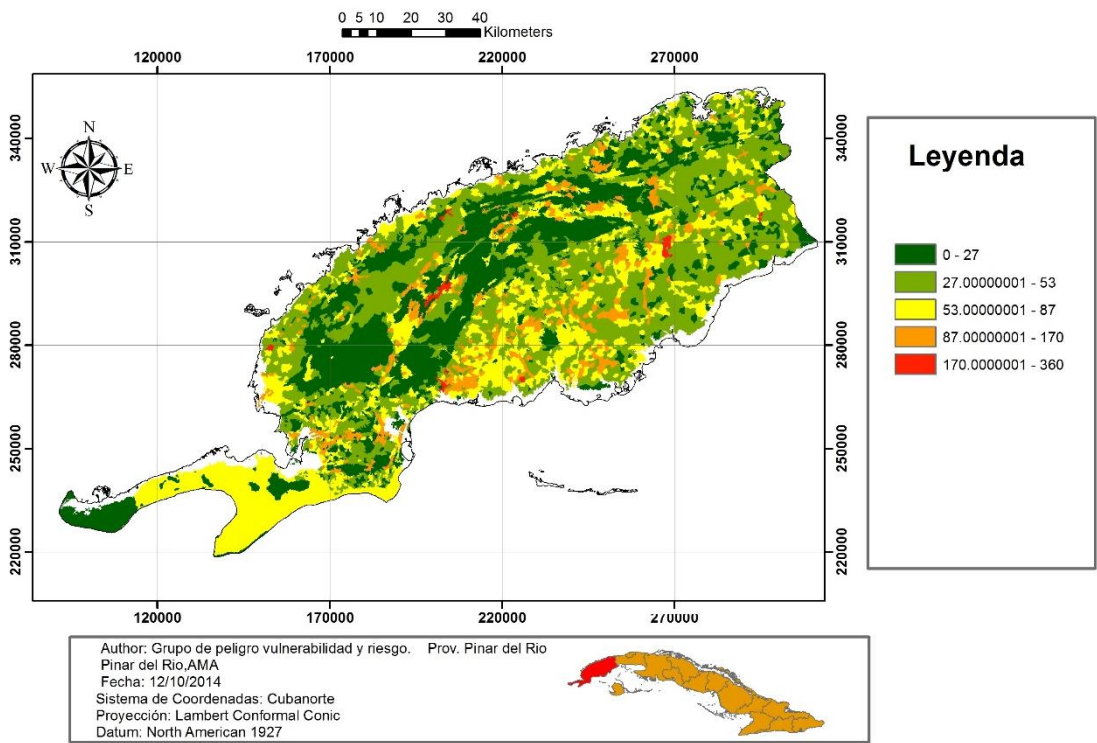
Anexo 3: Mapa de Pendiente



Anexo 4: Mapa de Disección Vertical (m/ha)



