



Evaluación de la Amenaza por Deslizamiento en Málaga, Santander, aplicando la Metodología de los Conjuntos Difusos: Un Tema de Geología Ambiental.

MODESTO EUSEBIO PORTILLA GAMBOA

Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Apartado Aéreo 14490, Santafé de Bogotá, Colombia.

PORTILLA G., M.E. (1999): Evaluación de la Amenaza por Deslizamiento en Málaga, Santander, aplicando la Metodología de los Conjuntos Difusos: Un Tema de Geología Ambiental.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 24, pgs. 159-176, 13 Figs., 1 Tabla, Santafé de Bogotá.

RESUMEN

Con base en los datos geológicos, obtenidos a partir de interpretación fotogeológica y de campo, el deslizamiento del barrio Los Naranjitos de Málaga, al oriente del Departamento de Santander, se toma como ejemplo para el desarrollo metodológico de la evaluación de la amenaza por remoción en masa, siguiendo la teoría de los conjuntos difusos. Se exponen los factores involucrados en la probable reactivación del fenómeno, así como la forma de calificarlos y valorarlos por medio de las variables lingüísticas, las que se basan en la manera como se expresa el conocimiento humano, más que en la información estrictamente numérica. Se destaca el papel del profesional de las Ciencias de la Tierra, en la evaluación de la amenaza, como parte fundamental en el cálculo del riesgo, factor determinante en la toma de decisiones por parte de los planificadores del desarrollo regional y nacional.

Las metodologías tradicionales dan información acerca de la probable ocurrencia de un evento amenazante, sin tener en cuenta las condiciones y características geológicas locales. Esta deficiencia es superable por parte del geocientífico siguiendo la metodología de los conjuntos difusos; la que bien manejada, da resultados confiables y con bajo nivel de incertidumbre. Los resultados del trabajo que indican una probabilidad entre 63 % y 73 % de reactivación del deslizamiento, son de gran importancia para la realización de estudios posteriores sobre el tema; haciéndose necesario investigar y formular metodologías similares para el análisis de la vulnerabilidad, de tal forma que se pueda llegar a la evaluación integral del riesgo por fenómenos de remoción en masa.

Palabras Clave: Málaga, Santander, Colombia, Riesgo geológico, Deslizamientos, Conjuntos difusos, Geología ambiental.

ABSTRACT

Using geological field and photogeological data, the Los Naranjitos landslide in Malaga, eastern Santander province, is taken as an example to develop a methodology to evaluate mass movement hazards, following fuzzy sets theory. The factors involved in the probability of reactivation and the form to evaluate and qualify them through linguistic variables which are based on human knowledge, are briefly exposed. The geoscientist role, in hazard assessment as a part of risk evaluation is a major parameter in making decisions by national and regional developers and land-use planners.

Traditional methodologies give information on probability of hazardous events, without taking into account local geological characteristics. That deficiency is corrected by the geoscientist, applying the fuzzy sets methodology, which well focused gives good results with low uncertainty degree. The results of the proposed case (63 % - 73 % of probability of landslide reactivation) are very important to future investigations. It is necessary to carry out careful studies and formulate similar methodologies applied to vulnerability analysis to get integral risk assessment in mass movements.

Key Words: Malaga, Santander, Colombia, Geologic risk, Landslides, Fuzzy sets, Environmental geology.

1. INTRODUCCION

La evaluación del *Riesgo*, entendido como la probabi-

lidad de que se exceda cierto nivel de *pérdidas* en una región geográfica durante un tiempo determinado, se convierte en herramienta fundamental en el proceso de toma

de decisiones por parte de los encargados del ordenamiento territorial y de los planificadores del desarrollo de un país.

En tal sentido, se hace necesario por parte de los profesionales la identificación, estudio y evaluación de las amenazas a las que está sometida una región. Se entiende de la *Amenaza* como el *peligro* o la probabilidad de ocurrencia de un *fenómeno* físico (natural o antrópico), cuya evaluación implica la delimitación específica de un lugar geográfico donde se puedan manifestar los efectos del fenómeno y un tiempo determinado en el que se espera que se materialice la amenaza. La *Vulnerabilidad* se refiere al nivel de incapacidad de un elemento expuesto, de resistir adecuadamente la intensidad del Evento Amenazante, el cual representa la materialización de la Amenaza. La Vulnerabilidad se analiza con el propósito de definir el nivel de *daño* esperado para el elemento expuesto, como consecuencia de su afectación.

Técnicamente, las Geoamenazas deben ser analizadas por profesionales de las Ciencias de la Tierra, quienes poseen las bases tecnicocientíficas y el conocimiento esencial para llevar a cabo su identificación, estudio y evaluación. Así mismo, dependiendo del tipo de elemento expuesto, la Vulnerabilidad debe ser analizada por profesionales de las Ciencias Humanas, Sociales e Ingenierías.

Una vez definidas estas dos componentes fundamentales: la Amenaza y la Vulnerabilidad, mediante su convolución (en su acepción más sencilla: la multiplicación) se podrá entonces calcular el Riesgo. Conociendo el valor de éste último, de acuerdo a las medidas tanto estructurales como no estructurales que se lleguen a recomendar, los economistas deben realizar el estudio de la viabilidad tecnicoeconómica de la mitigación del Riesgo, teniendo como base, en el análisis de la relación costo/beneficio, el periodo de vida útil de los elementos expuestos y su valor de reposición.

Todo este proceso, incluyendo recomendaciones claras, precisas y entendibles, deberá ser comunicado a los planificadores del desarrollo y del ordenamiento territorial, para que sea la base del análisis en la toma de decisiones finales en cuanto a la apropiación de recursos presupuestales y definición de prioridades en el cronograma de inversiones a realizarse para una efectiva y coherente mitigación del Riesgo; de tal forma que sea posible evitar la ocurrencia de hechos desastrosos, que lleven a un atraso en el nivel de desarrollo de una región y en general de un país.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, es claro que la evaluación y la mitigación del Riesgo requiere de un trabajo multidisciplinario (Ciencias de la Tierra, Humanas, Sociales, Ingenierías, Políticas y por supuesto la Comunidad como eje central del proceso). Por lo tanto, es fundamental el papel que deben jugar las instituciones educati-

vas en la adecuada preparación de sus estudiantes, en lo referente al tema de la evaluación del Riesgo.

2. JUSTIFICACION

Existen numerosas metodologías para el análisis y evaluación de la Amenaza por Deslizamiento (RUBIANO 1.993), basadas exclusivamente en información numérica, la cual se obtiene a partir de estudios geotécnicos detallados y costosos, cuya precisión y confiabilidad por lo general no retribuye la inversión realizada. Aún a escalas de nivel local (1:500 - 1:5000), se usan modelos determinísticos, que requieren datos del terreno como cohesión, ángulo de fricción interna, densidad volumétrica, nivel freático, etc., parámetros que se obtienen a partir de análisis de laboratorio y de campo, y cuyos procedimientos y valoración de resultados no son del mejor nivel de acuerdo a las mismas normas geotécnicas usadas para programas de exploración y caracterización del subsuelo. La información adicional se convierte en "factores" (geológicos, topográficos, de vegetación, de uso del suelo, entre otros), que en el mejor de los casos termina convirtiéndose en material complementario o anexos.

El objetivo del presente trabajo es mostrar la aplicación del conocimiento geológico en la evaluación de la Amenaza por Deslizamiento, tomando como ejemplo el fenómeno de Remoción en Masa que se presenta en el sector suroriental del Barrio Los Naranjitos, en el municipio de Málaga, Departamento de Santander. Mediante el presente estudio se propone el desarrollo de una metodología basada en una mejor aproximación a la forma del razonamiento humano: la Lógica Difusa, y como una de sus aplicaciones, los Conjuntos Difusos.

3. TEORIA DE LOGICA DIFUSA Y CONJUNTOS DIFUSOS

En la segunda mitad del presente siglo se han propuesto nuevas teorías que valoran los conceptos cualitativos del ser humano y a partir de ellas se han desarrollado metodologías no tradicionales, que facilitan la evaluación de las Geoamenazas donde el papel del geólogo es definitivo. Así, Loft Zadeh en 1.965 (WANG 1.994), propuso la teoría de la Lógica Difusa, la cual se fundamenta en la calificación de parámetros a través de variables lingüísticas. Estas a su vez expresan el razonamiento cualitativo que el ser humano hace de su entorno por medio de un juicio o abstracción de la realidad, utilizando el conocimiento y la experiencia en el proceso que valora.

Así, por ejemplo, un ser humano se expresa en los siguientes términos para referirse al estado de la temperatura ambiental local: "esta haciendo frío o está haciendo calor", y no: "esta haciendo 7.5 grados centígrados o está

haciendo 32,5 grados centígrados", a no ser que llevara consigo siempre un termómetro. En este caso se podría decir que las variables lingüísticas: frío y calor, califican razonablemente el estado de la temperatura ambiental y a ellas se las relaciona con rangos o intervalos de valores numéricos, que en promedio y en forma lógica las representa: temperaturas entre 0 y 5°C (mucho frío), entre 6 y 10°C (frío), entre 11 y 25°C (fresco) y mayor a 26°C (calor). Con estas calificaciones lingüísticas se desarrolla el proceso de evaluación y posteriormente se lleva la valoración lingüística a rangos numéricos, cuyos límites determinan el nivel de incertidumbre del resultado.

Una aplicación de ésta teoría son los denominados "Conjuntos Difusos". La fundamentación teórica y conceptual, así como el desarrollo matemático respectivo, se puede consultar en HELLEDOORN, DRIANKOV Y REINFRANK (1.996). Sin embargo, a manera de resumen, y para un mejor entendimiento del presente trabajo se mencionan a continuación algunos aspectos fundamentales relacionados con conjuntos difusos (adaptado de HELLEDOORN *et al* 1.996 y WANG 1.994).

