

Aplicación de los Sistemas de Lógica Difusa en la Evaluación de la Susceptibilidad a Fenómenos de Remoción en Masa

MODESTO EUSEBIO PORTILLA-GAMBOA

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

PORTILLA-GAMBOA, M.E.. (2001): Aplicación de los Sistemas de Lógica Difusa en la Evaluación de la Susceptibilidad a Fenómenos de Remoción en Masa.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 26, pp. 189-205, 12 Figs., 1 Tabla, Bogotá.

RESUMEN

Los Sistemas de Lógica Difusa (SLD's), desarrollados a partir de la teoría de conjuntos difusos, se constituyen en una poderosa herramienta para el análisis y procesamiento de datos en el estudio de Fenómenos de Remoción en Masa (FRM), al permitir el manejo integrado de información lingüística (opinión de expertos) y numérica (obtenida de trabajo en campo y ensayos de laboratorio).

Un FRM, es el resultado de la interacción de factores geológicos, geotécnicos y ambientales. En el presente trabajo se aplican los SLD, en el análisis y evaluación de los factores: Litología, meteorización, humedad del terreno y condición cinemática, para cada uno de los sectores del escarpe principal del deslizamiento "El Caminante" (Chíquiza, Boyacá).

Los resultados obtenidos son coherentes con la condición actual del deslizamiento "El Caminante", en el cual los factores determinantes de su grado de susceptibilidad a FRM, son la litología y la actitud estructural de las discontinuidades.

Palabras Clave: Chíquiza, Boyacá, Colombia, Evaluación de Susceptibilidad, Fenómenos de Remoción en Masa, Sistemas de Lógica Difusa.

ABSTRACT

Fuzzy Logic System based in the fuzzy set theory is a powerful tool in analysis and processing data of mass movement phenomena, that is it able to simultaneously handle numerical data (got it in field work and laboratory test) and linguistic information (experts opinion).

Mass movement takes place due to interaction of several factors (e.g., geological, geotechnical and environmental). This work presents application of SLD to analysis and assessment of the lithology, weathering, terrain moisture and cinematic condition for each one of the main scarp sector of "El Caminante" landslide (Chíquiza, Boyacá).

The results obtained agree with actual landslide conditions, in which the lithology and structural attitude are the factors conditioning susceptibility degree to mass movement phenomena.

Key Words: Chíquiza, Boyacá, Colombia, Susceptibility Assessment, Mass Movement Phenomena, Fuzzy Logic System.

1. INTRODUCCION

Los Sistemas de Lógica Difusa (SLD) constituyen una herramienta para modelar los procedimientos de razonamiento del ser humano. Razonamiento que por ser de carácter cualitativo, involucra siempre un nivel de incertidumbre, el cual se refleja en los resultados del proceso de evaluación de los diferentes fenómenos donde se apliquen los sistemas dinámicos basados en la lógica difusa.

Cuando se evalúa la amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa (FRM), por medio de las metodologías

tradicionales, igualmente sus resultados involucran incertidumbre, aportada por la serie de hipótesis y simplificaciones en las que se basan los modelos conceptuales matemáticos y físicos que se usan para representar una aproximación a la realidad del problema.

En este artículo se presenta el caso del FRM, ubicado a 1 Km al N de la desembocadura de la quebrada Churuvita en el río Samacá, vereda Juan Díaz del municipio de Chíquiza (Boyacá). Inicialmente se hace un breve resumen de los fundamentos de los SLD, posteriormente se describen las características técnicas del caso de estudio y finalmente

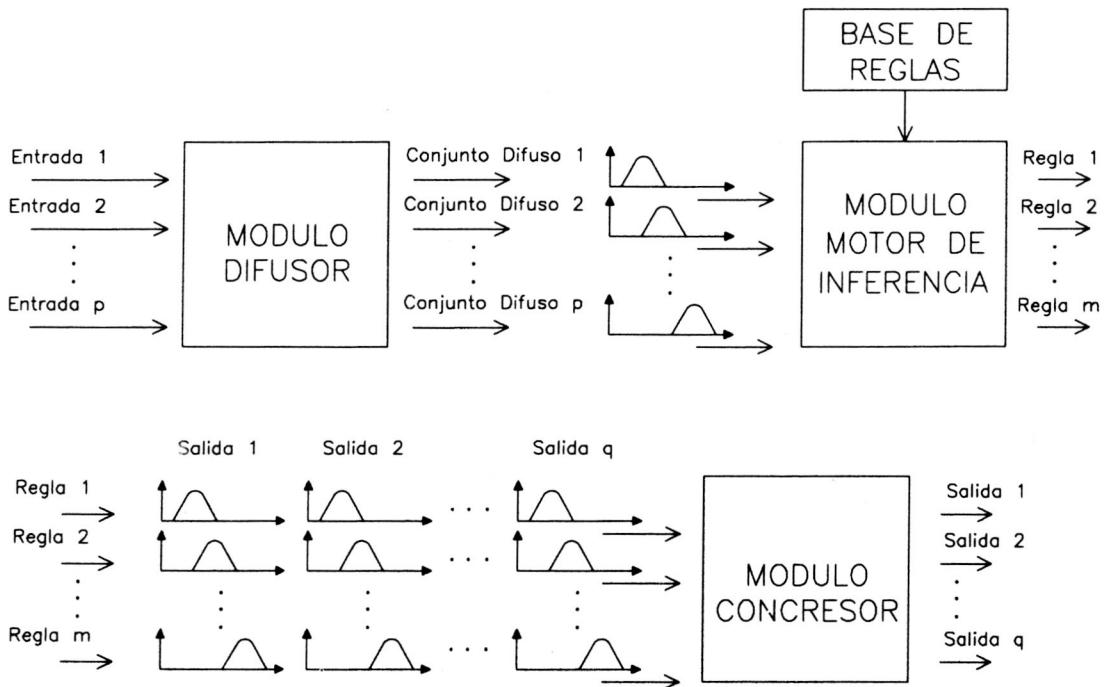


Fig. 1. Estructura de un Sistema de Lógica Difusa

se analiza el problema por medio del SLD diseñado para tal fin.

2. SISTEMAS DE LOGICA DIFUSA

Según MENDEL (1995), existen dos formas de abordar los problemas: 1) A partir del conocimiento objetivo, el cual se usa siempre en la formulación de los problemas de ingeniería a través de los modelos matemáticos; y, 2) Desde el conocimiento subjetivo, el cual está representado por la información lingüística, la cual usualmente es imposible de cuantificar utilizando las matemáticas tradicionales.

Los dos tipos de conocimiento pueden y deberían ser empleados para resolver problemas reales, si son combinados adecuadamente. Esto a su vez, se puede llevar a cabo de dos formas distintas (MENDEL 1995): 1) Por medio del enfoque basado en modelos, en el cual la información objetiva es representada mediante modelos matemáticos y la información subjetiva, representada mediante proposiciones lingüísticas o reglas, que posteriormente son cuantificadas por medio de la lógica difusa; y, 2) Siguiendo el enfoque libre de modelos, en el que las reglas se extractan a partir de datos numéricos y luego son combinadas con la información lingüística colectada de la heurística.

2.1 Estructura de un Sistema de Lógica Difusa

Formalmente, un SLD (Fig. 1) se puede definir como un algoritmo que toma información de entrada, la procesa a través del motor de inferencia siguiendo las reglas creadas según la heurística y da resultados numéricos concretos como producto para el análisis en el proceso de toma de decisiones. Los datos de entrada y de salida, son datos concretos, aunque dentro de la estructura del SLD, están representados por medio de una variable lingüística. El conjunto de las variables de entrada, se denomina universo de entrada y al conjunto de las variables lingüísticas de salida, se le conoce como universo de salida.

2.2 Variable Lingüística

Es una cuádrupla, en la que el primer elemento corresponde al nombre de la variable (Ej.: Angulo de Buzamiento); el segundo, al universo de discurso o rango en el cual toma los valores la variable; el tercero, representa el conjunto de términos lingüísticos constituidos por los calificativos de la variable; y el cuarto, es el significador que representa la distribución de los conjuntos difusos de los términos lingüísticos en el rango del universo de discurso de la variable: $\{\beta, \mathcal{B}, T_\beta, S_\beta\}$. Donde: β = Angulo de Buzamiento, $\mathcal{B} = [0, 90]$, $T_\beta = \{\text{Alto, Medio, Bajo}\}$, y el

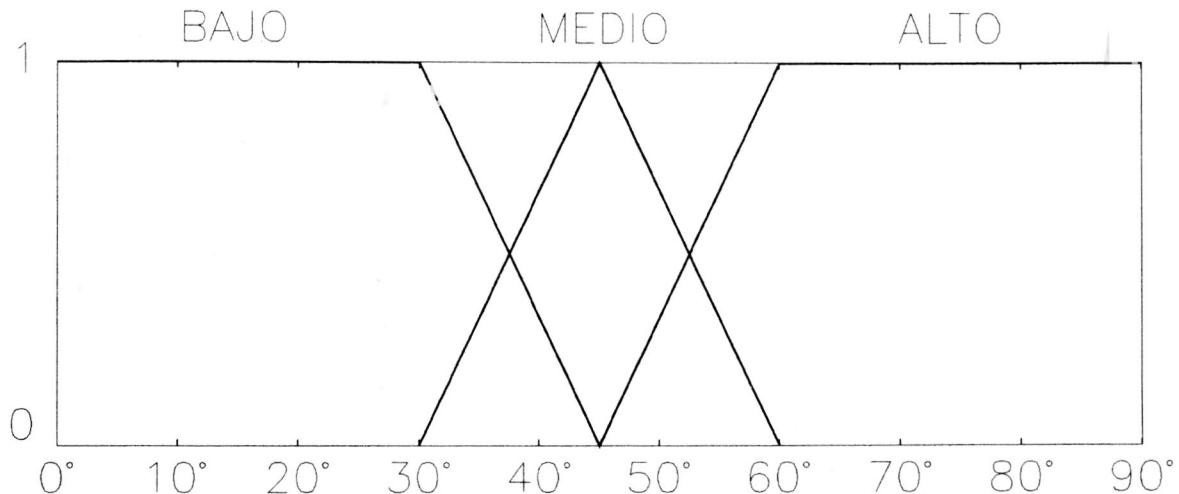


Fig. 2. Significador Lingüístico (Angulo de Buzamiento)

significador correspondería a lo expresado en la Fig. 2.

