



## EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS EN UN SECTOR DEL MUNICIPIO MOA APLICANDO MÉTODOS GEOMORFOLÓGICOS Y ESTADÍSTICOS.

**Yuri Almaquer Carmenates<sup>(1)</sup>, Miguel Ángel Rodríguez<sup>(2)</sup>, María del Rosario Moradas<sup>(2)</sup>, Asel María Aguilar Sánchez<sup>(3)</sup>.**

<sup>(1)</sup> Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba; Email: [yalmaquer@ismm.edu.cu](mailto:yalmaquer@ismm.edu.cu)

<sup>(2)</sup> Universidad de Oviedo, España;

<sup>(3)</sup> Institut f. Baustoffe. Zurich, Suiza.

### RESUMEN

Los deslizamientos son procesos geodinámicos que se desarrollan con mucha frecuencia en las cortezas lateríticas del territorio de Moa, constituyendo un riesgo latente fundamentalmente en las actividades mineras. Por tal motivo se desarrolla la presente investigación que tiene como objetivo evaluar los niveles de susceptibilidad por desarrollo de deslizamientos en un sector del municipio Moa, que permita el análisis futuro de peligrosidad y riesgos debido a estos fenómenos de inestabilidad de laderas y la implementación de planes de gestión en zonas de alta vulnerabilidad. La metodología aplicada parte de la interpretación mediante criterios geomorfológicos de fotos aéreas para la confección del inventario de deslizamientos; como factores de análisis de susceptibilidad se utiliza la tectónica analizando la distancia a las estructuras activas y la densidad de fallas, la litología a través de grupos litoestructurales y la influencia de factores geomorfológicos como la pendiente de laderas y zonas geomorfológicas, realizando el estudio comparativo entre zonas de llanuras, premontañas y montañas. La valoración de la susceptibilidad se obtiene aplicando el método de probabilidad condicional implementado en un Sistema de Información Geográfica. Como resultados se obtiene el inventario de deslizamientos, su descripción morfológica, direcciones preferenciales y litologías donde se desarrollan, siendo el movimiento rotacional la tipología predominante. El mapa de susceptibilidad por deslizamientos, clasificado en varias categorías en función de la probabilidad de ocurrencia de movimientos muestra la relación directa de inestabilidades con la cercanía a las fallas y zonas de mayor densidad de fallas por Km<sup>2</sup>, litologías más susceptibles como las cortezas sobre gabros y desarrollo de movimientos en pendientes bajas de 5-10°, resultado relevante que demuestra que la inclinación de terreno no es un factor decisivo en los deslizamientos en el territorio.

### ABSTRACT

The landslides are geodynamic processes that are developed very frequently in the lateritic soils of the territory of Moa, constituting a latent risk fundamentally in the mining activities. By such reason the present investigation is developed that it has like objective to evaluate the levels of susceptibility by development of landslides in a sector of the Moa municipality, that allows to the future analysis of danger and risks due to these phenomena of slope instability and the implementation of plans of management in zones of high vulnerability. The applied methodology part of the interpretation by means of geomorphological criteria of aerial photos for the preparation of the inventory of landslides; as factors of susceptibility analysis the tectonics is used analyzing the distance to the active structures and the density of faults, the lithology through litoestructural groups and the influence of geomorphological factors like the slope and geomorphological zones, making the comparative study between zones of plains, premountains and mountains. The valuation of the susceptibility is obtained applying the implemented method of conditional probability in a GIS. As results the inventory of landslides is obtained, its morphologic description, preferential directions and lithology where they are developed, being the rotational movement the predominant typology. The map of susceptibility by landslides, classified in several categories based on the probability of occurrence of movements shows to the direct relation of instabilities with the proximity the faults and more susceptible zones of greater density of faults by Km<sup>2</sup>, lithology like the soils on basic lithology and development of movements in slope losses of 5-10°, excellent result that demonstrates that the land inclination is not a decisive factor in the landslides in the territory.



## INTRODUCCION

En los últimos años se han producido cambios profundos en las interrelaciones Hombre–Medio Geológico. El hombre ha provocado una aceleración de los agentes naturales y al mismo tiempo, en el proceso de desarrollo económico, ha generado un cierto grado de vulnerabilidad, aumentando los riesgos de las actividades socioeconómicas de ellas derivadas. Bajo estas condiciones geoambientales, los deslizamientos constituyen un peligro geológico. Por lo general estos tienen lugar en zonas de difícil acceso y poco pobladas lo que provoca impactos a pequeña escala y de poca consideración, a excepción de algunos eventos catastróficos de grandes dimensiones. Actualmente los avances en las técnicas computacionales y la generación de nuevos software, permiten realizar análisis de riesgos, determinar la susceptibilidad y la vulnerabilidad del terreno a los movimientos de masas de manera mas precisa y confiable. En la actualidad los Sistemas de Información Geográfica (SIG), realizan el análisis de la susceptibilidad a la rotura por deslizamiento, así como la elaboración de mapas de peligrosidad de manera sistemática, rápida y eficiente, tratando con grandes bases de datos y realizando cálculos para la estimación de la susceptibilidad que no eran viables en grandes áreas.

En la evaluación del grado de susceptibilidad de terrenos frente a deslizamientos se aplican varias aproximaciones probabilísticas, las cuales se basan en la determinación de los factores que influyen en la inestabilidad del medio, caracterizados por mapas de factores condicionantes, que se combinan para definir los distintos grados de predisposición, obteniendo como resultado los mapas de susceptibilidad. La presente investigación se realiza como parte de la aplicación de estas técnicas en la solución de problemas relacionados con deslizamientos desarrollados en suelos lateríticos y en un entorno minero de gran importancia desde el punto de vista económico por encontrarse yacimientos ferroniquelíferos. La problemática tratada consiste en la ocurrencia de deslizamientos en taludes y laderas del territorio de Moa, lo cuál genera riesgos debido a la vulnerabilidad de la infraestructura de las actividades socioeconómicas, dado principalmente por el grado de exposición y por la peligrosidad condicionado por la predisposición del terreno frente a estos fenómenos y la acción de agentes dinámicos como las intensas lluvias y la sismicidad del territorio. Como objetivo se plantea evaluar los niveles de susceptibilidad por deslizamientos en los suelos lateríticos aplicando un Sistema de Información Geográfica que sirva de base en futuras evaluaciones de riesgos para prevenir o mitigar los daños derivados de estos fenómenos.

El área de la investigación se encuentra en el municipio de Moa, ubicado en el extremo oriental de la provincia de Holguín, Cuba; forma parte del grupo orográfico Sagua-Baracoa, lo cual hace que el relieve sea predominantemente montañoso, principalmente hacia el sur, y hacia el norte el relieve se hace más suave, disminuyendo gradualmente hacia la costa (figura 1).

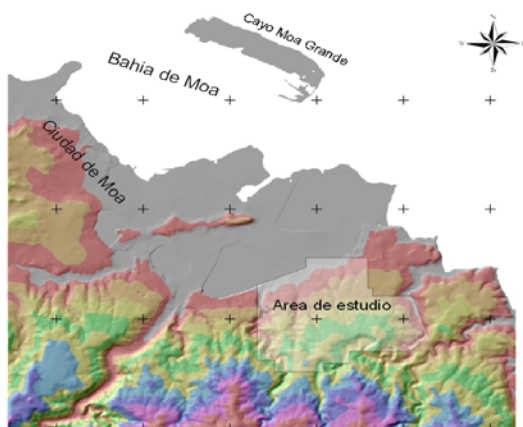




Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio

La abundancia de precipitaciones y las características del relieve, favorecen la existencia de una red fluvial bien desarrollada del tipo dendrítica, que corre de sur a norte. Está representada por numerosos ríos y arroyos entre los que se destacan: Yamanigüey, El Medio, Semillero, Quesigua, Cayo Guam, Punta Gorda, Yagrumaje, Moa, Cabaña y Aserrío los cuales son de carácter permanente. Estos ríos desembocan en la Bahía de Moa, formando deltas cubiertos de mangles; forman terrazas al llegar a la zona de pie de monte y presentan numerosos meandros.

