

**REPUBLICA DE COLOMBIA  
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN GEOCIENCIAS, MINERIA Y  
QUIMICA**

**INVESTIGACION PARA LA PREVENCION DE DESASTRES  
POR DESLIZAMIENTOS**

**"METODOLOGIA PARA LA CARTOGRAFIA DE ZONAS  
DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS A  
PARTIR DE SENSORES REMOTOS Y S.I.G."**

Por:

**GERMAN VARGAS CUERVO\***  
Geólogo M.Sc Sensores Remotos

**Febrero de 1994**

## CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	63
ABSTRACT.....	63
1. INTRODUCCION.....	63
1.1. DEFINICIONES Y REFERENCIAS.....	64
1.2. AREA DE ESTUDIO.....	65
2. METODOS Y TECNICAS.....	65
2.1. PRODUCTOS NUMERICOS DE BASE.....	69
2.2. PROCESAMIENTO DE IMAGENES.....	69
2.3. ANALISIS ESTADISTICO.....	74
3. ANALISIS DE LOS PARAMETROS DEL TERRENO.....	75
3.1. DESLIZAMIENTOS.....	76
3.2. USO Y OCUPACION DEL SUELO.....	78
3.3. GEOLOGIA.....	83
3.4. GEOLOGIA ESTRUCTURAL.....	87
3.5. MAPAS DERIVADOS DEL MODELO NUMERICO DE TERRENO.....	89
3.5.1. ALTITUD RELATIVA.....	90
3.5.2. INCLINACION DE PENDIENTES.....	90
3.5.3. ORIENTACION DE LA PENDIENTE.....	92
3.5.4. DRENAJE Y MICROCUCENCAS.....	93
4. ELABORACION DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD.....	96
4.1. VALIDACION DEL METODO.....	104
4.2. DISCUSION DE RESULTADOS.....	109
4.3. PERSPECTIVAS.....	111
5. AGRADECIMIENTOS.....	111
6. CONCLUSIONES.....	111
7. REFERENCIAS.....	112

## FIGURAS

1 Localización del área de Estudio.....	66
2 Organigrama del método de trabajo.....	67
3 Imagen SOPT-XS.....	70
4 Imagen LANDSAT-TM.....	71
5 Modelo Numérico de Terreno.....	72
6 Ortoimagen Spot en falso color del área de estudio.....	73
7 Ortoimagen Spot con realce espectral "color natural" índices físicos y análisis en componentes principales.....	74
8 Esquema de análisis estadístico de mapa-imágenes sobre un SIG.....	76
9 Vistas tridimensionales de los deslizamientos del Salitre y la Chapa.....	79

10	Imagen-mapa de coronas de deslizamientos.....	80
11	Imagen-Mapa de densidad de coronas de deslizamientos.....	81
12	Imagen-mapa de ocupación y uso actual del suelo.....	82
13	Imagen-mapa geológico estructural.....	84
14	Mapa geológico estructural superpuesto a la ortoimagen Spot.....	85
15	Diagramas rosa de lineamientos.....	88
16	Imagen-mapa de densidad de lineamientos.....	89
17	Imágenes-mapas morfométricos derivados del MNT. ....	91
18	Mapa hidrográfico derivado del MNT de red de drenaje y microcuencas.....	94
19	Mapa de densidad de red de drenaje.....	95
20	Imágenes-mapas de susceptibilidad geológica a los deslizamientos.....	97
21	Imágenes-mapas de susceptibilidad de la ocupación y uso del suelo a los deslizamientos.....	98
22	Imágenes-mapa de susceptibilidad de la inclinación de la pendiente a los deslizamientos.....	99
23	Imágenes-mapas de susceptibilidad de densidad de lineamientos a los deslizamientos.....	100
24	Imágenes-mapas de susceptibilidad de la altitud relativa a los deslizamientos.....	101
25	Imágenes-mapas de susceptibilidad de la densidad de drenaje a los deslizamientos.....	102
26	Imágenes-mapas de susceptibilidad de la orientación de las pendientes a los deslizamientos.....	103
27	Esquema de superposición digital de imágenes sobre un SIG para la elaboración de mapas de susceptibilidad del terreno hacia los deslizamientos.....	104
28	Susceptibilidad del terreno a los deslizamientos de tipo 1.....	105
29	Susceptibilidad del terreno a los deslizamientos de tipo 2.....	106

30	Susceptibilidad del terreno a los deslizamientos de tipo 3.....	107
31	Susceptibilidad del terreno hacia los deslizamientos en general.....	108

## TABLAS

1	Cálculo estadístico del peso de las unidades de uso y ocupación del suelo hacia los deslizamientos.....	83
2	Cálculo estadístico del peso de las unidades geológicas hacia los deslizamientos.....	86
3	Cálculo estadístico del peso de las unidades de densidad de lineamientos hacia los deslizamientos.....	90
4	Cálculo estadístico del peso de las unidades de altitud relativa hacia los deslizamientos.....	92
5	Cálculo estadístico del peso de las unidades de inclinación de pendiente hacia los deslizamientos.....	92
6	Cálculo estadístico del peso de las unidades de orientación de pendientes hacia los deslizamientos.....	93
7	Cálculo estadístico del peso de las unidades de densidad de drenaje hacia los deslizamientos.....	95
8	Intervalos de susceptibilidad.....	96

## RESUMEN

Sistemas de Información Geográfica (GIS) y mapas digitales obtenidos de imágenes SPOT-XS y LANDSAT-TM y un Modelo Digital de Terreno (MNT), han facilitado desarrollar un nuevo método de correlación para obtener diferentes mapas de susceptibilidad del terreno a los deslizamientos. Este método, basado sobre un análisis estadístico, determina cuantitativamente el peso o grado de susceptibilidad de cada unidad de terreno hacia tres tipos de deslizamientos, clasificados por su edad, actividad y dimensiones: mayor activo, menor activo y antiguo inactivo.

Siete factores de terreno han sido considerados en este estudio: litología, estructural (densidad de lineamientos), uso y ocupación del suelo, inclinación de pendientes, orientación de pendientes, y densidad de drenaje.

Este estudio también demuestra que en áreas de frecuente nubosidad donde es difícil obtener imágenes estereoscópicas Spot, la combinación de SPOT-XS y LANDSAT-TM por correlación automática permitió obtener la estereoscopía y un MNT, el cual fue de gran utilidad en la cartografía de los mapas de susceptibilidad.

El área piloto se localiza en la cordillera oriental de los Andes Colombianos sobre el valle alto del río Chicamocha, la cual representa un laboratorio natural para la aplicación del método aquí desarrollado.

## ABSTRACT

Geographical Information Systems (GIS) and digital maps obtained from SPOT and LANDSAT image data and a Digital Elevation Model (DTM), have allowed the development of a new method of "correlation" to obtain different maps of

landslides terrain susceptibility. This method based on a statistical analysis quantitatively provides the weight or grade of susceptibility for each terrain unit with regard to three landslides types classification taken in account their age, activity and size (mayor active, minor active and ancient inactive).

Seven terrain factors have been considered in this study: lithology, structure (lineament density), landuse, slope degree, slope aspect and drainage density.

This study also shows that, where it was possible to obtain stereopair from Spot images in this frequently cloud covered area, combination of Spot-XS and Landsat-TM data by autocorrelation provide a DTM, which is useful for landslide susceptibility mapping.

The pilot area is located in the Chicamocha Valley in the Eastern Cordillera of Colombian Andes, which provide a natural laboratory for the application of the method developed here.

## 1. INTRODUCCION

En los Andes Colombianos, entre las catástrofes naturales los movimientos en masa son los fenómenos mas frecuentes y ampliamente distribuidos.

Hasta hace una época reciente el estudio e inventario de los movimientos de terreno fue basado en interpretación de fotografías aéreas en combinación con levantamientos de campo (RITCHIE, 1958).

La alta resolución espacial de las fotografías aéreas y su capacidad de análisis estereoscópico, las hacen de hecho una herramienta de gran utilidad. Sin embargo, su uso en estudios regionales muestra limitantes en cuanto a la disposición de vuelos, la diversidad de

escalas, la densidad de interpretación, y su carácter de análisis cualitativo, lo cual hace de la teledetección satelital y los sistemas de información geográfica (SIG) una herramienta de mayor capacidad.

Las imágenes de satélite (Spot, Landsat, etc.) presentan grandes ventajas en la identificación y cartografía de elementos del terreno. En especial por: la alta resolución espectral determinada por varias bandas (planos imagen) de diferente longitud de onda, la facilidad de interpretación digital a varias escalas (resolución espacial por pixel de 10-20 m en imágenes Spot y de 30 m en imágenes Landsat TM), la capacidad de producir múltiples planos-imagen por procesamiento digital y el carácter numérico de su información, entre otras.

Un SIG permite la entrada y el manejo ordenado y preciso de la información en cualquiera de sus formas (datos, mapas, etc.) para su análisis, modelamiento, actualización y presentación.

Esta investigación tiene por objeto principal establecer una metodología para la cartografía de mapas de susceptibilidad a los movimientos de terreno, determinando cuantitativamente el "peso" de cada parámetro o unidad de terreno.

La posición fisiográfica de la región y la diversidad de factores geológicos, estructurales y geomorfológicos hacen del área un laboratorio natural para el estudio de los fenómenos de remoción en masa.

Los resultados aquí presentados hacen parte del trabajo de tesis de grado presentado a la Universidad de París 6 (VARGAS, 1991) y se enmarca dentro del programa "GARS" (Geological Applications of Remote Sensing) en Colombia, desarrollado bajo el auspicio de la IUGS y UNESCO y la participación de INGEOMINAS, BRGM (Francia) UNIVERSIDAD DE PARÍS 6 (Francia), y el ITC de Holanda.

## 1.1. DEFINICIONES Y REFERENCIAS

El término "zonación" (Varnes, 1984) se aplica en sentido general a una división de la superficie terrestre en áreas que representan diferentes grados de amenaza (hazard) potencial o actual hacia deslizamientos u otros movimientos en masa.

La zonación o zonificación sobre áreas de actividad humana, involucra tres términos principales: amenaza, riesgo y vulnerabilidad. Los conceptos y criterios que involucran estos términos más aceptados a nivel mundial son los propuestos por la UNDRO (Office of the United Disaster) y la UNESCO:

*Amenaza natural (Hazard)* determina la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno dañino potencial dentro de un lapso específico y en un área determinada.

*Vulnerabilidad (V)* determina el grado de pérdida de un elemento o conjunto de elementos bajo riesgo como resultado de un fenómeno natural de una cierta magnitud. Es expresado sobre una escala de "no daño" a "pérdida total".

*Riesgo específico (RS)* determina los daños esperados debido a la ocurrencia de un fenómeno natural. Puede ser expresado por el producto de la amenaza (H) y la vulnerabilidad (V)

*Elementos en riesgo (E)* determina la población, propiedades, actividades económicas, incluyendo servicios públicos, etc. en riesgo en un área dada.

*Riesgo total (RT)* determina el número de personas afectadas, daños en propiedades o interrupción de actividades económicas, esperadas debido a un fenómeno natural. Es el producto de riesgo específico (RS) y elementos en riesgo (E).

$$RT = (E)(RS) = (E)(HxV)$$

El término de susceptibilidad a los deslizamientos (Hazard susceptibility) ha sido considerado por varios autores (HANSEN, 1984) como un "riesgo" relativo y probabilístico en el cual se compara una situación con otra, bajo la existencia de eventos de amenaza en un tiempo pasado.

Aquí se considera el término "susceptibilidad" como el grado de probabilidad de ocurrencia o reactivación de un movimiento de terreno específico, en un área determinada y en un lapso relativo.

Evelyn *et al.* (1978) introducen la cartografía computarizada (en una estructura de celdas) de mapas de susceptibilidad a los deslizamientos a partir de dos factores de análisis: geología e inclinación de pendientes.

Gupta y Joshi (1990); Scanvic y Girault (1989); Van Westen, (1989); Scanvic y Notti (1990); Scanvic *et al.* (1990); Carrara *et al.* (1991); Vargas, (1991); Leroi *et al.* (1992); Pachauri y Pant (1992); Rengers *et al.* (1992) y otros autores han perfeccionado la cartografía de estos mapas a través de análisis estadísticos a partir de técnicas de sensores remotos y SIG.

En esta investigación se dan nuevos aportes en este campo, especialmente en la utilización de las imágenes de satélite Spot y Landsat, modelos de terreno y SIG para la cartografía temática de los diferentes parámetros de terreno, y en la determinación cuantitativa del "peso" o susceptibilidad de cada parámetro y unidad de terreno hacia los movimientos en masa, agrupados en tres categorías. Esto ha permitido obtener una serie de mapas temáticos de susceptibilidad, confiables para estudios regionales.

## 1.2. AREA DE ESTUDIO

El área de este estudio se localiza sobre los Andes Orientales Colombianos en la cuenca alta del río Chicamocha, en

jurisdicción del departamento de Boyacá. Su extensión es de 110 km<sup>2</sup> (Figura 1).

Paz de Río, principal población del área, registra 4.300 habitantes en su casco urbano y 4.800 en la zona rural. Geográficamente esta población se localiza en las siguientes coordenadas respecto al meridiano de Greenwich:

Latitud 5°59' Norte  
Longitud 72°45' Oeste

La altitud en el área varía entre 2200 m s.n.m. en la parte septentrional del valle del río Chicamocha y 3600 m.s.n.m en la zona de la Chapa.

Cuatro unidades microclimáticas se registran en la zona (IGAC, 1984):

Frío seco: precipitación anual entre 500 y 1000 mm, altitudes entre los 2000 y 3000 m, y temperaturas de 11 a 18°C.

Frío húmedo: precipitación anual entre 1000 y 2000 mm, altitudes entre los 2000 y 3000 m, y temperaturas de 11 a 18°C.

Muy frío húmedo (páramo bajo): precipitación anual entre 500 y 1000 mm, altitud entre los 3000 y 3600 m, y temperaturas de 8 a 11°C.

Muy frío (páramo alto): precipitación anual entre los 1000 y 2000 mm, altitudes entre los 3600 y 4200 m, temperaturas menores de 8°C.

## 2. METODOS Y TECNICAS

La metodología aquí desarrollada, se fundamenta en la utilización de imágenes de satélite, modelos numéricos de terreno (MNT) y sistemas de información geográfica (SIG) para el estudio y zonificación de fenómenos de remoción en masa. (Figura 2).