3.1 Definición de Conjunto Difuso. Es una colección de objetos o elementos cuya pertenencia al conjunto, de acuerdo a sus características o propiedades, está dada por una función que representa un grado de pertenencia, de tal elemento al conjunto. A diferencia de la teoría clásica de conjuntos, donde el elemento pertenece o no pertenece, es verdadero o es falso y toma el valor de 0 o de 1, la teoría de conjuntos difusos concibe estas situaciones como los valores extremos que puede tomar la variable o elemento valorado. La función de pertenencia o "función característica", representada por μ_F , se denota de la siguiente manera:

$$\mu_F : U \rightarrow [0, 1]$$

donde $\mu_F(u)$ es el grado en que el elemento u pertenece al conjunto universal U (ejemplo: $\mu_F(u) = 0.25$, indica que el elemento u pertenece en un 25 % a U y en un 75 % u no pertenece a U). En otras palabras, que existe un 25 % de probabilidades de hallar a u en U y un 75 % de no hallarlo).

3.2 Definición de las operaciones. Unión, Intersección y Complemento, en Conjuntos Difusos: Sean A y B dos conjuntos difusos definidos en el conjunto universal U .

a) La **intersección** (\cap) entre A y B es un conjunto difuso en U , con una función de pertenencia definida para todo $u \in U$, mediante:

$$\mu_{A \cap B} = \text{Min} \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \}; \text{ valor mínimo entre } \mu_A(u) \text{ y}$$

$\mu_B(u)$, algebraicamente expresado por el producto:

$$\mu_A(u) \cdot \mu_B(u) \text{ (T-norma, WANG 1.994)}$$

b) La **unión** (\cup) entre A y B , es un conjunto difuso en U , con una función de pertenencia definida para todo $u \in U$, mediante:

$$\mu_{A \cup B} = \text{Max} \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \}; \text{ valor máximo entre } \mu_A(u) \text{ y } \mu_B(u), \text{ algebraicamente expresado por la suma:}$$

$$\mu_A(u) + \mu_B(u) - \mu_A(u) \cdot \mu_B(u) \text{ (T-conorma, WANG 1.994)}$$

c) El **complemento** del conjunto difuso A , \bar{A} , es un conjunto difuso en U , con la función de pertenencia definida para todo $u \in U$, por:

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u)$$

d) Operaciones entre intervalos

$$[a, b] + [c, d] = [a+c, b+d]$$

$$[a, b] - [c, d] = [a-d, b-c]$$

$$[a, b] \times [c, d] = [\text{Min} (ac, ad, bc, bd), \text{Max} (ac, ad, bc, bd)]$$

4. LOCALIZACION Y GEOLOGIA DEL AREA DE MÁLAGA, SANTANDER

El municipio de Málaga se encuentra ubicado en la zona oriental del Departamento de Santander, 150 km al SE de Bucaramanga, en la Provincia de García Rovira. A su vez el deslizamiento del Barrio Los Naranjitos se ubica 1 km al sur del centro de Málaga, sobre la quebrada La Malagueña, por la vía que conduce al Municipio de San José de Miranda (Fig.1); coordenadas planas $X = 1.232.000$ y $Y = 1.149.000$, con origen en Santa Fe de Bogotá.

A continuación se hace una breve descripción de las características geológicas de la zona, con el fin de proveer la información básica, a partir de la cual se desarrollará posteriormente la aplicación del método de los conjuntos difusos, en la evaluación de la Amenaza por la probable reactivación del deslizamiento.

4.1 Litología. En los alrededores de Málaga y en el sitio del deslizamiento del barrio Los Naranjitos, afloran sedimentitas de ambiente depositacional marino. Litológicamente están constituidas por calizas con intercalaciones de lutitas fisisables, altamente fracturadas, pertenecientes a la Formación Tibú-Mercedes (VARGAS *et al* 1.976) (Fig. 2a). Las intercalaciones de lutitas constituyen geotécnicamente hablando, planos de debilidad por donde drena el agua de infiltración. Lo anterior le confiere a dicho macizo rocoso, un alto grado de susceptibilidad a

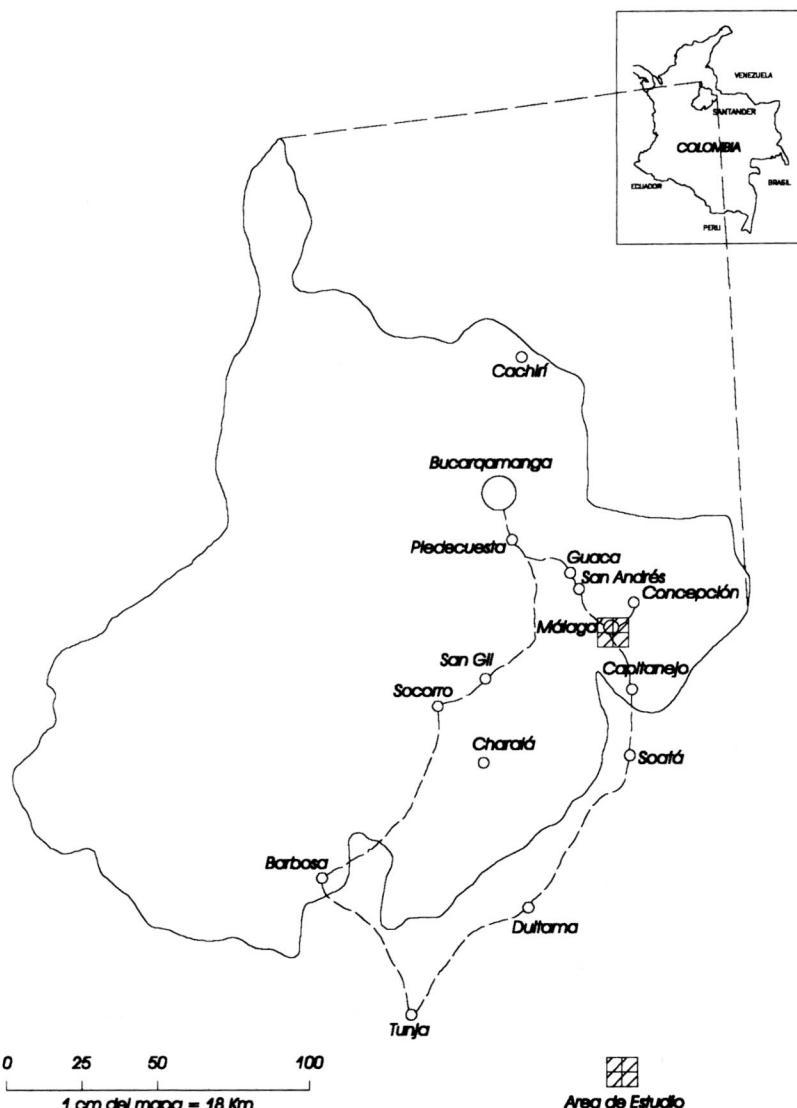


Fig. 1. Mapa de localización

los fenómenos de remoción en masa. De hecho, sobre esta litología se presenta el 70% de los deslizamientos cartografiados en la región (PORTILLA 1.997).

4.2 Geología Estructural. Las estructuras presentes corresponden a una serie de anticlinales y sinclinales, cuyos ejes tienen una orientación predominante N-S, los que se encuentran afectados por fallas inversas inclinadas 45 a 60° al W, con orientación paralela al tren general de los pliegues. Las estructuras plegadas

son asimétricas y apretadas, con buzamientos hasta de 50°. En el casco urbano de Málaga se proyecta el eje del sinclinal del mismo nombre, afectado por la falla normal Málaga-Miranda (500 m al W del deslizamiento); a 2500 m al E del mismo, pasa el trazo principal de la falla inversa del río Servitá (Fig. 2b).

4.3 Geomorfología. A grandes rasgos se puede decir que la zona de estudio corresponde a un valle de erosión fluvial con orientación N-S, longitudinal al tren cordillerano. El pro-

ceso morfodinámico del río Servitá y sus afluentes, dentro de los cuales se halla la quebrada La Malagueña, han labrado valles en V amplios y profundos, dando lugar a un relieve escarpado con pendientes superiores al 50 %. Localmente el relieve varía entre ondulado a fuertemente escarpado, presentando enmascaramiento del sustrato rocoso por la presencia de depósitos coluviales y por el desarrollo de suelos residuales arcillosos, con espesores desde algunos centímetros hasta 10 m. Es de anotar que en la región predomina la topografía kárstica, asociada a la presencia de rocas calcáreas y clima húmedo, correspondiente a la zona de vida Bosque Húmedo Montano Bajo (CORPOICA 1.995): biotemperatura anual = 12 a 18°C, altura sobre el nivel del mar = 1800 a 2300 m y precipitación anual = 1000 a 2000 mm. En la Tabla 1 se presenta el registro histórico de precipitaciones en Málaga, correspondientes a los datos del IDEAM para la estación No 2403095.

