

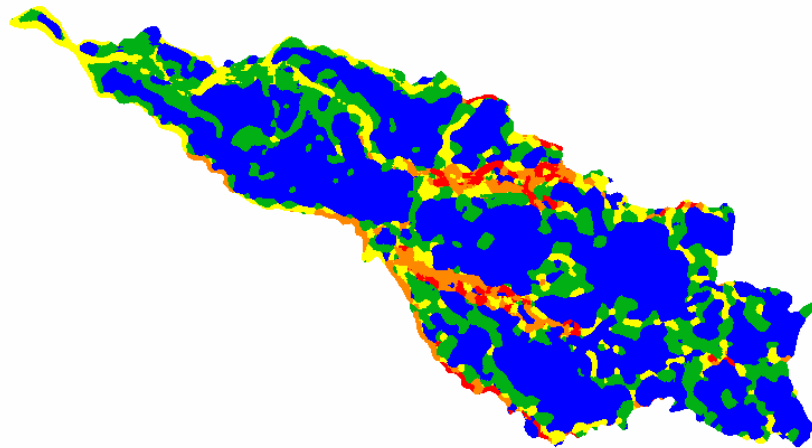
EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO DEL CANTÓN DE SAN JOSÉ, PROVINCIA DE SAN JOSÉ, COSTA RICA.

M.Sc. Rolando Mora Chinchilla

Escuela Centroamericana de Geología

Universidad de Costa Rica

E-mail: rmorach@geologia.ucr.ac.cr



**PROYECTO FUNDEVI 0960
SERVICIOS ESPECIALIZADOS DE LABORATORIO DE SUELOS Y ROCAS
Fundación de la Universidad de Costa Rica para la Investigación**



JUNIO, 2004

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO DEL CANTÓN DE SAN JOSÉ, PROVINCIA DE SAN JOSÉ, COSTA RICA.

M. Sc. Rolando Mora Chinchilla
Servicios Especializados de Laboratorio de Suelos y Rocas, FUNDEVI 0960
Sección Geotecnia e Hidrogeología
Escuela Centroamericana de Geología
Universidad de Costa Rica
E-mail: rmorach@geologia.ucr.ac.cr

1. INTRODUCCIÓN.

Se ha empleado la nueva metodología para el estudio de la susceptibilidad al deslizamiento, denominada método Mora-Vahrson-Mora (MVM) (Mora, R. et al., 2002), para establecer los sectores con potencial de presentar deslizamientos en caso de lluvias de intensidad alta, sismos de magnitud importante o una combinación de ambos.

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 indicadores morfodinámicos y su distribución espacio-temporal. En este trabajo se utilizó una base topográfica 1:25000, con una resolución de 400 m², es decir un tamaño de píxel de 20x20 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. et al., 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 la 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. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc.
II	Baja	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.
III	Moderada	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos urbanos de baja densidad.
IV	Alta	Probabilidad de deslizamiento alta (< 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios estabilidad a detalle y la implementación de 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 (> 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Prohibido su uso con fines urbanos, se recomienda usarlos 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).

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

Clase de pendiente		Condiciones del terreno	Color sugerido	Valor del parámetro S_p
Grados	Porcentaje			
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 severo de erosión.	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 (caída de rocas), cobertura vegetal limitada	Morado	6

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. 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_f
< 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_f
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_r).

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 de Trifunac & 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.

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 7: Valoración del parámetro de disparo por sismicidad D_s .