Anexo 5: Mapa de Profundidad de suelo

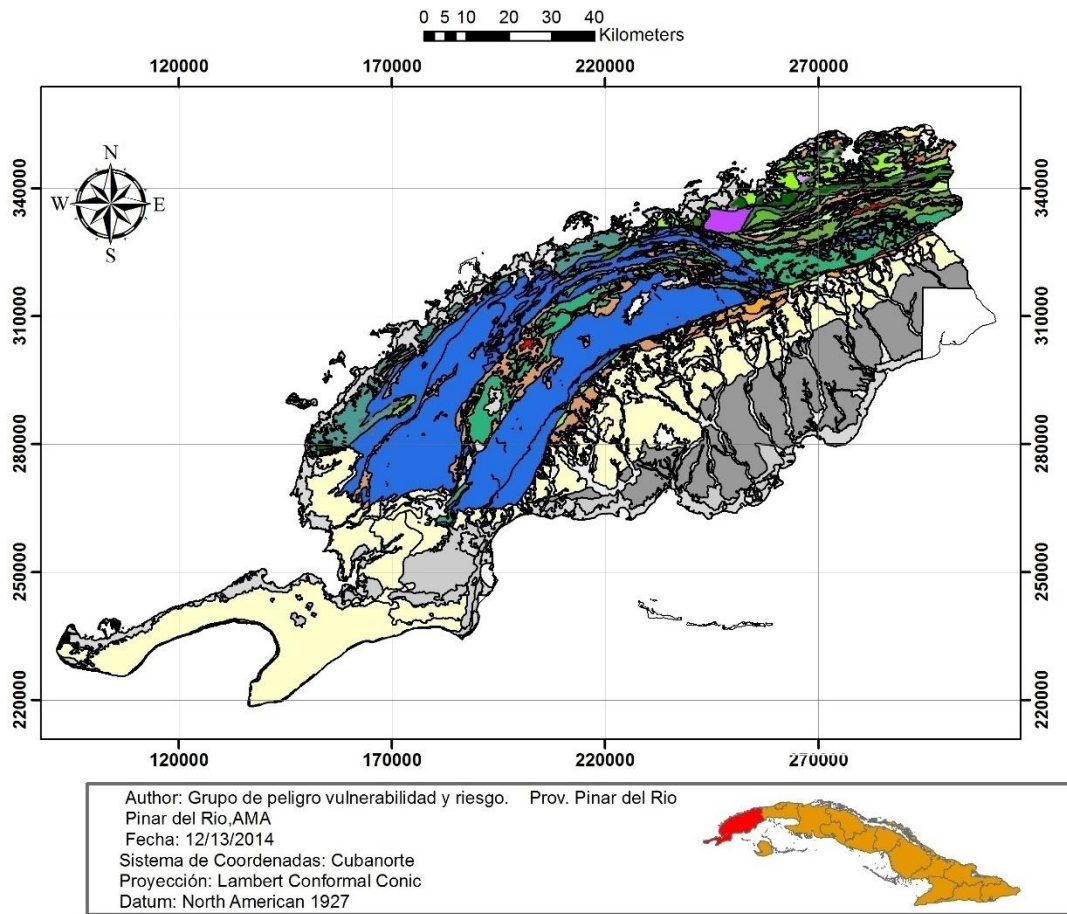


Author: Grupo de peligro vulnerabilidad y riesgo. Prov. Pinar del Río
Pinar del Río, AMA
Fecha: 12/10/2014
Sistema de Coordenadas: Cubanorte
Proyección: Lambert Conformal Conic
Datum: North American 1927