El clima en la región es tropical húmedo, siendo una de las áreas de mayor pluviometría del país, condicionado por las características orográficas. Las precipitaciones son abundantes en todo el año alcanzando 2000-2600mm; los períodos de lluvia son de mayo-junio y octubre-febrero y dos de sequías marzo-abril y julio-septiembre; la cantidad de lluvia media de precipitaciones es de 2500 mm.

Para la caracterización geológica, se consultaron los trabajos de Iturralde-Vinent (1990), Lewis et al (1990), Morris (1990), Campos (1991), Rodríguez (1998). El área de estudio se relaciona, desde el punto de vista regional, al desarrollo de sistemas de arco insulares y cuenca marginal durante el mesozoico, y a su extinción a fines del Campaniano Superior-Maestrichtiano. Debido a procesos de acreción tectónica, se produce la obducción del complejo ofiolítico, según un sistema de escamas de sobrecorrimiento, sobre el borde pasivo de la Plataforma de Bahamas. Relativo a la morfotectónica, el área de estudio se encuentra ubicado en el Bloque El Toldo, el cuál ha manifestado los máximos levantamientos relativos de la región (Rodríguez, 1998). La litología está representada por rocas del complejo máfico y ultramáfico de la secuencia ofiolítica, sobre las cuales se ha desarrollado un relieve de montañas bajas de cimas aplanadas ligeramente diseccionadas.

En el área aparecen tres grandes conjuntos litológicos:

1. El basamento que revela una alta complejidad tectónica y mediana complejidad litológica. La litología que predomina es la peridotita serpentizada. Se localizan fajas de serpentinita foliada, esquistosa y budinada, que coinciden con las zonas de contacto entre mantos tectónicos imbricados.
2. La corteza de meteorización residual que está desarrollada principalmente sobre peridotitas de tipo harzburgitas, serpentinitas, y en menor grado gabro olivínico, plagioclasita y anfibolita:
3. Las lateritas redepositadas (o sedimentarias) formados por lateritas redepositadas, intercaladas en ocasiones con arcillas pardo oscuras con material carbonizado, lentes conglomeráticos y arenosos con fragmentos predominantes de ultramafitas y en ocasiones de gabros. También pueden presentarse algunos horizontes calcáreos con gran contenido de fauna.

Las aguas subterráneas del área siguen la morfología del terreno, con flujos predominantes hacia el norte en la mayor parte del área, pudiendo tener sentido diferente y hasta opuesto hacia los principales cursos de aguas superficiales. El gradiente varía entre 0.03 ° y 31.7° (De Miguel, 1998, 2004; Blanco et al, 2004). Las rocas acuíferas son las serpentinitas agrietadas y presentan un importante flujo lateral por la zona del contacto con la corteza laterítica. En las lateritas el movimiento del agua es fundamentalmente de ascenso capilar, que varían entre 0.0 m a 25.5 m. (De Miguel et al, 1998). La permeabilidad en las lateritas oscila entre 0.006 y 0.21 m/días; los valores más altos se corresponden a los horizontes de ocre inestructurales con perdigones y los más bajos a los ocre estructurales.

## METODOLOGIA

Para realizar el análisis de susceptibilidad se parte de una hipótesis de trabajo que permite orientar la selección de parámetros que caracterizan las laderas así como su tratamiento y posterior interpretación, y que tiene las siguientes condiciones:



- La base de los taludes y las laderas está constituido por un substrato rocoso impermeable compuesto por rocas ultrabásicas serpentizadas y en menor medida por básicas. Sobre éste yace, en la mayor parte del área, una corteza laterítica residual y en el resto del área, de forma discordante, una corteza laterítica redepositada. De forma intercalada, aparecen arcillas, formadas a partir de la meteorización de rocas básicas (gabros).
- Las cortezas lateríticas, por sus propiedades físicas y composición mineralógica, presentan gran capacidad de almacenaje, acumulando considerables cantidades de aguas que son transmitidas muy lentamente, manteniéndose con alta humedad durante todo el año. Esta situación aumenta el peso, las presiones intersticiales en los poros y disminuye las propiedades resistentes de los suelos.
- Las condiciones estructurales del sistema roca-suelo, junto a las propiedades geomecánicas, determinan los mecanismos y tipologías de deslizamientos desarrollados en el área.

De esta forma, en los lugares que converjan todas estas condicionantes, fallas, intenso agrietamiento, altas subpresiones en la corteza y presencia de intercalaciones de arcillas formadas a partir de la descomposición de gabros, se deben manifestar roturas o inestabilidades.

### Factores condicionantes utilizados en el análisis de susceptibilidad.

Teniendo en cuenta los criterios de inestabilidad y los factores condicionantes, sobre la base de los reconocimientos de campo, se seleccionaron los factores utilizados en el análisis de susceptibilidad para su tratamiento mediante técnicas estadísticas (tabla I). La utilización combinada de estos factores genera un mapa residual, que explica que lugares son mas o menos susceptibles al desarrollo de deslizamientos, a cada uno se le asigna un valor o significado, por su influencia de favorecer o reducir la posibilidad de rotura de los taludes y laderas, en función de la cantidad de área ocupada por deslizamientos en las clases de cada factor. Por el tamaño del área del yacimiento (8.75 Km<sup>2</sup>), el grado de estudio, las características de la información de base y del sistema Hardware-Software se utilizó como escala de trabajo 1:2 000.

Tabla I. Relación de factores utilizados en el análisis de susceptibilidad.

Factores de análisis de susceptibilidad del terreno a la rotura	Internos	Características intrínsecas	Factor litológico	Grupos lito-estructurales
			Factor tectónico	Fallas, grietas, diques
		Características extrínsecas	Factor geomorfológico	Pendiente umbral de deslizamientos
	Externos	Factor hidrogeológico		Subpresión de la corteza laterítica, nivel freático, gradiente crítico.
		Factor de uso actual del suelo		Uso de suelo

### Inventario de deslizamientos.

El inventario se confeccionó a partir de campañas de reconocimiento de campo, a escala 1:2 000, ejecutadas desde el año 1997, en las cuales se describieron todos los deslizamientos desarrollados en el área. Para perfeccionar el cartografiado de los movimientos, fundamentalmente los de mayor extensión, se utilizó la técnica de interpretación fotogeológica a escala 1:36 000, utilizando los siguientes criterios de reconocimiento:

- 1- Laderas de altas pendientes con depósitos extensos de suelo y rocas es los pies de las mismas.
- 2- Presencia de líneas nítidas relacionadas con escarpes.
- 3- Superficies onduladas formadas por el deslizamiento de las masas de suelo desde los escarpes. Formas topográficas onduladas no naturales semejantes a una concha.



- 4- Depresiones alargadas.
- 5- Acumulación de detritos en canales de drenajes y valles.
- 6- Presencia de tonos claros donde la vegetación y el drenaje no han sido restablecidos.
- 7- Cambios bruscos de tonos claros a oscuros en las fotografías (tonos oscuros indican zonas húmedas).
- 8- Cambios bruscos de la vegetación, indicando variaciones en una unidad de terreno.