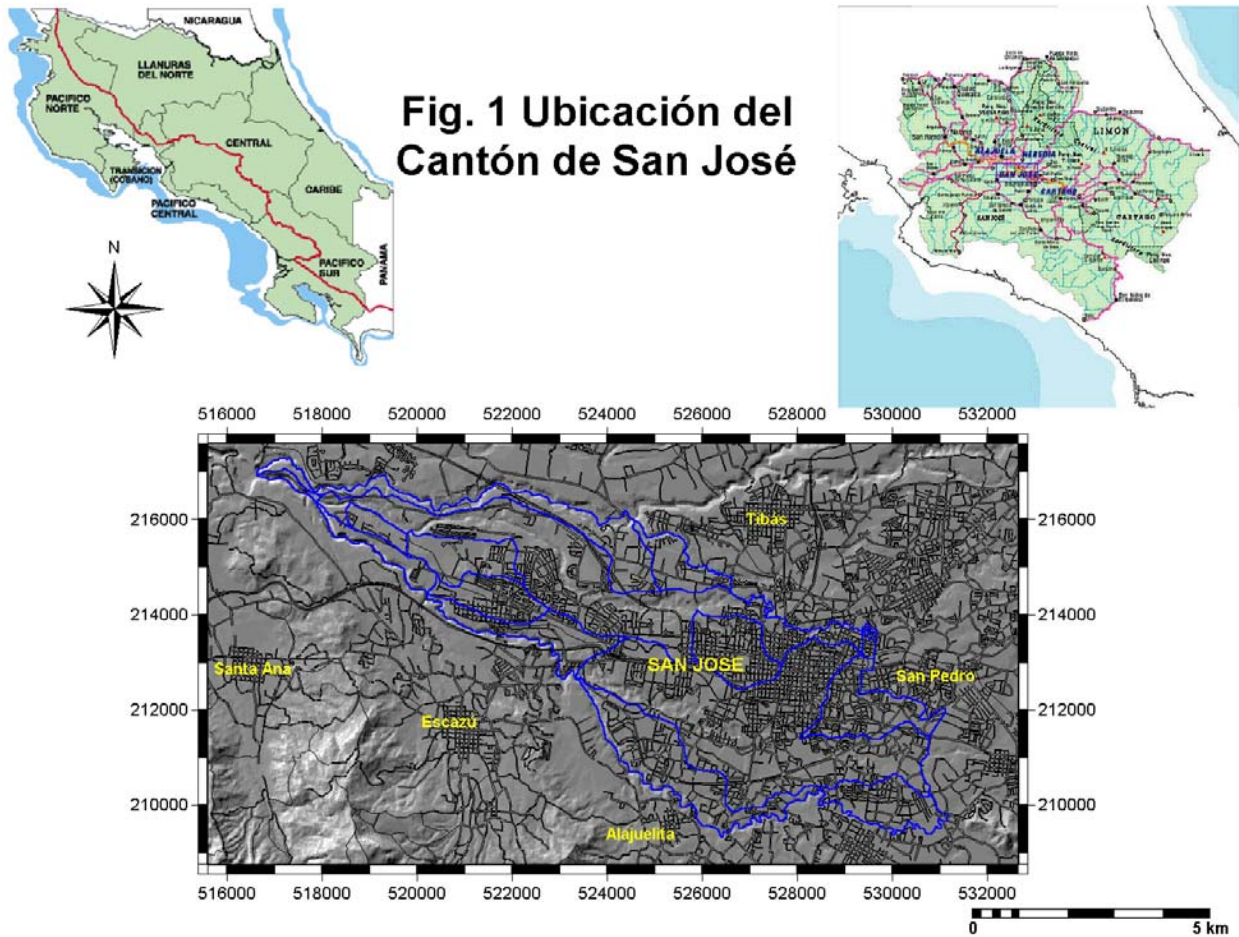
Intensidad Mercalli-Modificada	Aceleración pico (%g) (Trifunac & Brady, 1975)	Valoración del parámetro D_s
I	0.3-0.6	1
II	0.6-1.1	2
III	1.1-2.2	3
IV	2.2-4.5	4
V	4.5-8.9	5
VI	8.9-17.7	6
VII	17.7-35.4	7
VIII	35.4-70.5	8
IX	7.5-140.8	9
X	140.8-280.8	10
XI	280.8-560.4	11
XII	> 560.4	12