suelo

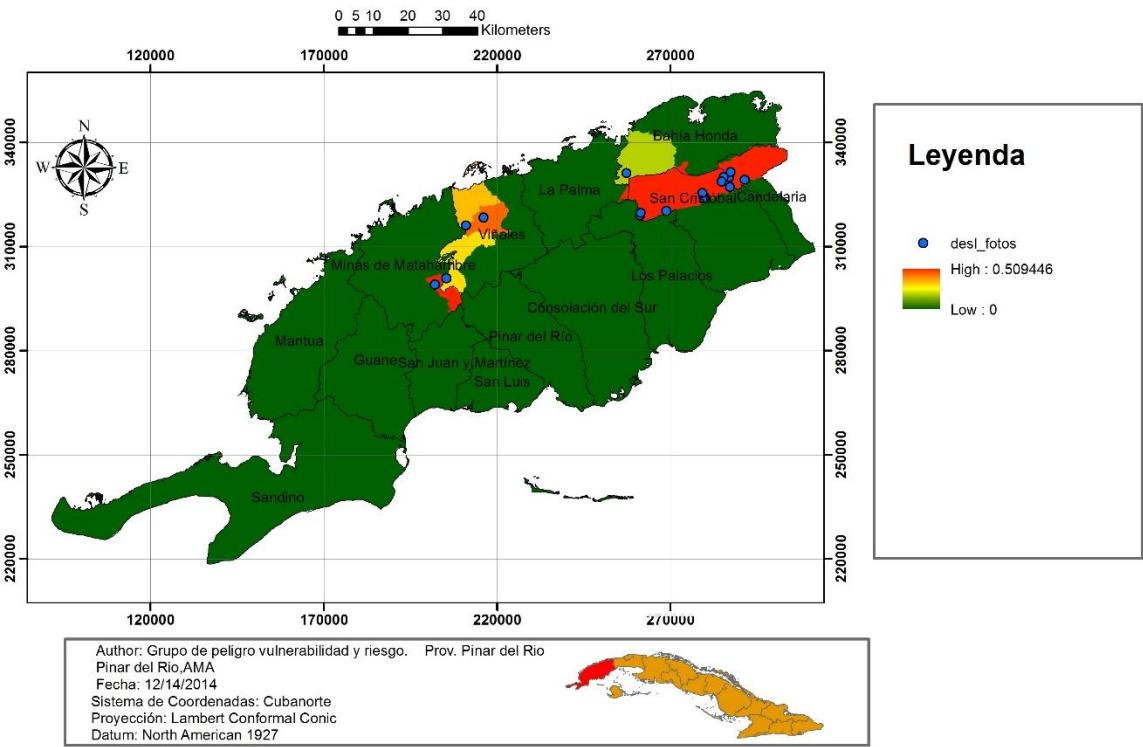
<all other values>	I	Urbano	XVI
?	II	V	XXI
Arena	III	VI	XXII
Arrecife	IV	VII	XXIII
Caserio	IX	VIII	XXV
Cgc	Jejenes	X	XXVI
Cgi	Laguna	XII	XXVII
Embalse	Macizo_Rocoso	XIII	XXVIII
	Mangle	XIV	Zona_baja
	Pica	XIX	Zona_no_Estudiada

Anexo 7: Mapa Geológico



ANCON	DEPOSITOS BIOGENICOS	DEPOSITOS ELUVIO-COLUVIALES	JAGUA	PINALILLA
ARROYO CANGRE	DEPOSITOS DE ARENA FINA (0.025-0.1mm)	DEPOSITOS MARINOS	JAIMANITAS	POLIER
ARTEMISA	DEPOSITOS DE ARENA GRUESA (10-0.5mm)	DEPOSITOS PALUSTRES	JAIMANITAS (en el mar)	PONS
BASALTOS	DEPOSITOS DE ARENA MEDIA (0.5-0.25mm)	DIABASAS	LOMA CANDELA	PRESA
BASALTOS Y DIABASAS	DEPOSITOS DE ARENAS	EL SABALO	LOS NEGROS	QUIÑONES
BUENAVISTA	DEPOSITOS DE ARENAS GRAVOSAS	ENCUCIJADA	MADRUGA	SAN CAYETANO
CACARAJICARA	DEPOSITOS DE ARENAS LIMOSAS	ESPERANZA	MANACAS	SANTA TERESA
CAMACHO	DEPOSITOS DE GRAVA FINA (25-10.0mm)	FRANCISCO	MANUELITA	SERPENTINAS DOLERITICAS?
CAPDEVILA	DEPOSITOS DE GRAVA MEDIA (5-25mm)	GABROS	MAR	SERPENTINITAS
CARMITA	DEPOSITOS DE GRAVAS ARENOSAS	GUAJAIBON	MARIEL	SIGUANEIA
CASTELLANOS	DEPOSITOS DE LIMO FINO (0.1-0.05mm)	GUANE	METAVULCANITAS	TECTONITAS
COCODRILO	DEPOSITOS DE LIMO GRUESO (0.05-0.1mm)	GUANE+GUEVARA	MORENO	UNIVERSIDAD
COJIMAR	DEPOSITOS DE LIMOS	GUASASA	OROZCO	VEDADO
CUMULOS MAFICOS	DEPOSITOS DE LIMOS ARCILLOSOS	GUEVARA	PASO REAL	VIA BLANCA
DEPOSITOS ALUVIALES	DEPOSITOS DE LIMOS ARENOSOS	GUEVARA + VEDADO	PEÑALVER	