4.4 Hidrología Local. Cuatro kilómetros al occidente del casco urbano de Málaga, sobre las estribaciones orientales del cerro El Cabro, nacen los arroyos que conforman la quebrada denominada La Magnolia, quebrada Seca o quebrada La Malagueña. Esta corriente de agua presenta una dirección predominante NW-SE, pasando por el centro de la población de Málaga, donde le vierten sus aguas negras, continuando su recorrido y pasando por el centro del deslizamiento del barrio Los Naranjitos, para luego desembocar en el río Servitá. Cuando se presentan las precipitaciones de carácter torrencial, el agua rápidamente alcanza el cauce de la quebrada, debido a la alta pendiente de las laderas y a la culturización del paisaje (deforestación progresiva), transportando consigo abundante cantidad de sedimentos que contribuyen a la erosión de las laderas y al socavamiento del cauce, constituyén-

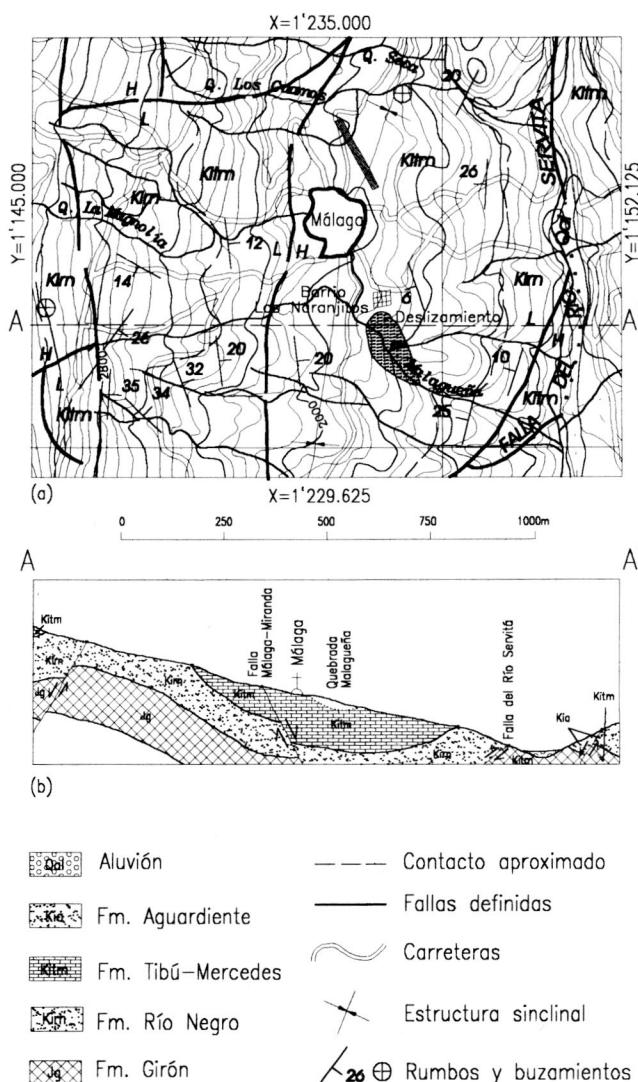


Fig. 2. a) Mapa geológico del área de Málaga (VARGAS et al 1976)
b) Perfil geológico del área de estudio.

dose en el principal proceso geomórfico de interés para el tema de estudio.

4.5 Uso actual y Potencial del suelo. En el área circunvecina al deslizamiento se ha construido el barrio Los Naranjitos (a 150 m de la corona del deslizamiento), la subestación eléctrica de Málaga (a 50 m de la corona del deslizamiento) que le suministra energía a la totalidad de la Provincia de García Rovira, la carretera Málaga-Capitanejo-Bogotá (a 200 m

de la corona del deslizamiento), casas de habitantes de la región, una estación de gasolina y nueve ladrilleras o "chircales" que extraen su materia prima de los suelos residuales anexos a la corona del deslizamiento. Estas construcciones, obras de infraestructura y explotaciones mineras, constituyen los elementos expuestos (sin tener en cuenta los seres vivos que las habitan o usufructúan) y además generan una mayor área de exposición al agua de percolación y por lo tanto al avance retrogresivo de la

zona de inestabilidad. El uso potencial del suelo es la ganadería de tipo extensivo, con prácticas de conservación y manejo, y el desarrollo de cultivos permanentes y semipermanentes (CORPOICA 1.995).

5. EL DESLIZAMIENTO

A continuación se describe el estado del deslizamiento "Los Naranjitos", de acuerdo a los datos recolectados en campo. Se incluyen las características geológicas locales y las versiones tomadas de los moradores más antiguos de la zona con respecto al comportamiento del deslizamiento durante los últimos 30 años.

El fenómeno de remoción en masa transcurre paralelamente al cauce de la quebrada La Malagueña (S45°E), presentando su flanco izquierdo en el sector noreste y el flanco derecho en el sector suroeste de dicho cauce. Sus dimensiones, en diciembre de 1.997, eran:

- Longitud = 900 metros
- Amplitud = 400 metros
- Altura = 200 metros

Es decir, está afectando aproximadamente unas 20 hectáreas de tierra fértil. La superficie de la corona se encuentra a una altura de 2.150 m.s.n.m. y la pata a 1.950 m.s.n.m.; el avance retrogresivo y lateral alcanza los 200 m a lado y lado del cauce de la quebrada.

Durante la fase de campo se realizaron varias travesas a lo largo y ancho de la zona del deslizamiento, con el fin de conocer las condiciones reales del mismo y de ello se puede anotar lo siguiente:

- Se asumía, porque así lo indicaban las descripciones geológicas regionales realizadas hasta la fecha (1.997), que en la zona los estratos de calizas y lutitas buzaban hacia el NW, es decir en contra de la pendiente topográfica local.
- Igualmente se tenía la información que, litológicamente los materiales constituyentes eran calizas ma-

TABLA 1
Registro Histórico de Precipitaciones en Málaga, Santander (valores totales en mm)

AÑO/MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	Vr ANUAL
1.973	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60.5	60.5
1.974	54	111	132	221	260	23	69.5	118	265	225	271.5	0	1749.5
1.975	11	140	52	108	189	54	126	66	204	282	227	308	1767
1.976	22.5	109	139	224	162	83	43	31	132	349	75	18	1387.5
1.977	5	2	50	185	282	128	75	58	123	169	346	3	1425.5
1.978	27	25	201	336	189	103	68	92	168	232	167	45	1653
1.979	27	31	77	230	245	210	101	151	217	328	243	117	1977
1.980	47	103	30	105	149	80	34.3	101.5	41	72	198.4	126.8	1088
1.981	0	75.1	129	1010	780	408	-	131	66.8	295	186.1	138	3219.1
1.982	116	269.7	391	565	320	79	-	134.7	-	-	95	25	1996.3
1.983	12	9	67	157	71	-	99.6	66.5	60.8	177	76.5	56.9	853.3
1.984	38.3	87.3	40.2	60.6	38.3	29.6	150	58	212.6	149	163.8	57.4	1085
1.985	12.1	47.7	160	133	131	64.5	27.3	45.3	79.7	65.8	107.5	66	939.3
1.986	17.2	46	71.3	158	-	116	-	-	316	282	335	122	1463.5
1.987	2.3	22.5	54.9	55.4	219	81.9	135	176	144	663	152	16	1721.8
1.988	33	101	63	220	212	144	168	287	344	347	348	92	2359
1.989	61	89	177	91	148	57	69	74	291	266	99	93	1515
1.990	46.4	35.1	77.7	278	142	65.2	93.7	119.3	60.7	339	246.3	93.8	1597.3
1.991	48.7	9.1	120	135	203	68	53	45.3	150.4	202	189.6	32.4	1256.6
1.992	16.6	28.8	47.5	78.8	175	98.9	66	101.8	158.4	98.9	213	99	1182.9
1.993	85.4	3.2	76	203	314	93.6	55	88.7	157.7	162	225.1	80.3	1543.9
1.994	47.3	78.6	100	160	179	40.7	69.4	85.3	223	257	240.2	62.6	1542.9
1.995	36.5	38.2	50.7	204	148	158	112	189	189.9	374	40.7	121.3	1661.6
1.996	71.5	84.6	149	86.3	107	-	-	-	-	-	-	-	497.7
1.997	-	-	-	-	-	31	31	282	202	170	11	727	
1.998	67	91	125	248	-	-	-	-	-	-	-	-	531
MEDIOS	37.7	68.2	108	219	212	104	82.3	102.3	176.7	252	192	76.9	1630

sivas, como ocurre en la meseta de Málaga y San José de Miranda.

- En la percepción de los habitantes de la zona, el deslizamiento ya terminó porque llegó hasta "la peña". Los nuevos moradores no tienen conocimiento de la existencia del fenómeno o se niegan a aceptarlo.
- Una vez realizado el estudio de campo, las condiciones geológicas reales del sitio son:
 - La litología está representada por una secuencia de estratos de caliza altamente fracturados e interestratificados con bancos de limolitas finamente laminadas ("lutitas"), fisibles y con partición en "lapiaz".
 - El rumbo de los estratos, tanto de caliza como de limolitas es N10°W con buzamiento de 49° hacia el NE (a favor de la pendiente topográfica local).
 - El espesor de los estratos varía entre 40 y 80 cm, y presenta sistemas de diaclasas con las siguientes aptitudes: E-W/75°S, N-S/46°W.
 - Otros datos tomados 100 m abajo de la actual posi-

ción de unos gaviones ubicados sobre el cauce de la quebrada (en la pata del flanco noreste), dan las siguientes aptitudes para los planos estratigráficos: N29°W/28°NE (diaclasas: N30°E/85°NW, N8°E/68°SE, N50°W/52°SW) y 50 m más abajo N20°E/21°SE.

- Cien metros aguas arriba, por el cauce de la quebrada, se encontró el eje de un anticinal, donde efectivamente el buzamiento de los estratos es NW, la aptitud de éstos es: N35°E/36°NW. La topografía en este trayecto ya es plana, es decir, se llega a la meseta propiamente dicha.
- En el flanco NE, estratigráficamente, la secuencia de calizas y limolitas, se halla suprayacida por un paquete de limolitas fisibles, altamente fracturadas, color gris oscuro a negro, con manchas amarillentas o rojizas, producto de la meteorización de los sulfuros de hierro contenidos en ellas (pirita). Esta secuencia se encuentra en proceso de remoción en masa, fenómeno que está avanzando

retrogresivamente hacia el barrio Los Naranjitos. Sobre esta litología se desarrolla una capa de suelo cuya profundidad máxima es de 100 cm, textura arenó-gravosa con relictos del material parental, sobre la cual crece vegetación nativa y algunos pastos culturales, como adaptación del terreno a predios de pastoreo.