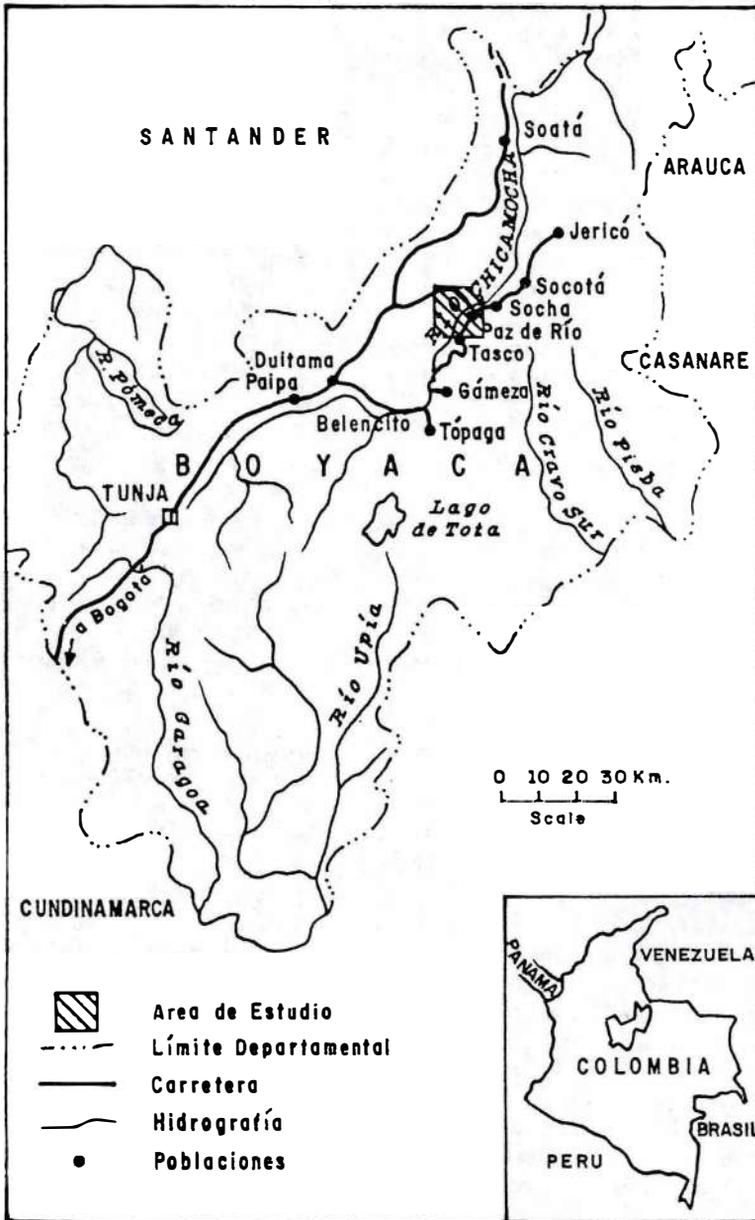


FIGURA 1: LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

**METODO DE TRABAJO**

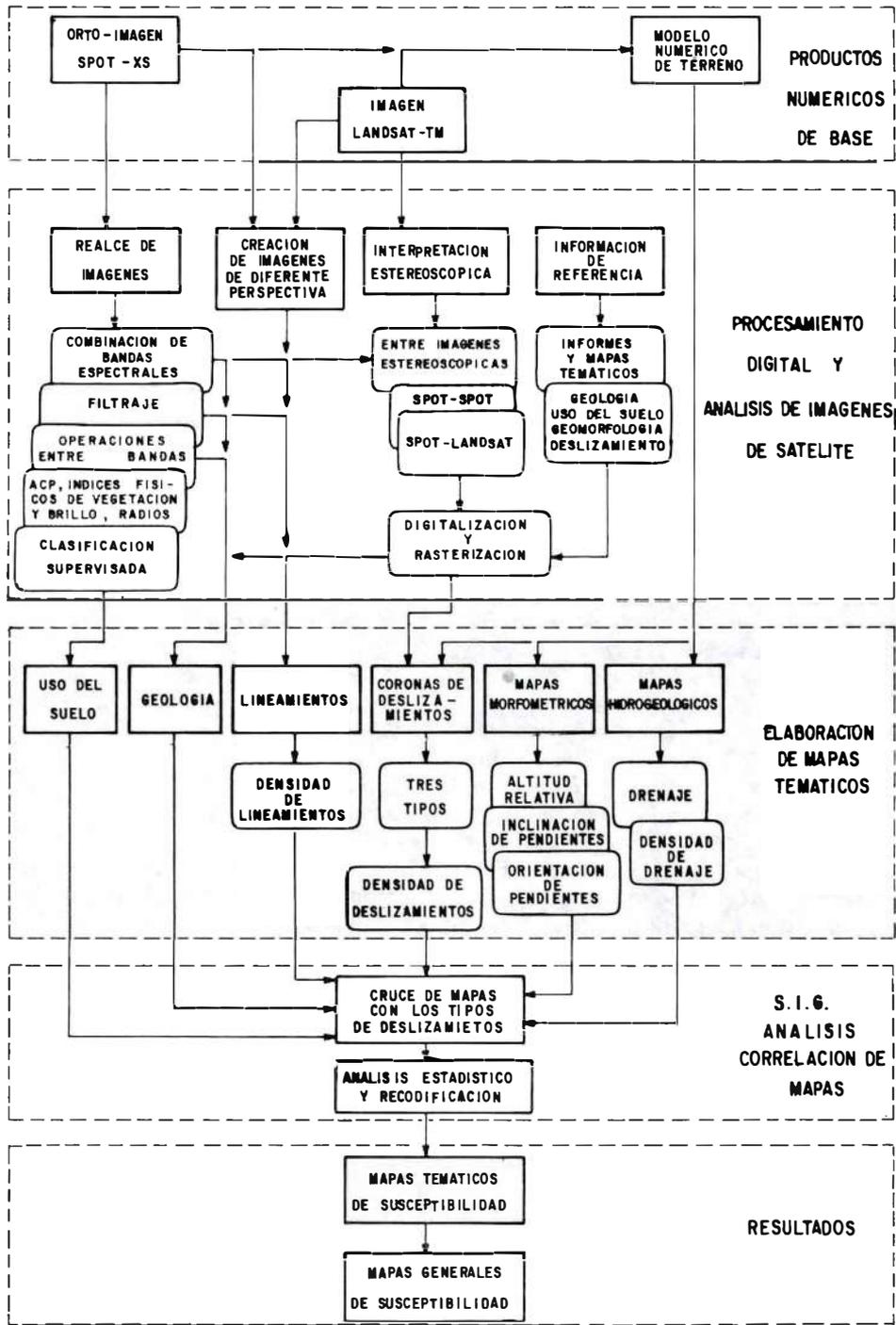


FIGURA 2: ORGANIGRAMA DEL METODO DE TRABAJO.

La elaboración de mapas de susceptibilidad por estas técnicas, comprende cuatro fases principales:

En la primera fase se indican diferentes técnicas de procesamiento digital para el realce del contraste de imágenes de satélite con el objeto de resaltar e identificar los rasgos geológicos, geomorfológicos y forestales.

También aquí se presentan técnicas de combinación de productos digitales (imágenes y MNT) para la obtención de productos estereoscópicos y vistas tridimensionales, utilizando el programa VVUE-3D de Istar.

En la segunda fase se presentan diferentes procesos de cartografía digital para la obtención de los diferentes mapas temáticos (geología, ocupación del suelo, deslizamientos, pendientes, etc.) a partir de imágenes Spot XS, Landsat-TM y un modelo numérico de terreno.

La tercera fase presenta un método de análisis digital estadístico que permite determinar cuantitativamente el "peso" o la relación de cada unidad o parámetro de terreno sobre tres diferentes tipos de deslizamientos. Este proceso se realiza sobre un sistema de información geográfica.

Finalmente se obtienen los diferentes mapas digitales que representan la susceptibilidad de una unidad o parámetro del terreno hacia cada deslizamiento clasificado (tres tipos), o del terreno en general recodificando las imágenes-mapas base en términos de susceptibilidad.

Un sistema de información geográfica (SIG), es un sistema computarizado que permite la entrada, almacenamiento, representación y salida eficiente de datos espaciales (mapas) y atributos (descriptivos) de acuerdo con especificaciones y requerimientos concretos.

Los SIG son sistemas diseñados para trabajar con datos, mapas e imágenes referenciados por coordenadas geográficas o imágenes de igual tamaño (filas y columnas) y la misma resolución espacial (píxeles) o múltiplo de ésta.

La superposición manual de mapas o datos utilizando diferentes instrumentos (mesas de luz, planímetros, etc) constituye un procedimiento semejante al de un SIG digital; sin embargo, los programas digitales presentan grandes ventajas en los siguientes aspectos (VAN WESTEN, 1989).

Los datos o archivos almacenados en forma digital pueden ser fácilmente consultados, modificados y recuperados.

La información espacial y no espacial puede ser analizada simultáneamente en una forma relacional.

Permite determinar rápidamente la evolución de un fenómeno en el tiempo y el espacio.

Son de gran utilidad en la creación de modelos cartográficos.

Los modelos conceptuales pueden ser probados rápidamente facilitando su evaluación.

Permite analizar y producir información a diversas escalas cartográficas.

Permite la transformación de datos con estructura vectorial a raster y viceversa.

Por otra parte el almacenamiento de datos espaciales en un formato digital se puede realizar bajo dos modelos de estructuras de datos geográficos principales: estructuras vectoriales o de segmentos y estructuras raster o de celdas. La diferencia entre éstos dos tipos de modelos es que la estructura vectorial asume un espacio geométrico, mientras que el modelo raster divide el espacio geográfico en elementos

o celdas independientes con un valor que representa un atributo.

## 2.1. PRODUCTOS NUMERICOS DE BASE

A continuación se describen las principales características de los productos numéricos utilizados en este estudio.

Una escena Spot "HRV2" (alta resolución en el visible) de referencia geográfica K 649/ J 338, registrada el 16 de febrero de 1989, con vista oblicua de 26.5° en dirección Este, con un tamaño de 4500 por 3600 pixeles en columna y fila y un nivel de corrección geométrica y radiométrica inicial 1B, resolución espacial al suelo de 20 m modo multibanda o XS. (Figura 3).

Una escena Landsat-Tm (Thematic mapper) de referencia Path 007/Row 56 del 11 de enero de 1988. Esta imagen tomada en vista vertical tiene una resolución espacial por pixel de 30 m. Este producto fue útil para la generación del modelo digital del terreno y para las interpretaciones visuales estereoscópicas como producto fotográfico. (Figura 4).

Un modelo numérico de terreno generado por la Sociedad Istar de Francia, por el método de correlación automática entre las imágenes Spot-XS y Landsat-TM y puntos de control sobre un mapa topográfico escala 1:100.000. Posee una resolución de 40 m en X-Y, y de 20 m en Z. (Figura 5).

La técnica de correlación automática sobre dos imágenes estereoscópicas se basa en la determinación de la altitud entre dos puntos homólogos de cada imagen (PANTON, 1978; MASSON D'AUTUME, 1978; DOUFOUR y ABGRALL, 1983; MASSON D'AUTUME, 1984; PERTL, 1985; DUBAYAH *et al*, 1986; JULIEN, 1987; CAPELLINI *et al*, 1991). Hasta el momento la correlación automática de imágenes numéricas para la obtención de modelos numéricos de

terreno se há aplicado principalmente a imágenes Spot (DUPERET, 1990) y fotografías aéreas digitales. Sobre imágenes Landsat MSS y TM, Simard and Krishna, 1983; Simard *et al.*, 1984; Enhlers y Welch, (1987), han aplicado esta técnica utilizando la zona de traslape de imágenes registradas en órbitas adyacentes.

Un primer ensayo de obtener MNT por correlación de imágenes Spot-XS y Landsat TM ha sido realizado por la Sociedad Istar de Francia en el marco de esta investigación.

## 2.2. PROCESAMIENTO DE IMAGENES

El procesamiento digital de los productos digitales se desarrolló en el Departamento de Teledetección del B.R.G.M. de Francia, utilizando los programas IIS System 600 versión 4.0 (USA) y ARBORECEANCE y VUE-3D de ISTAR (Francia). Las restituciones a color fueron generadas sobre una impresora térmica VERSATEC modelo C2766).

Una vez visualizada el área de interés sobre la ortoimagen Spot de 3600 x 4500 pixeles en línea y columna, se seleccionó una imagen de 512 x 512 pixeles, que tiene como centro la población de Paz de Río. De igual forma se extrajo el modelo digital de terreno para esta área de aplicación. Dado que este producto está codificado sobre 16 bits el tamaño de esta ventana es de 256 x 256 pixeles.

Sobre la subimagen Spot de trabajo se aplicó un stretching de tipo lineal y un realce de bordes mediante la aplicación de filtros de alta frecuencia (Figura 6). Para el realce espectral de la imagen SPOT se generaron dos índices físicos: de vegetación (IV) y brillo (IB). El primero permite establecer claras diferencias entre los diversos tipos de vegetación y el segundo discrimina suelos y rocas desnudos y resalta rasgos de algunas formas de terreno asociadas a fenómenos morfo-dinámicos. A partir de estos dos índices como imágenes en monocanal se realizó

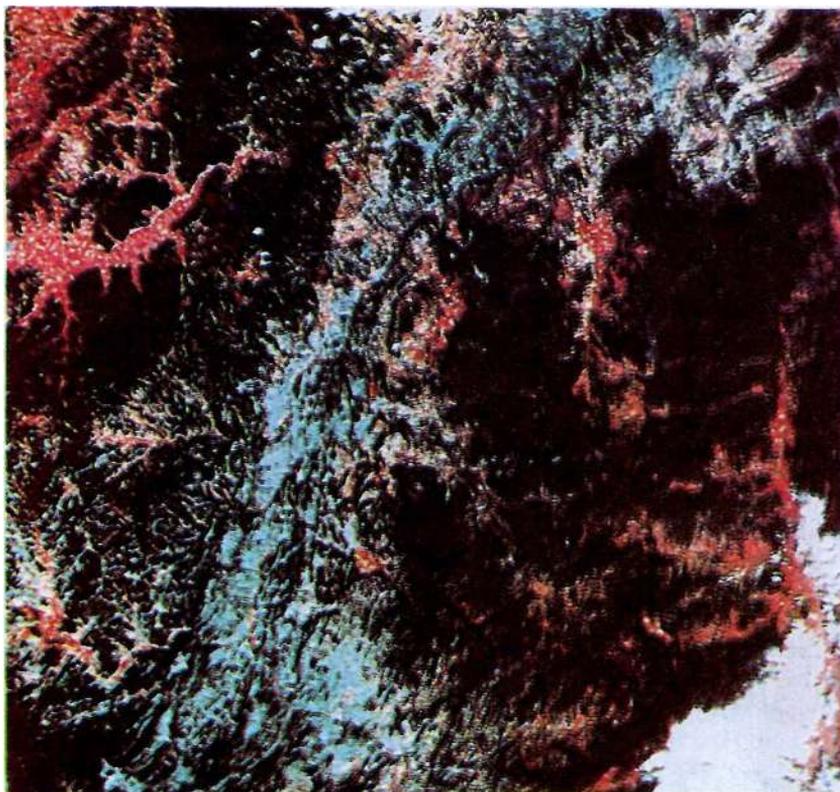


FIGURA 3: ESCENA SPOT-XS "HRV2" K 649 / J 338, 16-02-1989, 4500 X 3600 PÍXELES EN COLUMNA Y FILA, NIVEL 1B, BANDAS 3,2,1 (R,V,A)



FIGURA 4: CUADRANTE NW DE LA ESCENA LANDSAT-TM. PHAT 007/ROW 56, 11-01-1988, 2983 X 4220  
PIXELES EN FILA POR COLUMNA. BANDAS 4,5,3 (R,V,A)



FIGURA 5 MODELO NUMERICO DE TERRENO EN NIVELES DE GRIS OBTENIDO POR CORRELACION AUTOMATICA ENTRE IMAGENES SPOT-XS Y LANDSAT-TM. 2250 X 1800 PIXELES EN COLUMNAS POR FILAS.