## Información básica

La información litológica se trabajó clasificando las rocas en grupos lito-estructurales, teniendo en cuenta sus susceptibilidades, resistencia y características litológicas (tabla II). El área se clasificó en cuatro clases: roca debilitada tectónicamente representado por rocas ultrabásicas serpentinizadas y rocas básicas; roca con apariencia de suelo con estructura de la roca original representada por la corteza laterítica residual; roca con apariencia de suelo con estructura sedimentaria representada por la corteza laterítica redepositada y materiales granulares representada por los sedimentos aluviales.

Las características estructurales del macizo rocoso fueron analizadas a través la información de yacencia de grietas, fallas y diques de gabros; se midieron parámetros como abertura, espaciamiento, tipo de relleno, consistencia del relleno, continuidad, condiciones hidrogeológicas y característica de la superficie de la grieta. Las fallas se detectaron a través de reconocimiento de campo, análisis fotogeológico y procesamiento del modelo digital de elevaciones de superficie y del substrato rocoso. Este último sirvió para detectar estructuras enmascaradas por los procesos denudativos de superficie. La información estructural se utilizó en el análisis de los mecanismos y tipologías de movimientos de masas mediante la técnica de proyección estereográfica, comparando la posición relativa de las familias de grietas y las laderas y taludes.

Tabla II. Caracterización de los grupos lito-estructurales del área de estudio.

Factor litológico			
Grupos lito-estructurales		litologías	Características
1	Roca debilitada tectónicamente	Rocas ultrabásicas serpentinizadas Rocas básicas (gabro)	Muy susceptibles a la meteorización (amplio desarrollo de cortezas de intemperismo). Zonas trituradas e intensamente fracturadas con presencia de espejos de fricción y foliación secundaria. Se manifiestan caídas de bloques, vuelcos y roturas en cuña. Se comportan como rocas acuíferas.
2	Roca con apariencia de suelo con estructura de la roca original	Corteza laterítica residual	Susceptibles a procesos de erosión laminar y en cárcavas. El deterioro primario ocurre como lavado superficial y arrastre de granos con flujos de detritos, y deslizamientos como modos secundarios. Los mecanismos secundarios están controlados, principalmente, por la estructura relíctica de la roca original y en menor medida por las propiedades físico-mecánicas de los materiales. Presenta gran capacidad de almacenaje de agua, aunque la transmiten muy lentamente.
3	Roca con apariencia de suelo con estructura sedimentaria	Corteza laterítica redepositada	Susceptible a procesos de erosión laminar y en cárcavas. Los mecanismos secundarios están controlados por las propiedades físico-mecánicas de los materiales. Presenta gran capacidad de almacenaje de agua, aunque la transmiten muy lentamente.
4	Materiales granulares	Sedimentos aluviales (grava, arena y	Son susceptibles a la erosión fluvial.



		arcilla)	
--	--	----------	--

Para evaluar la influencia de las condiciones hidrogeológicas sobre el desarrollo de deslizamientos se analizaron varias variables como el nivel de aguas subterráneas, la dirección y gradiente de los flujos, y las subpresiones de la corteza laterítica. Se confeccionó el mapa de hidroisohipsas del área clasificado en 6 clases: 0m, 5m, 10, 15m, 20m y 25m y permitió el análisis del gradiente hidráulico y la dirección de los flujos subterráneos. Se utilizó el mapa de presiones de poros de la corteza laterítica, utilizando información de 43 pozos hidrogeológicos presentes en el área, generando un mapa de isolíneas, dividido en cuatro clases principales: presión nula, baja, alta y muy alta.

El elemento geomorfológico utilizado es la pendiente umbral de deslizamientos, obteniendo un mapa clasificado en cuatro clases, 0°-9°, 10°-19°, 20°-40° y mayor de 40°. La influencia de la pendiente sobre el desarrollo de deslizamientos, se determina comparando la cantidad de movimientos y la longitud de los escarpes de los deslizamientos desarrollados por cada clase de pendiente.

### Metodología de valoración de la susceptibilidad.

El análisis estadístico está basado en la relación observada entre cada factor condicionante analizado y la distribución espacial o temporal de los deslizamientos. La fortaleza funcional del método aplicado es directamente dependiente de la calidad y cantidad de los datos disponibles para el análisis. La aproximación estadística puede ser aplicada siguiendo diferentes técnicas las cuales difieren en el procedimiento estadístico aplicado (univariado o multivariado) y del tipo de unidad de terreno utilizada.

La técnica estadística aplicada en la investigación es el análisis condicional, que aunque es simple conceptualmente, no lo es operativamente; intenta evaluar la relación probabilística entre los factores condicionantes relevantes seleccionados y la ocurrencia de deslizamientos en el área. El basamento teórico parte del teorema de Bayes, conforme al cual los datos de frecuencia, tales como área de deslizamientos o cantidad de deslizamientos, pueden ser usados para calcular probabilidades que dependen de la ocurrencia de eventos previos.

El análisis condicional, que fue usado por primera vez en la exploración de minerales sólidos e hidrocarburos, puede ser aplicado clasificando el área de estudio en unidades de condiciones únicas (UCU). La frecuencia de deslizamientos se determina:

$$LF = \text{Área de deslizamientos} / \text{Área de UCU}$$

Como se mencionó anteriormente, de acuerdo al teorema de Bayes, LF es igual a la probabilidad condicional (P) de ocurrencia de deslizamientos (L) dado por el grupo de factores condicionantes, obteniéndose UCU, es decir:

$$P(L|UCU) = \text{Área de deslizamientos} / \text{Área de UCU}$$

Por comparación de las diferentes probabilidades condicionales de los diferentes factores para el área de investigación, con la probabilidad de deslizamiento media para el área total de trabajo (ER), es decir:

$$P(LER) = \text{Área de deslizamientos} / \text{Área total ER}$$

Es posible clasificar el área de trabajo en zonas de niveles diferentes de susceptibilidad, y más tarde reclasificado en clases apropiadas.

Modelo estadístico empleado.

A partir de la base teórica del teorema de Bayes, y bajo varias aproximaciones probabilísticas, se seleccionó la siguiente ecuación para la valoración de las clases de los diferentes factores usados en el análisis de susceptibilidad (Almaguer, 2005):



$$V_c = \left[ \left( \frac{X_i}{Y_i + G} \times \frac{X}{Y} \right) + \sum \left( \frac{X_n}{Y_n} \times \frac{X}{Y} \right) \right] \times 1000$$

**Donde:**

$V_c$ : valor de la clase analizada.

$X_i$ : área ocupada por deslizamientos en la clase lito-estructural.

$Y_i$ : área de la clase del grupo lito-estructural.

$G_i$ : área ocupada por cuerpos de gabros en la clase lito-estructural.

$X_n$ : área ocupada por deslizamientos en la clase analizada.

$X$ : área total ocupada por deslizamientos.

$Y_n$ : área de la clase analizada.

$Y$ : área total de la zona de estudio.

En la figura 2 se muestra la aplicación del análisis condicional en ambiente SIG para la caracterización de los planos temáticos de factores condicionantes y posterior valoración de susceptibilidad. La valoración de todos los factores se realizó en función de la cantidad de área ocupada por deslizamientos en cada clase, sin embargo, en el caso del factor litológico se realizó un análisis adicional, debido a la particularidad que presenta el yacimiento de poseer, además de las litologías aflorantes en superficie, la presencia de cuerpos de gabro, tanto en el substrato como intercalados en la corteza laterítica, de manera que fue preciso incluir la influencia de estos cuerpos en el análisis de susceptibilidad. Una vez valoradas todas clases de los factores analizados, se procedió a la conversión en formato raster con tamaño de celda de 5x5 m (figura 3) y la posterior reclasificación de cada plano temático mediante el análisis de cluster, que es una técnica estadística multivariada, que se usa para identificar o clasificar características similares en un grupo de observaciones. De esta forma se determinaron las clases de susceptibilidad para cada factor, para las combinaciones entre estos y para la obtención del plano final de susceptibilidad.