- En la totalidad de la superficie de este flanco y sus alrededores, en tiempos posteriores a la iniciación del movimiento se reforestó con especies tales como pino, eucalipto, sauce, loqueto, cucharo y matemonte; su único logro ha sido constituirse en sobrecarga al material en proceso de deslizamiento. La erosión superficial es producida por el agua de escorrentía, dando lugar a la generación de microvalles o surcos longitudinales con poca socavación lateral y poca profundización.
- El nivel freático en este flanco, presenta el siguiente comportamiento: hacia la parte superior se halla a 7.5 m de profundidad; hacia la parte media a 5.3 m y en la pata está a 4.5 m de la superficie. Estos datos se obtuvieron mediante la realización de trincheras a través del escarpe.
- En el flanco SW la situación es diferente y más complicada a la del flanco NE, porque allí no se ha ido completamente la masa de limolitas (aunque se está deslizando sobre la superficie de la secuencia de calizas y limolitas interestratificadas). En este sector, la vegetación nativa está presente en una mayor proporción y el terreno ha sido adaptado como predios de pastoreo. El avance retrogresivo del fenómeno es activo y el escarpe principal ya se halla a 50 m de la subestación eléctrica de Málaga.
- En la parte superior del flanco hay desarrollo de suelos residuales con profundidades efectivas de hasta 3 m, textura arcillolimosa, manchas amarillentas a rojizas; de su explotación se extrae el material para fabricar adobes y ladrillo quemado. No se observó el nivel freático debido a que la superficie está cubierta por vegetación y pastos, pero debe presentar un comportamiento similar al del flanco noreste.
- En la totalidad de la superficie del deslizamiento, cuya pendiente topográfica es de 45°, se presentan agrietamientos, indicio de que el material está en movimiento, aunque éste no sea perceptible a simple vista.
- A 20 m del ápice distal o pie del deslizamiento, a la altura de las fincas Santo Domingo y La Hacienda, se vierten las aguas negras que vienen canalizadas desde los barrios Los Naranjitos y La Salle.
- La quebrada La Malagueña está canalizada a su paso por el casco urbano de Málaga, pero únicamente

hasta la altura del barrio Los Naranjitos; de allí en adelante sigue su curso sobre suelo normal, hasta llegar y pasar sobre la superficie del deslizamiento.

- En inmediaciones del escarpe principal se desarrollan labores de minería (extracción de arcillas para la fabricación de ladrillos). Esta actividad también se realiza sobre el talud que dejó el corte de la vía Málaga - San José de Miranda, desestabilizándolo y permitiendo un mayor ingreso de aguas meteóricas al subsuelo.
- En noviembre de 1.996, el Municipio de Málaga construyó unos gaviones de 50 m de largo, por 5 m de ancho y 9 m de alto, sobre la margen izquierda de la quebrada La Malagueña, con el fin de "detener" el avance del deslizamiento en este sector, que corresponde a su perímetro municipal. El flanco SW se encuentra dentro del perímetro municipal de San José de Miranda. Estos gaviones han sufrido en el transcurso de su corta existencia una deformación por el empuje del material que está en movimiento y por el socavamiento de sus bases producto de la acción de la quebrada.
- Según versiones de los pobladores de la zona, en la vertiente NE de la quebrada La Malagueña se construyó una carretera hasta el borde de la pendiente existente y allí se depositaban los residuos sólidos recogidos en Málaga y municipios vecinos. Aunque se encontraron numerosos vestigios de dichos residuos, no fue posible dimensionar las cantidades de los materiales que allí se alcanzaron a verter, para determinar su influencia en la generación y desarrollo del deslizamiento.

5.1 Versión de los Habitantes sobre el Deslizamiento

Durante el trabajo de campo y como parte de la investigación histórica del origen, evolución y estado del fenómeno de remoción en masa, se tomaron en cuenta las versiones de los habitantes más antiguos de la región, mediante la modalidad de la entrevista personal.

Bernardino Celis: "El deslizamiento se ha ido poco a poco, sobre todo en épocas de invierno. En los últimos dos años se ha estado casi quieto, debido a que la cantidad de agua que ha caído ha mermado".

Luis Ballesteros: "Hace unos 15 o 20 años empezó el deslizamiento y se va poco a poco, sobre todo en los meses de octubre y noviembre en épocas de invierno; aunque fue en verano cuando se fue el del lado de la subestación eléctrica, del lado de Miranda".

Eusebio Súarez: "En octubre del año 1.980 empezaron las grietas y lloraban agua, arrastraron una casa. Esto en las partes de abajo de la quebrada, por allá en la Hacienda, había dos aguadas (nacederos de agua) a donde bebió el ganado. Como un año

después se fue la tierra y se llevó un bosque de loquetos y al año siguiente se fue la aguada de arriba y se terminó el bebedero para el ganado; de ahí en adelante se ha seguido yendo, hasta hace unos 2 o 3 años que mermó el invierno.

5.2 Análisis de Fotografías Aéreas. Una vez realizado el trabajo de campo, se adquirieron las fotografías aéreas de la región, las cuales existen en los archivos del Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" y están disponibles para la venta al público.

Se analizaron los siguientes vuelos que pasan por la región de interés: C-2031 (1.981), C-2077 (1.983), C-2168 (1.984), C-2378 (1.989) y C-2503 (1.992); de cada uno de ellos se escogió la foto donde estaba enmarcada el área de estudio y en ellas se pudo detectar lo siguiente:

C-2031/154 (27-VII-81):

- Existen evidencias de un proceso erosivo en el cauce de la quebrada La Malagueña (gran cantidad de materiales en el cauce), pero aún no se ha iniciado el deslizamiento.
- No existe el barrio Los Naranjitos.
- Ya existe la carretera al sitio de disposición de los residuos sólidos de Málaga; pero no se visualiza el material que allí se vertía.
- No existe la ladrillera ubicada hoy en día al lado de la subestación eléctrica.
- Existen tres casas vecinas al valle de la quebrada.

C-2077/07 (20- III-83):

- Ya existe el deslizamiento.
- Todavía no existe el barrio Los Naranjitos.
- Siguen las tres casas vecinas al valle de la quebrada.
- Aún no se observa la ladrillera al lado de la subestación eléctrica.

C-2168/199 (30-XII-84):

- El deslizamiento continúa avanzando retrogresivamente.
- Se ha ido parte de la carretera que conducía al sitio de disposición de residuos sólidos.
- Ya existe el barrio Los Naranjitos.
- Unicamente se observan dos casas vecinas al valle de la quebrada.
- No se observa la ladrillera que actualmente existe cerca de la subestación eléctrica.

C-2378/124 (16-II-89):

- Continúa el avance del deslizamiento en forma drástica.
- Desaparece la carretera que conducía al sitio de disposición de residuos sólidos.

- La corona del deslizamiento se acerca al barrio Los Naranjitos. La segunda casa ya está en su borde.
- Está construida la ladrillera en las inmediaciones de la subestación eléctrica.

C-2503/164 (8-XII-92):

- El deslizamiento sigue su avance; está cerca de la carretera que conduce a la ladrillera del señor Eusebio Suárez (se ha nombrado anteriormente como la segunda casa).
- El estado actual del deslizamiento es el que se observa en las fotografías 1 y 2.

6. EVALUACION DE LA AMENAZA - CONJUNTOS DIFUSOS

La teoría de los conjuntos difusos se basa en la lógica difusa: cuando un sistema es complejo de analizar, este se subdivide sistémicamente en sus componentes, de tal forma que el entendimiento del fenómeno sea cada vez más sencillo, al disponerse de una mejor información acerca de sus componentes, más que del conjunto como un todo. La evaluación que se hace a cada subnivel se integra posteriormente al nivel superior y así sucesivamente hasta llegar al nivel principal.

La metodología de evaluación de la amenaza por deslizamiento, siguiendo los conjuntos difusos, aplica las siguientes etapas:

- i Determinar los factores relacionados con la probable ocurrencia de un deslizamiento:
 - Lluvias
 - Sismos
 - Distancia a Fuentes Sismogénicas
 - Sismicidad Histórica
 - Factores Antrópicos
 - Deforestación
 - Labores Mineras
 - Geología
 - Litología
 - Grado de fracturamiento del macizo rocoso
 - Buzamiento de los estratos con respecto a la pendiente topográfica
- ii Organizar jerárquicamente los factores (Fig. 3):

Primer orden: Lluvias, Sismos, Factores Antrópicos y Geología.

Segundo orden: Distancia a Fuentes Sismogénicas, Sismicidad Histórica, Deforestación, Labores Mineras, Litología, Grado de Fracturamiento del Macizo Roco y Buzamiento de los Estratos con respecto a la Pendiente Topográfica.



Fotografía 1. Flanco SE del deslizamiento. Extremo superior izquierdo, subestación eléctrica de Málaga.



Fotografía 2. Flanco NE del deslizamiento. Buzamiento a favor de la pendiente topográfica

Los factores de primer orden son los que determinan la probabilidad de ocurrencia del fenómeno evaluado y, los factores de niveles subordinados influyen en la probable ocurrencia del factor del cual dependen, o en la participación de este factor en el fenómeno principal.

iii Definir la dependencia entre los diferentes factores:
Lluvias: Independiente de los demás factores.
Distancia a fuentes sismogénicas y sismicidad histórica: condicionan la probable ocurrencia de un *Sismo*.
La litología, el grado de fracturamiento del macizo rocoso y el

buzamiento de los estratos con respecto a la pendiente topográfica, condicionan la participación de la *Geología* en la probable reactivación del deslizamiento.

- iv Determinar la participación o importancia individual de los factores evaluados en la reactivación del deslizamiento.

Para ello se define un criterio de evaluación homogéneo para todos los factores (proceso de acumulación de evidencias):
¿En cuánto contribuye o cual es la evidencia de que el factor a evaluar, favorece la ocurrencia del fenómeno del nivel superior? Para el presente caso, se tomará una escala entre 0.0 y 1.0, de tal forma que cuando definitivamente haya evidencia de que el factor evaluado favorece la ocurrencia del fenómeno, se le dará un valor de 1.0 y cuando definitivamente no haya evidencia de que el factor evaluado contribuye a la ocurrencia del fenómeno, se le dará un valor de 0.0; y de acuerdo a la opinión del experto se tomarán valores comprendidos entre ese rango cuando la calificación de la evidencia sea intermedia.

A continuación se relacionan los factores involucrados en la evaluación, su calificación de la evidencia y la razón de dicha calificación, teniendo en cuenta que los factores de primer orden se califican independientemente de los factores de orden subordinado y que estos últimos aportan o participan únicamente en la ocurrencia del factor del cual dependen.

- **Lluvias:** 1.0, porque de acuerdo con la información de los moradores de la región, en épocas de invierno se reactiva el fenómeno.