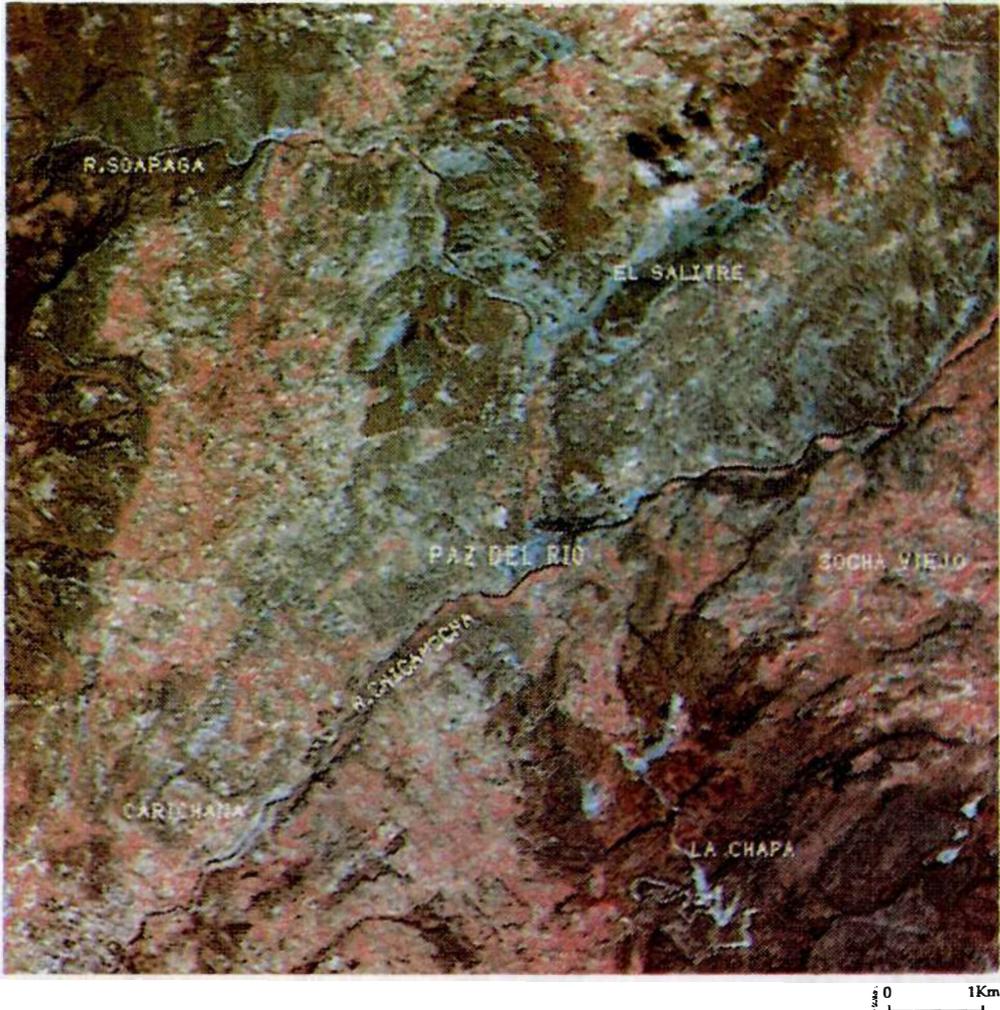


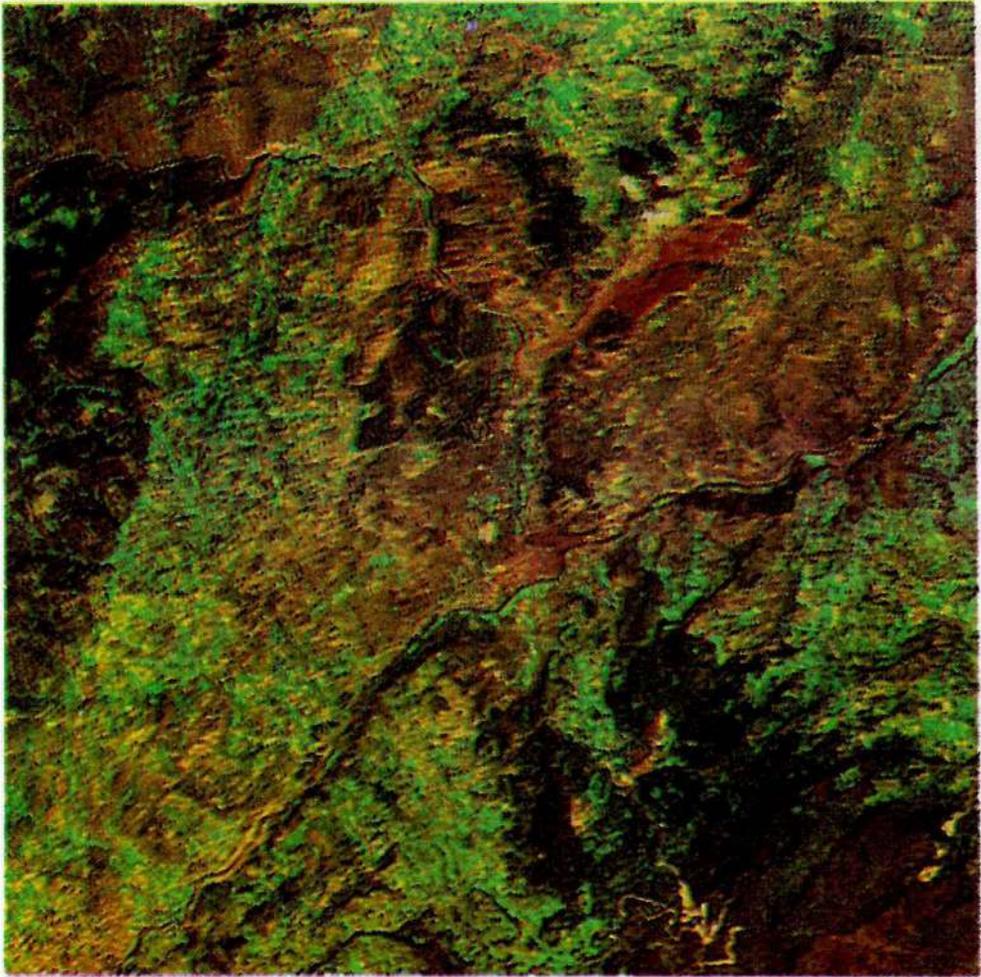
FIGURA 6: ORTOIMAGEN SPOT-XS EN FALSO COLOR DEL AREA DE ESTUDIO BANDAS 3,2,1 (R,V,A) 512 X 512 PÍXELES

una composición en falso color con la banda XS3 o infrarroja de la imagen de referencia así: XS3,IV,IB (R,B,A).

Otro de los procesos digitales de mejoramiento espectral de imágenes es el análisis de componentes principales (ACP). Como resultado de la aplicación de este proceso a la imagen realizada mediante los índices físicos se obtuvo una imagen en color "natural" que resalta claramente los diferentes tipos de vegetación, suelos desnudos, afloramientos

rocosos, zonas afectadas recientemente por procesos de erosión y remoción en masa y los yacimientos y depósitos superficiales de hierro (Figura 7). Sobre las diferentes imágenes procesadas se aplicaron filtros numéricos de tipo "paso alto y paso medio" para realzar bordes.

Dentro de las técnicas de procesamiento digital se realizaron investigaciones para la obtención de imágenes con diferente perspectiva con el fin de obtener imágenes estereoscópicas.



0 1Km

FIGURA 7: ORTOIMAGEN SPOT CON REALCE ESPECTRAL "COLOR NATURAL" INDICES FISICOS Y ANALISIS EN COMPONENTES PRINCIPALES 512 X 512 PÍXELES

Con este objetivo se utilizó el programa VUE3D (ISTAR, 1990) que combina la ortoimagen y el modelo numérico de terreno.

Este programa realiza un proceso comparable a la toma aerotransportada de fotografías aéreas, en el cual se determinan los siguientes parámetros: acimut, ángulo de vista, altura de vuelo, apertura focal, exageración vertical y la inclinación de la plataforma del captor o aparato de toma.

El mejor plano imagen obtenido para conformar la estereoscopia con la ortoimagen Spot XS se obtuvo con los .siguien-

tes parámetros: acimut  $70^\circ$ , altura de vuelo 400 km, ángulo de plataforma  $0^\circ$ , focal 2000 mm, exageración vertical 15. Mediante esta misma técnica, disminuyendo la altura de vuelo, la focal y la exageración vertical se obtuvieron vistas tridimensionales de zonas inestables que permitieron resaltar las características geomorfológicas de algunas zonas de interés.

### 2.3. ANALISIS ESTADISTICO

Para la determinación del "peso" (que representa la susceptibilidad de los factores o unidades de terreno en su

formación de deslizamientos) se han postulado y utilizado muchos métodos de carácter cualitativo y cuantitativo. El método más usual es el de la superposición manual de los diferentes mapas de análisis con un mapa morfodinámico, seleccionando cualitativamente zonas donde se presentan estos movimientos de acuerdo con su extensión areal y distribución.

Otros métodos semicuantitativos establecen el "peso" de los factores, asignándoles valores que son determinados de acuerdo con ciertos parámetros o características "críticas" del terreno, ej: pendientes fuertes, materiales arcillosos, distancia a zona de falla etc. (CENDERO *et al.*, 1990; ANBALAGAN, 1992; PACHAURI y PANT, 1992).

En general, la mayoría de métodos fundamentan su análisis en alguno de estos dos procesos determinísticos: densidad de deslizamientos por unidad de terreno o densidad de deslizamientos por kilómetro cuadrado. Aquí se ha considerado el primer criterio como factor de análisis.

Las coronas de deslizamientos que constituyen el elemento de análisis están representadas cartográficamente en tres imágenes-mapas (raster) diferentes, de acuerdo con su tipo (1, 2 ó 3). Sobre cada imagen, estos rasgos morfodinámicos (coronas) presentan una disposición cartográfica de un pixel de ancho y una longitud de acuerdo con su extensión en el terreno; los pixeles que contienen ésta información presentan un mismo valor numérico.

En esta investigación la determinación cuantitativa del "peso" (W) de las unidades o parámetros de terreno, se fundamenta en un análisis estadístico digital sencillo, que determina la densidad de coronas de deslizamiento sobre cada unidad de terreno.

El procedimiento se inicia con la superposición digital (sobre un SIG) de cada mapa temático con las coronas de deslizamiento (de un movimiento). Poste-

riormente se realiza un análisis estadístico de la imagen resultante que determina: el número de pixeles acumulado que ocupa cada unidad de terreno y el número de pixeles acumulado de deslizamientos que hay sobre cada una de éstas unidades de terreno (DZX). (Ver Figura 8).

Este mismo procedimiento se realiza para todos los parámetros de terreno y sobre cada tipo de movimiento clasificado.

A partir de los datos estadísticos obtenidos se determina el "peso" o susceptibilidad de cada unidad de terreno mediante la siguiente ecuación (VARGAS, 1991).

$$W\% = \frac{DZX * 100}{S} \text{ de donde:}$$

**W** Es el valor en porcentaje del "peso" o susceptibilidad de la unidad de terreno respecto al movimiento de análisis.

**DZX =** Representa el área cubierta por las coronas de deslizamientos (número acumulado de pixeles) que hay sobre la unidad de terreno. X determina el tipo de movimiento (DZ1, DZ2 o DZ3).

**S** Es el área total de la unidad de terreno expresada en número acumulado de pixeles.

A partir de los resultados obtenidos de los análisis estadísticos que determinaron el peso "W" de las diferentes unidades de terreno en la formación de movimientos en masa se realizan los mapas temáticos de susceptibilidad.

### 3. ANALISIS DE LOS PARAMETROS DEL TERRENO

En este aparte se presentan diversos métodos de análisis de imágenes numéricas para la obtención cartográfica de los diferentes parámetros del terreno y la determinación del "peso" o susceptibilidad de sus unidades respecto a los deslizamientos a partir del anterior análisis.

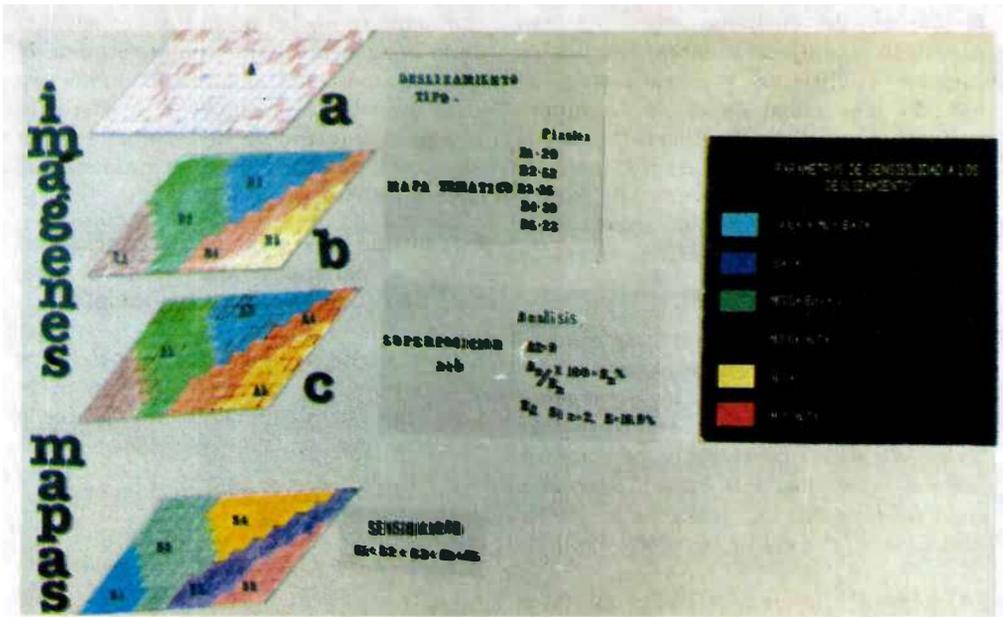


FIGURA 8: ESQUEMA DE ANALISIS ESTADISTICO DE MAPA-IMAGENES EN UN S.I.G. PARA LA DETERMINACION DEL "PESO" DE LOS FACTORES EN LA FORMACION DE UN DESLIZAMIENTO.