2.3 Conjunto Difuso

Es la reunión de elementos constituidos por duplas, en las que el primer elemento pertenece al universo de discurso y el segundo elemento, corresponde al grado de pertenencia del elemento al término lingüístico en cuestión. Para mayor ilustración, respecto a la teoría de conjuntos difusos, consultar las referencias: DRIANKOV *et al* (1996), KLIR *et al* (1997) y PORTILLA (1999).

A continuación se describen, brevemente, cada uno de los módulos constituyentes de un SLD:

2.3.1 Módulo Difusor: La función que cumple, consiste en tomar el valor concreto de entrada (x^*) y hallarle el grado de pertenencia a cada uno de los términos lingüísticos que interseque al proyectarlo verticalmente desde la horizontal. Es decir, recibe las entradas concretas y genera un conjunto difuso por cada uno de los términos lingüísticos involucrados. Cada conjunto difuso, así generado, está definido sobre el universo de discurso de la respectiva variable lingüística.

2.3.2 Módulo Base de Reglas: Conjunto de proposiciones lógicas, generadas a partir de la experiencia o de la abstracción del análisis de datos numéricos. Cada una de las reglas, presenta la forma: *IF* antecedente 1 *AND* antecedente 2 *AND*.....*AND* antecedente *n*, *THEN* consecuente *s*. Como condición necesaria, no debe existir más de una regla con el mismo antecedente.

2.3.3 Módulo Motor de Inferencia: De acuerdo con los términos lingüísticos intersecados por x^* en el módulo difusor, toma la base de reglas y define cuáles de ellas se

deben tener en cuenta según lo enunciado por el antecedente; luego, procesa este enunciado de acuerdo a la implicación predeterminada como parámetro de diseño del SLD, dando un conjunto difuso resultante y, por último, lo opera con el respectivo término lingüístico del universo de discurso de la variable de salida, generando un corte o conjunto difuso de salida. Actualmente, las implicaciones más usadas en problemas de Ingeniería, son las del mínimo y el producto, por cuanto éstas además de facilitar el cálculo, preservan la relación causa – efecto (MENDEL 1995).

2.3.4 Módulo Concretor: Recibe los conjuntos difusos de salida o cortes producidos por el motor de inferencia, los procesa y mediante un algoritmo produce un valor concreto de salida (y^*), que es la salida final del SLD. El concretor más utilizado, para obtener el valor concreto de salida a partir del conjunto difuso final, es el centro de gravedad (\bar{y}), definido por la expresión:

$$\bar{y} = \frac{\left[\int_u y \mu_B(y) dy \right]}{\left[\int_u \mu_B(y) dy \right]}$$

Una vez hallado el centro de gravedad, se proyecta sobre el eje del universo de discurso y donde lo corte estará el valor de y^* .

3. CASO DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza a 1 Km al N de la desembocadura de la quebrada Churuvita en el río Samacá, vereda Juan Díaz del municipio de Chíquiza, Departamento de Boyacá (Fig. 3a). Específicamente el FRM "El Caminante" (Foto 1), se ubica en la margen derecha del río Samacá, ladera NW de la loma El Volador,

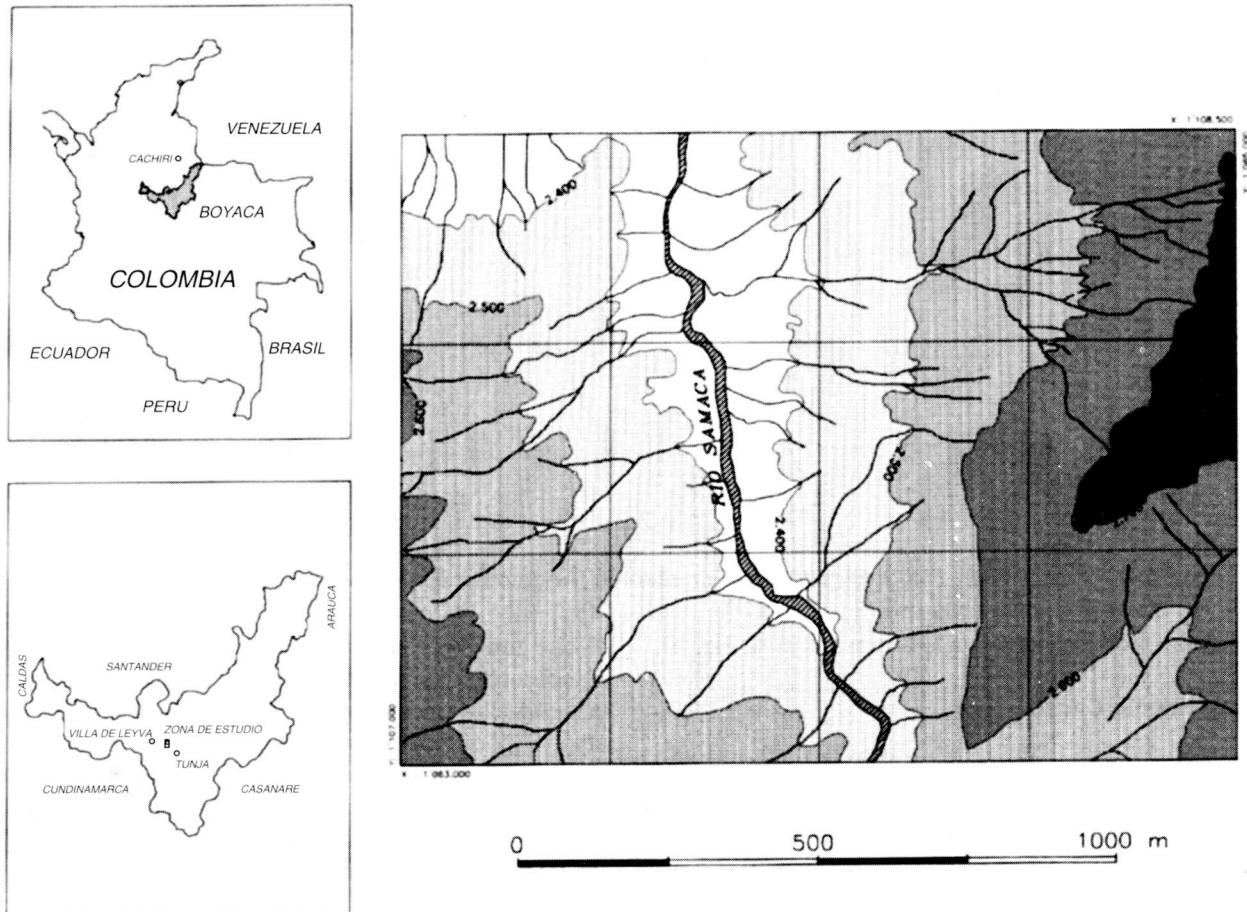


Fig. 3a. Mapa de Localización del área de estudio

entre las coordenadas planas: $X = 1'063.800$ a $X = 1'064.300$ y $Y = 1'107.300$ a $Y = 1'107.900$, Plancha 191 – I – C – 1 del IGAC.

3.1 Geología

A continuación se presenta un resumen de las características geológicas del área de estudio (Fig. 3b), con el fin de formalizar las bases a partir de las que se definirán y calificarán las variables a tener en cuenta en el proceso de análisis de la amenaza por FRM, utilizando los Sistemas de Lógica Difusa.

3.1.1 Litología

En el área donde se presenta el FRM, desde el cauce del río Samacá hasta el cruce de la carretera que conduce a Chíquiza, aflora la siguiente secuencia litológica sedimentaria:

Hacia la parte inferior se presenta una secuencia homogéneamente heterogénea con predominio de shales iodolíticos micáceos con intercalaciones de capas de

arenitas micáceas y arenitas con cemento calcáreo (espesores entre 0.3 y 1.1 metros), correspondiendo a la parte superior del segmento B de la Formación San Gil Superior.

A partir de donde se presenta un incremento en la pendiente topográfica, suprayaciendo al anterior nivel, se pasa transicionalmente a bancos delgados de arenitas con intercalaciones de shales micáceos color gris verdoso oscuro (espesores entre 0.5 a 1 metro); desde el trazado del canal de riego, hasta donde se empina aún más la pendiente topográfica, la litología esta representada por bancos de arenitas cuarzosas estratoengrosantes hacia el techo (espesores entre 1 y 5.9 metros), con esporádicas intercalaciones de shales color gris verdoso (espesores entre 0.25 y 0.9 metros) y capas de lumaquela (espesores entre 0.9 y 2.1 metros). Este segundo paquete litológico corresponde al segmento A de la Formación Churuvita (Etayo, comunicación verbal, 2001). El espesor estratigráfico de este nivel es de 102.4 metros, de acuerdo a las medidas aproximadas tomadas en campo.

Suprayaciendo al segmento A, se encuentra un paquete



Fotografía 1. Panorámica del Deslizamiento “El Caminante”. Fotografía tomada en dirección W-E.

de arcillolitas micáceas color ocre, en bancos de hasta 5 metros de espesor, alternando con capas de arenitas calcáreas en capas de 0.9 a 1.4 metros de espesor y bancos de lumaquela de 0.35 a 2.3 metros de espesor. Estas últimas se han meteorizado químicamente hasta dar hidróxido de calcio (caliche color blanquecino, que resalta en los escarpes), debido a la alternancia de épocas de lluvia con épocas de poca pluviosidad. El espesor total de éste nivel alcanza los 72 metros, de acuerdo con las medidas aproximadas tomadas en campo.