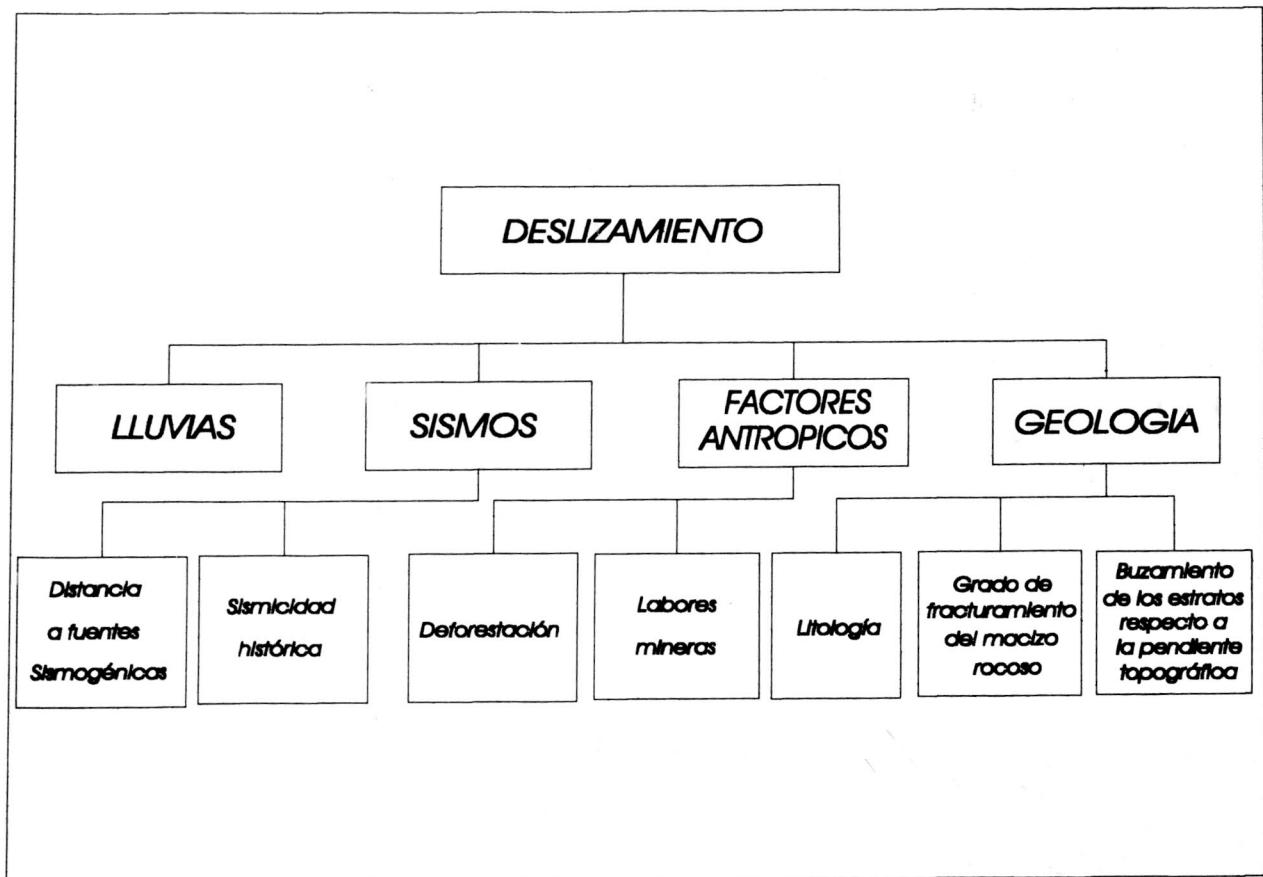


Fig. 3. Organización jerárquica de los factores evaluados.

- **Sismos: 0.1**, porque a pesar de que la zona está dentro del corredor de la falla de Servitá y de la falla Málaga-Miranda, por sismicidad histórica -según las mismas versiones de los moradores- nunca un "temblor" ha afectado al deslizamiento.
 - *Distancia a Fuentes Sismogénicas: 1.0*, porque la zona se encuentra, como ya se dijo, dentro del corredor de fallas regionales, a menos de 3 km, y porque esas fallas son activas, de acuerdo a evidencias observadas en campo: estratos de arenisca sobre depósitos de edad cuaternaria.
 - *Sismicidad Histórica: 0.2*, porque hay casi total evidencia de que ningún sismo ha generado o afectado al deslizamiento.
- **Factores Antrópicos: 0.1**, porque aunque la actividad antrópica (deforestación y labores mineras) permite una mayor acción del agua en el área de influencia del deslizamiento, a su vez implica una disminución de la sobrecarga.
 - *Deforestación: 0.8*, porque de acuerdo a las versiones de los moradores, hace unos 50 años los terrenos al occidente de Málaga eran un bosque y con el transcurso del tiempo se deforestó para adaptar predios de pastoreo, lo que implicó una mayor acción del agua en la cuenca de la quebrada La Malagueña y una mayor velocidad de las crecientes durante las épocas de lluvia, con el respectivo socavamiento del cauce de la quebrada y desestabilización de las laderas.
 - *Labores Mineras: 0.4*, debido a que la explotación del subsuelo que se lleva a cabo a cielo abierto, conduce a una mayor superficie de exposición a la infiltración del agua lluvia, pero igualmente la cantidad de material que se remueve le quita una sobrecarga a la corona del deslizamiento.
- **Geología: 0.8**, porque la interestratificación de calizas y limolitas, combinada con diaclasamiento de las mismas y buzamiento a favor de la pendiente

topográfica, suponen todas las condiciones favorables para que ocurra un movimiento de remoción en masa, siempre y cuando se presenten otros factores exógenos (sismos, lluvias).

- *Litología: 0.8*, porque la intercalación de limolitas fisisbles y finamente laminadas dentro de una secuencia de otro tipo de roca, constituye planos de debilidad, que con las lluvias pasan a ser superficies de deslizamiento.
- *Grado de Fracturamiento del Macizo Roco: 0.8*, ya que las diaclasas y fallas se convierten en planos de ingreso del agua lluvia, aumentan la porosidad y permeabilidad de las rocas y disgregan el material (menor cohesión).
- *Buzamiento de los Estratos con respecto a la Pendiente Topográfica: 0.8*, porque el buzamiento de los estratos es a favor de la pendiente topográfica. Además, un talud sobre litología limolítica, finamente laminada y con partición en lapiáz, para que sea estable en condiciones saturadas, debe tener una inclinación máxima de 21° y en condiciones no saturadas, de 30-35° (MCLEAN & CRIBBLE 1.985). La pendiente actual del talud es de 45 grados.
- v *Otorgar un nivel de confianza a la evaluación del experto: la calificación varía en un rango entre 0.0 (no se confía) y 1.0 (confianza total en el concepto).* Para la presente evaluación, se dieron los siguientes niveles de confianza:
 - *Lluvias: 1.0*, porque se tiene total certeza (bases técnicas y versiones), acerca del papel que desempeñan las lluvias como evento detonante en fenómenos de remoción en masa. En Málaga, en el deslizamiento del barrio Los Naranjitos, se han presentado reactivaciones en épocas invernales.
 - *Distancia a Fuentes Sismogénicas: 1.0*, por cuanto las evidencias en campo son definitivas, para asegurar que dichas fuentes están presentes en la zona y que ellas son activas.
 - *Sismicidad Histórica: 0.7*, por cuanto no es totalmente claro el papel de la sismicidad de Málaga en la generación y/o reactivación de los fenómenos de remoción en masa presentes en la zona.

- *Deforestación y Labores Mineras: 0.8*, por cuanto la evaluación la realiza un profesional que tiene experiencia en el campo de la minería y conoce los efectos de esta labor en la desestabilización de las cuencas hidrográficas.
- *Litología: 1.0*, porque el estudio realizado al respecto fue en detalle y las observaciones de campo indican el papel determinante de la litología en la evolución del problema analizado.
- *Grado de Fracturamiento del Macizo Roco: 0.6*, porque no se tomaron datos en forma sistemática con respecto a la tectónica local, sino que fueron puntuales y espaciados (baja densidad de muestreo).
- *Buzamiento de los Estratos con respecto a la Pendiente Topográfica: 0.8*, porque las evidencias de campo en las que se basó el concepto emitido, concuerdan con los datos teóricos comúnmente aceptados.
- vi *Calificación de cada uno de los factores evaluados: para ello se acude a las variables lingüísticas y a su tratamiento, contemplado en la teoría de los conjuntos difusos. Se le da una calificación de MUY BUENO (cuando el factor definitivamente no contribuye a la ocurrencia del fenómeno), BUENO, REGULAR, MALO (cuando la evidencia de que el factor contribuya o no al fenómeno, no sea contundente) y MUY MALO (cuando el factor definitivamente sí contribuye a la ocurrencia del fenómeno).* La calificación otorgada a cada uno de los factores que se tuvieron en cuenta en la evaluación de la amenaza para el deslizamiento Los Naranjitos, fue:
 - *Lluvias: MUY MALO*, porque definitivamente es el principal evento detonante de movimientos en masa.
 - *Distancia a Fuentes Sismogénicas: MUY MALO*, por la cercanía de la zona del deslizamiento a fallas activas.
 - *Sismicidad Histórica: REGULAR*, porque no existen los argumentos definitivos y concluyentes para afirmar o negar su participación en los fenómenos de remoción en masa de la zona de Málaga y porque a lo mejor no se han hecho observaciones cuidadosas al respecto (nadie realizó observaciones en los deslizamientos, con posterioridad a la ocurrencia de un "temblor").