Los métodos cartográficos aquí utilizados incluyen: técnicas de clasificación automática y supervisada de imágenes de satélite; cartografía automática supervisada de rasgos morfométricos (pendientes, etc) e hidrológicos (drenaje) a partir del modelo numérico de terreno; interpretaciones visuales estereoscópicas, digitalización y rasterización de la información interpretada (litología, estructural, deslizamientos), y técnicas de procesamiento digital mediante la aplicación de filtros numéricos para degradación de la información lineal hasta mapas de densidad con información espacial en polígonos.

### 3.1. DESLIZAMIENTOS

Sobre la cuenca del río Chicamocha se registra un gran número de movimientos antiguos y recientes de tipo: flujos de rocas, flujos de lodos y tierra, derrumbes, caídas, movimientos lentos de reptación y soliflucción, etc, que modelan en gran parte el relieve en el área.

Sobre la región de estudio se cuenta con un buen registro histórico de los movimientos a nivel local (HUBACH Y ALVARADO, 1933; ALVARADO, 1955; ORDOÑES, 1962; PACHECO, 1971; SARMIENTO, 1973; REYES, 1971, 1983, 1987A, 1987B; RODRIGUEZ, 1987; LOBO-GUERRERO y RODRIGUEZ, 1978; LLINAS Y PRECIADO, 1988, 1989); inventarios regionales y estudios de zonificación por remoción en masa (CARDENAS y VARGAS, 1989; VARGAS, 1989). Esta información constituyó un material bibliográfico de gran importancia para el seguimiento morfodinámico de la región.

Muchos de estos deslizamientos han repercutido sobre los centros poblados y zonas rurales de interés, con notables daños materiales y pérdidas económicas. A continuación se citan algunos ejemplos de los principales eventos catastróficos:

En 1870, un deslizamiento de rocas y lodo destruyó la población de Socha

(hoy día Socha viejo) implicando la reubicación de sus pobladores a unos 6 km al norte (hoy Socha).

En 1933, la población de la Paz (hoy Paz Viejo) fue destruida por un deslizamiento de movimiento lento, obligando a su reubicación en donde hoy se encuentra la principal población de la región llamada Paz de Río. Hoy día este deslizamiento sigue activo.

En 1979, en la vereda Carichana al SW de Paz de Río un deslizamiento obstruyó el cauce del río Chicamocha destruyendo un tramo de la vía férrea, básica para el transporte del mineral de hierro hacia su centro de procesamiento en Belencito. Este mismo deslizamiento originó una represa con un gran volumen de agua que puso en estado de alerta a los habitantes de Paz de Río.

En la última década, Paz de Río ha sido amenazada continuamente por nuevos deslizamientos de gran peligrosidad que convergen hacia ésta población (El Salitre, La Chapa, etc).

En este estudio se tuvieron en cuenta varios criterios que resultan básicos para la cartografía de los deslizamientos y la determinación de la susceptibilidad del terreno hacia estos. El primer punto fue definir el elemento o elementos del deslizamiento a cartografiar (coronas de arranque, cuerpo, pata etc).

De acuerdo con las observaciones de campo, se comprobó que muchos de los materiales deslizados eran transportados por corrientes de agua, o depositados pendiente abajo sobre otras unidades de terreno no involucradas en la formación del movimiento. Esto llevó a contemplar que las coronas de arranque constituyen el elemento más confiable para la determinación de la susceptibilidad y la relación de una unidad de terreno con los dife-

rentes tipos de movimientos cartografiados.

De otra parte, como los materiales deslizados constituyen zonas potenciales de inestabilidad, se involucraron diferencialmente como unidades de terreno dentro del mapa geológico.

En este estudio se clasificaron los movimientos en tres tipos de acuerdo con su actividad, dimensiones y características así: activos mayores, activos menores y deslizamientos inactivos antiguos. A continuación se presentan las principales características de estos movimientos.

**Tipo 1:** Deslizamientos activos mayores.

Por su posición y dimensiones (mas de 500 m<sup>2</sup>), sobre áreas pobladas o de interés económico se les dá el carácter de "peligrosos". Estos movimientos son los más claramente visibles sobre las imágenes de satélite, especialmente por la alta reflectancia que presenta la zona de arranque y el material recientemente removido.

Se cartografiaron un total de 57 movimientos de este tipo, de los cuales los más destacados son los deslizamientos de: El Salitre, La Chapa, Carichama y Paz Viejo.

El deslizamiento El Salitre se localiza en la parte central del área, en inmediaciones de la población de Paz de Río. Es un movimiento complejo, definido como un flujo de escombros, de forma estrecha y alargada, de unos 2.600 m de largo y un volumen de material removido de 2'800.000 m<sup>3</sup>. Su peligrosidad radica en que la masa se dirige hacia el cauce del río Soapaga en inmediaciones de Paz de Río. (Ver Figura 9A).

El deslizamiento de la Chapa se localiza en la zona del páramo del mismo nombre al SE del área. Es un deslizamiento que cubre 18 hectáreas e involucra unos 150.000 m<sup>3</sup> de material removido. Su corona se localiza en el nacimiento de la quebrada La Chapa y sobre el techo una zona

escarpada, lo cual constituye un factor de alta dinámica para el material inestable. La peligrosidad de este deslizamiento radica en que el material deslizado sigue el curso de la quebrada con un fuerte gradiente hasta su desembocadura sobre el río Chicamocha (en la zona urbana de Paz de Río). (Ver Figura 9B).

El deslizamiento de Carichama se localiza sobre la margen izquierda del río Chicamocha aguas arriba de Paz de Río. Es un deslizamiento de 345 hectáreas y de unos 14'000.000 m<sup>3</sup> que obstruyó en su inicio (1979) el cauce del río Chicamocha, causando grandes daños en un sector de la vía férrea. Actualmente, su movimiento es muy lento y está semiestabilizado por obras de ingeniería.

El deslizamiento de Paz Viejo se localiza en la parte Norte del área. Es un movimiento activo iniciado en 1933, y afecta unas 120 hectáreas de tierra. Su corona se inicia con un plano de falla planar y se continúa con un movimiento lento de una gran masa arcillosa hasta una zona escarpada en donde forma flujos de lodo de mayor velocidad.

**Tipo 2:** Incluye los movimientos menores activos, de menores dimensiones (< 500 m<sup>2</sup>) como desprendimientos, caídas, reptación, flujos, deslizamientos de roca y suelos. Sobre las imágenes la corona es determinada por su forma semicircular en movimientos donde hubo desprendimiento de material litológico. La identificación de movimientos lentos de suelos sobre las imágenes es difícil y poco contrastante, haciéndose necesario los controles de campo; sin embargo, ésta área puede ser evidente por su respuesta espectral de material en movimiento si su contenido de agua es notable.

Estos movimientos son los más numerosos y ampliamente distribuidos en el área, de los cuales se identificaron y cartografiaron un total de 175.

**Tipo 3:** Representa los deslizamientos antiguos. Sobre las imágenes son poco evidentes, especialmente por la presencia de vegetación sobre el material deslizado. Aunque su reconocimiento espectral en las imágenes es difícil, se identificaron por sus rasgos geomorfológicos (zona de arranque). Estos deslizamientos son muy característicos en la margen derecha del río Chicamocha. Sobre el área de estudio se cartografiaron 67 deslizamientos de este tipo.

El análisis de los diferentes parámetros y unidades de terreno con los movimientos en masa se realizó a partir de las coronas de los tres tipos de deslizamientos representados en imágenes-mapas. (Ver Figura 10).

Una zonificación de la distribución de las coronas de deslizamientos es presentada en la Figura 11, como mapa de densidad (landslide isopleths). Este mapa fue realizado mediante la aplicación sucesiva de dos filtros digitales de alta frecuencia, el primero de tipo paso alto con un tamaño de malla o ventana móvil de 51x51 píxeles en línea por columna y el segundo, de tipo paso bajo de 15x15 píxeles en línea por columna.

### 3.2. USO Y OCUPACION DEL SUELO

Utilizando el proceso de clasificación automática supervisada (método de mínimo de distancia) por selección de parcelas (píxeles de igual valor radiométrico) sobre la imagen realizada espectral y visualmente (Figura 7), se elaboró el mapa de ocupación del suelo. Para la zona de estudio se definieron 8 unidades de uso y ocupación del suelo, que se relacionan con los procesos morfodinámicos y la estabilidad del área. (Figura 12).

**Clase 1.** Zonas de afloramientos de areniscas ferruginosas. Estas rocas presentan una alta resistencia a la erosión.

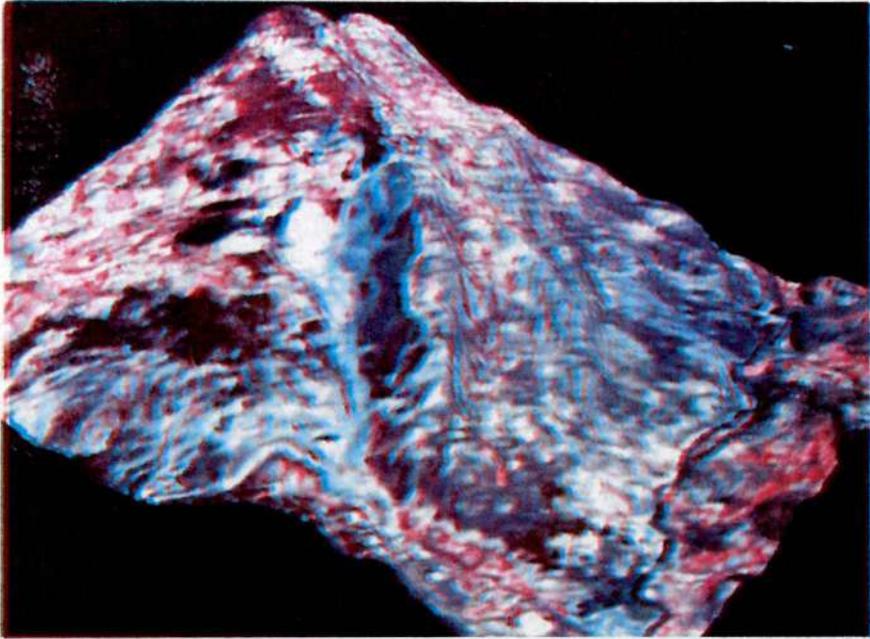
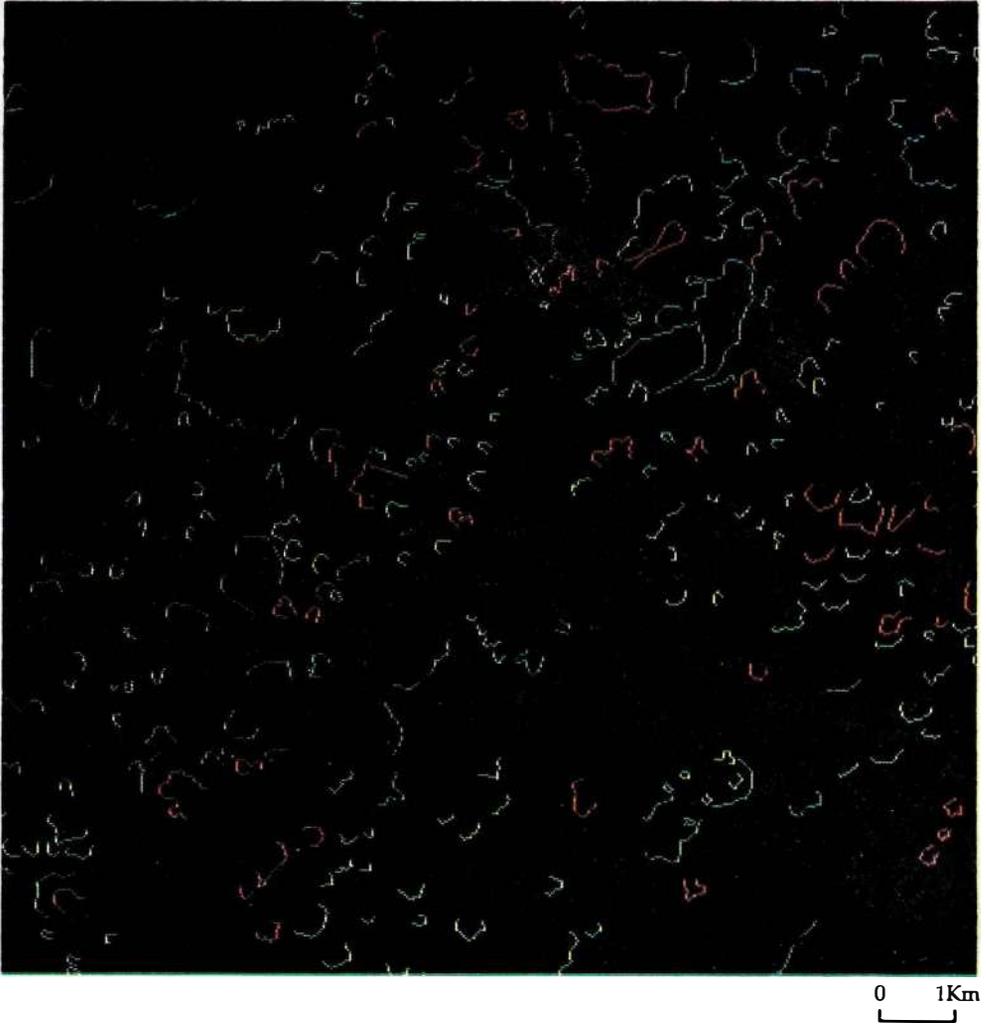


FIGURA 9: VISTAS PERSPECTIVAS EN TRES DIMENSIONES MEDIANTE LA SUPERPOSICION DEL MNT Y LA ORTOIMAGEN SPOT-XS. A. DESLIZAMIENTO DEL SALITRE, B. DESLIZAMIENTO DE LA CHAPA.



Rojo:	Deslizamientos de tipo 1
Amarillo:	Deslizamientos de tipo 2
Azul:	Deslizamientos de tipo 3

FIGURA 10: IMAGEN MAPA DE CORONAS DE DESLIZAMIENTOS

**Clase 2.** Zonas de suelos desnudos de color verdoso (desarrollados a partir de rocas paleozoicas). Estos materiales presentan características mineralógicas particulares que permiten una clara diferenciación espectral sobre las imágenes de satélite. Sobre estos suelos se presenta una notable erosión hídrica de tipo laminar.