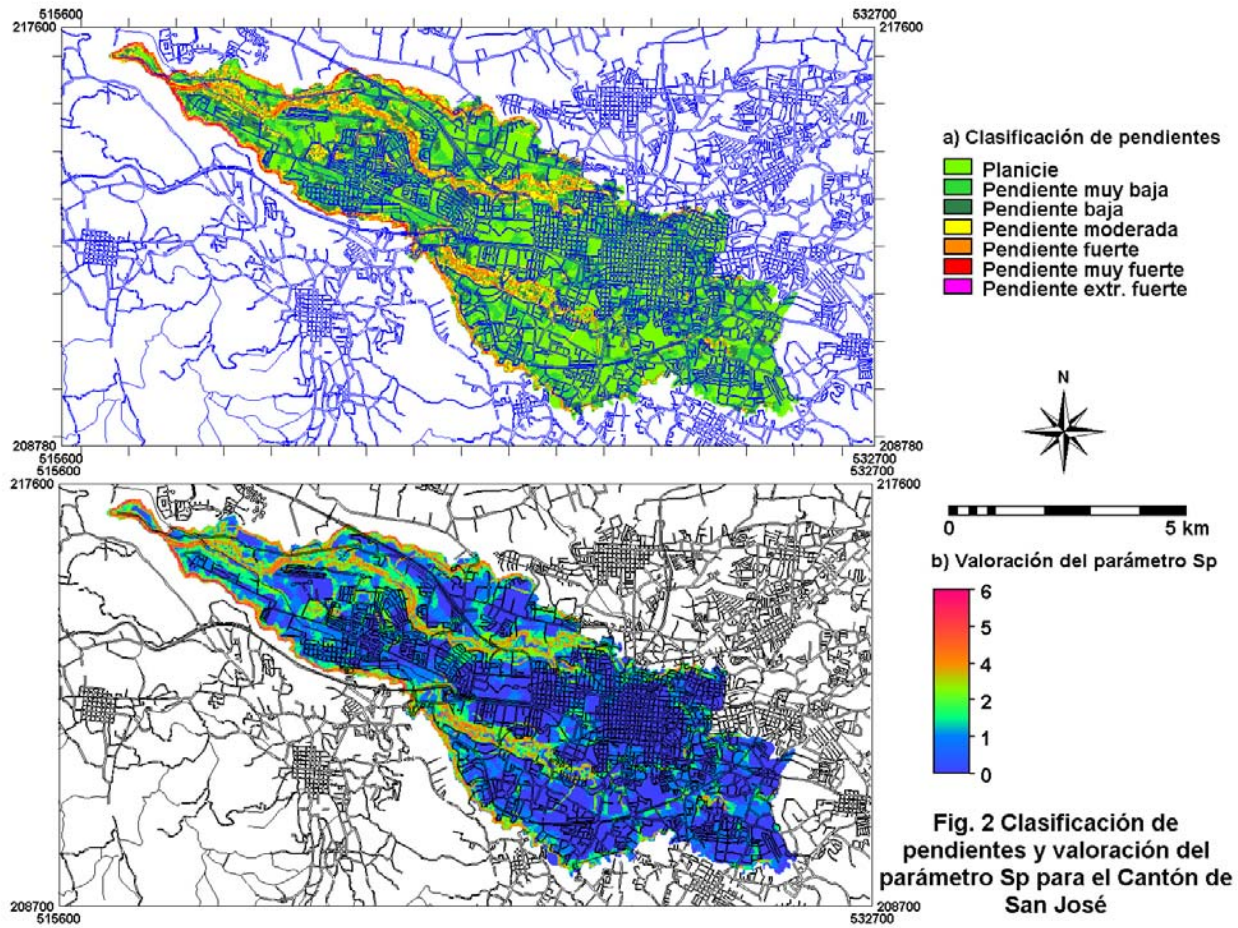
Cuadro 8: Valoración del parámetro de disparo por lluvias D_{II} (Mora, R. et al., 1992).

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

4. RESULTADOS PARA EL CANTÓN DE SAN JOSÉ.

El área de estudio comprende el cantón de San José, en la Provincia de San José, Costa Rica (Fig. 1). Este cantón se caracteriza por presentar una predominancia de pendientes bajas, muy bajas y planicies (84.1% del área), según la clasificación de van Zuidam (1986), las cuales se asocian con la forma del terreno característica del lugar: campos de depósitos volcánicos (lahares, flujos ignimbríticos y caída de cenizas). En un segundo plano aparecen las pendientes de muy fuertes a extremadamente fuertes (8.1% del área), asociadas a los cañones fluviales. Las pendientes moderadas representan un 7.8% del área y corresponden con los sectores de transición entre los dos grupos antes mencionados. 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.





La Geología del catón se caracteriza por la presencia de depósitos de origen volcánico del Cuaternario (Denyer & Arias, 1991). Cada unidad geológica se ha clasificado de acuerdo con los cuadros propuestos por Mora (2002), empleando la clasificación de macizos rocosos RMR (Bieniawski, 1989) en caso de rocas fracturadas (Qv4 y Qv3) y el parámetro de susceptibilidad litológica en caso de suelos para los depósitos laháricos, cenizas y aluviones (Qvl y Qal). Posteriormente se ha asignado su valoración de acuerdo con el parámetro de susceptibilidad litológica (Fig. 3 y cuadro 10).