- **Deforestación:** **MALO**, porque es evidente que a menor vegetación presente en una zona, mayor es la posibilidad de que se generen procesos erosivos e infiltración de aguas lluvias.
- **Labores Mineras:** **REGULAR**, porque el área que con ello se expone a una mayor infiltración del agua, no es tan grande como cuando se deforesta; además, se quita peso o sobrecarga a la corona del deslizamiento.
- **Litología:** **MUY MALO**, por la presencia de limolitas fisibles y finamente laminadas, que conforman una superficie de debilidad, máxime cuando le ingresan fluidos.
- **Grado de Fracturamiento del Macizo Rocoso:** **MALO**, porque las diaclasas y demás fracturas incrementan la porosidad y permeabilidad de las rocas afectadas, disminuyendo su cohesión y generando una mayor inestabilidad.
- **Buzamiento de los Estratos con respecto a la Pendiente Topográfica:** **MALO**, porque una disposición de estratos a favor de la pendiente topográfica favorece la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa, y un talud con un ángulo de inclinación mayor al ángulo de fricción de los materiales constituyentes, es inestable y favorece la ocurrencia de deslizamientos.

vii Desarrollar la evaluación, teniendo como base los datos obtenidos en los anteriores pasos, así:

- (a) Para cada factor en el cual se tenga una evaluación, se toma el nivel de confianza otorgado al concepto del experto -eje de las ordenadas- y se proyecta horizontalmente en el gráfico para variables lingüísticas (ver Figs. 4 a 11), hasta la intersección de los límites del campo definido por la calificación de ese factor.
- (b) La proyección vertical de estos puntos de intersección en las abscisas, representa el intervalo numérico que valora cuantitativamente a la variable lingüística. Ese intervalo nos dice el rango de probabilidad en el que el factor evaluado contribuye a la ocurrencia del fenómeno. El corte de estas proyecciones con los límites de los campos anterior y posterior al campo calificado, nos da el grado de pertenencia de la variable lingüística usada por el experto, a esos respectivos campos.

nencia de la variable lingüística usada por el experto, a esos respectivos campos.

- (c) El intervalo así obtenido se multiplica por la importancia relativa (I_r) del componente con respecto al nivel superior. La participación o importancia relativa de un componente se obtiene de ponderar su importancia individual (I_i), con respecto a la sumatoria de las importancias individuales de los elementos pertenecientes a cada factor evaluado ($I_r = I_i / \sum (I_i)$).
- (d) Los intervalos obtenidos de esta manera se operan de acuerdo a las relaciones estipuladas para los conjuntos difusos (operación entre intervalos).
- (e) Se repite este procedimiento hasta llegar al nivel principal. El valor obtenido para este nivel principal, es la probabilidad de que ocurra el fenómeno evaluado.

Para el deslizamiento Los Naranjitos, de acuerdo al anterior procedimiento y datos especificados, se tiene el siguiente desarrollo y resultados:

- **Lluvia (LL)**
 - Participación o Importancia Individual = 1.0
 - Importancia relativa = 0.50
 - Confianza = 1.0
 - Calificación = **MUY MALO**
 - De confianza y calificación = [0.90, 0.90] (Fig. 4)
 - Ponderación por Importancia relativa = $0.50 \times [0.90, 0.90] = [0.45, 0.45]$
 - $PR(LL) = [0.45, 0.45]$
- **Sismo (S)**

De este factor dependen: Distancia a Fuentes Sismogénicas y Sismicidad Histórica; por lo tanto:

 - **Aporte de Distancia a Fuentes Sismogénicas al factor Sismo A(DFS)S**
 - * Participación o Importancia Individual = 1.0
 - * Importancia relativa = 0.83
 - * Confianza = 1.0
 - * Calificación = **MUY MALO**
 - * De confianza y calificación = [0.90, 0.90] (Fig. 5)
 - * Ponderación por importancia relativa = $0.83 \times [0.90, 0.90] = [0.75, 0.75]$
 - $A(DFS)S = [0.75, 0.75]$
 - **Aporte de Sismicidad Histórica al factor Sismo**

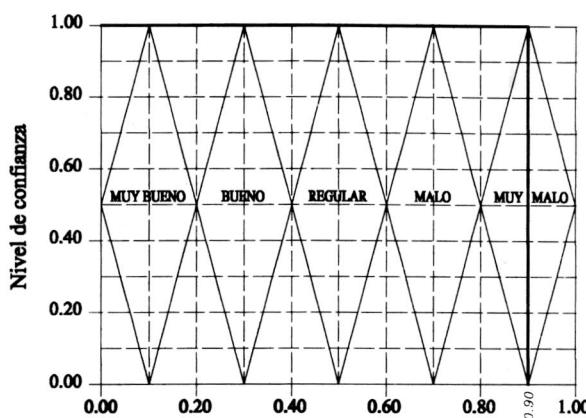


Fig. 4. Calificación por variables lingüísticas para lluvias.

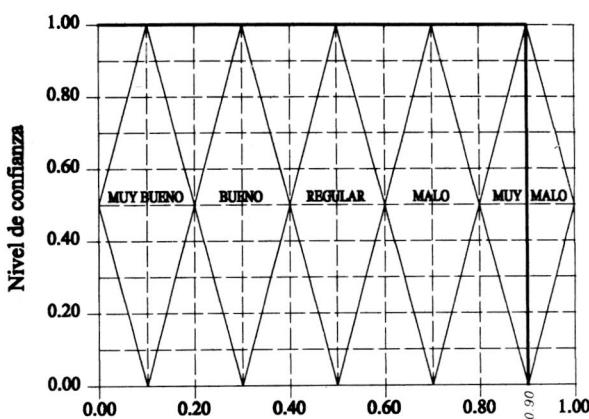


Fig. 5. Calificación por variables lingüísticas para Aporte de Distancia de Fuentes Sismogénicas a Sismos.

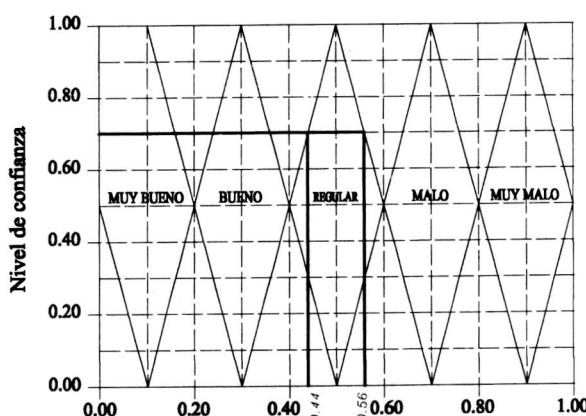


Fig. 6. Calificación por variables lingüísticas para Aportes de Sismicidad Histórica a Sismos.

$A(SH)S$

- Participación o Importancia Individual = 0.2
- Importancia relativa = 0.17
- Confianza = 0.7
- Calificación = **REGULAR**
- De confianza y calificación = [0.44, 0.56] (Fig. 6)
- Ponderación por importancia relativa = $0.17 \times [0.44, 0.56] = [0.07, 0.10]$
- **$A(SH)S = [0.07, 0.10]$**

Ahora se operan los intervalos obtenidos para cada uno de los componentes del factor **sismo** (nivel superior del cual dependen):

$$PR(S) = A(DFS \cup SH)S = A(DFS)S + A(SH)S - A(DFS)S \cdot A(SH)S$$

$$\begin{aligned} &= [0.75, 0.75] + [0.07, 0.10] - [0.75, 0.75] \times [0.07, 0.10] \\ &= [0.82, 0.85] - [0.05, 0.08] \\ &= [0.74, 0.80] \\ &\cdot \text{ Participación o Importancia Individual} = 0.1 \\ &\cdot \text{ Importancia relativa} = 0.05 \\ &\cdot \text{ Ponderación por importancia relativa} \\ &= 0.05 \times [0.74, 0.80] = [0.04, 0.04] \\ &\text{ } PR(S) = [0.04, 0.04] \end{aligned}$$

• Factores Antrópicos (FA)

De este factor dependen: Deforestación y Labores Mineras; por lo tanto:

- Aporte de Deforestación a Factores Antrópicos $A(D)FA$

- * Participación o Importancia Individual = 0.8
- * Importancia relativa = 0.67
- * Confianza = 0.8
- * Calificación = **MALO**
- * De confianza y calificación = [0.66, 0.74] (Fig. 7)
- * Ponderación por importancia relativa = $0.67 \times [0.66, 0.74] = [0.44, 0.50]$
- $A(D)FA = [0.44, 0.50]$**

• Aporte de Labores Mineras a Factores Antrópicos $A(LM)FA$

- Participación o Importancia Individual = 0.4
- Importancia relativa = 0.33
- Confianza = 0.8
- Calificación = **REGULAR**
- De confianza y calificación = [0.46, 0.54] (Fig. 8)
- Ponderación por importancia relativa = $0.33 \times [0.46, 0.54] = [0.15, 0.18]$
- $A(LM)FA = [0.15, 0.18]$**

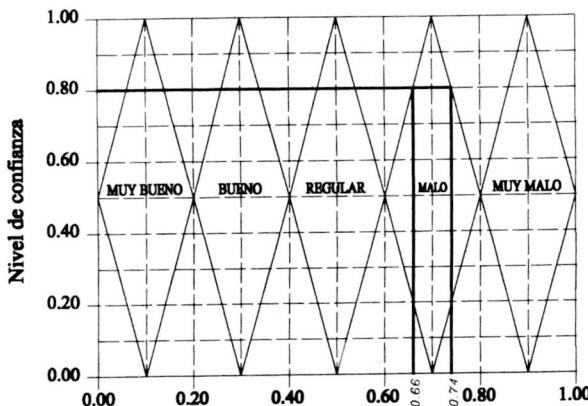


Fig. 7. Calificación por variables lingüísticas para Aporte de Deforestación a Factores Antrópicos.

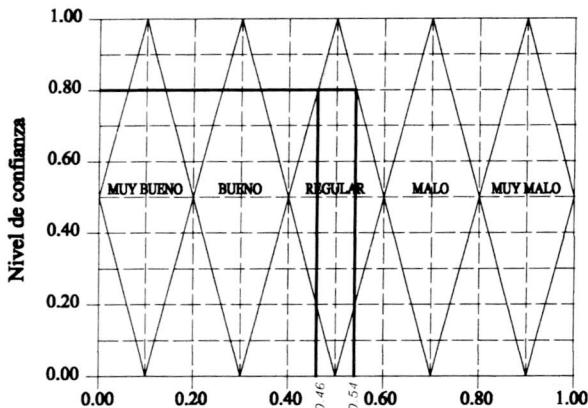


Fig. 8. Calificación por variables lingüísticas para Aporte de Labores Mineras a Factores Antrópicos.

