

ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO: RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA PENÍNSULA DE PAPAGAYO MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DEL MÉTODO MORA-VAHRSON (MORA, R. ET AL., 1992).

M. Sc. Rolando Mora Chinchilla¹
Geól. Jeisson Chaves Gamboa¹
Geól. Mauricio Vásquez Fernández¹

1. INTRODUCCIÓN

La metodología para la determinación “a priori” de la amenaza de deslizamientos Mora-Vahrson (Mora, R. et al., 1992) se ha modificado con la inclusión del ángulo de la pendiente del terreno, en sustitución del índice de relieve relativo, y la consideración de los parámetros de resistencia al corte de suelos y la clasificación de macizos rocosos de Bieniawski (1989) en el parámetro de susceptibilidad litológica. También, se ha considerado una clasificación más simplificada del grado de amenaza, el cual se propone se denomine Susceptibilidad al Deslizamiento. De esta manera, la nueva metodología para el estudio de la susceptibilidad al deslizamiento se ha denominado método Mora-Vahrson-Mora (MVM).

Esta metodología permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizarse, mediante la combinación de la valoración y peso relativo de diversos indicadores morfodinámicos, la cual es sencilla de implementar en un sistema de información geográfica (SIG). Se pretende dividir el área estudiada en sectores de comportamiento similar y proveer una base para entender las características de cada uno de estos sectores.

La metodología es simple, fácilmente recordada y entendible; cada uno de sus factores es claro y la terminología utilizada es ampliamente aceptada; incluye los factores más significativos desde el punto de vista de la inestabilidad de laderas; se basa en parámetros que pueden determinarse de manera rápida y barata en el campo y en la oficina, así como, en valoraciones que incluyen el peso relativo de los parámetros.

Los mapas generados con esta metodología se utilizan y aplican como instrumentos en la toma de decisiones para los procesos de planificación del uso del terreno, explotación de recursos naturales y el desarrollo de infraestructura, urbanismo y líneas vitales (Mora, R. et al., 1992). El resultado de su aplicación será una mejor comprensión de los fenómenos naturales en el área de estudio, lo cual incide en su desarrollo eficiente y duradero (Mora, R. et al., 1992).

La metodología permite desarrollar una aproximación del grado de susceptibilidad al deslizamiento de la región estudiada y de los fenómenos que influyen mayormente esta condición (Mora, R. et al., 1992). Es valiosa en la identificación de áreas críticas y útil en la orientación de prioridades en cuanto al destino de los recursos destinados hacia estudios geotécnicos de detalle (Mora, R. et al., 1992).

Bajo ninguna circunstancia, esta metodología debe sustituir los estudios geotécnicos de campo y laboratorio, necesarios para el diseño y concepción de las obras civiles y sus complementos de protección y mitigación correspondientes (Mora, R. et al., 1992). Adicionalmente, fuera de un concepto general, la metodología tampoco es capaz de pronosticar el tipo de deslizamiento que podría presentarse.

2. FACTORES Y PARÁMETROS UTILIZADOS POR LA METODOLOGÍA MVM

La metodología se aplica mediante la combinación de varios factores y parámetros, los cuales se obtienen de la observación y medición de

¹ Profesor de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica

indicadores morfodinámicos y su distribución espacio-temporal. En este trabajo se utilizó una base topográfica 1:20000, con una resolución de 100 m², es decir un tamaño de píxel de 10x10 m.

La combinación de los factores y parámetros se realiza considerando que los deslizamientos ocurren cuando en una ladera, compuesta por una litología determinada, con cierto grado de humedad y con cierta pendiente, se alcanza un grado de susceptibilidad (elementos pasivos) (Mora, R., Vahrson, W. & Mora, S., 1992). Bajo estas condiciones, los factores externos y dinámicos, como son la sismicidad y las lluvias intensas (elementos activos), actúan como factores de disparo que perturban el equilibrio, la mayoría de las veces precario, que se mantiene en la ladera (Mora, R. et al., 1992).