El parámetro de humedad del terreno se ha evaluado con los datos de tres estaciones presentes en o cerca de la zona de estudio, las cuales pertenecen al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y cuentan con longitudes de registro apropiadas para su evaluación con el ajuste de funciones de valores extremos. En el cuadro 11 y la figura 4 se resume la información correspondiente a los promedios mensuales de las estaciones y los valores asignados a cada estación para el parámetro

Sh. La clasificación final del parámetro de humedad es de 2 a 3, lo cual indica una influencia de baja a media del mismo en lo que respecta a la susceptibilidad al deslizamiento.

Cuadro 9: Porcentaje de área por clase de pendiente.

Clase de pendiente	Área [km ²]	% de área
Planicie	20.2	45.5
Pendiente muy baja	11.2	25.1
Pendiente baja	6.0	13.5
Pendiente media	3.5	7.8
Pendiente fuerte	3.1	6.9
Pendiente muy fuerte	0.5	1.1
Pendiente extremadamente fuerte	0.1	0.1

Cuadro 10: Clasificación y valoración de las unidades litológicas.

Unidad geológica	Litología	RMR	S _i
Qal	Depósitos aluviales y coluviales		5
Qvl	Lahares y cenizas		3
Qv3	Ignimbritas	61-80	2
Qv4	Lavas andesíticas	61-80	2

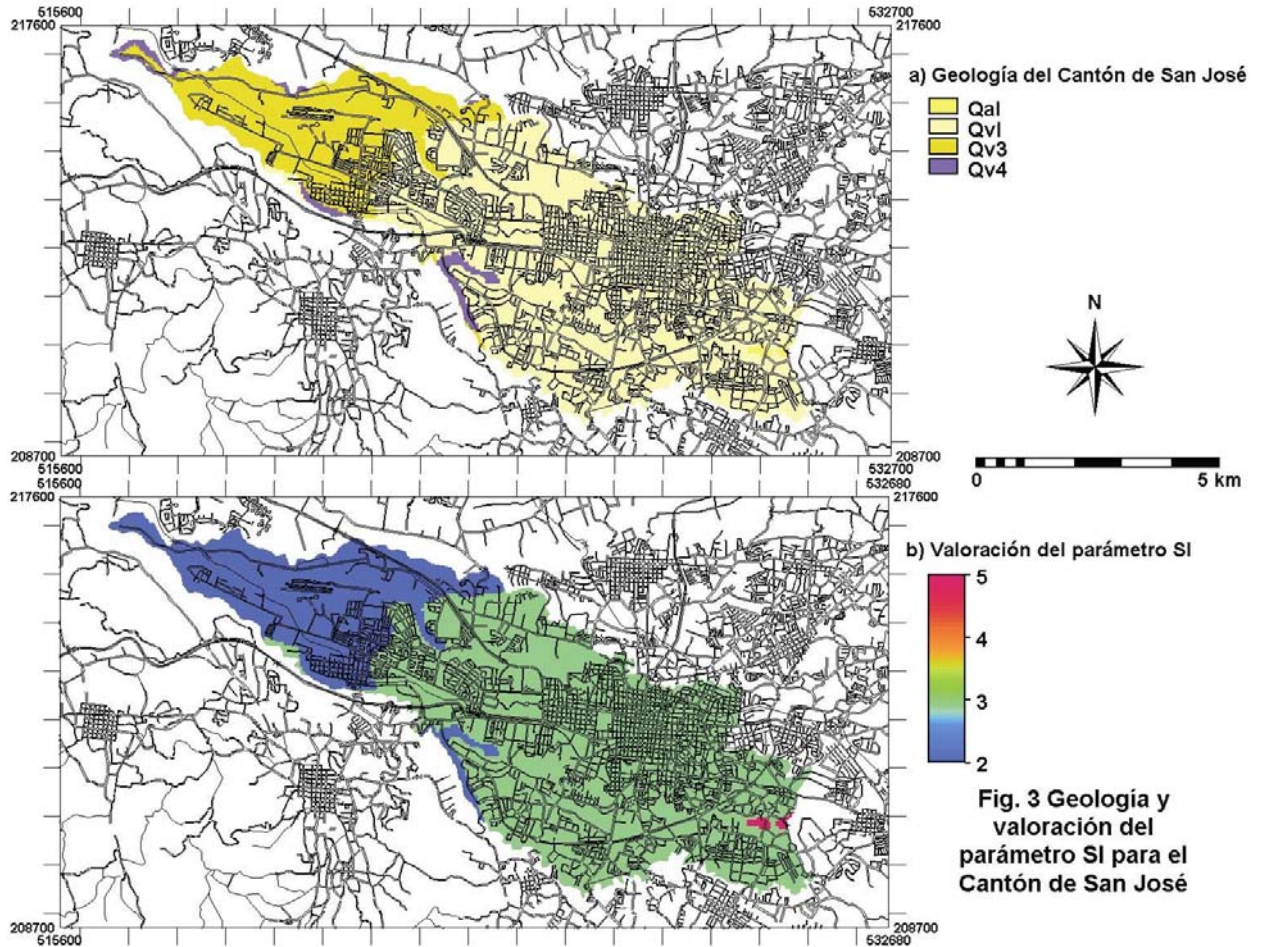
Cuadro 11: Valoración del parámetro humedad del terreno (S_h)