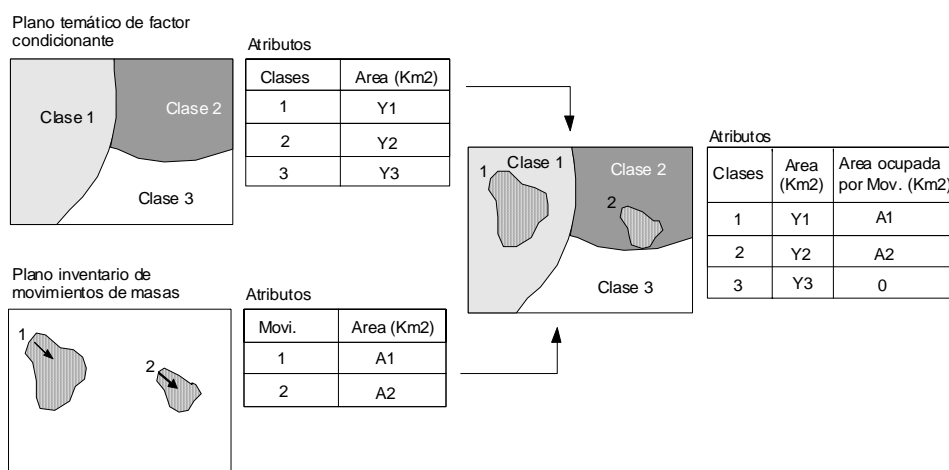
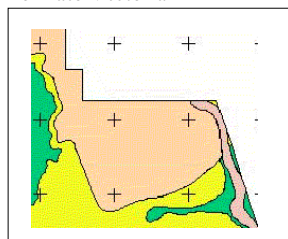


Figura 2. Procedimientos para la caracterización y combinación de factores condicionantes mediante técnicas SIG, a través del análisis de probabilidad condicional.

La metodología aplicada en la investigación, se resume en la figura 4, donde se presenta la estructura del SIG implementado y el orden lógico de los procedimientos para la obtención del plano final de susceptibilidad.



Plano temático de factores condicionantes.  
Formato Vectorial



#### RASTERIZACION (5X5 m)

Transformación en formato raster.  
Tamaño de celda 5x5 m.

Reclasificación de los planos temáticos a partir del valor de las clases obtenido en el análisis de probabilidad condicional

Obtención de los planos de susceptibilidad de cada plano temático

Plano de susceptibilidad de factores condicionantes.  
Formato Raster

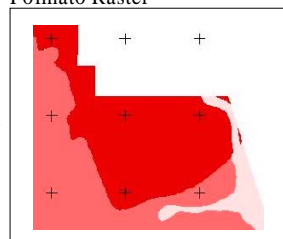


Figura 3. Proceso de rasterización y reclasificación para la obtención de planos de susceptibilidad de factores condicionantes.

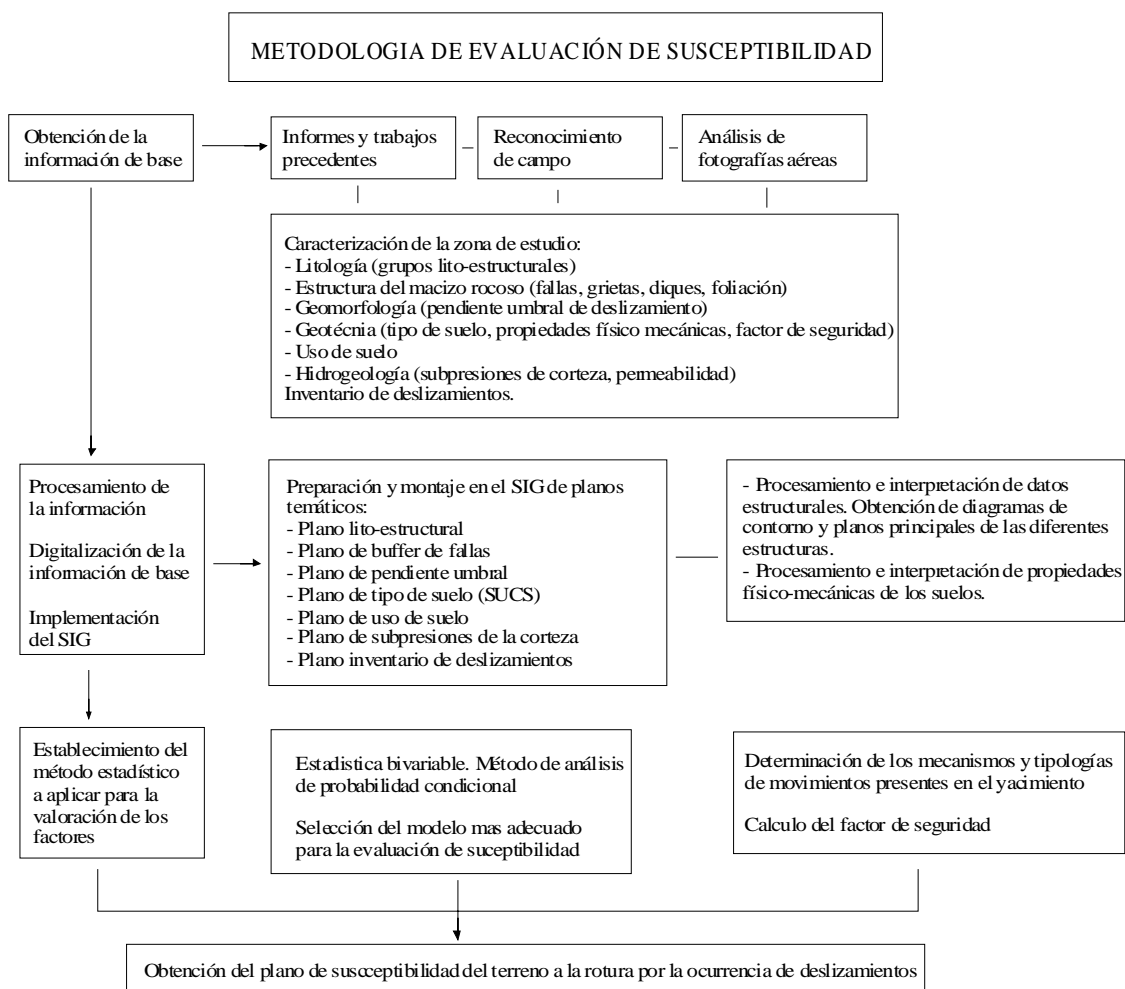


Figura 4. Metodología empleada en la evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Para evaluar el grado de susceptibilidad del terreno frente a los deslizamientos existen diversas aproximaciones basadas, la mayor parte de ellas, en la determinación de los factores que influyen en la aparición de las roturas. En general, estos factores se combinan para definir los distintos grados de susceptibilidad, expresándose los resultados de forma cartográfica mediante los mapas o mapas de susceptibilidad. La clasificación de los métodos empleados para evaluar la susceptibilidad a la rotura



de una ladera, así como para la realización de mapas, varían según los autores (Hansen, 1984; Hartlén y Viberg, 1988; Corominas, 1987 y 1992; Van Westen, 1993 y 1994; Carrara et al., 1995; y Leroi, 1996). Aunque existen diversas técnicas de estimación, todas ellas se basan en el principio del actualismo. El principio expresado según Varnes (1984) afirma que *“el estudio del pasado y del presente es la clave de lo que puede ocurrir en el futuro”*. En referencia a los deslizamientos, significa que las roturas que pueden ocurrir en un futuro, es probable que lo hagan en las mismas condiciones en que ocurrieron los deslizamientos antiguos o actuales.