Según ETAYO (1968), suprayaciendo el anterior nivel, se encuentra una alternancia de arcillolitas y limolitas con bancos macizos de areniscas de grano variable entre tamaño fino y medio, y con bancos calcáreos macizos. El espesor estratigráfico de este segmento C, de la Formación Churuvita, alcanza los 225 metros (aproximadamente desde unos 10 metros por encima de la actual banca de la carretera a Chíquiza hasta la cima del cerro El Volador).

3.1.2 Geomorfología

Morfogenéticamente, el modelado terrestre regional, donde se halla inmersa el área de estudio, corresponde a

eventos tectónicos de carácter compresivo que dieron origen al sistema cordillerano andino y específicamente a la Cordillera Oriental de Colombia.

La respuesta litológica a tales procesos geomórficos endógenos, de acuerdo a la variedad del tipo de rocas presentes (arenitas, limolitas, arcillolitas y calizas), da origen a una unidad genética de relieve de plegamiento (VILLOTA 1997), la cual es de carácter diferencial de acuerdo al comportamiento geomecánico de tales materiales, dando lugar a pliegues asimétricos con grado de fracturamiento variable, desde bajo como ocurre en el anticlinal de Arcabuco, hasta alto, como lo es en la zona de estudio.

La forma externa del terreno es la respuesta a la acción erosiva fluvial del río Samacá y sus afluentes, que disecan las laderas siguiendo el patrón estructural y las pendientes topográficas locales formando un drenaje subparalelo a rectangular. Esto da origen al relieve montañoso estructural erosional, sobre el que se encaja el valle del río Samacá y sus afluentes, formando paisajes disecados y de alta pendiente topográfica.

Morfométricamente, el FRM presenta unas dimensiones de 650 m x 500 m, pendiente topográfica

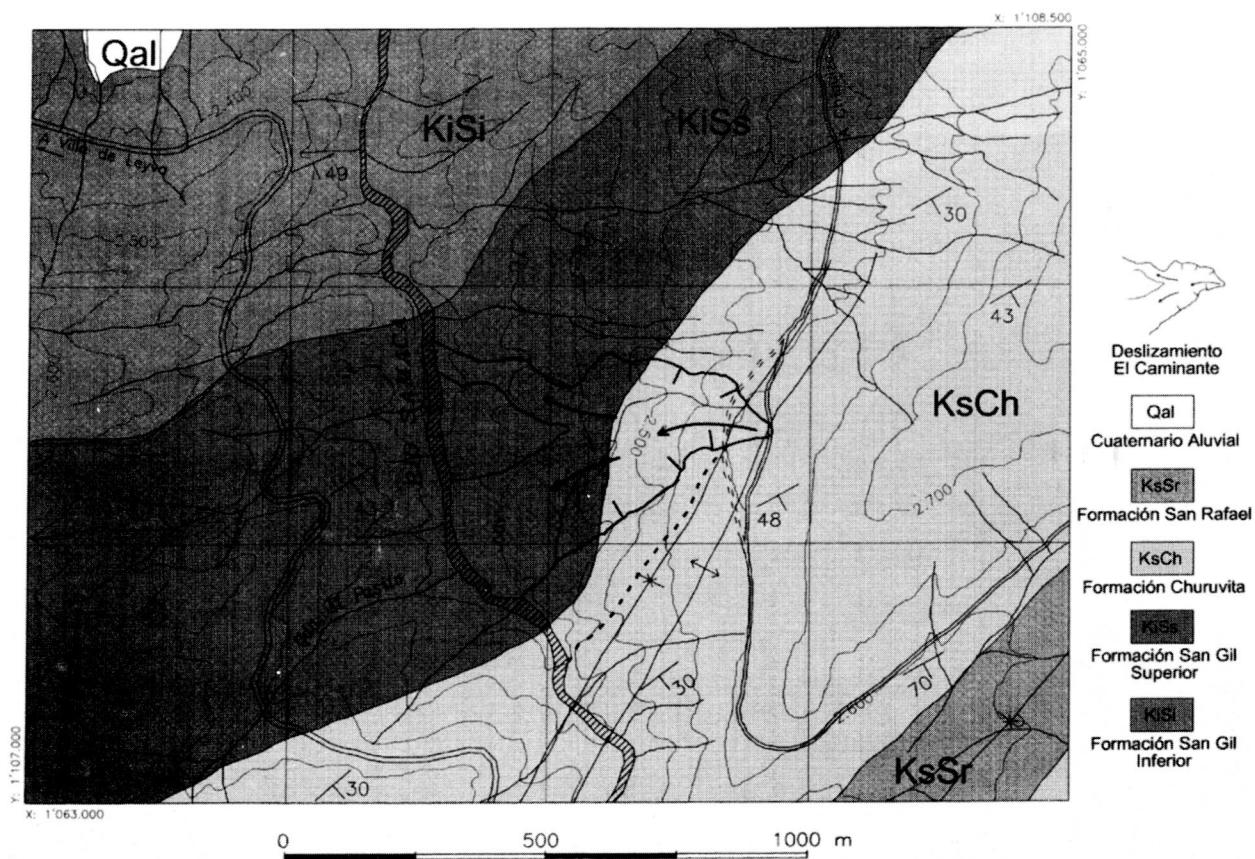


Fig. 3b. Mapa Geológico del área de estudio (Tomado de PATARROYO 1994)

suave en la zona de acumulación del material movido y fuerte en la zona de aporte (escarpes); la pata del deslizamiento se halla a una cota de 2350 msnm y la corona a 2600 msnm.

3.1.3 Geología Estructural

Según DENG & COVEY (1993), el estilo estructural que dio origen a los plegamientos presentes en la Cordillera Oriental, corresponde a una deformación contraccional por fallas de despegue en la cobertura, con transporte tectónico predominante hacia los Llanos Orientales, aunque con un componente importante hacia el valle del Magdalena. El anticlinal de Arcabuco, 5 Km al N del área del presente estudio, correspondería a un anticlinal de rampa sobre el plano de la falla de Boyacá ("Fault-Bend Fold"), cuyo buzamiento es hacia el W (Fig. 4).

En el área del FRM "El Caminante", por los esfuerzos compresivos que afectaron la región, se formaron dos pliegues similares asimétricos (sinclinal y anticlinal), cuyos ejes están orientados en dirección N30E y sus flancos buzando entre 38 y 72 grados; estos pliegues, por

disarmonía se van amortiguando tanto hacia el N como hacia el S, hasta desaparecer formalmente. Dichos pliegues se formaron teniendo como planos de acción de los esfuerzos de cizalla, el nivel superior de arenitas del segmento A de la Formación Churuvita y el segmento C de la misma formación; es decir, el plegamiento involucra las arenitas del segmento A y la totalidad del segmento B de la Formación Churuvita (Foto 2).

En general, la estructura presente al SE del anticlinal de Arcabuco, corresponde a un monoclinal cuyo rumbo está orientado al NE y el buzamiento hacia el SE; este monoclinal se extiende hasta la zona próxima al replegamiento, que inicia con el par de pliegues similares mencionados.

3.2 Geotecnia

Debido a que el comportamiento geomecánico de una masa rocosa así como de la roca, depende de las características geotécnicas, se presenta a continuación una breve discusión sobre tal aspecto, el cual también será

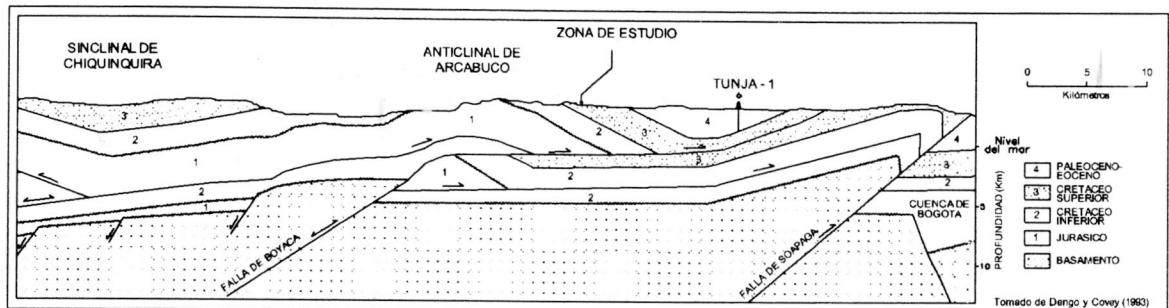


Fig. 4. Estructura Anticinal de Rampa (Tomado de DENG & COVEY 1993)



Fotografía 2. Pliegues Similares al S del Deslizamiento "El Caminante". Vista tomada en dirección S-N.

tenido en cuenta en la definición de las variables, en el diseño del SLD.

3.2.1 Geometría y Movimiento del FRM

Los límites del FRM enmarcan una forma sinuosa humana, caminando sobre el cauce del río Samacá y con la cabeza sobre la carretera destapada que conduce a Chíquiza, de ahí su nombre: "El Caminante" (Foto 1). En el escarpe principal, se distinguen tres sectores: Flanco

Norte, Sector Central o Cabeza y Flanco Sur.

De acuerdo a la versión del señor Luis Páez, quien habita la región desde hace 55 años, el primer movimiento importante del material, ocurrió en Julio o Agosto de 1955, dando origen al lóbulo sur; este material, al llegar al cauce del río lo obstruyó formándose una represa de unos 10 metros de profundidad, que evacuó sus aguas sin romper el muro formado y colmatándose de sedimentos con el paso del tiempo.