Estación	Valor Asignado	Valoración del parámetro Sh
Pavas	9	Bajo (2)
San José	10	Medio (3)
Desamparados	10	Medio (3)

El parámetro de disparo por sismo se ha evaluado considerando la intensidad (MM) máxima reportada por Morales & Aguilar (1993), la cual es de VIII y se considera constante para el área de estudio. Por lo anterior, el factor de disparo por sismo conduce a una valoración del parámetro D_s de 8, constante para el área de estudio.

Para evaluar el parámetro de disparo por lluvia (D_{ll}) se utilizaron los datos de las estaciones Pavas, San José y Desamparados, tomando los valores extremos anuales de lluvia en 24 horas y

aproximando las distribuciones de valores extremos LogPearson tipo III y Gumbel tipo I (Linsley et al., 1986). Los resultados se aprecian en el cuadro 12. En este caso el factor de disparo por lluvia tiene una influencia baja en el cálculo de la susceptibilidad y es constante para toda el área de estudio.



Cuadro 12 Valoración del parámetro de disparo por lluvias de intensidad alta (DII).

Estación	Años de registro	Lluvia en 24 horas con período de retorno de 100 años		Valoración del parámetro DII
		Log-Pearson tipo III [mm]	Gumbel tipo I [mm]	
Pavas	29	132.1	139.6	Bajo (2)
San José	54	132.7	131.7	Bajo (2)
Desamparados	42	150.1	133.3	Bajo (2)

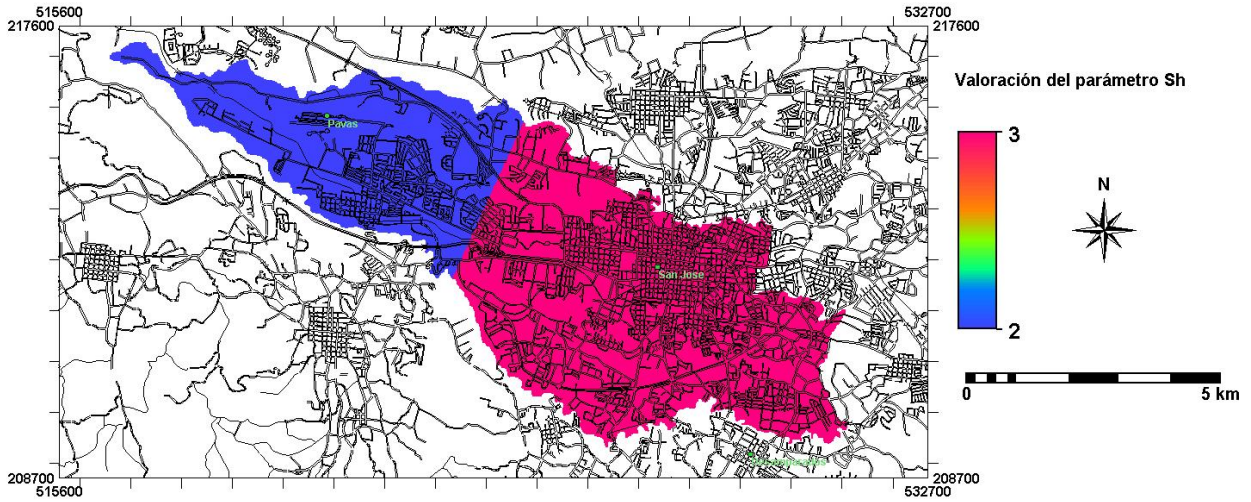


Fig. 4 Valoración del parámetro de susceptibilidad por humedad del terreno (Sh) para el Cantón de San José

4.1. SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO POR INFLUENCIA DE LLUVIAS DE INTENSIDAD ALTA Y SISMOS DE MAGNITUD IMPORTANTE.