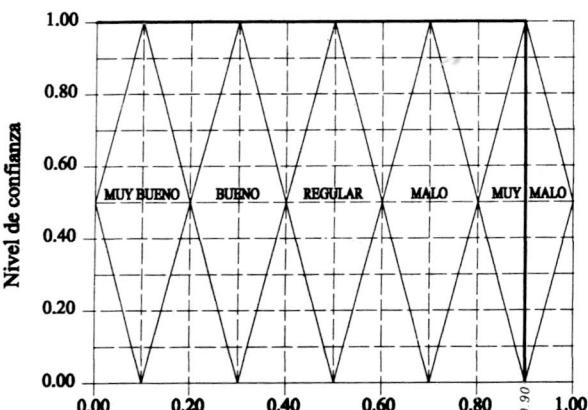


Fig. 9. Calificación por variables lingüísticas para Aporte de Litología a Geología.

Ahora se operan los intervalos obtenidos para cada uno de los componentes de los **factores antrópicos** (nivel superior del cual dependen):

$$PR(FA) = A(D \cup LM)FA = A(D)FA + A(LM)FA - A(D)FA \cdot A(LM)FA$$

$$= [0.44, 0.50] + [0.15, 0.18] - [0.44, 0.50] \times [0.15, 0.18]$$

$$= [0.59, 0.68] - [0.07, 0.09]$$

$$= [0.50, 0.61]$$

- Participación o Importancia Individual = 0.1

- Importancia relativa = 0.05

- Ponderación por importancia relativa

$$= 0.05 \times [0.50, 0.61] = [0.03, 0.03]$$

$$PR(FA) = [0.03, 0.03]$$

- **Geología (G)**

De este factor a evaluar dependen: Litología, Grado de Fracturamiento del Macizo Roco y Buzamiento de los Estratos con respecto a la Pendiente Topográfica; por lo tanto:

- **Aporte de Litología al factor Geología A(L)G**

- * Participación o Importancia Individual = 0.8

- * Importancia relativa = 0.33

- * Confianza = 1.0

- * Calificación = **MUY MALO**

- * De confianza y calificación = [0.90, 0.90] (Fig. 9)

- * Ponderación por importancia relativa = 0.33 x [0.90, 0.90] = [0.30, 0.30]

$$A(L)G = [0.30, 0.30]$$

- **Aporte de Grado de Fracturamiento del Macizo Roco al factor Geología A(T)G**

- * Participación o Importancia Individual = 0.8

- * Importancia relativa = 0.33

- * Confianza = 0.6

- * Calificación = **MALO**

- * De confianza y calificación = [0.62, 0.78] (Fig. 10)

- * Ponderación por importancia relativa = 0.33 x [0.62, 0.78] = [0.20, 0.26]

$$A(T)G = [0.20, 0.26]$$

- **Aporte de Buzamiento de los Estratos con respecto a la Pendiente Topográfica al factor Geología A(PT)G**

- * Importancia = 0.8

- * Importancia relativa = 0.33

- * Confianza = 0.8

- * Calificación = **MALO**

- * De confianza y calificación = [0.66, 0.74] (Fig. 11)

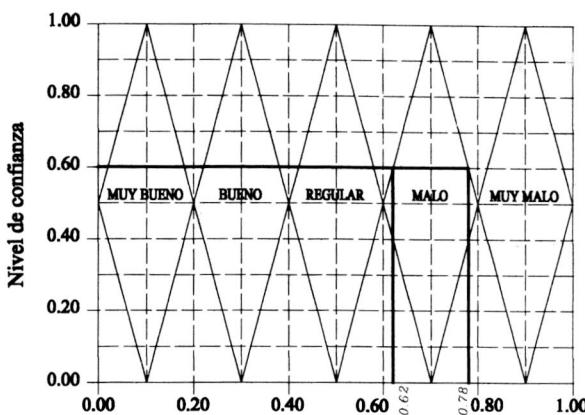


Fig. 10. Calificación por variables llingüísticas para Aporte de Grado de Fracturamiento del Macizo Roco a Geología.

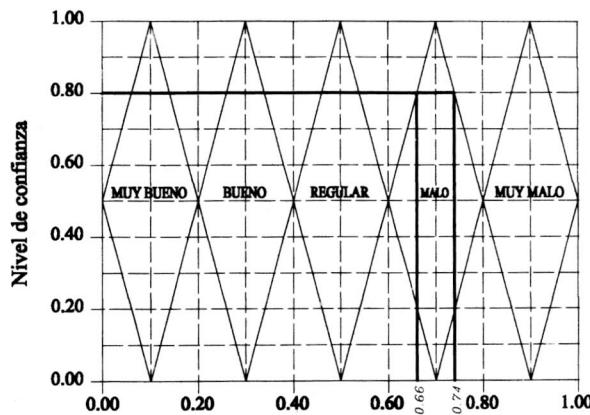


Fig. 11. Calificación por variables llingüísticas para Aporte del Buzamiento de Estratos vs la Pendiente Topográfica a Geología.

- * Ponderación por importancia relativa = $0.33 \times [0.66, 0.74] = [0.22, 0.24]$
 $A(PT)G = [0.22, 0.24]$

Ahora se operan los intervalos obtenidos para cada uno de los componentes del factor **Geología** (nivel superior del cual dependen):

$$\begin{aligned}
 PR(G) &= A(L \cap PTG) \cup A(T)G = A(L)G \cdot A(PT)G \cup A(T)G \\
 &= A(L)G \cdot A(PT)G + A(T)G - A(L)G \cdot A(PT)G \cdot A(T)G \\
 &= [0.30, 0.30] \times [0.20, 0.26] + [0.22, 0.24] - [0.30, 0.30] \times [0.20, 0.26] \times [0.22, 0.24] \\
 &= [0.06, 0.08] + [0.22, 0.24] - [0.06, 0.08] \times [0.22, 0.24] \\
 &= [0.28, 0.32] - [0.01, 0.02] = [0.27, 0.30]
 \end{aligned}$$

- Participación o Importancia Individual = 0.8
- Importancia relativa = 0.40

- Ponderación por importancia relativa = $0.40 \times [0.27, 0.30] = [0.11, 0.12]$
 $PR(G) = [0.11, 0.12]$

Resumiendo los datos obtenidos a partir de los anteriores cálculos, se tiene:

$$\begin{aligned}
 PR(LL) &= [0.45, 0.45] \\
 PR(S) &= [0.04, 0.04] \\
 PR(FA) &= [0.03, 0.03] \\
 PR(G) &= [0.11, 0.12]
 \end{aligned}$$

Los anteriores datos se utilizarán para hallar la **Probabilidad Global de Reactivación del Deslizamiento**, $P(RD)$, de acuerdo a las condiciones en las que se daría dicha reactivación. Las condiciones las establece el experto dependiendo del grado de conocimiento que se tenga del proceso en la zona o por comparación con áreas similares. Así para el caso de Málaga, en el barrio Los Naranjitos, el deslizamiento se reactivaría si se da una de las siguientes condiciones:

- (a) Si continúan actuando bajo las circunstancias actuales, los factores evaluados.
- (b) Si se presenta un nivel de precipitación anual, cuyo período de retorno sea el correspondiente al nivel alcanzado en el año de 1.988, dado que existe una Geología local desfavorable (en este año se produjo una época invernal, que reactivó el deslizamiento ya existente).

$$\begin{aligned}
 (a) \quad P(RD) &= PR(LL) \cup PR(S) \cup PR(FA) \cup PR(G) \\
 &= PR(LL) + PR(S) + PR(FA) + PR(G) - \\
 &\quad PR(LL) \cdot PR(S) \cdot PR(FA) \cdot PR(G) \\
 &= [0.45, 0.45] + [0.04, 0.04] + [0.03, 0.03] + \\
 &\quad [0.11, 0.12] - [0.45, 0.45] \cdot [0.04, 0.04] \cdot [0.03, 0.03] \cdot [0.11, 0.12] = [0.63, 0.64] \\
 \Rightarrow P(RD) &= [0.63, 0.64] \quad (\text{Fig. 12})
 \end{aligned}$$

$$(b) \quad P(RD) = PR(LL_{1988} \cap G) = PR(LL_{1988} \cap G) / PR(G) \quad (\text{Probabilidad Condicional})$$

Donde $PR(LL_{1988} \cap G)$ se obtiene a partir del archivo histórico, así: de la Tabla 1, se tiene que un nivel igual o superior al registrado en 1.988 reactivó el deslizamiento dos veces en un período de 25 años, dado que se presentó una Geología desfavorable. Por lo tanto, el período de retorno (T), para dicho evento, es = 12.5 años y su probabilidad asociada es ($P = 1/T$): 0.08.