**Clase 3.** Representa zonas de rocas de composición arenosa, afectadas por procesos de erosión y remoción en masa.

**Clase 4.** Zonas de rocas de composición arcillosa, afectadas por procesos de erosión y remoción en masa.

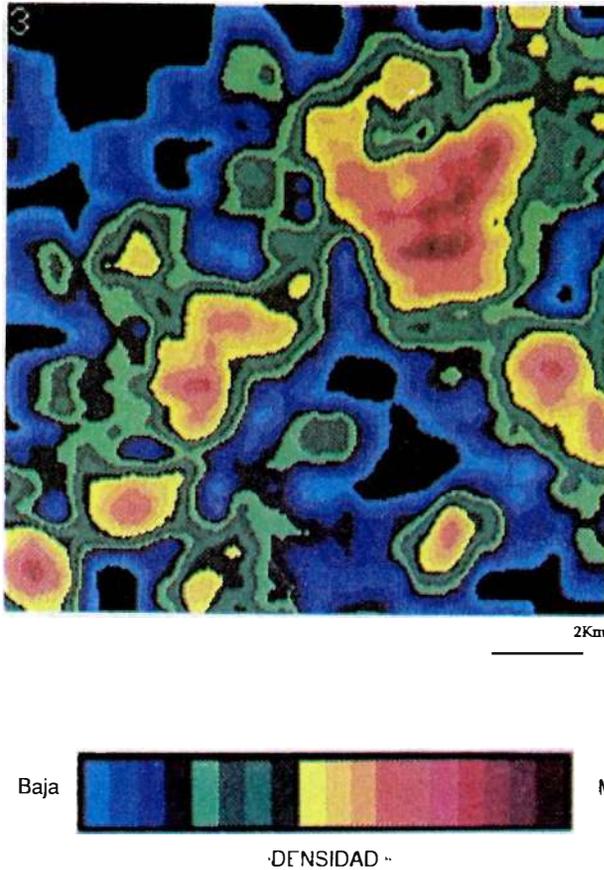


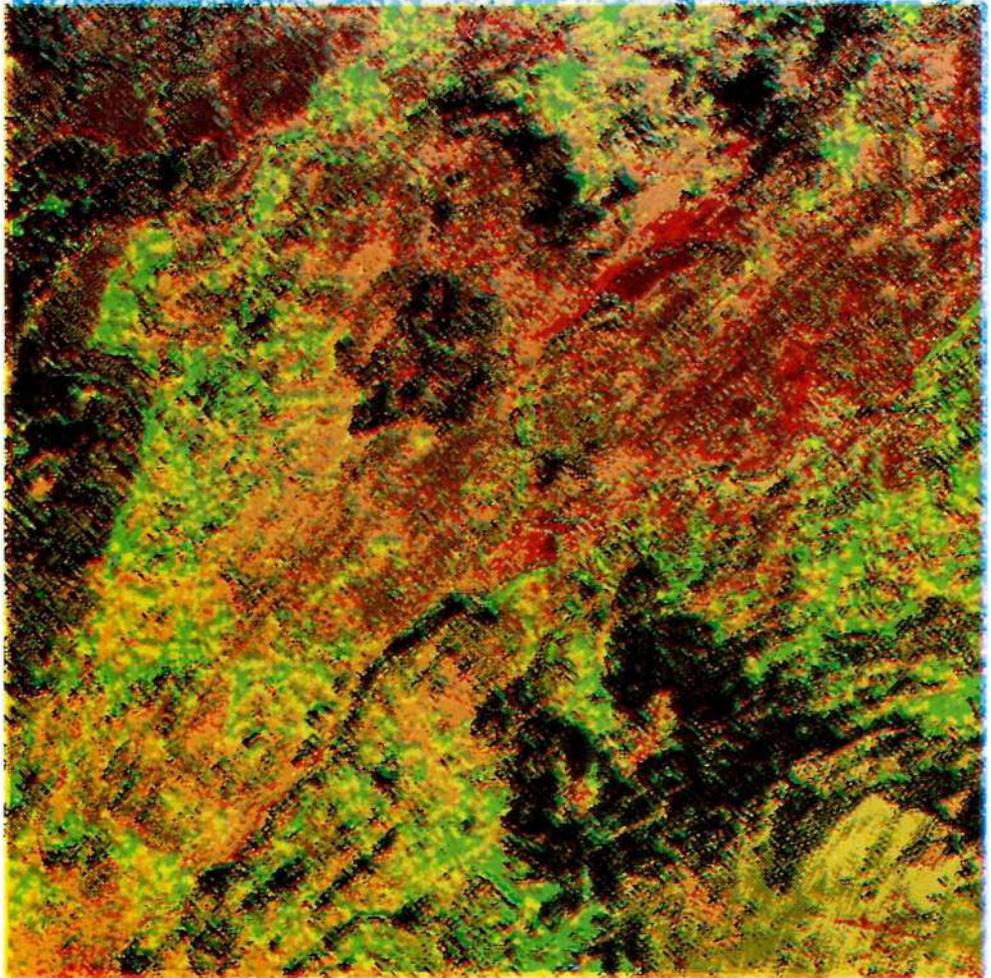
FIGURA 11: IMAGEN-MAPA DE DENSIDAD DE CORONAS DE DESLIZAMIENTOS

- Clase 5.** Areas de cultivos y pastizales.
- Clase 6.** Vegetación natural arbustiva.
- Clase 7.** Zonas de bosques naturales y áreas reforestadas principalmente por pinos.
- Clase 8.** Areas de actividad minera (explotación superficial de hierro).

Sobre los deslizamientos de tipo 1 (mayores activos) la unidad de terreno que representa la actividad humana en la explotación del hierro (clase 8), presenta un alto valor de peso (0.98).

La determinación del peso de las diferentes unidades de ocupación y uso del suelo respecto a los tres tipos de deslizamientos es presentada en la Tabla 1.

A partir de las observaciones de campo y de los documentos de referencia se estableció que gran parte de los materiales residuales de estas explotaciones, fueron involucrados en deslizamientos recientes. Por el contrario la influencia de la actividad humana, respecto a los deslizamientos de tipo 3 es prácticamente nula en la parte minera (clase 8).



0 1Km

FIGURA 12: MAGEN-MAPA DE OCUPACION Y USO ACTUAL DEL SUELO

Sobre los deslizamientos de tipo 2, las unidades tres y cuatro (relacionadas con los fenómenos de remoción en masa) muestran un alto valor de peso (1.06 y 1.47 respectivamente), igualmente en los deslizamientos de tipo 1, estas unidades presentan un importante valor de peso (0.70 y 1.00 respectivamente).

La influencia de las actividades agropecuarias (clase 5), muestra una alta relación, especialmente sobre los deslizamientos de tipo 2.

Observaciones de campo registraron un uso inadecuado e intensivo del suelo por ésta última actividad, con pérdida de la

TABLA 1: CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES DE USO Y OCUPACION DEL SUELO HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Unidades de uso y ocupación del suelo	Superficie total de unidades de uso ocupación del suelo (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por unidad de uso y ocupación del suelo (# de pixeles)"DZX"			Susceptibilidad o "peso" de las unidades de uso y ocupación del suelo a los deslizamientos (W%).		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
CLASE 1	13.425	27	49	62	0.20	0.36	0.46
CLASE 2	39516	246	441	303	0.62	1.12	0.76
CLASE 3	60064	419	638	470	0.70	1.06	0.78
CLASE 4	10373	103	153	57	1.00	1.47	0.55
CLASE 5	37959	252	471	297	0.66	1.24	0.78
CLASE 6	52389	237	419	463	0.45	0.80	0.88
CLASE 7	46174	130	323	405	0.28	0.70	0.87
CLASE 8	1735	27	14	1	0.98	0.80	0.06

capa orgánica. Este abandono de tierras se evidencia por el gran número de viviendas abandonadas y las obras artesanales (cercas de piedra).

3.3. GEOLOGIA

Sobre el área de estudio se cuenta con estudios de cartografía regional (ULLOA, *et al*, 1973; REYES, 1984), a escalas 1:100.000 y 1:50.000 y estudios a escala media (1:25.000) orientados hacia la zonificación de movimientos en masa (VARGAS, 1989). En este trabajo, el mapa geológico se obtuvo a partir de interpretaciones visuales sobre pares estereoscópicos de imágenes Spot-XS y Landsat-TM a escala 1:50.000, y un previo reconocimiento del terreno.

Los resultados de éstas interpretaciones fueron digitalizados y perfeccionados digitalmente sobre la pantalla de computador. Posteriormente se transformaron estos archivos vectoriales en una imagen-mapa tipo raster, en la cual cada unidad geológica esta representada por un conjunto de pixeles con igual valor numérico. (Ver figuras 13 y 14).

A continuación se presenta una breve descripción litológica de las unidades geológicas del área de estudio desde la más antigua a la más reciente.

- *Formación Silgará (PDS)*. Comprende una secuencia de rocas clásticas metamorfizadas, tipo pizarras, filitas, metali-

molitas, metaarenitas, metaconglomerados, milonitas y protomilonitas. Estas dos últimas son comunes en la zona de la falla de Soapaga.

- *Formación Girón (JG)*. Consta de una secuencia de conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas de color rojo-violeta. Sobre el área, las rocas de esta formación se caracterizan por desarrollar suelos ricos en hierro y pobres en materia orgánica, por lo cual su cobertura vegetal es muy baja y la erosión laminar es alta.
- *Formación Luna (KSL)*. Comprende una secuencia de rocas de tipo chert, porcelanitas, calizas y lutitas en esporádicos niveles de fosforita. Las rocas de esta formación se caracterizan por su alta deformación y fracturamiento.
- *Formación Guadalupe (KSG)*. En el área, esta formación comprende dos miembros: uno inferior arcilloso (lutitas de Los Pinos) y uno superior arenoso (Arenisca Tierna).
- *Formación Guaduas (KTG)*. Comprende una espesa secuencia de rocas arcillosas con intercalaciones de arenisca y mantos de carbón.
- *Formación Socha Inferior (TPSI)*. Está compuesta de areniscas cuarzosas de grano fino a grueso con niveles de arcillolitas y limolitas.

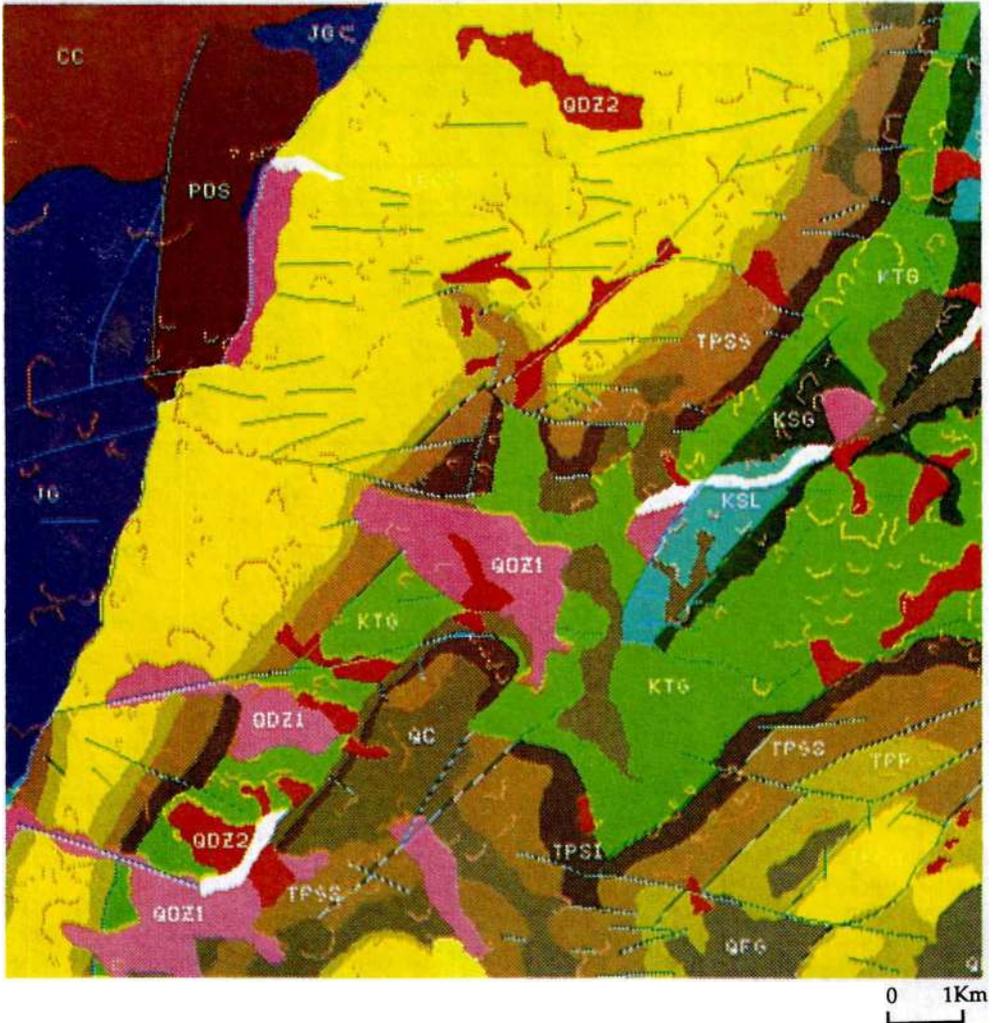


FIGURA 13: IMAGEN-MAPA GEOLOGICO ESTRUCTURAL

- *Formación Socha Superior (TPSS)*. Es una unidad predominantemente arcillosa constituida por arcillolitas y limolitas de colores variados con intercalaciones de arenisca. Localmente presenta mantos de turba y costras de yeso.
- *Formación Picacho (TPP)*. Representa un paquete de areniscas feldespáticas de grano fino a conglomeráticas, de consistencia friable y deleznable. En el sector de La Chapa, al NE del área presenta notables niveles arcillosos.

*Formación Concentración (TECO)*. Comprende una espesa secuencia de arcillas y limolitas de colores claros (amarillo, crema, gris, etc) con intercalaciones de areniscas. Hacia la base de ésta formación se presenta un manto de hierro oolítico de 2 a 9 m de espesor, el cual constituye uno de los principales minerales explotables en la industria del acero, que caracteriza esta región.