Los resultados de la aplicación del método MVM se aprecian en la figura 5, donde se destaca que un 82.4% del área del cantón presenta susceptibilidad al deslizamiento de muy baja a baja, un 10.8% es de susceptibilidad moderada, un 4.6% de susceptibilidad alta y un 2.3% de susceptibilidad muy alta.

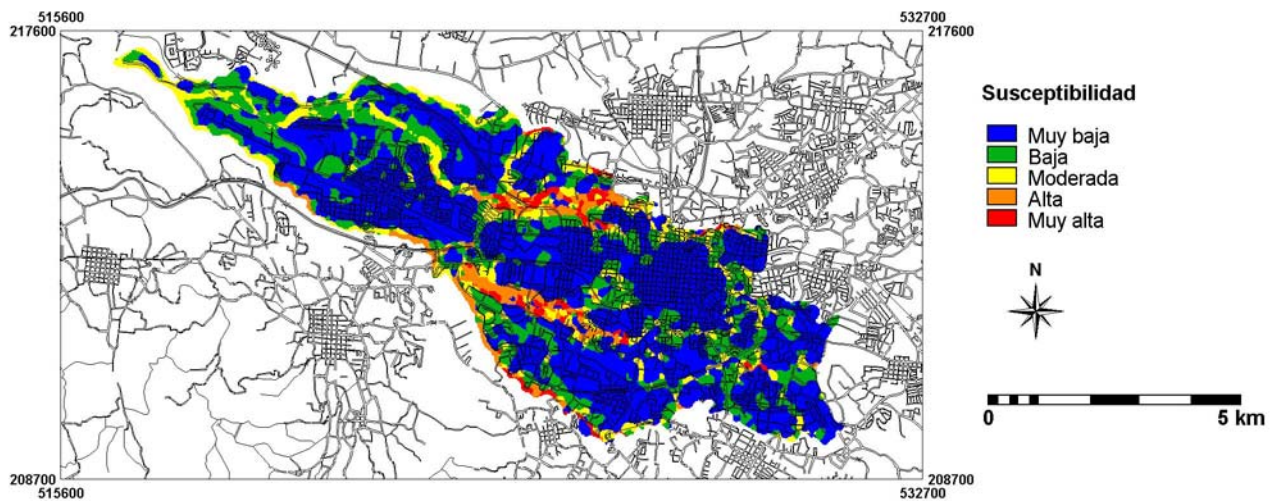


Fig. 5 Susceptibilidad a la inestabilidad del cantón de San José, método MVM

En la figura 6 se observa el uso recomendado del terreno, según el cuadro 1, considerando únicamente la susceptibilidad al deslizamiento en caso de lluvias intensidad alta conjugada con sismos de magnitud importante, otros conceptos pueden y deben ser incluidos para restringir el uso del terreno. Bajo estas condiciones se puede decir que el 82.3% del área del cantón puede destinarse a desarrollo, el 10.8% a desarrollo controlado (sujeto a la prevención de deslizamientos) y el 6.9% a conservación.