A continuación se muestran los resultados del análisis de los factores condicionantes y su influencia sobre las inestabilidades, y la aplicación de los métodos estadísticos en la cartografía de susceptibilidad del terreno al desarrollo de deslizamientos en el área investigada.

### Descripción y cartografía de los deslizamientos.

Los primeros trabajos realizados, con vista al análisis de la susceptibilidad del terreno, fueron de reconocimiento del área para ubicar y caracterizar los deslizamientos existentes y crear el mapa de inventario de los mismos (figura 6).

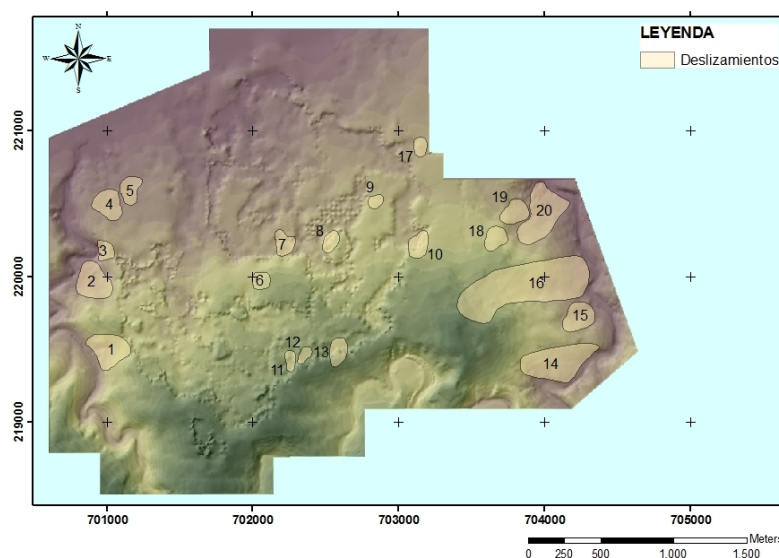


Figura 5. Inventario de deslizamientos del área.

### Clasificación de los deslizamientos.

Los movimientos de laderas y taludes, desarrollados en el área del yacimiento, son fenómenos asociados al mecanismo de rotura de la corteza laterítica y al tipo de desplazamiento de los volúmenes de materiales o de sus partes móviles unidas entre sí, que componen el cuerpo de los movimientos. El conocimiento del mecanismo de las roturas, permiten entender la física del proceso, revelar los esquemas de calculo mas reales y elegir las medidas ingenieriles que permitan debilitar los esfuerzos de dislocación y/o aumentar la resistencia de las rocas. Así, para revelar el mecanismo de los deslizamientos que tienen lugar en el área de estudio fue necesario un estudio detallado de la estructura y las propiedades físicas y mecánicas de las rocas y suelos y la dinámica de los movimientos. Para realizar la descripción de los movimientos y las definiciones de los distintos mecanismos, se ha tomado como base los trabajos propuestos por Varnes (1978), Lontadze (1982), Hutchinson (1988), WP/WLI (1993), y Cruden y Varnes (1996).

Los mecanismos que se desarrollan en el área son movimientos a través de una superficie de rotura definida, con tipologías rotacionales (figura 6). Generalmente la masa de suelo desplazada se divide



en bloques o escalones que experimentan un giro según un eje situado por encima de su centro de gravedad. El material de la cabecera de los escalones se inclina contra la ladera, generando depresiones paralelas a la corona del talud o ladera a través de la cuál se infiltran las aguas superficiales y pueden lograr reactivaciones. Generalmente hay presencia de agua y la parte frontal del cuerpo del deslizamiento evoluciona como una colada de suelo. En algunos casos este tipo de movimiento se desarrolla en laderas compuestas por roca serpentinizada, en la cuál el espaciado de las grietas es tan pequeño que le confiere un comportamiento tipo suelo (Almaguer, 2005).



Figura 6. Escarpe principal de un deslizamiento rotacional en suelos lateríticos en el territorio de Moa (Almaguer, 2005).

### Descripción de los factores que intervienen en el surgimiento de inestabilidades.

Para el análisis de la susceptibilidad del terreno frente al desarrollo de deslizamientos se utilizaron como factores condicionantes la litología, las condiciones tectónicas, las condiciones hidrogeológicas, el uso de suelo, la geomorfología y las condiciones geotécnicas de los suelos.

Relación de las características litológicas con el desarrollo de deslizamientos.

Para el análisis litológico, el área de estudio se dividió en cuatro grupos lito-estructurales principales, los cuales por orden de predominio son: roca con apariencia de suelo con estructura de la roca original (lateritas residuales: 48,7 %), roca debilitada tectónicamente (rocas ultrabásicas serpentinizadas: 26,8 %), roca con apariencia de suelo con estructura sedimentaria (lateritas redepositadas: 15,6 %) y materiales granulares (sedimentos aluviales: 8,8 %).

Del análisis realizado de cada una de las litologías, y la comparación del mapa correspondiente con el inventario de deslizamientos (tabla III), las mas afectadas son las lateritas residuales (0,456 Km<sup>2</sup>) lo que representa un 52,7 % del área total ocupada por deslizamientos, en segundo lugar las rocas serpentinizadas (0,21 Km<sup>2</sup>) y las lateritas redepositadas (0,18 Km<sup>2</sup>) lo que representa un 24,7 y 21,7 % respectivamente.

Influencia de las condiciones estructurales del macizo sobre el desarrollo de deslizamientos.

*Influencia del agrietamiento del macizo rocoso serpentinado.*

Como se ha descrito anteriormente, el agrietamiento juega un papel decisivo en el desarrollo de los movimientos en el área de estudio, influyendo sobre todo, en los mecanismos y tipologías de las roturas. A continuación se muestran dos ejemplos de tipologías de movimientos condicionados por la posición relativa de las familias de grietas y la dirección de los taludes o laderas. Como base, se toma



el mapa de direcciones de agrietamiento confeccionado con las mediciones de elementos de yacencia tomadas en los bloques de explotación con afloramientos del substrato rocoso.



Tabla III. Caracterización de los grupos lito-estructurales en relación al desarrollo de deslizamientos.

Grupo lito-estructural	Litologías	Área (Km <sup>2</sup> )	% de área total	Área ocupada por cuerpos de gabro	% del área total ocupada por cuerpos de gabro	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos
Roca debilitada tectónicamente	Serpentinitas de cauce	1,8031	20,6068	0,0079	5,4861	0	0
	Serpentinitas lixiviadas	0,5319	6,0861	0,0314	21,8055	0,2147	24,77
Roca con apariencia de suelo con estructura relíctica de la roca original	Lateritas residuales	4,2700	48,7270	0,0635	44,0972	0,4568	52,70
Roca con apariencia de suelo con estructura sedimentaria	Lateritas redepositadas	1,3720	15,6560	0	0	0,1888	21,78
Materiales granulares	Sedimentos aluviales	0,7700	8,7860	0	0	0,0065	0,75

Relación de las condiciones hidrogeológicas con el desarrollo de deslizamientos.