*Conglomerados de Tenería (TQC)*. Bajo este nombre se define a un paquete

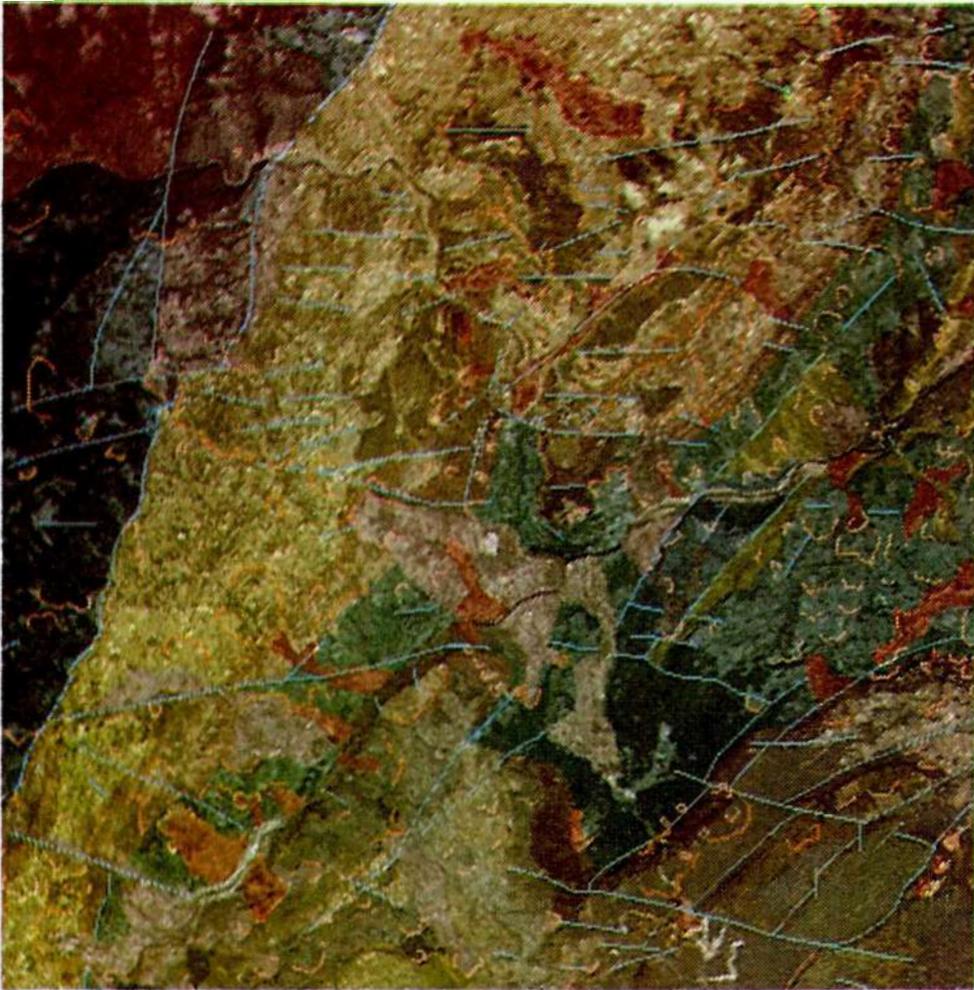


FIGURA 14: MAPA GEOLOGICO ESTRUCTURAL SUPERPUESTO A LA ORTOIMAGEN SPOT

de conglomerados polimícticos semi-consolidados, conformados por cantos de cuarcitas y metaareniscas en una matriz arenosa; en sectores esta matriz se presenta bien cementada por óxidos de hierro. Sus afloramientos representan escarpes verticales de unos 50 metros de altura y montañas onduladas.

Se definieron 5 tipos de depósitos inconsolidados, de acuerdo con su origen y composición:

*Fluvioglaciares (QFG)*. Están conformados por grandes bloques rocosos de for-

ma angular a subangular, en una matriz limoarcillosa poco compacta. Los fragmentos son principalmente areniscas. Estos depósitos se restringen principalmente a la margen derecha del río Chicamocha entre las poblaciones de Tasco (al Sur) y Socha (al Norte).

*Aluviales (QAL)*. Cantos y bloques de diferente origen y composición, principalmente asociados al río Chicamocha y al río Soapaga.

*Coluviales (QC)*. Gravas, cantos y bloques subangulares a angulares (princi-

palmente areniscas), sobre la superficie del terreno o embebidas en una matriz areno-arcillosa.

*Depósitos de deslizamientos antiguos (QDZ1).* Numerosos bloques, guijos y cantos de rocas, en una matriz predominantemente arcillosa y moderadamente compacta.

*Depósitos de deslizamientos recientes (QDZ2).* Material rocoso (arcillolitas, areniscas, o calizas, etc) mezclado con restos vegetales en una matriz arcillo-arenosa o arenolimsa, dependiendo de las rocas que originaron el movimiento.

La litología representa un factor importante en la definición de la susceptibilidad del terreno hacia tipos particulares de deslizamientos. En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis estadístico que determina el "peso" de cada unidad litológica hacia los deslizamientos.

De la anterior tabla, resulta evidente que los materiales rocosos recientemente removidos (depósitos de deslizamientos recientes "QDZ2") constituyen una unidad

litológica altamente susceptible a deslizarse o reactivarse el movimiento (deslizamientos tipo 1).

Otra unidad geológica que presenta un alto "peso" hacia los deslizamientos de tipo 1, es la formación Guaduas (KTG). El alto valor (1.38) está relacionado en parte por su carácter predominantemente arcilloso y los numerosos cortes del terreno por vías y excavaciones rudimentarias realizadas para la explotación de carbón.

Las formaciones litológicas que presentan mayor susceptibilidad a los deslizamientos de tipo 2 son: Luna, Socha inferior, Guadalupe, Concentración, Socha superior y Picacho. La diversidad de litologías está relacionada a la misma variedad de movimientos que se incluyen dentro de este tipo (flujos, derrumbes, caídas, etc).

Un caso especial lo constituye un depósito de terraza (QT) que esta involucrado casi en su totalidad por un movimiento de tipo 2, por lo cual dada su poca extensión en el área (77 pixeles que hacen 154 m<sup>2</sup>) muestra un valor de susceptibilidad muy alto (6.5).

TABLA 2: CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES GEOLOGICAS HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Formación litológica (Símbolo)	Superficie total de la unidad de terreno (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por formación geológica (# de pixeles) "DZX"			Susceptibilidad o "peso" de la formación geológica a los tipos de deslizamientos (W%).		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
QAL	1640	-	-	-	-	-	-
QDZ2	9772	279	32	5	2.90	0.33	0.05
QDZ1	14206	80	71	47	0.56	0.50	0.33
QC	13931	64	123	97	0.46	0.88	0.70
QT	77	-	5	-	-	6.50	-
QFG	9719	10	34	11	0.10	0.35	0.11
TQC	883	-	10	-	-	1.13	-
TECO	67643	299	848	794	0.44	1.26	1.04
TPP	16460	93	181	181	0.56	1.10	1.10
TPSS	27968	102	319	415	0.36	1.14	1.50
TPSI	10755	15	250	60	0.14	2.32	0.56
KTG	35267	485	279	197	1.38	0.79	0.56
KSG	7219	4	150	23	0.05	2.10	0.32
KSL	3252	-	97	3	-	2.98	0.09
JG	22357	-	30	241	-	0.13	1.08
CC	11400	-	-	29	-	-	0.25
PDS	8284	-	79	44	-	0.95	0.53

Las unidades litológicas más relacionadas con los deslizamientos de tipo 3 (antiguo inactivo), corresponden a las formaciones Socha superior (TPSS), Picacho (TPP), y Concentración (TECO). Gran parte de las coronas de estos deslizamientos (tipo 3) se presentan en sectores de antigua influencia fluvio-glacial, en la zona de contacto, entre estas formaciones arcillosas y arenosas.

### 3.4. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Desde el punto de vista de teledetección "lineamiento" se define como aquellos rasgos rectilíneos o ligeramente curvados representados sobre las imágenes de satélite como anomalías radiométricas lineales, discontinuidades morfológicas, etc, que evidencian elementos estructurales regionales como fallas, fracturas, ejes de pliegues etc. (SCANVIC, 1983).

La cartografía de los rasgos estructurales se realizó a partir de interpretaciones de imágenes Spot-XS y Landsat-TM en estereoscopia y digitalmente sobre el computador. En este último proceso se aplicaron filtros numéricos direccionales para su realce.

Como resultado de esta interpretación se cartografiaron nuevos sistemas de lineamientos que corresponden a fallas, especialmente de rumbo, no identificados en estudios anteriores y no perceptibles en las fotografías aéreas. Estos nuevos lineamientos presentan una orientación predominante en dirección E-W.

Con base en esta información se realizó un análisis digital de estadística circular representado bajo la forma de diagramas "rosa", que expresan la dirección de lineamientos en cuanto a la longitud y el número acumulado. (Figura 15).

Los sistemas de lineamientos más importantes en número y longitud acumulada se orientan en dirección N70-90W y N70-90E. Observaciones de campo, indican que éstos lineamientos

corresponden en su mayoría a fallas de tipo normal y de rumbo y sistemas de lineamientos en dirección N40 a 50 E se asocian a fallas regionales de varios tipos: inversa, cabalgamiento y normal.

En el área la estructura más destacada es la Falla de Soapaga, que se expresa sobre el terreno y las imágenes como un lineamiento rectilíneo, formado por el cabalgamiento hacia el este de rocas Jurásicas de la Formación Girón y Silgará, con una morfología de montañas y colinas pronunciadas, sobre rocas del Terciario Superior de la Formación Concentración, de morfología suavemente ondulada. Esta falla origina en este sector un salto estratigráfico de más de 3000 m en donde se han generado una serie de rocas cataclásticas (milonitas, etc) y zonas de rocas muy fracturadas y deformadas.

La falla de Soapaga se presenta truncada y desplazada por varias fallas transversales con desplazamientos laterales y verticales. Entre estas fallas se destaca la Falla de Colacote, localizada al SW del área de estudio.

Sobre el sector SE del área, en la zona de la "Chapa" se presenta un sistema de fallas normales escalonadas e inclinadas hacia el oeste, afectando las rocas de la Formación Picacho.

Otra estructura importante en el área es el anticlinal del Chicamocha. Es un pliegue estrecho y asimétrico con una dirección SW-NE, fallado en sus flancos y con fuertes cabeceos axiales hacia el SW. En el área lo conforman rocas de la formación Guadalupe y Luna.

El mapa de lineamientos está representado bajo una estructura de tipo raster y en forma lineal. Para la evaluación y análisis espacial con los deslizamientos se transformó la información lineal en areal (mapa de densidad), mediante la aplicación sucesiva de dos filtros numéricos. El primer filtro de tipo "paso alto" (alta frecuencia) con un tamaño de malla de 51x51

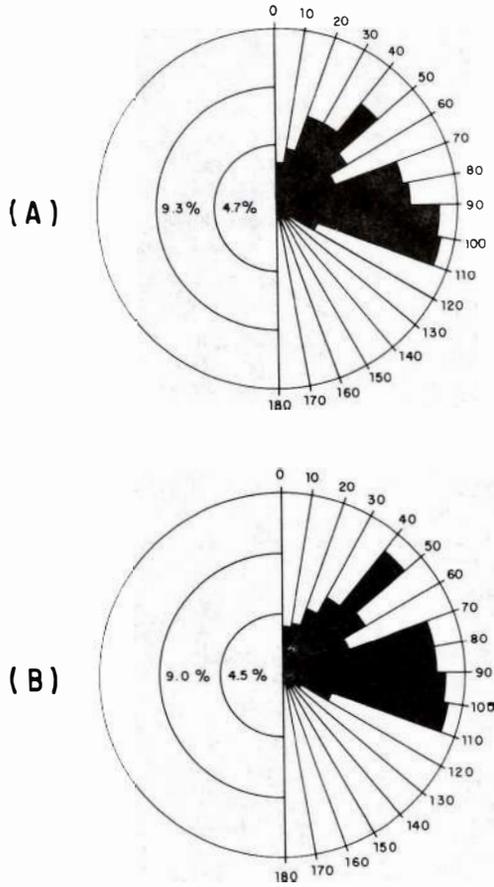


DIAGRAMA ROSA DE LINEAMIENTOS  
 ( A ) NUMERO ACUMULADO. ( B ) LONGITUD ACUMULADA

Figura No. 15

FIGURA 15: DIAGRAMA ROSA DE LINEAMIENTOS. (A) NUMERO ACUMULADO. (B) LONGITUD ACUMULADA.

pixeles en línea por columna define arealmente la información lineal. El segundo filtro de tipo paso bajo de 15x15 pixeles en línea y columnas realza los bordes.

El mapa de densidad de lineamientos, definido por esta técnica representa las áreas de mayor o menor concentración de lineamientos en siete unidades bajo la terminología de muy baja a muy alta. (Ver Figura 16).

El análisis estadístico de este parámetro de terreno con los deslizamientos (Tabla 3), muestra que no existe una relación directa de las zonas de mayor densidad de lineamientos con los deslizamientos; tal es el caso de la unidad de mayor densidad que no muestra ningún valor de "peso" hacia los deslizamientos de tipo 1. Similar-

mente ocurre para los deslizamientos de tipo 2.

### 3.5. MAPAS DERIVADOS DEL MODELO NUMERICO DE TERRENO.

Un modelo numérico de terreno o modelo digital de elevación se define como un archivo digital ordenado de valores que representan la distribución espacial de las altitudes (Z) en una posición dada (X, Y).

Los modelos numéricos de terreno constituyen un producto básico en estudios de las ciencias de la tierra, en especial los relacionados con geomorfología dinámica. Varias aplicaciones de MNT se han desarrollado en este campo de los deslizamientos (VARGAS, 1992).

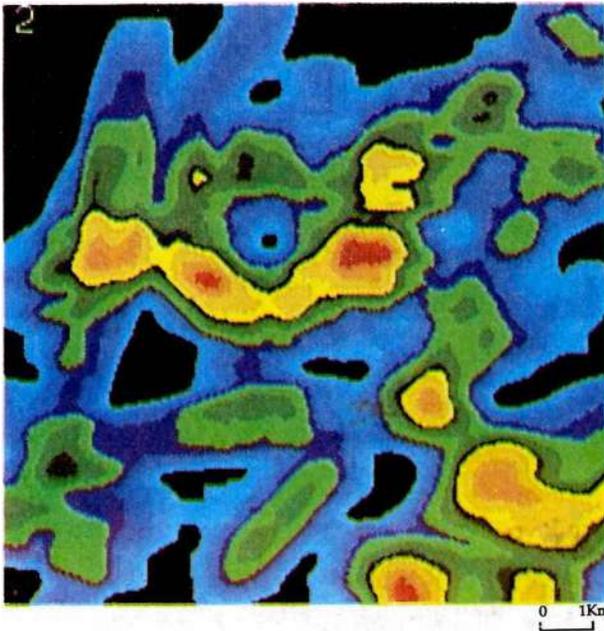


FIGURA 16: IMAGEN-MAPA DE DENSIDAD DE LINEAMIENTOS

TABLA 3 CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES DE DENSIDAD DE LINEAMIENTOS HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Intervalos de densidad de lineamientos "densidad"	Superficie total de densidad de lineamientos (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por unidad de densidad de lineamientos (# de pixeles) "DZX"			Susceptibilidad o "peso" de la densidad de lineamientos a los tipos de deslizamientos (W%)		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Muy baja	40680	230	331	290	0.56	0.81	0.71
Baja	44739	323	366	457	0.72	0.81	1.02
Media baja	65174	336	824	557	0.51	1.26	0.85
Media	26179	147	243	229	0.56	0.92	0.87
Media alta	16052	148	186	125	0.92	1.16	0.78
Alta	13529	42	155	131	0.31	1.15	0.97
Muy alta	4579	-	28	24	-	0.06	0.05

Entre las principales aplicaciones cartográficas desarrolladas a partir de modelos numéricos de terreno se destacan: la extracción automática de formas circulares asociadas a coronas de deslizamientos (PAPO Y GELBMANE, 1984; TAUD y PARROT, 1991 y 1992); medidas automáticas de planos estructurales (MARTZ y DE JONG, 1978; CHOROWICZ, 1984; VILLIERS y LAYMARIE, 1984; CHOROWICZ *et al*, 1991); reconocimiento de formas de terreno (COLLINS, 1975; PIKE y ROZEMA, 1975; MASSON D'AUTUME, 1978; UNGAR *et al*, 1983; PIKE, 1986, 1988; CHOROWICZ *et al*, 1989), cartografía temática de mapas morfométricos (MARK 1975; EVANS, 1980; DUPERET, 1990).