Es así como se considera que el grado de susceptibilidad al deslizamiento es el producto de los elementos pasivos y de la acción de los factores de disparo (Mora, R. et al., 1992):

$$H = EP * D$$

donde:

H: grado de susceptibilidad al deslizamiento,
EP: valor producto de la combinación de los elementos pasivos, y
D: valor del factor de disparo.

Por su parte el valor de los elementos pasivos se compone de los siguientes parámetros (Mora, R. et al., 1992):

$$EP = S_l * S_h * S_p$$

donde:

S_l : valor del parámetro de susceptibilidad litológica,
S_h : valor del parámetro de humedad del terreno, y
S_p : valor del parámetro de la pendiente.

El factor de disparo se compone de los siguientes parámetros (Mora, R. et al., 1992):

$$D = D_s + D_{ll}$$

donde:

D_s: valor del parámetro de disparo por sismicidad, y

D_{ll}: valor del parámetro de disparo por lluvia. Sustituyendo los parámetros apropiados, la ecuación original se puede expresar como (Mora, R. et al., 1992):

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

De esta ecuación se pueden derivar las relaciones (Mora, R. et al., 1992).

$$H_s = (S_l * S_h * S_p) * (D_s)$$

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

donde:

H_s: susceptibilidad al deslizamiento por sismicidad, y

H_{ll}: susceptibilidad al deslizamiento por lluvias.

Para los resultados de la combinación de todos los factores no se puede establecer una escala de valores única, pues los mismos dependen de las condiciones de cada área estudiada. Por este motivo, se sugiere dividir el rango de valores obtenidos, para el área de estudio, en cinco clases de susceptibilidad y asignar los calificativos que se presentan en el cuadro 1. El calificativo de susceptibilidad es una representación cuantitativa de los diferentes niveles de amenaza, que muestra solamente el rango de amenaza relativa en un sitio en particular y no la amenaza absoluta. Se sugiere que la asignación de rangos se efectúe con la utilización de un histograma de los resultados de la combinación de parámetros.

Se debe enfatizar en que esta clasificación relativa de la susceptibilidad, se basa en influencia que tienen las diferentes condiciones examinadas en un área específica; es decir, las áreas de susceptibilidad determinadas para un sitio son válidas únicamente para este sitio. Condiciones similares, encontradas fuera del sitio, pueden producir un resultado diferente por una pequeña diferencia en alguno de los factores.

Cuadro 1: Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento.

Clase	Calificativo de susceptibilidad al deslizamiento	Característica
I	Muy baja	Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta.
II	Baja	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en casos especiales. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta.
III	Moderada	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se mejora la condición del sitio.
IV	Alta	Probabilidad de deslizamiento alta en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Se deben realizar estudios de detalle y medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
V	Muy alta	Probabilidad de deslizamiento muy alta en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Se deben realizar estudios de detalle y medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA METODOLOGÍA MVM.

3.1 PARÁMETRO DE LA PENDIENTE (S_p)

Este parámetro utiliza las clases de pendiente de van Zuidam (1986), con las cuales se describen los procesos característicos y esperados, y las condiciones del terreno, así como una leyenda de colores sugerida por el mismo autor (Cuadro 2). Las clases de pendientes pueden coincidir con los sectores críticos, donde los procesos de deslizamiento son dominantes (van Zuidam, 1986).

3.2 PARÁMETRO DE SUSCEPTIBILIDAD LITOLÓGICA (S_l)

Los tipos de suelos y rocas juegan un papel preponderante en el comportamiento dinámico de las laderas (Mora, R. et al., 1992).

La composición mineralógica, la capacidad de retención de humedad, los espesores y grado de meteorización, el estado de fracturamiento, el ángulo de buzamiento, la posición y variación de los niveles freáticos, etc., influyen claramente en la estabilidad o inestabilidad de las laderas (Mora, R. et al., 1992).

La evaluación de este parámetro puede realizarse según las sugerencias de Mora, R. et al., (1992), sin embargo, si se cuenta con descripciones de los macizos rocosos y la evaluación de propiedades geotécnicas de suelos, se recomienda utilizar los cuadros 3 y 4.