Es decir, $PR(LL_{1988} \cap G) = 0.08$
 $P(RD) = 0.08 / [0.11, 0.12]$
 $P(RD) = [0.67, 0.73]$

7. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

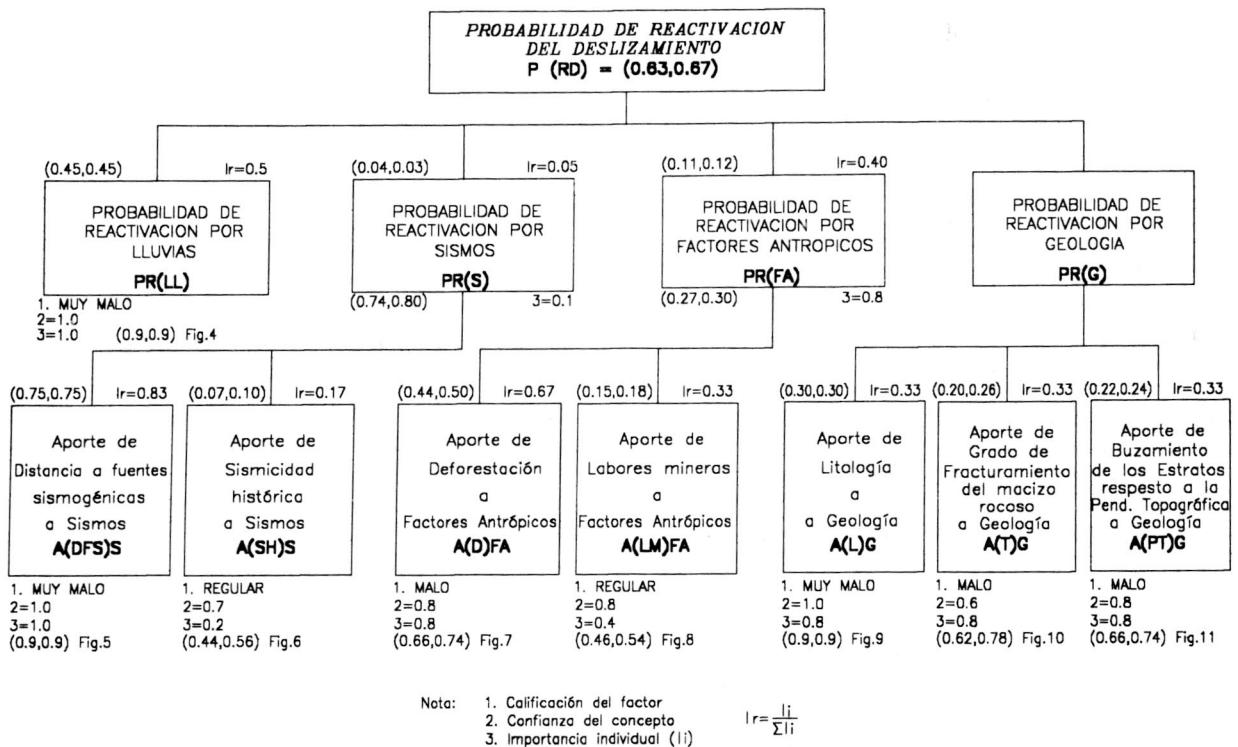


Fig. 12. Desarrollo operacional de intervalos para hallar la probabilidad global de reactivación del deslizamiento.

1. Si las condiciones actuales continúan actuando en la zona, la probabilidad de que el deslizamiento Los Naranjitos se reactive, de acuerdo a la metodología de los conjuntos difusos, está entre un 63 % y un 64 %, y si se presenta un nivel de precipitación igual o superior al registrado en el año de 1.988, entre un 67 % y 73 %. Esto quiere decir que las condiciones actuales están generando una amenaza similar a la que representa un nivel de precipitación como el de 1.988.

2. De continuar actuando los factores antrópicos (deforestación y labores mineras), se estaría generando con el tiempo un efecto similar al que llegaría a producir un sismo mayor. Esto se deduce al comparar las probabilidades de reactivación del deslizamiento, como consecuencia de dichos factores: Factores Antrópicos (0.03) y Sismo (0.04).

3. Las metodologías tradicionales dan información acerca de la probabilidad de ocurrencia de un evento sin tener en cuenta las condiciones locales y puntuales de una zona, generalizando para regiones amplias; mientras que por el sistema de los conjuntos difusos sí se tienen en cuenta las

características locales propias de los diferentes factores involucrados en la evaluación. Sin embargo, la metodología de conjuntos difusos no da una probabilidad de ocurrencia de un evento en el tiempo; simplemente indica la probabilidad de que se presente dicho evento; mientras que las metodologías técnicas tradicionales, sí indican la probabilidad de que un evento se presente en los próximos x años.

4. Analizando las fotografías aéreas disponibles, se llega a la conclusión de que bien fuese por ignorancia o por omisión, los planificadores del ordenamiento territorial (urbano o rural) para los años 80s, no tenían en cuenta el riesgo como factor clave en el proceso de toma de decisiones. Lo anterior se observa claramente en el hecho de haber permitido la construcción del barrio Los Naranjitos en zona de riesgo, máxime si se tiene en cuenta que para el año de 1.982 ya existía el deslizamiento en la zona adyacente al sitio de ubicación del conjunto residencial (se construyó, según se concluye del análisis de las fotografías aéreas, entre 1.983 y 1.984).

5. Los resultados del estudio realizado son de gran im-

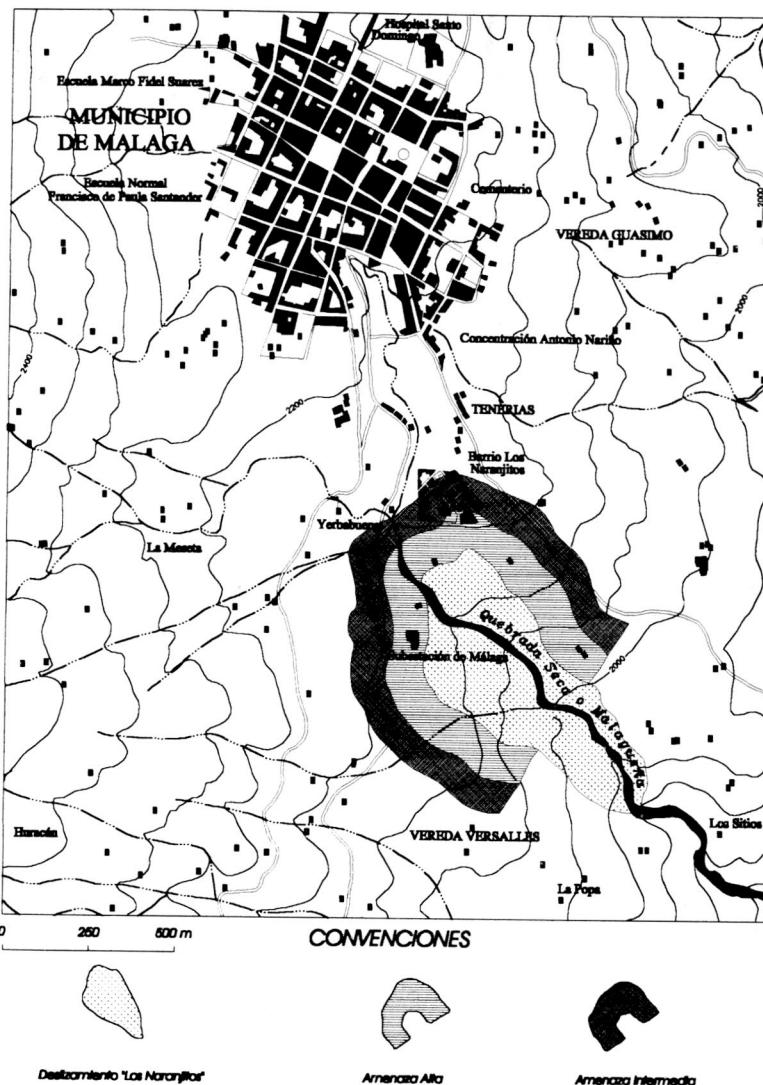


Fig. 13. Zonificación de la amenaza por deslizamiento en Málaga - Santander

portancia para futuros trabajos de investigación al respecto, por cuanto la evaluación de la amenaza es uno de los componentes fundamentales en el cálculo del riesgo, el que a su vez debe ser la base en el proceso de toma de decisiones en la formulación de alternativas para su mitigación. Se recomienda que para llegar a una correcta formulación de alternativas se debe desarrollar y aplicar una metodología para el análisis de la vulnerabilidad por fenómenos de remoción en

masa, de tal forma que se pueda lograr una evaluación integral del riesgo. La evaluación de la amenaza debe estar a cargo de profesionales de las Ciencias de la Tierra; el análisis de la vulnerabilidad y el cálculo del riesgo, en conjunto con profesionales de las ciencias humanas, sociales, políticas, económicas y de la ingeniería.

6. Un resultado que no se había contemplado inicialmente lo constituye el hecho de haber logrado realizar

el Mapa de Zonificación de la Amenaza por deslizamiento en el área de interés (Figura 13). Esto se logró gracias a la obtención de datos confiables y válidos para hacer una separación entre una zona de amenaza alta y una de amenaza intermedia. La zona de amenaza alta se delimitó desde el borde del escarpe principal hasta 100 m al W del mismo, utilizando como criterio fundamental la ubicación del eje del anticlinal, donde los estratos cambian de buzamiento de NE a NW (a favor de la pendiente topográfica o contra la pendiente topográfica), lo que supone una mayor estabilidad del terreno. La zona de amenaza intermedia se llevó hasta el lugar donde, debido a la explotación de arcillas y la ubicación de la bancada de la carretera, se presenta una mayor infiltración de las lluvias y aguas de escorrentía, lo cual traerá una mayor desestabilización del terreno y por lo tanto una mayor probabilidad de reactivación del fenómeno de remoción en masa.

8. AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos al profesor Luis Alberto Briceño Guarupe, del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Santa Fe de Bogotá, por la permanente colaboración en la redacción del manuscrito para el presente trabajo.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CORPORACION COLOMBIANA DE INVESTIGACION AGROPECUARIA (Corpoica) (1.995): Caracterización Biofísica y Socioeconómica Provincia de García Rovira.- Creced Provincia de García Rovira, 180 p, Málaga (Santander).
- HELLEDOORN, H., DRIANKOV, D. & REINFRANK, M. (1.996): An Introduction to Fuzzy Control.- Springer-Verlag, 316 p, New York.
- MCLEAN, W. & CRIBBLE, J. (1.985): Geology for Civil Engineers.- E & FN Spon, 327 p, New York.
- PORTILLA, M (1.997): Tipo de Amenazas en la Cuenca del río Servitá (Traba-

- jo).- Universidad de Los Andes, Departamento de Ingeniería Civil, 25 p, Santafé de Bogotá.
- RUBIANO, D (1.992): Aspectos Metodológicos para la Evaluación de Amenaza y Riesgo por Deslizamiento (Tesis de Grado).- Universidad de Los Andes, Departamento de Ingeniería Civil, 140 p, Santafé de Bogotá.
- VARGAS, R., ARIAS, T., JARAMILLO, L. & TELLEZ, N. (1.976): Mapa Geológico Preliminar, Plancha 136 - Málaga.- Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras - Ingeominas, Santafé de Bogotá.
- WANG, L (1.994): Adaptive Fuzzy Systems and Control, Design and Stability Analysis.- Prentice Hall Inc, 232 p, New Jersey.

Manuscrito recibido, Noviembre de 1.998