*Influencia del nivel freático sobre el desarrollo de deslizamientos.*

En análisis se realiza a partir del mapa de hidroisohipsas, clasificado en 6 clases: 0m, 5m, 10m, 15m, 20, y 25m. Los niveles más bajos se distribuyen hacia el norte, sur, este y oeste del área. Los niveles de 5m están distribuidos en región central de área, con cierta alineación noreste-suroeste. Los niveles de 10m aparecen hacia el este y oeste. Los restantes niveles por encima de 15m solamente aparecen hacia el este y sureste del yacimiento.

Comparando el mapa del nivel freático con el inventario de deslizamientos (tabla IV) da como resultado que en los niveles mínimos (0m) y máximos (25m) no se reportan movimientos. En los 5m y 20m se desarrollan el 9,4% y 9,3% respectivamente, en los 15m el 23,3% y en el nivel 10m se reporta el mayor porcentaje de área ocupada por deslizamientos, 57,9%.

Tabla IV. Caracterización del mapa de hidroisohipsas en relación al desarrollo de deslizamientos.

Nivel freático (m)	Área (Km <sup>2</sup> )	% del área total	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos
0	1,2083	13,80	0	0
5	3,2083	36,66	0,0819	9,45
10	2,8783	32,89	0,5019	57,90
15	1,1283	12,89	0,2019	23,29
20	0,2883	3,29	0,0809	9,33
25	0,0383	0,44	0	0

*Análisis del gradiente crítico y del proceso de sifonamiento. Influencia sobre las inestabilidades.*

El estudio del gradiente crítico se realizó para cada horizonte ingeniero-geológico utilizando finalmente el valor medio para compararlo con el gradiente hidráulico obtenido mediante el mapa de hidroisohipsas. El valor del gradiente crítico para el horizonte serpentinitas lixiviadas es de 0,41, para



el horizonte de ocrens estructurales de 0,76 y para los ocrens inestructurales con perdigones de 1,03. El valor de cálculo es de 0,75, o sea la media de los anteriores. De esta forma se ha obtenido un mapa donde se señala las áreas de posible desarrollo de procesos de sifonamiento en la corteza clasificados en dos grados o clases de alta y media susceptibilidad.

De acuerdo al mapa correspondiente se observa que el área de susceptibilidad alta, frente a tubificación, se ubica al este y en menor medida al sur del yacimiento, en la cual se han desarrollado los mayores movimientos. Las zonas de media susceptibilidad se distribuyen al este, sur y noroeste, estos dos últimos con menor desarrollo.

#### *Influencia de las presiones de la corteza laterítica sobre los deslizamientos.*

Para el análisis de la influencia de las condiciones hidrogeológicas sobre el desarrollo de los deslizamientos se confeccionó un mapa de subpresiones de la corteza laterítica, a partir de los datos de la profundidad de alumbramiento del agua subterránea y del nivel de estabilización de las mismas, medidos en 43 calas perforadas en la zona de estudio. Las presiones nulas, se distribuyen en la parte central del yacimiento, relacionadas con las zonas minadas. Los valores de presiones de 2 metros, hacia el oeste, norte central y en una banda alargada de dirección noreste-suroeste, en la región sur y sureste del área. Estas presiones, en las zonas límites entre valores altos y mínimos, influyen sobre las inestabilidades, erosionando los pies de los taludes y laderas, al moverse las aguas subterráneas, hacia las zonas de menor presión.

Tabla V. Caracterización del mapa de subpresiones de la corteza laterítica en relación al desarrollo de deslizamientos.

Clases de Subpresiones (m)	Descripción	Área (Km <sup>2</sup> )	% del área total	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos
0	Nula	5,45	62,30	0,25	29,28
2	Baja	2,21	25,30	0,23	26,13
4	Alta	0,87	9,95	0,23	26,96
≥ 6	Muy alta	0,21	2,45	0,15	17,63
					44,59

En la tabla V se muestran los resultados del análisis conjunto entre el mapa de subpresiones y el inventario de deslizamientos. La clase de presiones nulas (0 m), que ocupa el 62,304 % del área total de trabajo, presenta un total de 0,2538 Km<sup>2</sup> ocupados por deslizamientos, lo que representa el 29,28 % del área total de deslizamientos, el mayor porcentaje entre todas las clases, sin embargo, los deslizamientos desarrollados son los de menor tamaño. La clase de 2 m de presión, representa el 25,298 % del área total, y en ella se desarrollan el 26,130 % del área total ocupada por deslizamientos. Estos deslizamientos, de mediano tamaño, se ubican fundamentalmente hacia la zona oeste del yacimiento. En las clases 4 m y ≥ 6 m, que representan tan solo el 12,39% del área total, se desarrollan el 44,59% del área total ocupada por deslizamientos, además de poseer los mayores movimientos desarrollados, que se encuentran hacia el este del yacimiento.

#### *Análisis del factor geomorfológico.*

El elemento geomorfológico utilizado en el análisis de susceptibilidad es la pendiente del terreno actual del área de estudio. Las clases utilizadas en el análisis, se tomaron en base a las pendientes medidas en los trabajos de reconocimiento en el área de trabajo. El mapa, muestra los rangos de pendientes umbrales de deslizamiento con cuatro intervalos: 0°-9°, 10°-19°, 20°-39° y >40°.

Como se muestra en la tabla VI, la clase en la cuál se desarrollan más movimientos es entre 10° y 19°, un total de 8, lo que representa el 40% del total. Le continúa la clase entre 0° y 9°, con un 35% del total. En las dos clases, se desarrollan el 75% de todos los deslizamientos inventariados, dentro



de los cuales, se encuentran los de mayor extensión ocurridos en las áreas no afectadas por la actividad minera. Esto contradice lo que se pensaba hasta el momento, sobre la influencia de las grandes pendientes sobre el desarrollo de deslizamientos. No obstante, un 20% de los deslizamientos, se desarrollan en áreas de pendientes mayores de  $40^\circ$ , formadas por la modificación del terreno por la actividad minera, pero son los movimientos de menor extensión espacial.

Tabla VI. Caracterización del mapa de pendiente umbral en relación al desarrollo de deslizamientos.

Clases de pendientes umbrales	Descripción	Área (Km <sup>2</sup> )	No. Deslizamiento	% de la cantidad total de deslizamientos	Longitud total ocupada por escarpes (m)	% de la longitud total de escarpes
$0^\circ - 9^\circ$	Baja	3,72	4, 5, 6, 9, 15, 17, 18	35	770	28.20
$10^\circ - 19^\circ$	Media	3,83	1, 2, 3, 13, 14, 16, 19, 20	40	1450	53.11
$20^\circ - 39^\circ$	Alta	1,12	10	5	130	4,76
$\geq 40^\circ$	Muy alta	0,08	7, 8, 11, 12	20	380	13,91

#### Análisis del factor geotécnico.

Para el análisis de las condiciones geotécnicas del terreno, se confeccionó el plano de tipo de suelo. Los limos arcillosos de alta plasticidad (MH), ocupan 4,27 Km<sup>2</sup>, lo que representa el 48,76% del área total. Se distribuyen hacia el oeste, sur y sureste del yacimiento. Las arenas limosas (SM) ocupan 3,17 Km<sup>2</sup>, el 36,21% del área. Estas se distribuyen hacia la parte central, norte y noreste del yacimiento. El resto del área ocupada por roca fresca, arenas y gravas, relacionadas espacialmente con los cauces de los ríos presentes en el área (tabla VI).

Tabla VI. Caracterización del plano de tipo de suelo en relación al desarrollo de deslizamientos.