Anexo 8: Mapa de densidad de deslizamientos

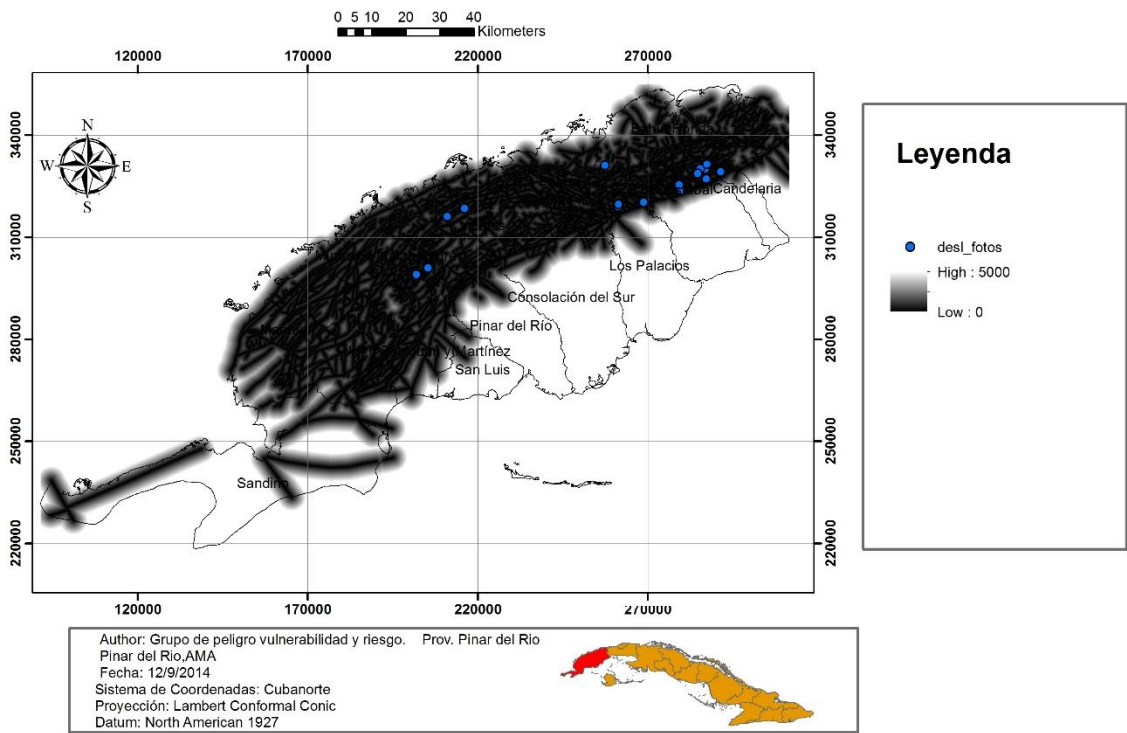


Anexo 9: Tabla de fenómenos gravitacionales como resultado del inventario de carreteras