Hacia 1958 o 1959, se presentó un segundo movimiento importante, que dio origen al lóbulo norte, cuyo material igualmente llegó hasta el cauce del río Samacá, represándolo pero en menor proporción en que lo hizo el lóbulo sur; el agua buscó cauce desplazándose hacia la ladera opuesta. Este evento destruyó la casa del señor Pedro León Gómez, dueño de la finca afectada.

A finales del año de 1997, se presenta el último movimiento de importancia, generándose en la corona del deslizamiento, cuyo material se observa como un lóbulo a la altura del tercio superior (Foto 1). Los últimos movimientos del material han sido pequeños flujos y desprendimientos, que se deslizan sobre el escarpe principal, nada comparado a los dos anteriores.

De gran interés es el hecho de que los movimientos principales no se han materializado en épocas de lluvia (Abril – Mayo y Octubre – Noviembre), sino unos dos meses después de finalizadas las mismas, de acuerdo a la versión del señor Páez. Esto indica que uno de los eventos detonantes, está representado por la acción de las aguas subterráneas, debido al ascenso del nivel freático local y no a la intensidad de lluvias extremas. Estas lluvias sí han generado movimientos diferenciales al interior de la masa del material deslizado, generando FRM rotacionales retrogrados.

El escarpe principal presenta alturas que varían entre 35 y 73 metros y longitudes entre 50 y 200 metros, dando una forma tabular. La máxima longitud entre los dos lóbulos principales, en el cauce del río Samacá, es de aproximadamente 715 metros y en la cabeza, sobre la carretera de Chíquiza, la longitud involucrada es de aproximadamente 30 metros. Desde noviembre de 1997 hasta agosto de 2001, la corona se ha movido 17 cm, dando una velocidad de 4,5 cm/año; esto, a partir del monitoreo de una de las grietas de tracción que se encuentra a una distancia de 23 metros desde el escarpe principal en la zona norte.

3.2.2 Hidrogeología

La cuenca hidrográfica drena hacia el río Samacá (SW), pero la cuenca hidrogeológica lo hace en el sentido opuesto (SE), hacia la quebrada Honda (Fig. 3b).

De acuerdo a las observaciones de campo, a través de la superficie de falla del FRM, en épocas de lluvia, se presenta un nivel freático local, puesto que muy cerca de la pata del talud principal, se encuentra una emergencia de agua con un alto contenido arcilloso que le confiere un color amarillento.

La conductividad hidráulica de la masa rocosa involucrada es alta, debido principalmente a la permeabilidad secundaria conferida por el alto grado de fracturamiento de las rocas pertenecientes a la Formación Churuvita, que además de zona de recarga, es el acuífero;

pero debe decrecer drásticamente a partir del contacto con las arcillolitas de la Formación San Gil Superior, que constituye el acuífero.

3.2.3 Propiedades Geotécnicas

El pie sur corresponde a un flujo de detritos clastosoportado, con bloques de arenitas y lumaquelas, de 2 a 5 metros de diámetro, embebidos en un material de fragmentos de arenitas, lumaquelas y arcillolitas, de unos cuantos centímetros de diámetro. Este flujo, al obstruir el cauce del río Samacá, formó una represa tipo IV, según la clasificación de Costa y Schuster.

El pie norte representa un flujo de detritos matriz-soportado, con bloques de arenitas y lumaquelas de 1 a 2 metros de diámetro promedio, englobados en una matriz de fragmentos de arcillolitas y arenitas, con diámetros de unos pocos milímetros. Este flujo, al obstruir el cauce del río Samacá, formó una represa tipo II, según la clasificación de Costa y Schuster.

El material que se encuentra en la parte central y superior-central del cuerpo del FRM, corresponde a grandes bloques de lumaquelas y arenitas (2 – 3 metros) en contacto entre sí y mezclados con bloques de arcillolitas de hasta 1 metro de diámetro promedio. Este FRM, corresponde a caídas de material del sector central o cabeza del caminante, con algunos aportes localizados de los escarpes norte y sur.

El escarpe principal y corona del FRM, está constituido por rocas de la Formación Churuvita, de la siguiente manera:

- 1) En el **Flanco Sur**, cuya orientación es N45E/50NW, afloran arenitas con intercalaciones esporádicas de lumaquelas y shales micáceos, correspondientes a la parte superior del segmento A, y en una mínima proporción, arcillolitas micáceas con intercalaciones de arenitas calcáreas y lumaquelas, de la parte inferior del segmento B. Se presentan tres familias de discontinuidades: Los planos de estratificación con actitud estructural 130/30, espaciamiento promedio de 2 metros, cerrados, rugosos a muy rugosos y ligeramente meteorizados; y, dos familias de diaclasas con actitudes estructurales 290/80 y 15/80, espaciamiento promedio de 1 a 3 metros, apertura menor a 1 mm (cuando se presenta, el relleno es de cuarzo o calcita), rugosas y ligeramente meteorizadas.
- 2) En el **Sector Central** o cabeza del FRM, cuya orientación es N35E/52NW, afloran arcillolitas micáceas con intercalaciones de arenitas y lumaquelas, correspondientes al segmento B.

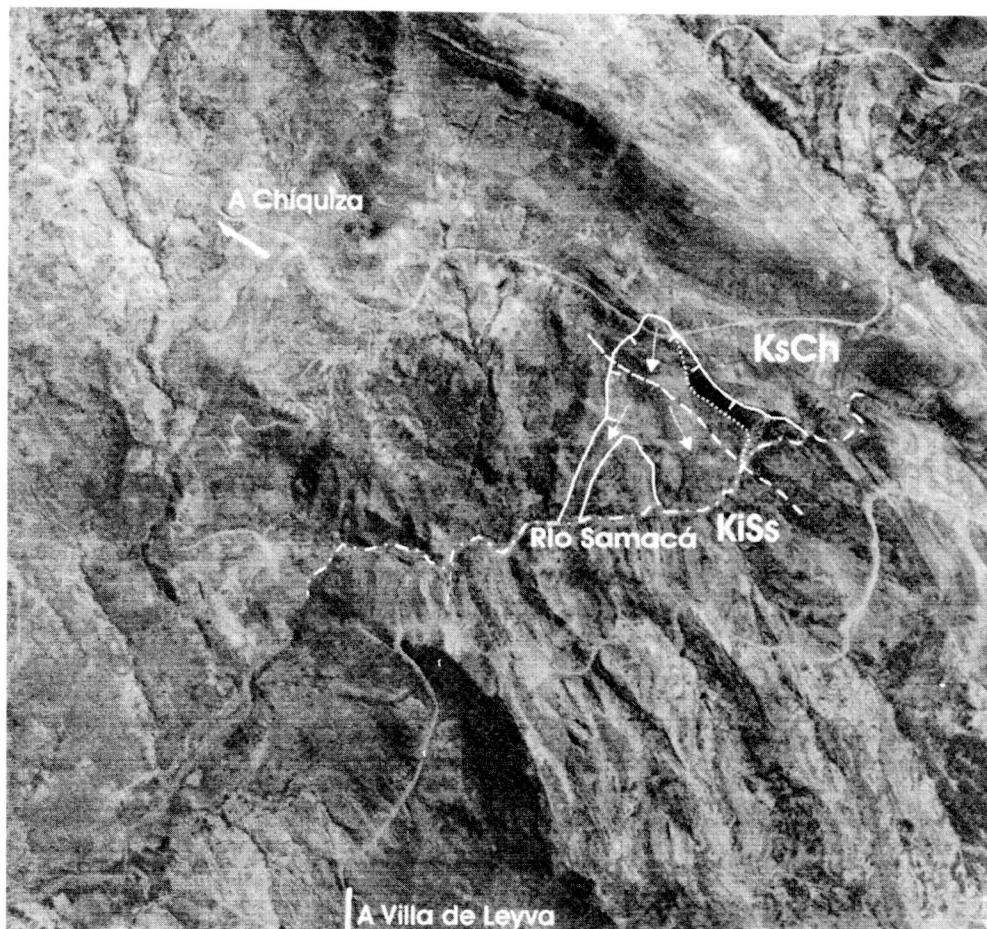


Fig. 5. Fotografía Aérea. Área de Estudio (Foto 165, vuelo C-2120, IGAC)

Igualmente se presentan tres familias de discontinuidades, representadas por: planos de estratificación con actitud estructural 305/45, espaciamiento promedio 1 metro, cerradas, lisas a ligeramente rugosas y altamente meteorizadas; y, dos familias de diaclasas con actitudes estructurales 130/75 y 215/80, espaciamiento de 60 a 90 centímetros, apertura de hasta 5 mm, con relleno arcilloso producto de la caída de escombros de la parte superior, rugosas y moderadamente meteorizadas.

Las grietas de tracción se encuentran a una distancia de entre 20 y 25 metros, desde el escarpe principal; presentan apertura de 1 a 2 metros y profundidades visibles entre 3 y 5 metros. Estas grietas afectan permanentemente a la carretera que conduce a Chíquiza, la que con frecuencia debe estar siendo rellenada con relleno, para mantener habilitado el paso de vehículos.

3) En el **Flanco Norte**, cuya orientación es N55W/50SW, afloran shales micáceos con intercalaciones de lumaquelas y arenitas, correspondientes al segmento B. También se presentan tres familias de discontinuidades: planos de estratificación con actitud estructural 165/35, espaciamiento de 20 centímetros a 1.8 metros, cerradas, onduladas y algo rugosas y altamente meteorizadas; dos familias de diaclasas, con actitudes estructurales 30/80 y 290/75, espaciamiento de 30 a 40 centímetros, apertura de 1 a 5 centímetros, sin relleno, rugosas y moderadamente meteorizadas.

Las grietas de tracción se encuentran a una distancia de entre 15 y 20 metros, desde el escarpe principal, presentan apertura de 1 cm a 17 cm y profundidades visibles entre 1 y 2 metros.