Clases de tipo de suelo y roca	Área (Km <sup>2</sup> )	% del área total	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos
Arena limosa (SM)	3,17	36,21	0,24	27,34
Limo arcilloso de alta plasticidad (MH)	4,27	48,76	0,46	52,70
Gravas, arenas y limos (GC)	0,77	8,76	0,01	0,75
Roca (R)	0,55	6,26	0,17	19,21

(R): Simbología seleccionada por el autor.

Del análisis de los movimientos de masas, se tiene que el 52,7% se desarrolla en los limos arcillosos de alta plasticidad. En las áreas ocupadas por las arenas limosas, los deslizamientos ocupan el 27,34% del área total de movimientos. El 19,2% afecta las áreas ocupadas por roca serpentizada y el 0,75 a las gravas y arenas. Estas últimas se relacionan con los materiales arrastrados en los frentes de los movimientos.

#### Análisis del factor uso del suelo.

Haciendo un análisis del uso del suelo en el área de trabajo, se tienen 5 clases fundamentales (tabla VII): zonas de vegetación natural (4,74 Km<sup>2</sup>), distribuida en la periferia del yacimiento, predominando hacia el este; áreas reforestadas (1,94 Km<sup>2</sup>) y áreas minadas (1,62 Km<sup>2</sup>), distribuidas en la parte interna del área; zonas de depósitos de mineral (0,28 Km<sup>2</sup>) y red vial (0,16 Km<sup>2</sup>).

De acuerdo al desarrollo de deslizamientos, el uso de suelo mas afectado es la zona cubierta con vegetación natural, afectada por 0,65 Km<sup>2</sup> de área ocupada por movimientos de masas, lo cual



representa el 75 % del área total de deslizamientos inventariada, esto da una medida de la inestabilidad que presenta el terreno debido a sus propias condiciones naturales. En segundo lugar se tienen las áreas minadas, en las que existe 0,11 Km<sup>2</sup> de área ocupada por deslizamientos (13,34%) y las zonas reforestadas con 0,09 Km<sup>2</sup>. En las áreas ocupadas por la red vial y los depósitos de mineral no se reportan deslizamientos.

Tabla VII. Caracterización del plano de uso de suelo en relación al desarrollo de deslizamientos.

Clases de Uso del suelo	Área (Km <sup>2</sup> )	% del área total	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos
Áreas minadas	1,62	18,50	0,11	13,34
Áreas reforestadas	1,94	22,22	0,10	11,28
Caminos mineros	0,16	1,84	-	-
Depósitos de mineral	0,28	3,16	-	-
Vegetación natural	4,75	54,27	0,65	75,33

#### Descripción del plano de susceptibilidad.

El plano de susceptibilidad del terreno a la rotura obtenido en la investigación esta clasificado en cuatro clases: Susceptibilidad baja, media, alta y muy alta (figura 7). Las mismas se describen a continuación:

- Susceptibilidad baja: ocupa un área de 3,35 Km<sup>2</sup> (38,33% del área total). De forma areal se distribuye en la parte central del yacimiento, relacionado con las zonas reforestadas. Además se relaciona con las zonas periféricas del yacimiento, ocupadas por sedimentos aluviales de los ríos Yagrumaje, Los Lirios, Moa, y arroyo La Vaca.
- Susceptibilidad media: ocupa un área de 3,03 Km<sup>2</sup> (34,63% del área total). Se distribuye al sur del yacimiento, en forma de franja alargada de dirección este-oeste en la parte central, al norte y en pequeñas zonas al este y oeste del área.
- Susceptibilidad alta: ocupa un área de 1,49 Km<sup>2</sup> (0,13% del área total). Su distribución es muy localizada hacia el oeste, noreste y al este-sureste donde presenta su mayor acumulación en forma discontinua y alineada con dirección noreste-suroeste. Existen pequeños parches al suroeste y en la parte central del yacimiento.
- Susceptibilidad muy alta: ocupa un área de 2,23 Km<sup>2</sup> (25,54% del área total). Su distribución es bien localizada y se relaciona espacialmente con la clase anterior. Aparece al oeste, noreste, suroeste y al este-sureste presente su mayor acumulación en forma continua y alineada en dirección noreste-suroeste.

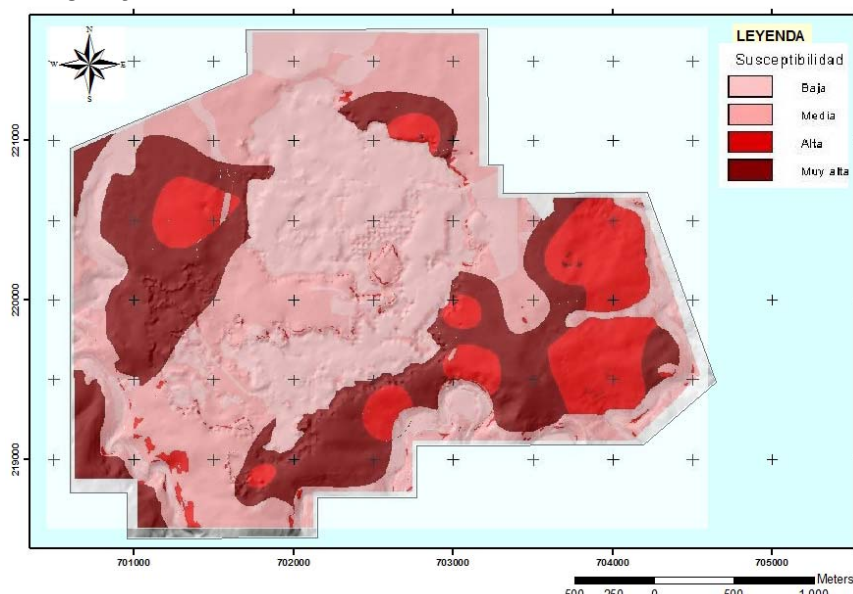


Figura 7. Plano de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el área de estudio. (Escala original: 1:2 000. Formato raster, tamaño de píxel: 5x5 m).

## CONCLUSIONES

1. La situación ingeniero-geológica del área de estudio se caracteriza por una alta complejidad tectónica y la presencia de cuatro horizontes ingeniero-geológicos diferenciados por sus propiedades físicas y comportamiento mecánico, así como por su conducta frente a los fenómenos de deslizamientos, en los cuales, con la profundidad, disminuye la fricción interna, aumentan los valores de humedad, sobrepasando en algunos casos, el límite líquido. Existen además horizontes colapsables debido a sus propias condiciones naturales. Estas características son elementos condicionantes y desencadenantes de la inestabilidad de los taludes del yacimiento, contribuyendo a la disminución de la resistencia al corte de los suelos y rocas y en otros casos aumentando las tensiones movilizadoras en el medio o talud.
2. Existen diferentes mecanismos de deslizamientos en el yacimiento que hacen que la evaluación y gestión del peligro sea más compleja. La solución de esta situación posibilita a los proyectistas de la actividad minera encontrar zonas más favorables y menos riesgosas para la explotación de yacimientos lateríticos.
3. Una vez caracterizado desde el punto de vista ingeniero-geológico el área y llegado a resultados en cuanto a mecanismos y tipologías, se concluye que la metodología empleada mediante el análisis probabilístico implementando un SIG, permite evaluar la susceptibilidad del terreno a la rotura frente al desarrollo de deslizamientos, en un yacimiento de corteza laterítica ferroniquelífera.
4. Los procedimientos de análisis de susceptibilidad de los taludes por desarrollo de deslizamientos utilizados en esta memoria aplicando un SIG, permite las siguientes ventajas: la viabilidad para este tipo de método porque se utilizan datos georeferenciados; la facilidad de actualizar las bases de datos y planos a medida que la actividad minera se desarrolla en el tiempo; la reproducibilidad de los resultados y la regionalización de la metodología utilizada; la rapidez de análisis de los factores que inciden en los deslizamientos y la obtención del plano de susceptibilidad final.
5. El plano de susceptibilidad del área permite una mejor valoración de las condiciones del medio geológico-minero y de las causales y condicionales de los deslizamientos. Es una herramienta útil para el ordenamiento minero-ambiental y para la prevención de movimientos de masas.