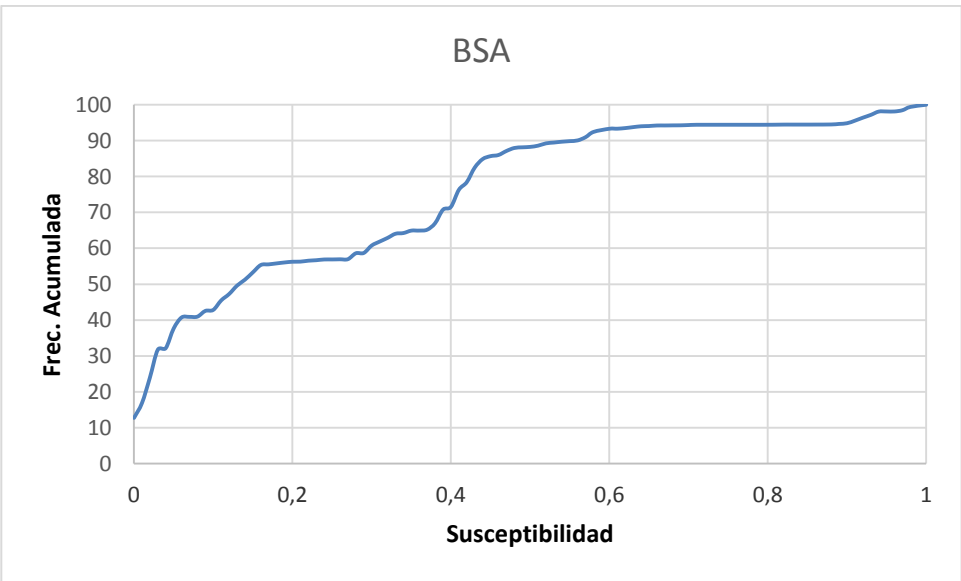
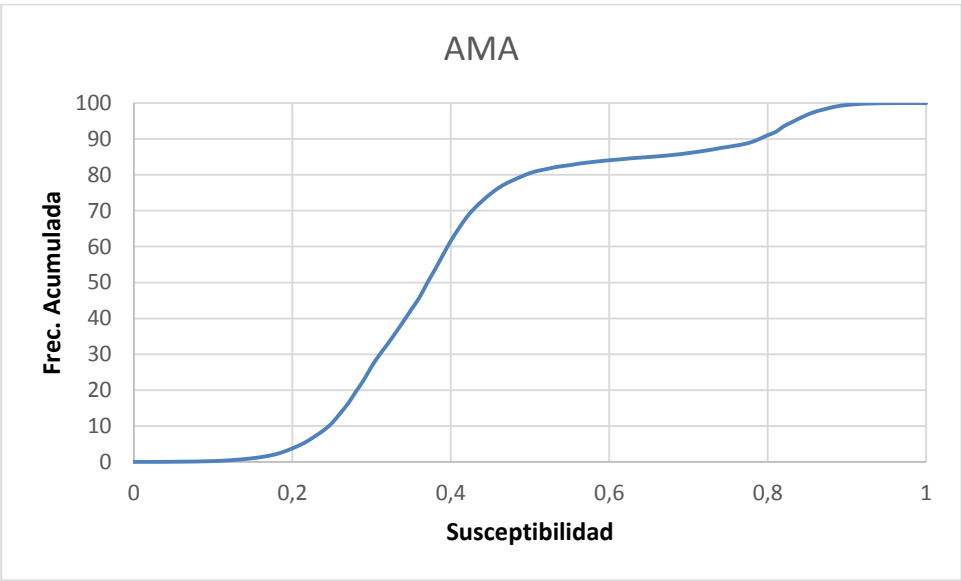
	X	Y	Formación	Tipo de Mov	Clasificación	Material	Magnitud
1	163166	269399	San Cayetano	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
2	189956	281765	Guasasa	desprendimiento	Caída	roca	mediano
3	191262	287863	Guasasa	desprendimiento	Caída	roca	mediano
4	193177	287814	Eluvio_Coluvio	flujo	Flujo	tierra	pequeño
5	214178	293549	Cangre	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
6	213688	293203	Cangre	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
7	212756	294018	Cangre	deslizamiento	rotacional	detritos	mediano
8	211700	296000	San Cayetano	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
9	223100	300300	Vía Blanca	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
10	208400	306100	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
11	214400	310300	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
12	220400	310100	San Cayetano	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
13	197900	308900	San Cayetano	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
14	240000	295800	Paso Real	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
15	243330	298100	Guane	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
16	247080	299490	Guane	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
17	243500	317800	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
18	240500	320000	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
19	240389	321838	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
20	239977	323085	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
21	233621	325065	Artemisa	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
22	262800	326500	Artemisa	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
23	267700	326000	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
24	268807	325828	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
25	268800	326400	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
26	271105	326370	Artemisa	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
27	270464	322603	Artemisa	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
28	270095	324004	San Cayetano	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
29	270840	327127	Cacarajicara	desprendimiento	Caída	roca	pequeño
30	272276	327692	Cacarajicara	desprendimiento	Caída	roca	pequeño
31	272556	327899	Cacarajicara	desprendimiento	Caída	roca	pequeño
32	273800	328500	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
33	277166	329194	Artemisa	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
34	277738	329739	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
35	278590	329705	Artemisa	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
36	279500	329350	Artemisa	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
37	280657	329199	Artemisa	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
38	280717	331247	Artemisa	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
39	281774	330468	Artemisa	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
40	282226	328269	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
41	282860	329534	San Cayetano	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño

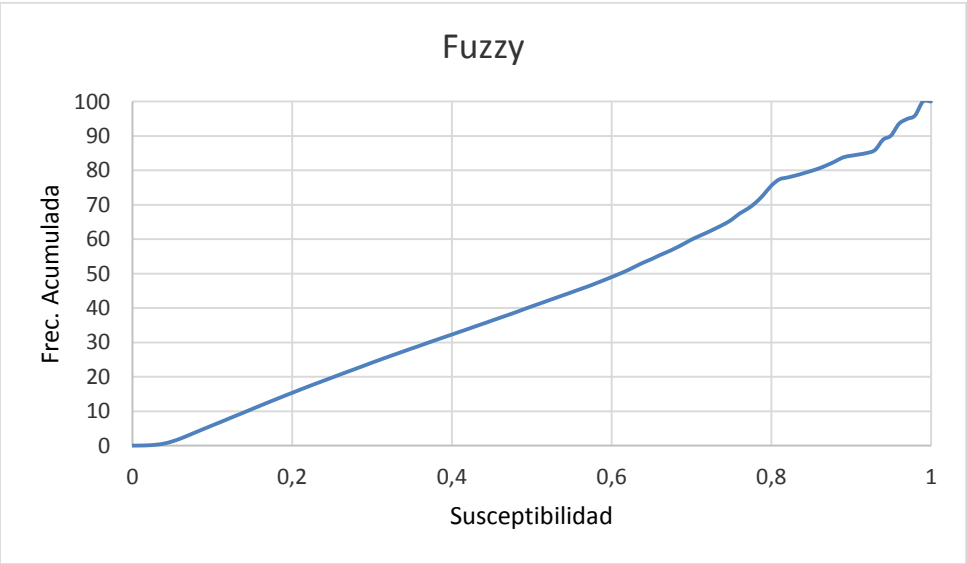
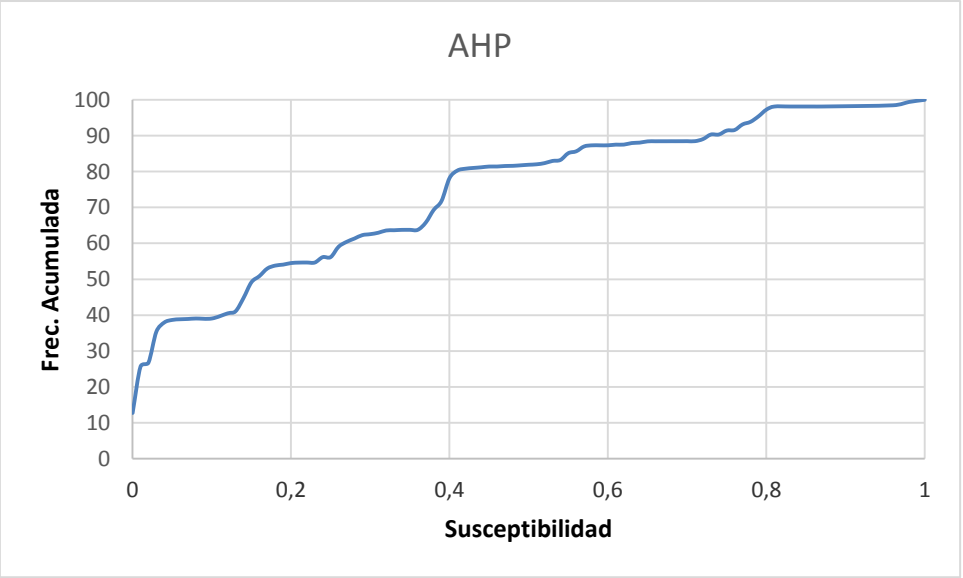
42	283005	329676	San Cayetano	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
43	284000	330300	San Cayetano	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
44	279219	334192	Serpentinitas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
45	277888	335186	Manacas	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
46	291500	333500	Polier	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
47	294000	330000	Artemisa	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
48	301950	336900	Polier	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño
49	282126	328159	Polier	deslizamiento	rotacional	detritos	pequeño