De la litología que aflora en la zona del FRM, se tomaron muestras, sobre las que se realizaron ensayos de

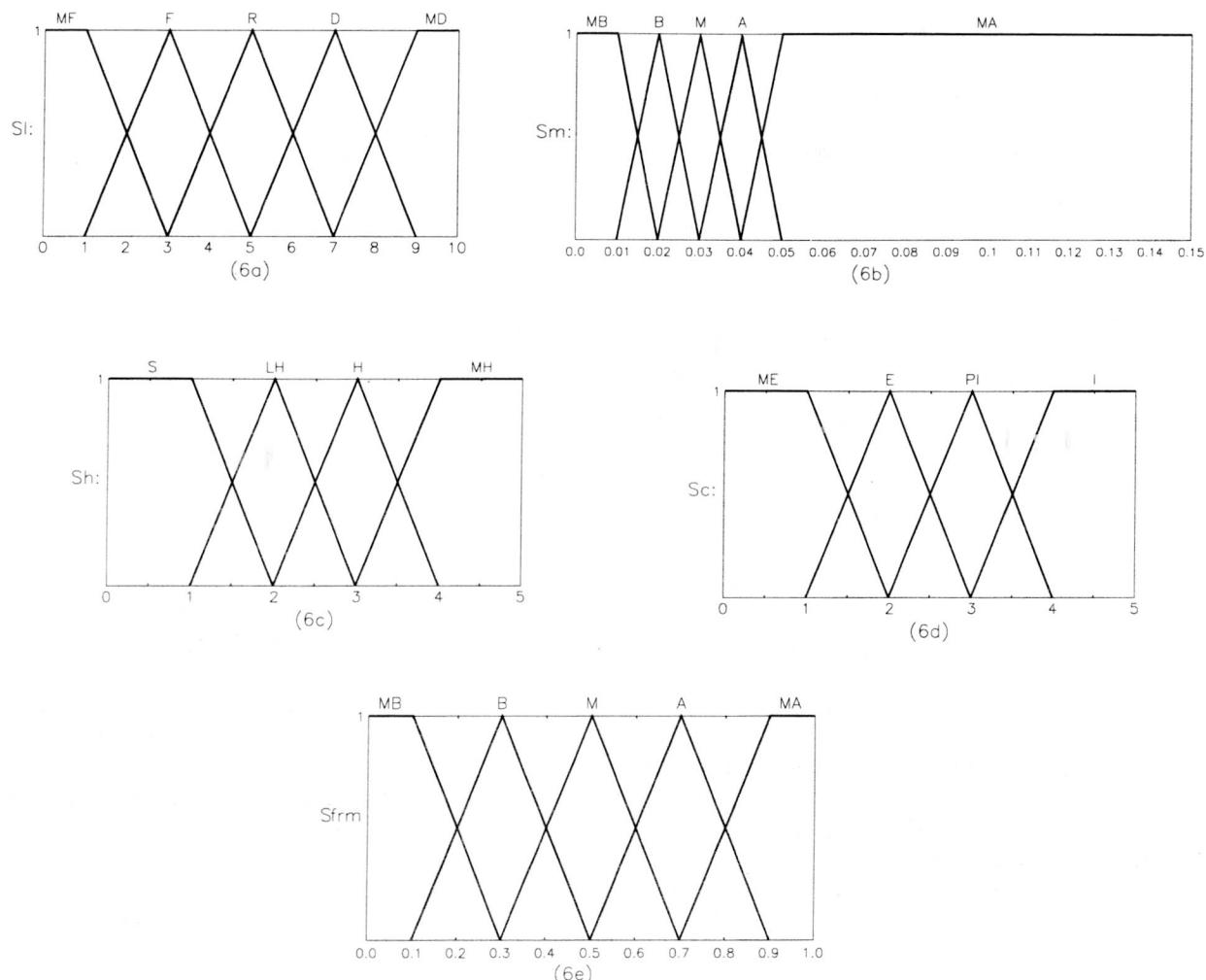


Fig. 6. a) Significador Lingüístico. Variable Litología b) Significador Lingüístico. Variable Meteorización c) Significador Lingüístico. Variable Humedad del Terreno d) Significador Lingüístico. Variable Cinemática e) Significador Lingüístico. Variable de Salida (Susceptibilidad a FRM)

compresión inconfinada y absorción, en laboratorio. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

4. DISEÑO Y APLICACIÓN DEL SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA

La Fig. 5, junto con la descripción geológica y geotécnica del caso de estudio, presentan las características técnicas del problema. Ahora, mediante el diseño y aplicación de un SLD, se evalúa la susceptibilidad a FRM, de cada uno de los sectores en que se dividió el escarpe principal del deslizamiento “El Caminante”.

Este caso constituye un sistema de comportamiento no lineal y se puede describir mediante cuatro variables: La litológica, de la que está compuesto cada uno de los sectores del deslizamiento; el grado de meteorización del

material rocoso; el estado de humedad del terreno y la condición cinemática respectiva.

4.1 Variables de Entrada

Para cada una de las variables, se definen los siguientes universos de discurso, términos lingüísticos y rangos de variación:

1) Litología: Se valoran las características composicionales y texturales de las unidades litológicas, estableciendo una escala índice, de 0 (litología con menor susceptibilidad a FRM) a 10 (litología más susceptible a FRM).

Las areniscas, al estar constituidas en un alto porcentaje por cuarzo, que es el mineral de mayor estabilidad física y química, se constituyen en las

TABLA 1
Compresión Inconfinada (BROWN 1981)

Roca	Área (cm²)	Carga Máxima (kN)	Resistencia (MPa)
Arenita Segmento A	19,7	237,2	120,3
Lumaquela	18,86	36,7	19,5
Arenita Segmento B	19,17	182,1	95,0
Shales (Carga Puntual)	12,60	2,2	1,2

Absorción (BROWN 1981)

Roca	Peso Muestra Húmeda Secada Superficialmente	Peso Muestra Seca
Arenita Segmento A	300,4 gr	295,1 gr
Lumaquela	203,0 gr	196,2 gr
Arenita Segmento B	212,0 gr	207,3 gr
Shales	458,5 gr	399,7 gr

sedimentitas de menor susceptibilidad a FRM. Las calizas, por presentar como constituyente esencial carbonatos, que son fácilmente alterables químicamente, presentan un mayor grado de susceptibilidad a FRM; pero las lutitas (arcillolitas o limolitas), presenten o no-fisiabilidad, por estar constituidas predominantemente por minerales del grupo de las arcillas, son las que muestran un mayor grado de susceptibilidad a FRM. Cuando se tienen intercalaciones de rocas duras (arenitas, calizas), con rocas blandas (lutitas), su grado de susceptibilidad a FRM, estará determinado por la predominancia de cada una de ellas dentro del conjunto global. Por último, los materiales no litificados (coluviones, talus, aluviones y suelo), al presentar un grado de cohesión muy bajo, son los materiales téreos de mayor grado de susceptibilidad a FRM. De acuerdo a lo anterior, se han establecido los siguientes rangos y calificativos lingüísticos, para la variable litología:

<u>Rango</u>	<u>Litología</u>
0 - 3	Muy Favorable (MF)
1 - 5	Favorable (F)
3 - 7	Regular (R)
5 - 9	Desfavorable (D)
7 - 10	Muy Desfavorable (MD)

Entonces: universo de discurso, $L = [0, 10]$, $T_1 = \{MF, F, R, D, MD\}$ y significador lingüístico (Fig. 6a).

2) Meteorización: Se evalúa de acuerdo al Índice de Hamroll (I_H), el cual se basa en el hecho de que la absorción de un material rocoso, cuando se sumerge

en agua durante un tiempo de 24 horas, se incrementa con el grado de meteorización de dicho material.

$I_H = (P_2 - P_1) / P_1$, donde: P_2 = Peso de la muestra saturada secada superficialmente; y P_1 = Peso de la muestra seca.

Para esta variable, se definen los siguientes rangos y términos lingüísticos:

<u>Rango</u>	<u>Meteorización</u>
0.00-0.02	Muy Baja (MB)
0.01-0.03	Baja (B)
0.02-0.04	Moderada (M)
0.03-0.05	Alta (A)
0.04-0.15	Muy Alta (MA)

Entonces: universo de discurso, $M = [0, 0.15]$, $T_m = \{MB, B, M, A, MA\}$ y significador lingüístico (Fig. 6b).

3) Humedad del Terreno: Tiene en cuenta la influencia del flujo de agua subterránea, en la estabilidad de la masa rocosa y en general de una ladera. Se evalúa de acuerdo a las condiciones generales de humedad del sitio de interés, por cuanto ello indica la presencia del nivel freático, que genera empujes desestabilizantes.