Cuadro 2: Clases de pendientes, condiciones del terreno, colores sugeridos y valoración del parámetro S_p .

Clase de pendiente		Condiciones del terreno	Color	Valor de S_p
[°]	[%]			
0-2	0-2	Planicie, sin denudación apreciable	Verde oscuro	0
2-4	2-7	Pendiente muy baja, peligro de erosión	Verde claro	1
4-8	7-15	Pendiente baja, peligro severo de erosión	Amarillo	2
8-16	15-30	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro de erosión severo	Naranja	3
16-35	30-70	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	Rojo claro	4
35-55	70-140	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible	Rojo oscuro	5
> 55	> 140	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (carca de rocas), cobertura vegetal limitada	Morado	6

El cuadro 3 se ha confeccionado con la utilización de la clasificación de macizos rocosos RMR (Bieniawski, 1989), y el cuadro 4 con la modificación del cuadro propuesto por Miles & Keafer (2002).

Cuadro 3: Valoración del parámetro susceptibilidad litológica, caso macizos rocosos según RMR (Bieniawski, 1989).

Valoración RMR	Número de clase RMR	Descripción RMR	Valoración del parámetro S_l
< 20	I	Muy pobre	5
21-40	II	Pobre	4
41-60	III	Medio	3
61-80	IV	Bueno	2
81-100	V	Muy Bueno	1

Cuadro 4: Valoración del parámetro susceptibilidad litológica, caso suelos

Ángulo de fricción efectiva [grados]	Cohesión efectiva [kPa]	Descripción	Valoración del parámetro S_l
0-15	0-10	Muy bajo	5
15-20	10-15	Bajo	4
20-25	15-20	Medio	3
25-30	20-25	Alto	2
> 30	> 25	Muy alto	1

3.3 PARÁMETRO DE HUMEDAD DEL TERRENO (S_h)

En este caso se recurre a los promedios mensuales de precipitación, efectuando con ellos un balance hídrico simplificado, en donde se asume una evapotranspiración potencial de 125 mm/mes, por lo tanto, precipitaciones mensuales inferiores a 125 mm no conducen a un aumento de la humedad del terreno, mientras que una precipitación entre 125 y 250 mm si la incrementa, y precipitaciones mensuales superiores a 250 mm conducen a una humedad del suelo muy alta (Mora, R. et al., 1992).

Seguidamente, a los promedios mensuales se les asignan los valores del cuadro 5 y se efectúa la suma de estos valores para los doce meses del

año, con lo que se obtiene un valor que puede oscilar entre 0 y 24 unidades. El resultado refleja los aspectos relacionados con la saturación y la distribución temporal de humedad en el terreno (Mora, R. et al., 1992). La valoración del parámetro se presenta en el cuadro 6.

Cuadro 5: Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia (Mora, R. et al., 1992).

Promedio de precipitación mensual [mm]	Valor asignado
< 125	0
125-250	1
>250	2

Cuadro 6: Valoración del parámetro humedad del terreno (S_h) (Mora, R. et al., 1992).

Suma de valores asignados a cada mes	Descripción	Valoración del parámetro S_h
0-4	Muy bajo	1
5-9	Bajo	2
10-14	Medio	3
15-19	Alto	4
20-24	Muy alto	5

3.4 PARÁMETRO DE DISPARO POR SISMICIDAD D_s

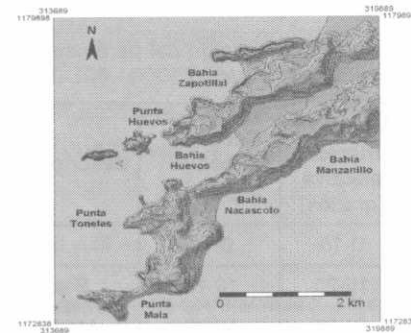
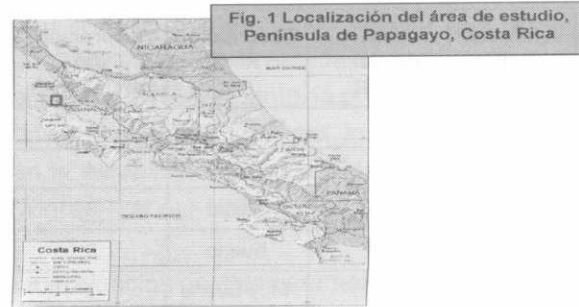
La sismicidad es el evento natural que ha causado la mayor destrucción por deslizamientos en Costa Rica (Mora, R. et al., 1992). Se ha observado que el potencial de generación de deslizamientos por actividad sísmica puede correlacionarse con la escala de intensidades Mercalli-Modificada (Mora, R. et al., 1992).