Anexo 10: Mapa de distancia a fallas

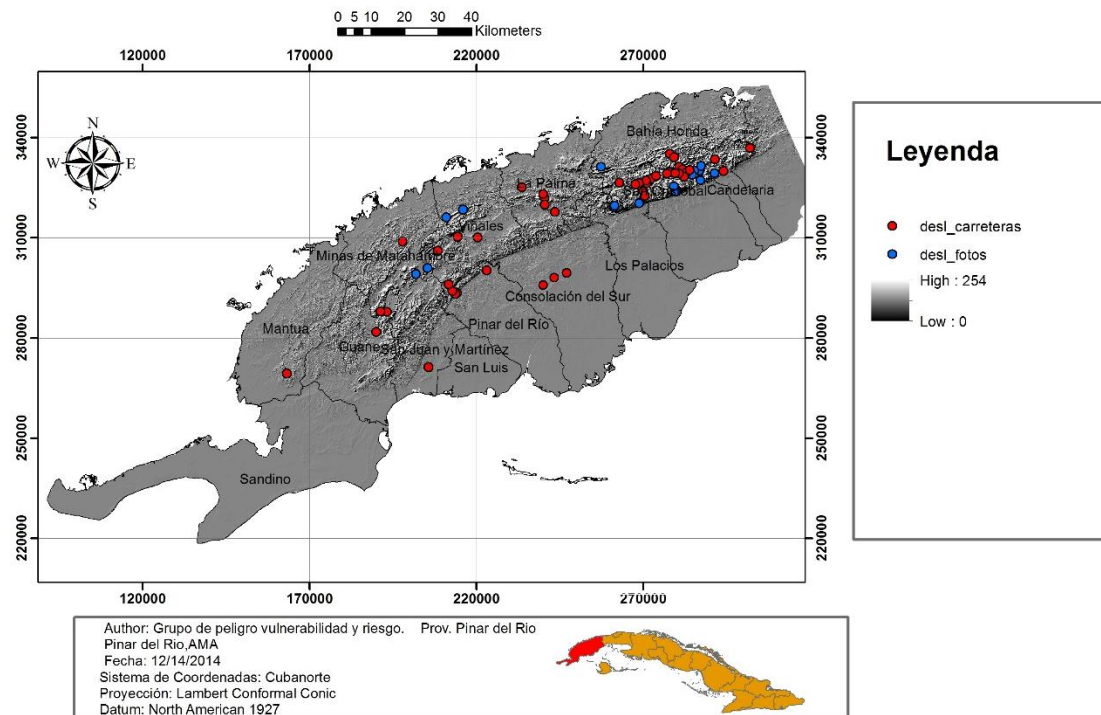


Anexo 11: Gráficos de dispersión mostrando la curva de los valores de susceptibilidad contra el área acumulada (%) para los diferentes métodos de modelación.





Anexo 12: Mapa de relieve sombreado



Anexo 13: Mapa de susceptibilidad a partir de la metodología de la AMA tomado del trabajo de diploma (Bee 2012).