Para su valoración se tiene en cuenta la siguiente escala y términos lingüísticos:

<u>Rango</u>	<u>Condición del Terreno</u>
0 - 2	Seco (S)
1 - 3	Ligeramente Húmedo (LH)
2 - 4	Húmedo (H)
3 - 5	Muy Húmedo (MH)

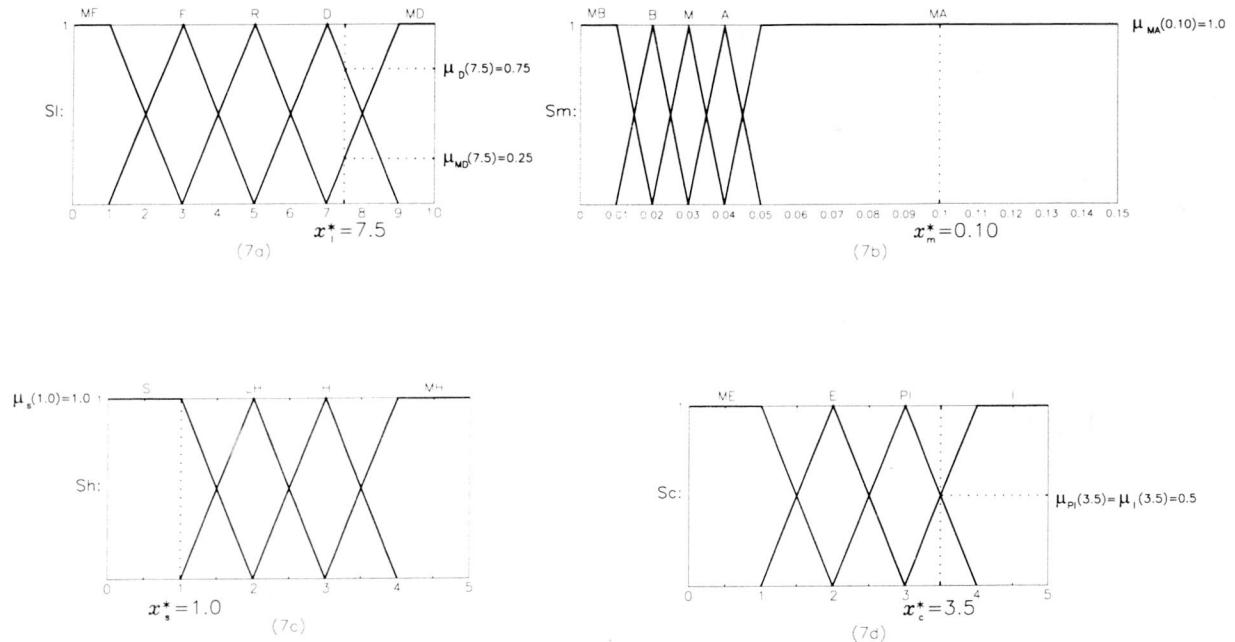


Fig. 7. a) Módulo Difusor Entrada Variable Litología (Sector Norte) b) Módulo Difusor Entrada Variable Meteorización (Sector Norte) c) Módulo Difusor Entrada Variable Humedad del Terreno (Sector Norte) d) Módulo Difusor Entrada Variable Cinemática (Sector Norte)

Entonces: universo de discurso, $H = [0, 5]$, $T_h = \{S, LH, H, MH\}$ y significador lingüístico (Fig. 6c).

4) Cinemática: Se evalúa de acuerdo a la actitud estructural de las discontinuidades (planos de estratificación, diaclasas, fallas, discordancias) de la masa rocosa y a su relación geométrica con respecto a la orientación e inclinación de la cara libre del talud o ladera.

Para que se presente un movimiento en una masa rocosa, debe cumplirse, como mínimo, la siguiente condición cinemática: El buzamiento de las discontinuidades o de sus intersecciones ($\beta d, i$), debe ser menor al ángulo de inclinación de la cara libre del talud o ladera (βt) y deben estar buzando a favor de la pendiente topográfica.

De acuerdo con lo anterior, se establecen las siguientes condiciones cinemáticas, sus respectivos rangos de calificación lingüística y numérica:

Condición Cinemática	Valoración Lingüística	Rango
$\beta d, i$ contra βt	Muy Estable (ME)	0 – 2
$\beta t < \beta d, i$	Estable (E)	1 – 3
$\beta t > \beta d, i$ y a favor	Potencialmente Inestable (PI)	2 – 4
$\beta d, i$ a favor de βt	Inestable (I)	3 – 5

Entonces: universo de discurso, $C = [0, 5]$, $T_c = \{ME, E, PI, I\}$ y significador lingüístico (Fig. 6d).

$E, PI, I\}$ y significador lingüístico (Fig. 6d).

4.2 Variable de Salida

Para la Variable de Salida, Susceptibilidad a Fenómenos de Remoción en Masa, se toma como un índice cuyo universo de discurso varía entre 0 y 1. Para tal fin, se ha definido la siguiente escala numérica y términos lingüísticos:

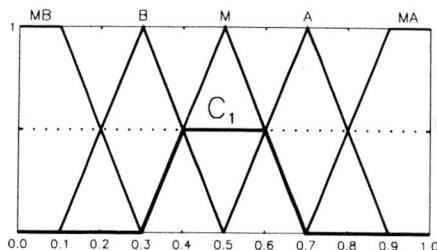
Rango Numérico	Calificación Lingüística
0.0 – 0.3	Muy Bajo (MB)
0.1 – 0.5	Bajo (B)
0.3 – 0.7	Moderado (M)
0.5 – 0.9	Alto (A)
0.7 – 1.0	Muy Alto (MA)

Entonces: universo de discurso, $SFRM = [0, 1]$, $T_{sfrm} = \{MB, B, M, A, MA\}$ y significador lingüístico (Fig. 6e).

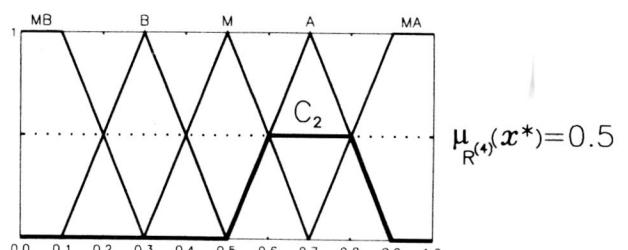
4.3 Base de Reglas

La Base de Reglas, diseñada para representar la heurística sobre el problema, está constituida por las siguientes proposiciones del lenguaje:

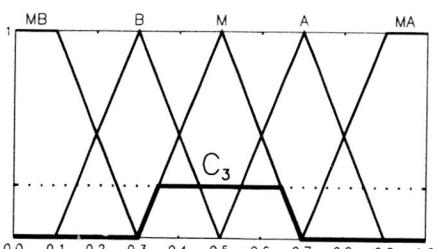
$R^{(1)}$: Si la Litología es Muy Favorable y la Meteorización



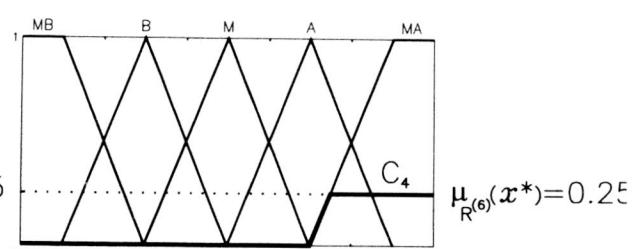
(8a)



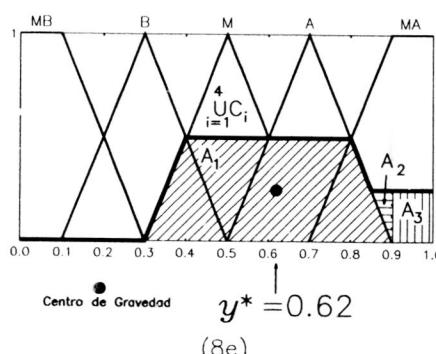
(8b)



(8c)



(8d)



(8e)

Fig. 8. a) Módulo Motor de Inferencia Corte C₁, generado por la regla 3 (Sector Norte) b) Módulo Motor de Inferencia Corte C₂, generado por la regla 4 (Sector Norte) c) Módulo Motor de Inferencia Corte C₃, generado por la regla 5 (Sector Norte) d) Módulo Motor de Inferencia Corte C₄, generado por la regla 6 (Sector Norte) e) Módulo Concretor Variable de Salida Susceptibilidad a FRM (Sector Norte)

es Baja y el Terreno es Seco y la Cinemática es Muy Estable, entonces la Susceptibilidad a FRM es Muy Baja

R⁽²⁾: Si la Litología es Favorable y la Meteorización es Moderada y el Terreno es Seco y la Cinemática es Estable, entonces la Susceptibilidad a FRM es Baja

R⁽³⁾: Si la Litología es Desfavorable y la Meteorización es Muy Alta y el Terreno es Seco y la Cinemática es Potencialmente Inestable, entonces la Susceptibilidad a FRM es Moderada

R⁽⁴⁾: Si la Litología es Desfavorable y la Meteorización es Muy Alta y el Terreno es Seco y la Cinemática es Inestable, entonces la Susceptibilidad a FRM es Alta

R⁽⁵⁾: Si la Litología es Muy Desfavorable y la Meteorización es Muy Alta y el Terreno es Seco y la Cinemática es Potencialmente Inestable, entonces la Susceptibilidad a FRM es Moderada

R⁽⁶⁾: Si la Litología es Muy Desfavorable y la Meteorización es Muy Alta y el Terreno es Seco y la Cinemática es Inestable, entonces la Susceptibilidad a FRM es Muy Alta

4.4 Procesamiento de Datos con el SLD

De acuerdo a la descripción geológica y geotécnica del problema, para cada uno de los sectores del deslizamiento, se tienen las siguientes calificaciones de las variables:

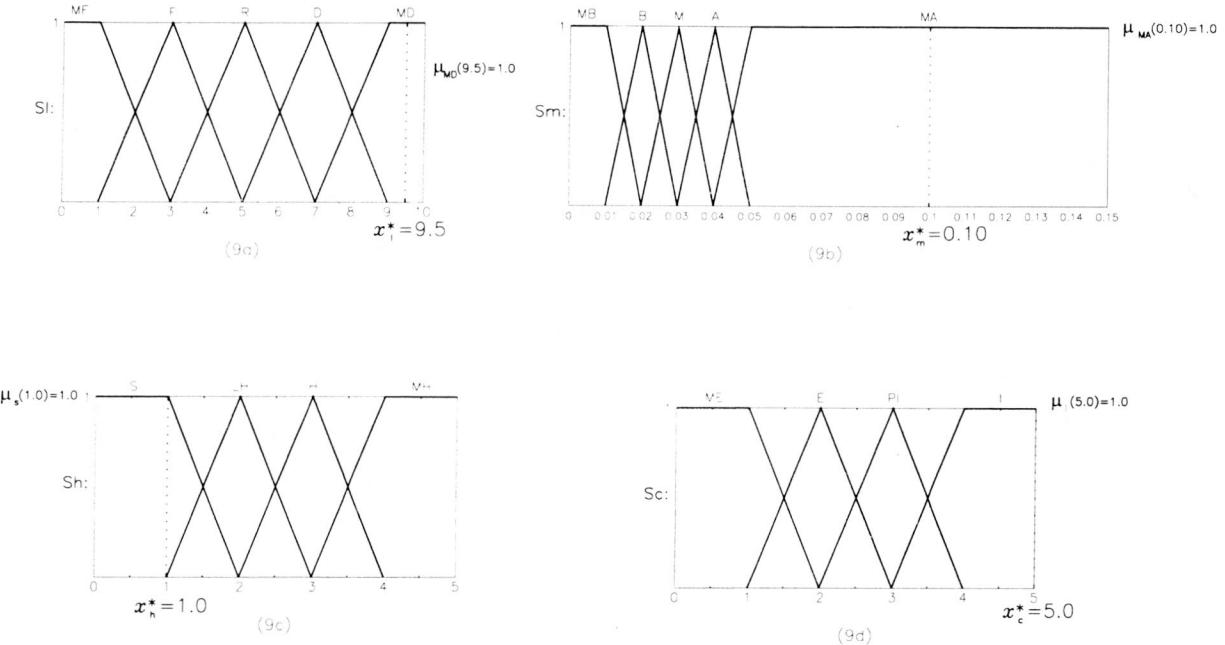


Fig. 9. a) Módulo Difusor Entrada Variable Litología (Sector Central) b) Módulo Difusor Entrada Variable Meteorización (Sector Central) c) Módulo Difusor Entrada Variable Humedad del Terreno (Sector Central) d) Módulo Difusor Entrada Variable Cinemática (Sector Central)

Sector	Litología	Meteorización*	Terreno	Cinemática
Norte	7,5	0,100	1,0	3,5
Central	9,5	0,100	1,0	5,0
Sur	2,5	0,025	1,0	2,0

* Se obtiene de ponderar el I_h de cada tipo de roca, por su porcentaje de ocurrencia en el segmento respectivo, en cada sector. Segmento A: Arenitas (90%), Lumaquelas (5%) y Shales (5%); y, Segmento B: Arenitas (20%), Lumaquelas (20%) y Shales (60%).

Procesando la anterior información, utilizando el SLD diseñado para tal fin, se tiene:

4.4.1 Sector Norte

Litología (Fig. 7a): $\mu_{MD}(7.5) = 0.25$, $\mu_D(7.5) = 0.75$
 Meteorización (Fig. 7b): $\mu_{MA}(0.10) = 1.00$
 Terreno (Fig. 7c): $\mu_s(1.0) = 1.00$
 Cinemática (Fig. 7d): $\mu_{PI}(3.5) = 0.50$, $\mu_i(3.5) = 0.50$

Por lo tanto se activan las reglas 3, 4, 5 y 6; y, de acuerdo a la implicación del mínimo, se tiene:

$$R^{(3)}: \text{Mínimo} [\mu_D(7.5), \mu_{MA}(0.10), \mu_s(1.0), \mu_{PI}(3.5)] \\ = \mu_{R(3)}(x^*) = 0.50$$

$$R^{(4)}: \text{Mínimo} [\mu_D(7.5), \mu_{MA}(0.10), \mu_s(1.0), \mu_i(3.5)] \\ = \mu_{R(4)}(x^*) = 0.50$$

$$R^{(5)}: \text{Mínimo} [\mu_{MD}(7.5), \mu_{MA}(0.10), \mu_s(1.0), \mu_{PI}(3.5)] \\ = \mu_{R(5)}(x^*) = 0.25$$

$$R^{(6)}: \text{Mínimo} [\mu_{MD}(7.5), \mu_{MA}(0.10), \mu_s(1.0), \mu_i(3.5)] \\ = \mu_{R(6)}(x^*) = 0.25$$

La regla 3, genera un corte (C_1), definido por:

$$\text{Mínimo} [\mu_{R(3)}(x^*), \mu_M(S_{frm})] = \text{Mínimo} [0.5, \mu_M(S_{frm})] \text{ (Fig. 8a)}$$

La regla 4, genera un corte (C_2), definido por:

$$\text{Mínimo} [\mu_{R(4)}(x^*), \mu_A(S_{frm})] = \text{Mínimo} [0.5, \mu_A(S_{frm})] \text{ (Fig. 8b)}$$

La regla 5, genera un corte (C_3), definido por:

$$\text{Mínimo} [\mu_{R(5)}(x^*), \mu_M(S_{frm})] = \text{Mínimo} [0.5, \mu_M(S_{frm})] \text{ (Fig. 8c)}$$

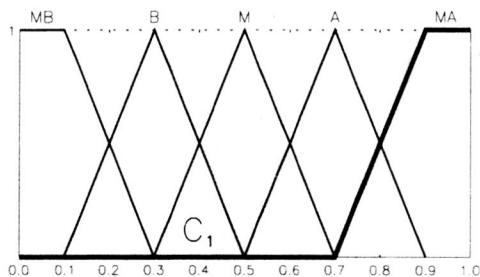
La regla 6, genera un corte (C_4), definido por:

$$\text{Mínimo} [\mu_{R(6)}(x^*), \mu_{MA}(S_{frm})] = \text{Mínimo} [0.5, \mu_{MA}(S_{frm})] \text{ (Fig. 8d)}$$

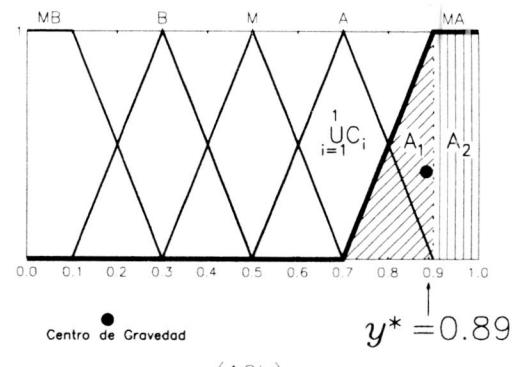
El módulo concesor toma los anteriores cortes, los une y aplicando el centro de gravedad, obtiene el valor concreto de salida (y^*), que da el índice de susceptibilidad a FRM para el Sector Norte (Fig. 8e).

El centro de gravedad, del área bajo la curva de la Fig. 8e, se calcula de la siguiente forma:

No.	Area	\bar{y}	Area * \bar{y}
1	0.5000	0.6000	0.3000
2	0.0063	0.8833	0.0056
3	0.0250	0.9500	0.0238
$\Sigma \text{Area} = 0.5313$			$\Sigma \text{Area} * \bar{y} = 0.3294$

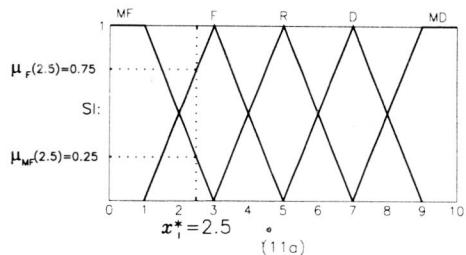


(10a)

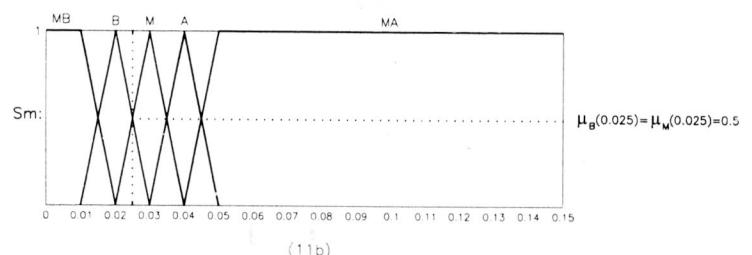


(10b)

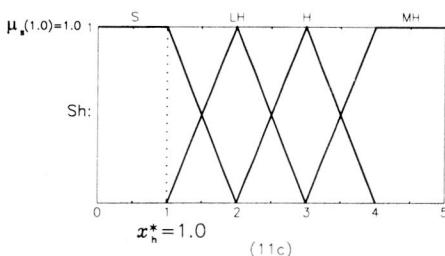
Fig. 10. a) Módulo Motor de Inferencia Corte C_i , generado por la regla 6 (Sector Norte) b) Módulo Concretor Variable de Salida Susceptibilidad a FRM (Sector Central)



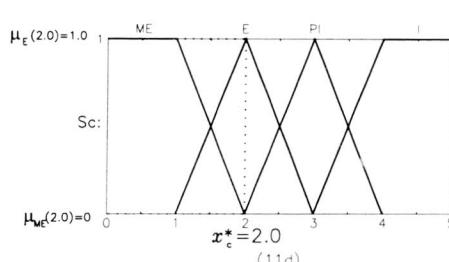
(11a)



(11b)



(11c)



(11d)

Fig. 11. a) Módulo Difusor Entrada Variable Litología (Sector Sur) b) Módulo Difusor Entrada Variable Meteorización (Sector Sur) c) Módulo Difusor Entrada Variable Humedad del Terreno (Sector Sur) d) Módulo Difusor Entrada Variable Cinemática (Sector Sur)

$$\bar{y} = (\sum \text{Area}^* \bar{y}) / (\sum \text{Area}) = 0.3294 / 0.5313 = 0.62 \Rightarrow \underline{y^* = 0.62}$$

implicación del mínimo, se tiene:

$$R^{(6)}: \text{Mínimo} [\mu_{MD}(9.5), \mu_{MA}(0.10), \mu_S(1.0), \mu_I(3.5)] \\ = \mu_{R(6)}(x^*) = 1.0$$