**BIBLIOGRAFIA.**

- Almaguer, Y. 2001. Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo rocoso serpentinizado de la región de Moa. Tesis de maestría. Fondo geológico, Departamento de Geología, ISMM, Moa.
- Almaguer, Y. 2005. Evaluación de la susceptibilidad por deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda. Tesis Doctoral. Departamento de Geología. ISMM, Moa.
- Almaguer, Y. Guardado R. 2005. Caracterización geotécnica del perfil de meteorización de rocas ultrabásicas serpentinizadas en el territorio de Moa, Cuba. *Revista Geología y Minería*, XX (1).
- Almaguer, Y. y Guardado R. 2005. Tipologías de movimientos de masas desarrollados en el territorio de Moa, Cuba. *Geología y Minería*, XX (2).
- Blanco J. L. y Llorente E., "Investigación ingeniero-geológica e hidrogeológica de la Base Minera Punta Gorda". Archivos de la Subdirección de Minas, Empresa Ernesto Che Guevara. Julio, 2004.
- Blanco, Jesús; Proenza, Joaquín. Terrenos geológicos de Cuba Oriental. *Revista Minería y Geología*, 1994, ISMM, Moa.
- Campos, M. Rasgos principales de la tectónica de la porción oriental de las provincias de Holguín y Guantánamo". *Minería y Geología*, ISMM, Cuba. 1991.
- Carrara, A.; Cardinali, M; Guzzetti, F. y Reichenbach, P., "GIS technology in mapping landslide hazard.". En: Carrara A, Guzzetti F (Eds) *Geographical information systems in assessing natural hazards*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands. 135-175 p. 1995.
- Corominas, J., "Criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera". *Riesgos Geológicos. Serie Geología Ambiental*. IGME, Madrid. 193-201 p. 1987.
- Corominas, J., "Movimientos de ladera: predicción y medidas preventivas". 1r Congreso Iberoamericano sobre Técnicas aplicadas a la Gestión de emergencias para la Reducción de Desastres Naturales, Valencia. 55-77 p. 1992.
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J., "Landslide types and processes". En: Turner, A.A.K. and Schuster, R.L. (Eds.): *Landslides. Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, Special Report*. National Academy Press, Washington, DC. 247, 36-75 p. 1996.
- De Miguel C., "Informe hidrogeológico conclusivo sobre: Investigación ingeniero-geológica e hidrogeológica de la Base Minera Punta Gorda. Archivos de la subdirección de Minas, Empresa Ernesto Che Guevara. Octubre, 2004.
- De Miguel C., Guardado R., Riverón B., Blanco J., Rodríguez A., Batista J., Almaguer Y., Pérez R., "Proyecto de investigaciones hidrogeológicas e hidrogeológicas del yacimiento Punta Gorda". Departamento de geología. 1998.
- Hansen, A., "Landslide hazard analysis". En: D. Brundsen and D.B. Prior (Editors), *Slope Stability*. John Wiley and Sons, 523-602 p. 1984.
- Hartlén, J. y Viberg, L., "Evaluation of landslide hazard". En: Ch. Bonnard (Ed): 5th. International Congress on Landslides. Lausanne. I (2), 1037-1057 p. 1988.
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Oficina Moa. 2007.
- Iturralde-Vinent M., "Las ofiolitas en la constitución geológica de Cuba". *Ciencias de la tierra y el espacio*, Cuba. 17, 1990.
- Iturralde-Vinent M., "Nuevo modelo interpretativo de la evaluación geológica de Cuba". ". *Ciencias de la tierra y el espacio*, Cuba. 3, 1981.
- Leroi, E., "Landslide risk mapping: problems, limitations and developments". en: Cruden & Fell (ed.), *Landslide risk assessment*. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment. A.A. Balkema. 239-250 p. 1997.
- Lewis J. L. y Draper G., "Geology and tectonic evolution of the northern Caribbean margin. The Caribbean region the geology of North America. H, 1990.
- Morris A. E., Taner I., Meyerhoff H. A., y Meyerhoff A. A., "Tectonic evolution of the Caribbean region; alternative hypothesis. The geology of North America. H. 1990.
- Rodríguez A., "Características geólogo-geomorfológicas del yacimiento Punta Gorda. *Revista Minería y Geología*, 1, 1983.
- Rodríguez A., "Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica". Tesis doctoral. Departamento de geología, ISMM, Cuba. 1998.
- Hansen, A., "Landslide hazard analysis". En: D. Brundsen and D.B. Prior (Editors), *Slope Stability*. John Wiley and Sons, 523-602 p. 1984.



- Hartlén, J. y Viberg, L., "Evaluation of landslide hazard". En: Ch. Bonnard (Ed): 5th. International Congress on Landslides. Lausanne. I (2), 1037-1057 p. 1988.
- Corominas, J., "Criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera". Riesgos Geológicos. Serie Geología Ambiental. IGME, Madrid. 193-201 p. 1987.
- Corominas, J., "Movimientos de ladera: predicción y medidas preventivas". 1r Congreso Iberoamericano sobre Técnicas aplicadas a la Gestión de emergencias para la Reducción de Desastres Naturales, Valencia. 55-77 p. 1992.
- Van Westen C.J., "GIS in landslide hazard zonation: areview, with examples from the Andes of Colombia". En: M.F. Price and D. I Heywood (Editors) *Mountain Environments and Geographic Information Systems*. Taylor & Francis Ltd. 135-165 p. 1994.
- Van Westen, C.J., "Application of Geographic Information System to landslide hazard zonation". ITC-Publications nº 15 ITC, Enschede. 45 p. 1993.
- Carrara, A.; Cardinali, M; Guzzetti, F. y Reichenbach, P., "GIS technology in mapping landslide hazard.". En: Carrara A, Guzzetti F (Eds) *Geographical information systems in assessing natural hazards*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands. 135-175 p. 1995.
- Leroi, E., "Landslide hazard-Risk mapsx at different scales: objectives, tools ans developments". Proc. 7th. Int. Symp. on Landslices, Trondheim, v.1, 35-51 p. 1996.
- Varnes, D.J., "slope movement types and processes". In: Landslides analysis and control. Special Report. 176, 11-33 p. 1978.
- Varnes, D.J., "Landslide hazard zonation: a review of principles and practice". Natural Hazards. nº 3. UNESCO, Paris. 63 p. 1984.
- Lomtatze V. D., "Geología aplicada a la ingeniería. Geodinámica aplicada a la ingeniería" Ed. Pueblo y Educación, 560 p. 1977.
- Hutchinson, J.N., "Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology". En: Ch. Bonnard (Editor), 5th Int. Congr. on Landslides, Lausanne. 1, 3-35 p. 1988.
- WP/WLI., "Multilingual landslide glossary". The Canadian Goethecnical society. Bitech Publishers Ltd. 1993.
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J., "Landslide types and processes". En: Turner, A.A.K. and Schuster, R.L. (Eds.): *Landslides. Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, Special Report*. National Academy Press, Washington, DC. 247, 36-75 p. 1996.