En caso de contar con datos sobre aceleraciones pico (PGA), se ha utilizado la relación Trifunac y Brady (1975), para establecer los valores correspondientes del parámetro de disparo por sismicidad (D_s) (Cuadro 7). Existen otras relaciones entre intensidad y aceleración que pueden ser utilizadas, a criterio de las personas que pongan en práctica esta metodología.

Cuadro 7: Valoración del parámetro de disparo por sismicidad D_s .

Intensidad Mercalli-Modificada	Aceleración pico (%g) (Trifunac & Brady, 1975)	Valoración del parámetro D_s
I	0.3-0.6	1
II	0.6-1.1	2
III	1.1-2.2	3
IV	2.2-4.5	4
V	4.5-8.9	5
VI	8.9-17.7	6
VII	17.7-35.4	7
VIII	35.4-70.5	8
IX	75-140.8	9
X	140.8-280.8	10
XI	280.8-560.4	11
XII	>560.4	12

La Península de Papagayo se caracteriza por presentar una predominancia de pendientes de fuertes a muy fuertes (51% del área), según la clasificación de van Zuidam (1986), las cuales se asocian con la forma del terreno característica del lugar: los acantilados costeros.



3.5 PARÁMETRO DE DISPARO POR LLUVIA D_{II}

En este parámetro se consideran las intensidades de lluvias potencialmente generadoras de deslizamientos, se utiliza la lluvia máxima en 24 horas con un período de retorno de 100 años, aplicando la distribución de valores extremos Gumbel tipo I o LogPearson tipo III a series temporales con más de 10 años de registro (Mora, R. et al., 1992). En el cuadro 8 se aprecia la valoración del parámetro D_{II} .

Cuadro 8: Valoración del parámetro de disparo por lluvias D_{II} (Mora, R. et al., 1992).

Lluvia máxima en 24 horas, período de retorno 100 años [mm]	Descripción	Valor del parámetro D_{II}
< 100	Muy bajo	1
100-200	Bajo	2
200-300	Medio	3
300-400	Alto	4
> 400	Muy alto	5

En un segundo plano aparecen las planicies y pendientes muy bajas (26% del área), asociadas a planicies ignimbríticas, sectores de manglar y playas.

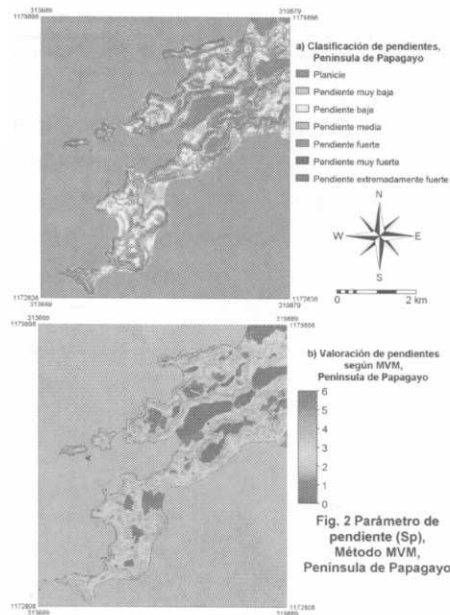
La figura 2 muestra la clasificación de pendientes y su valoración de acuerdo con el método MVM. En el cuadro 9 se aprecia el porcentaje de área cubierta por cada clase de pendiente.

Cuadro 9: Porcentaje de área por clase de pendiente.