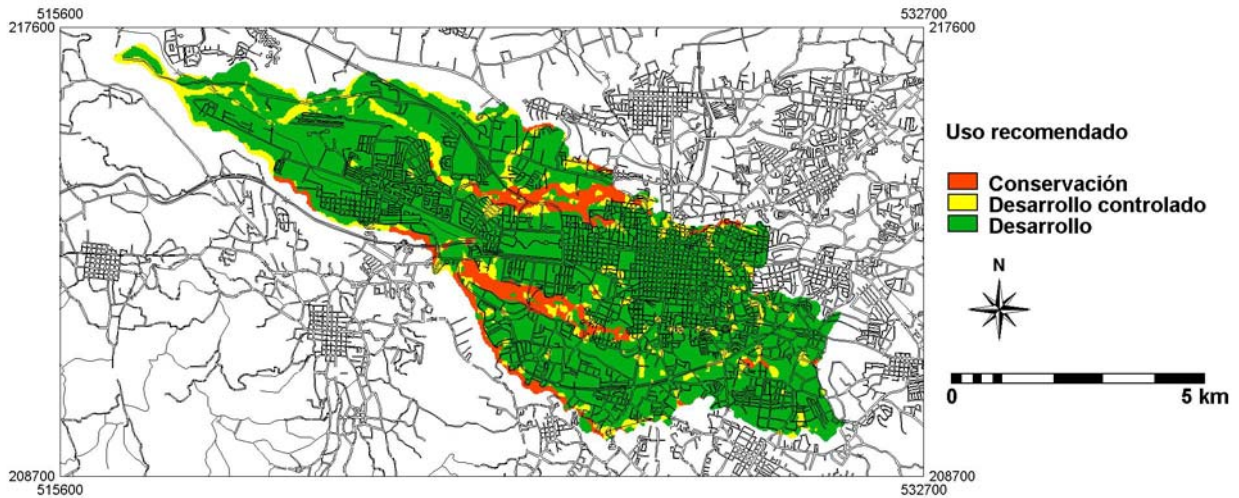


Fig. 6 Uso recomendado del terreno, de acuerdo con la susceptibilidad al deslizamiento, Cantón de San José

5. CONCLUSIONES.

El cantón de San José se caracteriza por presentar una predominancia de pendientes bajas, muy bajas y planicies (84.1% del área), según la clasificación de van Zuidam (1986), las cuales se asocian con la forma del terreno característica del lugar: campos de depósitos volcánicos (lahares, flujos ignimbríticos y caída de cenizas). En un segundo plano aparecen las pendientes de muy fuertes a extremadamente fuertes (8.1% del área), asociadas a los cañones fluviales. Las pendientes moderadas representan un 7.8% del área y corresponden con los sectores de transición entre los dos grupos antes mencionados

La clasificación final del parámetro de humedad es de 2 a 3, lo cual indica una influencia de baja a media de este parámetro en lo que respecta a la susceptibilidad al deslizamiento.

El parámetro de disparo por sismo se ha evaluado considerando la intensidad (MM) máxima reportada por Morales y Aguilar (1993), la cual es de VIII y se considera constante para el área de estudio. Por lo anterior, el factor de disparo por sismo conduce a una valoración del parámetro D_s de 8, constante para el área de estudio. El parámetro de disparo por lluvia tiene una influencia baja en el cálculo de la susceptibilidad y es constante para toda el área de estudio.

Los resultados, obtenidos mediante la aplicación de la metodología para determinar la susceptibilidad de los terrenos a deslizarse MVM, indican que un 10.8% del área se clasifica como de susceptibilidad media y un 6.9% como de susceptibilidad de alta a muy alta; el restante 82.3% se clasifica como de susceptibilidad de baja a muy baja.

El resultado de esta investigación debe ser utilizado como una herramienta para la toma de decisiones en lo que respecta a la planificación urbana, otorgamiento de permisos para la construcción de obras de infraestructura y en la regulación de uso del terreno, sin sustituir estudios geotécnicos de detalle, principalmente en las áreas de susceptibilidad de media a muy alta.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Denyer y Arias, 1991: Estratigrafía de la región central de Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 12: 1-59 p
- Bieniawski, Z.T., 1989: Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley & Sons, New York. 251 p.p.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A. & Paulhus, J.L., 1986: Hidrología para Ingenieros. McGraw-Hill, México. 386 p.p.
- Miles, S.B. & Keafer, D.K., 2002: Seismic landslide hazard for the city of Berkeley, California. U.S. Department of The Interior, U.S. Geological Survey. (Documento no editable en Internet)
- Mora, R., Chaves, J. & Vázquez, M., 2002: Zonificación de la Susceptibilidad al Deslizamiento: Resultados obtenidos para la Península de Papagayo mediante la modificación del método Mora-Vahrson (Mora, R., Vahrson & Mora, S., 1992). Servicios Especializados de Laboratorio de Suelos y Rocas, FUNDEVI 0960-00, Vicerrectoría de Investigación 113-A0827, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- Mora, R., Vahrson, W. & Mora, S., 1992: Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC).
- Morales, L.D., & Aguilar, A., 1993: Mapa de amenaza sísmica de la Gran Área Metropolitana. En: Denyer, P. & Kussmaul, S., 1994: Atlas Geológico de la Gran Área Metropolitana, Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 275 p.p.
- Trifunac, M.D. & Brady, A.G., 1975: On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of the recorded ground motion. Bulletin Seismological Society of America, vol. 65.
- van Zuidam, R.A., 1986: Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. Smits Publishers, The Hague. 442 p.p.