Como se anotó anteriormente, en esta investigación se utilizó un MNT generado por correlación automática entre un par estereoscópico de imágenes Spot XS y Landsat TM. De este modelo se derivaron automáticamente cuatro mapas temáticos: altitud relativa, exposición u orientación de pendientes (Figura 17), drenaje y microcuencas que se describen a continuación:

### 3.5.1. ALTITUD RELATIVA

Este mapa (Figura 17-A) muestra la altitud del área en contornos o intervalos cada 50 m, que se expresa sobre el mapa con diferentes coloraciones que van desde azul oscuro en el punto más bajo (2.200 m) sobre el cauce del río Chicamocha a rojo

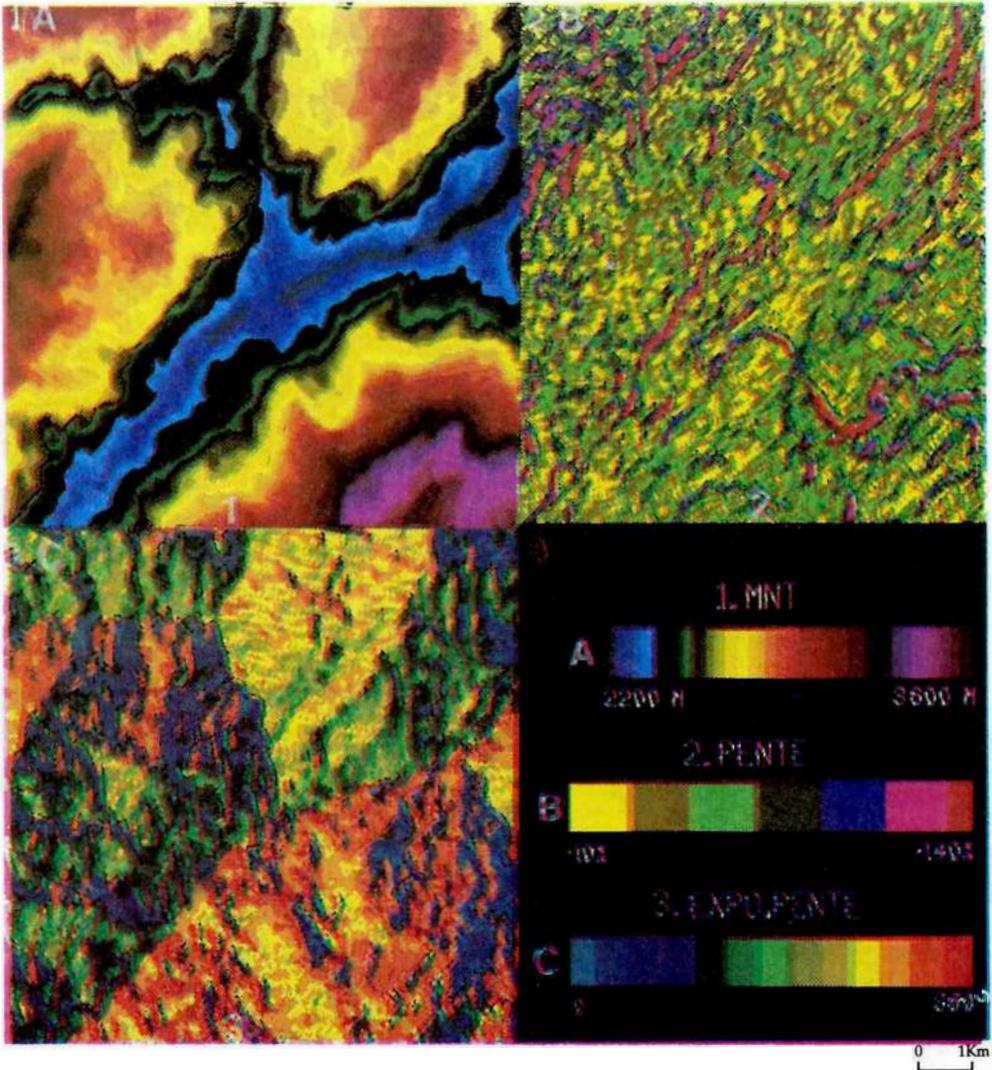
en el área más alta (3.600 m) en la zona del páramo de La Chapa. En este mapa se destacan claramente los valles estrechos de los ríos Chicamocha y Soapaga y la quebrada Cororadales (afluente del río Soapaga), los cuales separan cuatro zonas o regiones de montañas altas.

La importancia de este parámetro, en el análisis de los movimientos en masa en el área, se debe a la estrecha relación que existe entre la altitud y las unidades climáticas o microclimas, y sus correspondientes factores (precipitación, temperatura, etc).

El análisis estadístico de los deslizamientos con la altitud relativa muestra que los deslizamientos de tipo 1 se relacionan principalmente a las laderas bajas próximas a los ríos Chicamocha y Soapaga entre los 2200 y 2400 metros. Los deslizamientos de tipo 2 se asocian más a altitudes medias, entre los 2400 y 2600 m, y los deslizamientos de tipo 3 se relacionan principalmente a las laderas altas, entre los 2800 y 3000 metros.

### 3.5.2. INCLINACION DE PENDIENTES

Este mapa representa el ángulo formado por la superficie del terreno y un plano horizontal imaginario. Siete intervalos de pendientes, cada diez grados fueron definidos para el área (Figura 17-B).



A ALTITUD RELATIVA  
 B. INCLINACION DE PENDIENTES  
 C. ORIENTACION DE PENDIENTES  
 D. INTERVALOS TEMATICOS

FIGURA 17: IMAGENES-MAPA MORFOMETRICOS DERIVADOS DEL MNT

La distribución cartográfica de las pendientes en área, especialmente de las zonas escarpadas (mayores de 70°) evidencia una alta influencia tectónica en la región, con escarpes desplazados (fallas) o curvados (plegamiento).

Las pendientes generalmente constituyen un factor fundamental en la evaluación de los fenómenos de remoción en masa, sin

ser determinante el concepto que a mayor pendiente será menor la probabilidad de ocurrir un movimiento. Sobre la misma área de estudio es evidente la presencia de deslizamientos en áreas de pendientes muy suaves (Paz Viejo - La Chapa). Sin embargo, la dinámica de muchos de estos movimientos está estrechamente relacionada a la morfología de escarpes escalonados que impera en el área.

El análisis estadístico de este parámetro con los deslizamientos (Tabla 5), muestra que existe poca influencia de este factor con los deslizamientos de tipo 1 (valores de peso entre 0.46 y 0.57), mientras que para los deslizamientos de tipo 2 los valores de peso de los intervalos de pendientes son mayores (0.63 a 1.41) y presentan una relación directa a mayor grado de pendiente. Para los deslizamientos de tipo 3 las pendientes más fuertes ( $>70^\circ$ ) representan el mayor valor de peso.

### 3.5.3. ORIENTACION DE LA PENDIENTE

Este mapa representa el ángulo formado entre el norte geográfico de la imagen y la normal a la pendiente del terreno. Se expresa de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  en dirección este. En el área, este mapa (Figura 17C) presenta 12 intervalos, los cuales caracterizan 6 unidades geomorfológicas, bien definidas por el curso de los ríos Chicamocha y Soapaga

Sobre la margen derecha del río Chicamocha, la exposición de las pendientes constituye una unidad geomorfológica relativamente homogénea de orientación preferencial NS, mientras que sobre la margen izquierda de este mismo río se definen 5 unidades geomorfológicas, con direcciones predominantes E-W y NW.

El análisis estadístico de este factor con los deslizamientos (Tabla 6), muestra el bajo "peso" de este parámetro con los deslizamientos de tipo 1.

Para los deslizamientos de tipo 2, las laderas orientadas entre  $50^\circ$ - $100^\circ$ , y los  $300^\circ$ - $360^\circ$  presentan altos valores de susceptibilidad (1.17 y 1.16 respectivamente), y las laderas orientadas entre los  $100^\circ$ - $150^\circ$  y los  $200^\circ$ - $250^\circ$ , muestran altos valores de susceptibilidad hacia los deslizamientos de tipo 3.

TABLA 4: CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES DE ALTITUD RELATIVA HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Altitud relativa en metros	Superficie total de la Altitud Relativa (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por unidades de Altitud Relativa (# de pixeles) DZxamientos (# de pixeles) "DZX"			Susceptibilidad o "peso" de las unidades de Altitud Relativa a los tipos de deslizamientos (W%)		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
2000-2200	18774	33	1231	31	0.17	0.64	0.16
2200-2400	72736	665	769	461	0.91	1.00	0.63
2400-2600	80242	585	1005	674	0.73	1.25	0.83
2600-2800	58722	60	524	586	0.10	0.89	1.00
2800-3000	17085	58	89	231	0.33	0.52	1.35
3200-3400	12188	30	-	58	0.24	-	0.47
3400-3600	1888	-	-	16	-	-	0.84

TABLA 5: CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES DE INCLINACION DE PENDIENTE HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Inclinación de la pendiente en grados	Superficie total de la inclinación de la pendiente (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por unidades de inclinación de la pendiente (# de pixeles) "DZX"			Susceptibilidad o "peso" de la inclinación de la pendiente a los tipos de deslizamientos (W%)		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
< 10	38942	80	244	242	0.46	0.63	0.62
10-20	75568	421	649	536	0.56	0.86	0.71
20-30	66652	403	650	555	0.60	0.98	0.83
30-40	39593	198	442	298	0.50	1.11	0.75
40-50	19352	107	228	162	0.55	1.18	0.83
60-70	10404	58	147	104	0.56	1.41	1.00
> 70	11124	64	148	160	0.57	1.33	1.43

TABLA 6: CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES DE ORIENTACION DE LAS PENDIENTES HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Intervalos de Exposición de la pendiente en azimut	Superficie total de la Exposición pendiente (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por unidad de exposición de la pendiente (# de pixeles) "DZ"			Susceptibilidad o "peso" de la exposición de la pendiente a los tipos de deslizamiento (W%)		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
0.50	38988	237	1375	81	0.60	0.96	0.46
50-100	38122	162	447	306	0.42	1.17	0.80
100-150	47751	331	459	475	0.69	0.96	1.00
150-200	27547	192	232	218	0.70	0.84	0.79
200-250	32824	186	313	389	0.56	0.95	1.18
250-300	62768	252	523	419	0.40	0.83	0.66
300-360	13634	71	159	69	0.52	1.16	0.50

### 3.5.4. DRENAJE Y MICROCUENCAS

En los últimos años las investigaciones sobre cartografía automática de rasgos hidrográficos a partir de modelos numéricos de terreno han evolucionado notablemente. Entre éstas investigaciones se destacan: la extracción de redes de drenaje (HARALICK, 1983; JENSON, 1985; JENSON y DOMINIQUE, 1988; RIAZANOF *et al*, 1992), y límites hidrográficos en varios órdenes de cuencas o microcuencas (BAND, 1986; DOUGLAS, 1986; MORRIS Y MERDEGEN, 1988).

En este trabajo se obtuvo automáticamente la red de drenaje superficial y las líneas de divisoria de aguas (Figuras 18a y 18b) a partir del MNT utilizando software Arboresence y Bassins (ISTAR, 1990).

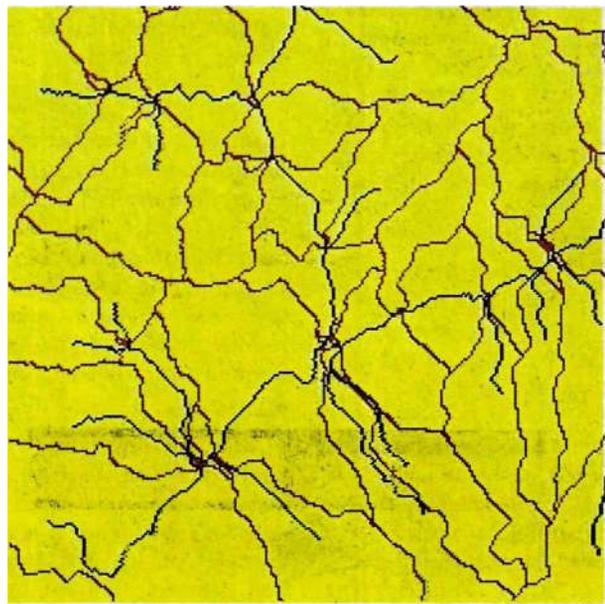
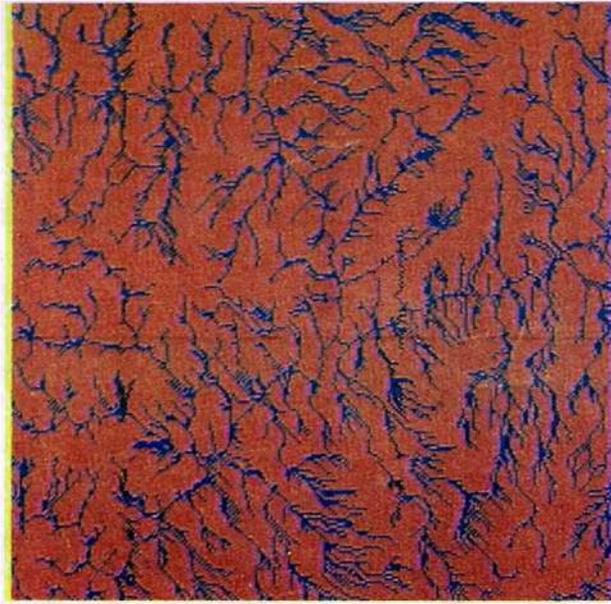
La cartografía de las redes de drenaje superficial se definió hasta un orden de cuarto grado. Su configuración define patrones de tipo paralelo y subparalelo, especialmente sobre la margen derecha del río Chicamocha, y dendrítico a subdendrítico en la margen opuesta del mismo río. Cabe anotar que este drenaje define las líneas o áreas por donde se pueden encauzar cuerpos de agua (lluvias)

y no corrientes permanentes, ya que las corrientes permanentes en el área se limitan principalmente a los ríos Chicamocha y Soapaga.

El mapa de líneas de divisoria de aguas definen un total de 48 microcuencas para el área de estudio.

El análisis de este factor de terreno con los deslizamientos se realizó a partir de un mapa de densidad de drenaje (Figura 19). Generalmente las zonas de mayor densidad de drenaje se relacionan a áreas en donde la erosión hídrica es o fue intensa. El mapa de densidad de drenaje representa cinco unidades de densidad, en términos de muy baja a muy alta.

El análisis estadístico (Tabla 7), de este parámetro con los deslizamientos indica que no existe una relación directa de las unidades de menor a mayor densidad de drenaje con los deslizamientos del área. Por ejemplo para los deslizamientos de tipo 2, la unidad de "media" densidad de drenaje presenta un mayor valor de susceptibilidad (1.23) que la unidad de muy alta densidad de drenaje (0.86).