La regla 6, genera un corte (C_i), definido por:

$$\text{Mínimo} [\mu_{R(6)}(x^*), \mu_{MA}(S_{frm})] = \text{Mínimo} [1.0, \mu_{MA}(S_{frm})]$$

Por lo tanto se activa la regla 6; y, de acuerdo a la

implicación del mínimo, se tiene:

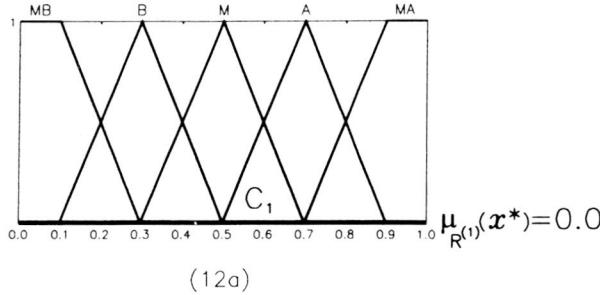
4.4.2 Sector Central

Litología (Fig. 9a): $\mu_{MD}(9.5) = 1.00$

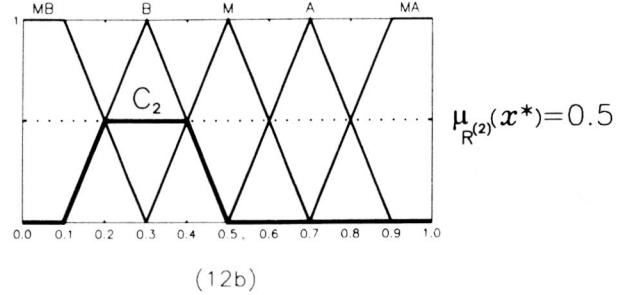
Meteorización (Fig. 9b): $\mu_{MA}(0.10) = 1.00$

Terreno (Fig. 9c): $\mu_S(1.0) = 1.00$

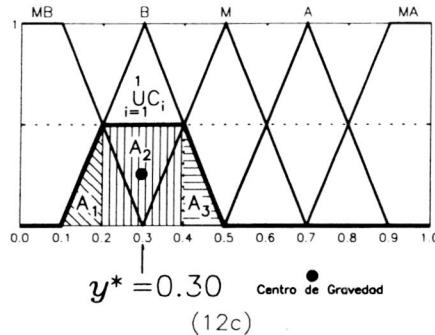
Cinemática (Fig. 9d): $\mu_I(5.0) = 1.00$



(12a)



(12b)



(12c)

Fig. 12. a) Módulo Motor de Inferencia Corte C₁, generado por la regla 1 (Sector Sur) b) Módulo Motor de Inferencia Corte C₂, generado por la regla 2 (Sector Sur) c) Módulo Concretor Variable de Salida Susceptibilidad a FRM (Sector Sur)

(Fig. 10a)

El módulo concretor, toma los anteriores cortes, los une y aplicando el centro de gravedad, obtiene el valor concreto de salida (y^*), que da el índice de susceptibilidad a FRM para el Sector Central (Fig. 10b).

El centro de gravedad, del área bajo la curva de la Figura 10b, se calcula de la siguiente forma:

No.	Area	\ddot{y}	Area* \ddot{y}
1	0.1000	0.8333	0.0833
2	0.1000	0.9500	0.0950
Σ Area = 0.2000			Σ Area* \ddot{y} = 0.1783

$$\ddot{y} = (\Sigma \text{Area} * \ddot{y}) / (\Sigma \text{Area}) = 0.1783 / 0.2000 = 0.89 \Leftrightarrow \underline{y^* = 0.89}$$

4.4.3 Sector Sur

Litología (Fig. 11a): $\mu_{MF}(2.5) = 0.25$, $\mu_F(2.5) = 0.75$

Meteorización (Fig. 11b): $\mu_B(0.025) = 0.50$, $\mu_M(0.025) = 0.50$

Terreno (Fig. 11c): $\mu_S(1.0) = 1.00$

Cinemática (Fig. 11d): $\mu_{ME}(2.0) = 0.00$, $\mu_E(2.0) = 1.00$

Por lo tanto se activan las reglas 1 y 2; y, de acuerdo a la implicación del mínimo, se tiene:

$$R^{(1)}: \text{Mínimo} [\mu_{MF}(2.5), \mu_B(0.025), \mu_S(1.0), \mu_{ME}(2.0)] \\ = \mu_{R(1)}(x^*) = 0.00$$

$$R^{(2)}: \text{Mínimo} [\mu_F(2.5), \mu_M(0.025), \mu_S(1.0), \mu_E(2.0)] \\ = \mu_{R(2)}(x^*) = 0.50$$

La regla 1, genera un corte (C_1), definido por:
 $\text{Mínimo} [\mu_{R(1)}(x^*), \mu_{MB}(S_{frm})] = \text{Mínimo} [0.5, \mu_{MB}(S_{frm})]$ (Fig. 12a)

La regla 2, genera un corte (C_2), definido por:
 $\text{Mínimo} [\mu_{R(2)}(x^*), \mu_B(S_{frm})] = \text{Mínimo} [0.5, \mu_B(S_{frm})]$ (Fig. 12b)

El módulo concretor toma los anteriores cortes, los une y aplicando el centro de gravedad, obtiene el valor concreto de salida (y^*), que da el índice de susceptibilidad a FRM para el Sector Sur (Fig. 12c).

El centro de gravedad del área bajo la curva de la Fig. 12c, se calcula de la siguiente forma:

No.	Area	\ddot{y}	Area* \ddot{y}
1	0.0250	0.1667	0.0042
2	0.1000	0.3000	0.0030
3	0.0250	0.4333	0.0108
Σ Area = 0.1500			Σ Area* \ddot{y} = 0.0558

$$\ddot{y} = (\Sigma \text{Area} * \ddot{y}) / (\Sigma \text{Area}) = 0.0558 / 0.1500 = 0.30 \Leftrightarrow \underline{y^* = 0.30}$$

5. CONCLUSIONES

1. El Fenómeno de Remoción en Masa “El Caminante”,

es un FRM complejo: en la parte superior, es un hundimiento traslacional retrogresivo de bloques de masa rocosa; este material es removido y progresiva a flujos de detritos, dentro de los cuales, en época de lluvias, ocurren reactivaciones como deslizamientos rotacionales y flujos de lodo internos.

2. Los factores determinantes en el mayor grado de susceptibilidad a Fenómenos de Remoción en Masa, para el caso de estudio: Deslizamiento "El Caminante", están representados por la cinemática presente en cada sector, así como por la litología y grado de meteorización del material rocoso.
3. Los resultados obtenidos muestran que el sector de mayor grado de susceptibilidad a FRM, del deslizamiento "El Caminante", es el Central ($y^* = 0.89$); el que además, al estar afectando la banca de la carretera que conduce al municipio de Chíquiza, puede fácilmente reactivarse en épocas de lluvia, con el consecuente riesgo generado. El flanco Norte presenta un grado de susceptibilidad a FRM Alto ($y^* = 0.62$), mientras que el flanco Sur, es el más estable ($y^* = 0.30$).
4. El Sistema de Lógica Difusa, diseñado y aplicado en la evaluación de la susceptibilidad del terreno a FRM, da resultados coherentes con la realidad geológica y geotécnica de la zona. Constituyéndose tal SLD, en piloto o calibrador del SLD que se aplicará en la Zonificación Geotécnica por Fenómenos de Remoción en Masa, en la comprensión municipal de Villa de Leyva (Boyacá), donde afloran rocas con características geológicas y geotécnicas muy similares.
5. Dada la gran importancia de la gestión integral del riesgo, dentro del proceso de toma de decisiones por parte de los planificadores del desarrollo de una región, es necesario complementar el presente estudio con la evaluación de la probabilidad de ocurrencia de eventos detonantes o extremos: Sismos, Lluvias, Antrópicos, etc.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos al profesor Álvaro Jaime González García del Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, por sus comentarios constructivos en el desarrollo de la Tesis de Maestría en Geotecnia: "Aplicación de los Sistemas de Lógica Difusa en la Zonificación Geotécnica por Fenómenos de Remoción en Masa y Erosión Superficial, en el municipio de Villa de Leyva (Boyacá): Base Técnica para la Formulación del Plan de Ordenamiento Territorial", de la cual el presente artículo forma parte integral.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BROWN, E.T. (1981): Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods.- Pergamon Press, 211 p, Oxford.
- DENGO, C.A. & COVEY, M.C. (1993): Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: Implications for Trap Styles and Regional Tectonics.- The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 77, 8, p.1315-1337, Tulsa.
- DRIANKOV, D., HELLENDOORN, H. & REINFRANK, M. (1996): An Introduction to Fuzzy Control.- Springer-Verlag, 316 p, Berlin.
- ETAYO S, F. (1968): El Sistema Cretáceo en la Región de Villa de Leyva y Zonas Próximas.- Geología Colombiana, 5, p.5-74, Bogotá.
- KLIR, G.J., St.CLAIR, U.H. & YUAN, B. (1997): Fuzzy Set Theory, Foundations and Applications.- Prentice Hall, Inc., 245 p, New Jersey.
- MENDEL, J. M. (1995): Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial.- Proceedings of the IEEE, v. 83, 3, p. 345-377, New York.
- PATARROYO G., P. (1994): Reevaluación Cartográfica, Reconocimiento Estratigráfico y Paleontológico del Área de Villa de Leyva – Boyacá.- Proyecto de Investigación del CINDEC, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- PORRILLA 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.- Geología Colombiana, 24, p.159-176, Santafé de Bogotá.
- VILLOTA, H. (1997): Una Nueva Aproximación a la Clasificación Fisiográfica del Terreno.- Revista CIAF – IGAC, v. 15, 1, p.83-115, Bogotá.

Manuscrito recibido, Septiembre de 2001