Clase de pendiente	Área [km ²]	% de área
Planicie	2.21	16.05
Pendiente muy baja	1.35	9.80
Pendiente baja	1.88	13.65
Pendiente media	3.35	24.33
Pendiente fuerte	3.72	27.02
Pendiente muy fuerte	1.17	8.50
Pendiente extremadamente fuerte	0.09	0.65

4. RESULTADOS PARA LA PENÍNSULA DE PAPAGAYO

El área de estudio comprende la Península de Papagayo, en la Provincia de Guanacaste, Costa Rica (Fig. 1).



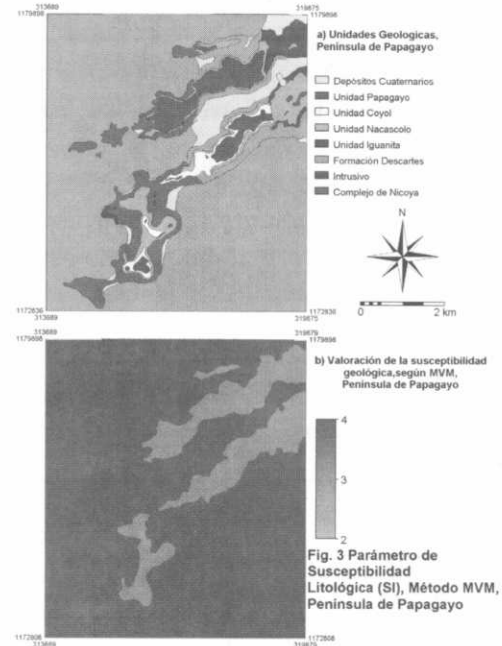
La Geología de la península se caracteriza por la presencia de rocas ígneas y sedimentarias, las cuales se han correlacionado con formaciones previamente descritas o se han descrito como unidades informales. Cada unidad se ha clasificado de acuerdo al RMR (Bieniawski, 1989) y se le ha asignado su valoración de acuerdo con el parámetro de susceptibilidad litológica (Fig. 3 y cuadro 10).

En la península el desarrollo de suelos es sumamente limitado, más bien, los problemas de estabilidad están asociados a deslizamientos en roca, por lo cual no se han realizado estudios tendientes a determinar parámetros de resistencia al corte de suelos.

El parámetro de humedad del terreno se ha evaluado con los datos de la estación Playas del Coco, la cual pertenece al Servicio Nacional de Riego y Avenamiento (SENARA). Esta estación cuenta con una longitud de registro de 21 años y es la más cercana a la Península de Papagayo. No se han considerado datos de otras estaciones, pues las mismas se encuentran bastante alejadas y no presentan la influencia del clima costero.

En el cuadro 11 se resume la información correspondiente a los promedios mensuales de la estación y los valores asignados a cada mes.

La clasificación final del parámetro de humedad es de 6, lo cual indica una influencia baja del mismo en lo que respecta a la susceptibilidad al deslizamiento. Este valor se tomará como constante para toda la península, pues como se menciona anteriormente, no se cuenta con datos de estaciones más cercanas.



Cuadro 10: Clasificación y valoración de las unidades litológicas.

Unidad geológica	Litología	RMR	S _l
Depósitos Recientes	Coluvios, aluviones, arenas	-	Bajo (4)
Unidad Papagayo	Ignimbritas	Medio (54)	Medio (3)
Unidad Coyol	Areniscas, ignimbritas conglomerados, tobas,	Medio (41-60)	Medio (3)
Unidad Nacascoco	Ignimbritas	Medio (55-60)	Medio (3)
Unidad Iguanita	Areniscas	Medio (59)	Medio (3)
Formación Descartes	Calciulitas	Pobre (37)	Bajo (4)
Intrusivos	Gabros y plagiogranitos	Pobre (21-40)	Bajo (4)
Complejo de Nicoya	Basaltos	Pobre (35)	Bajo (4)

El parámetro de disparo por sismo se ha evaluado considerando la intensidad (MM) máxima reportada para la península, la cual es de VIII y corresponde con un evento sísmico de magnitud