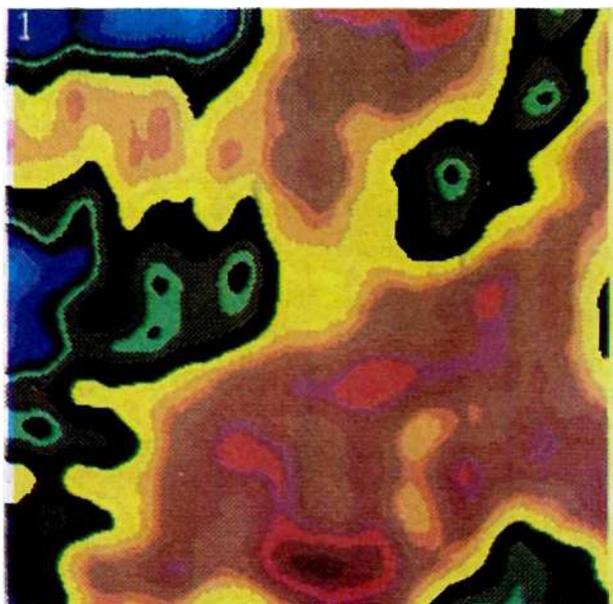


A: RED DE DRENAJE    B: MICROCUENCAS

FIGURA 18: MAPA HIDROGRAFICO DERIVADO DEL MNT

TABLA 7: CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES DE DENSIDAD DE DRENAJE HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Intervalos de densidad de drenaje "densidad"	Superficie total de densidad de drenaje (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por unidad de densidad de drenaje (# de pixeles) "DZX"			Susceptibilidad o "peso" de la densidad de drenaje a los tipos de deslizamientos (W%)		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Mu baja	5122	-	-	7	-	-	0.13
Baja	38067	76	184	419	0.20	0.48	1.10
Media	84234	523	1042	8110	.62	1.23	0.96
Alta	12184	804	1092	750	0.71	0.97	0.66
Muy alta	22028	28	190	70	0.12	0.86	0.31



0 1Km



FIGURA 19: MAPA DE DENSIDAD DE RED DE DRENAJE

#### 4. ELABORACIÓN DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD

Los mapas de susceptibilidad a los deslizamientos se realizan a partir del análisis estadístico que determina el valor de "peso" de cada unidad de terreno.

El método cartográfico se fundamenta en la recodificación de los valores iniciales de las unidades de terreno de los mapas digitales (Ej: los depósitos aluviales "Qal" tienen un valor de 1, y la unidad PDS de 17, etc), en términos de susceptibilidad ("W").

Como el valor del "peso" es dado en porcentaje, en un rango de valores entre 0 y 6.94, se realizó un análisis estadístico mediante el ajuste de los datos a una curva de distribución normal sobre cada tipo de movimientos en masa. Este análisis permitió establecer seis intervalos de susceptibilidad (Tabla 8).

La recodificación de los mapas temáticos en términos de susceptibilidad se realiza con valores de 1 a 6 de acuerdo con el intervalo en que se encuentre el valor del peso (W) de la respectiva unidad de terreno; por ejemplo, la unidad litológica TPSI tiene un valor de 11 sobre la imagen-mapa geológico y su susceptibilidad hacia los deslizamientos de tipo 1 muestra un va-

lor de 0.14. Entonces esta unidad se recodificará con un valor de 1 para este tipo de movimiento.

En las figuras 20 a 26 se presentan los mapas de susceptibilidad de los siete parámetros de estudio: geología, uso y ocupación del suelo, inclinación de la pendiente, densidad de lineamientos, altitud relativa, densidad de drenaje y orientación de la pendiente hacia los tres tipos de movimientos.

Una vez obtenidos los diferentes mapas temáticos de susceptibilidad específicos a los tres tipos de movimientos, se realizan los mapas de susceptibilidad del terreno.

El principio de análisis estadístico para la elaboración de estos mapas se fundamenta en el proceso de adición de imágenes-mapas de susceptibilidad temática (Figura 27).

En este proceso el valor del pixel (z) de la imagen resultante será la suma de los pixeles de las imágenes de entrada bajo la misma posición (x, y). En este caso siete mapas de entrada que tienen valores de pixel entre 1 y 6 producirán una imagen resultante que represente la susceptibilidad del terreno a un movimiento en especial. En esta imagen-mapa el valor del pixel será múltiplo de siete en un rango de 7 a 42.

TABLA 8: INTERVALOS DE SUSCEPTIBILIDAD

VALOR	INTERVALO (W)	TERMINO DESCRIPTIVO DE LA SUSCEPTIBILIDAD
1	< 0.25	Nula a muy baja
2	0.26 - 0.50	Baja
3	0.51 - 0.75	Media baja
4	0.76 - 1.00	Media Baja
5	1.01 - 1.25	Alta
6	> 1.26	Muy alta

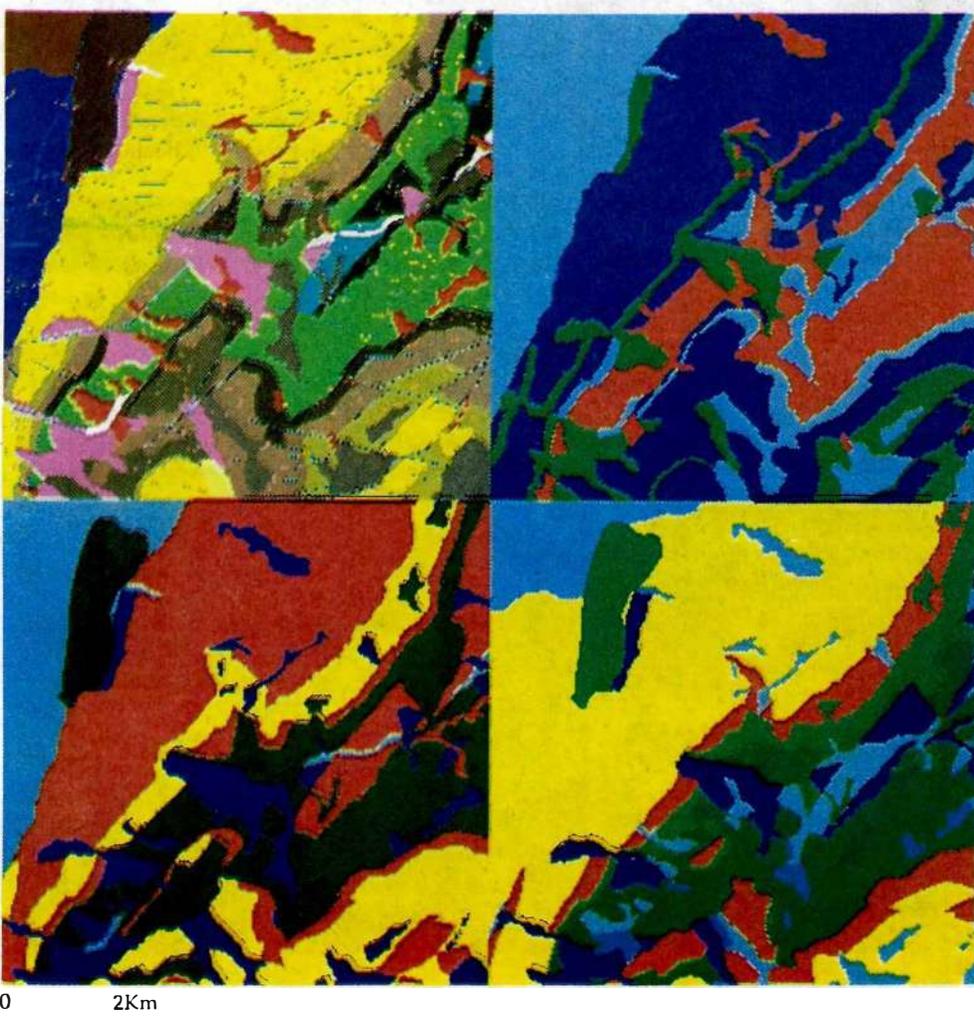


IMAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD GEOLOGICA A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD GEOLOGICA A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD GEOLOGICA A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 20: IMAGENES-MAPAS DE SÚSCEPTIBILIDAD GEOLOGICA A LOS DESLIZAMIENTOS

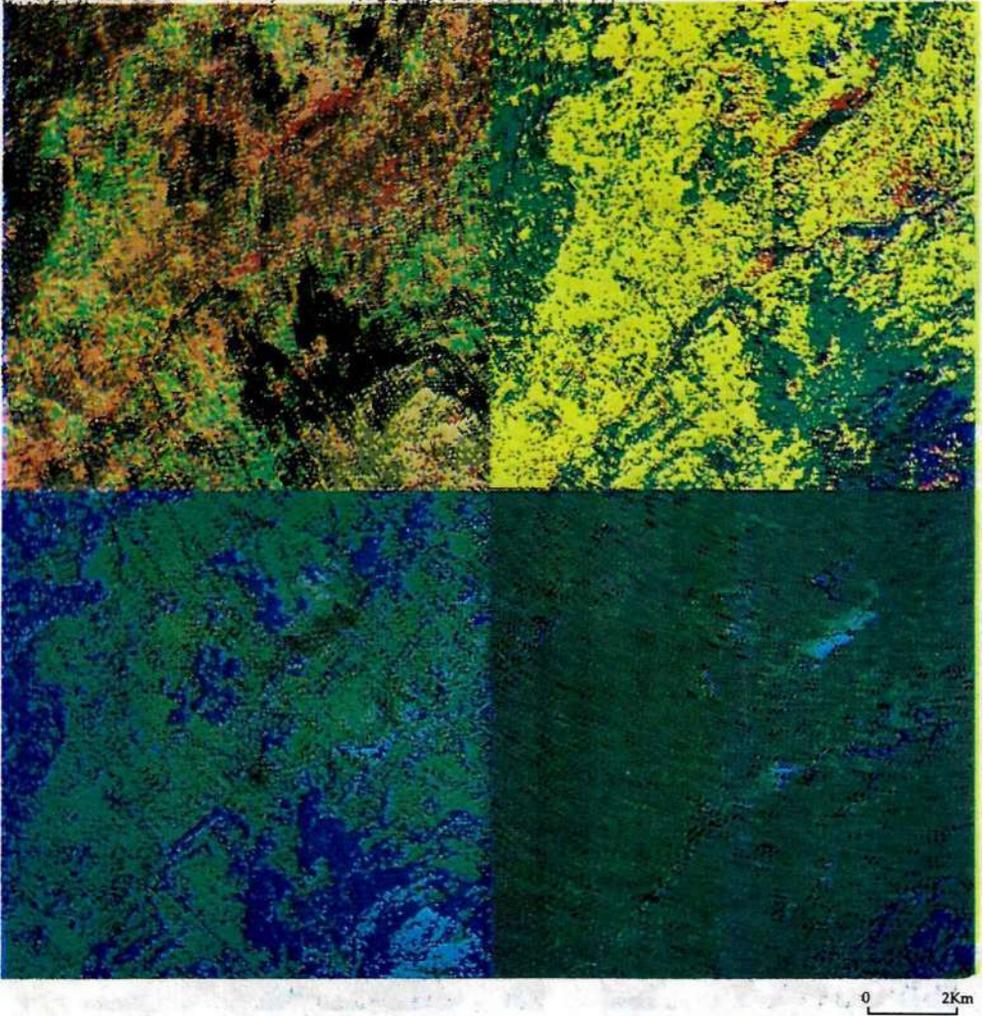


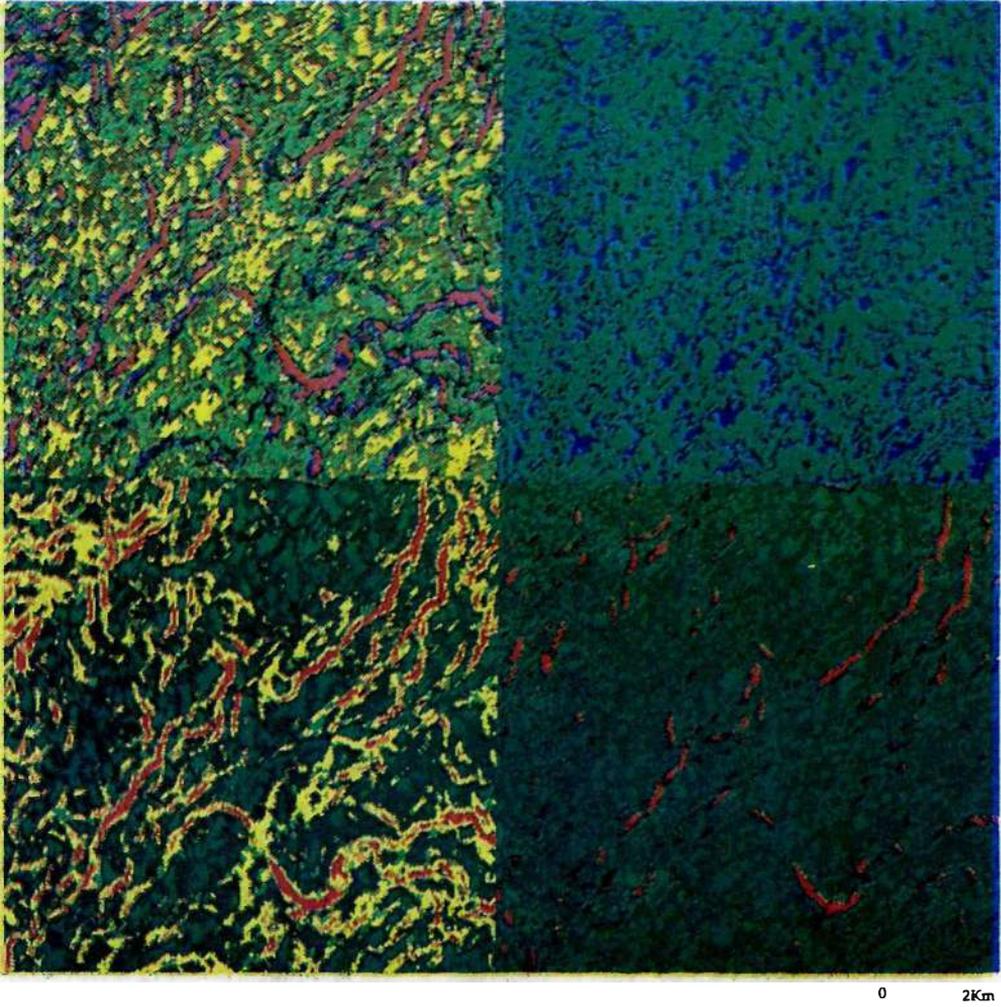
IMAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 21: IMAGENES-MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA OCUPACION Y USO DE SUELO A LOS DESLIZAMIENTOS



MAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 22: IMAGENES-MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA INCLINACION DE LA PENDIENTE A LOS DESLIZAMIENTOS



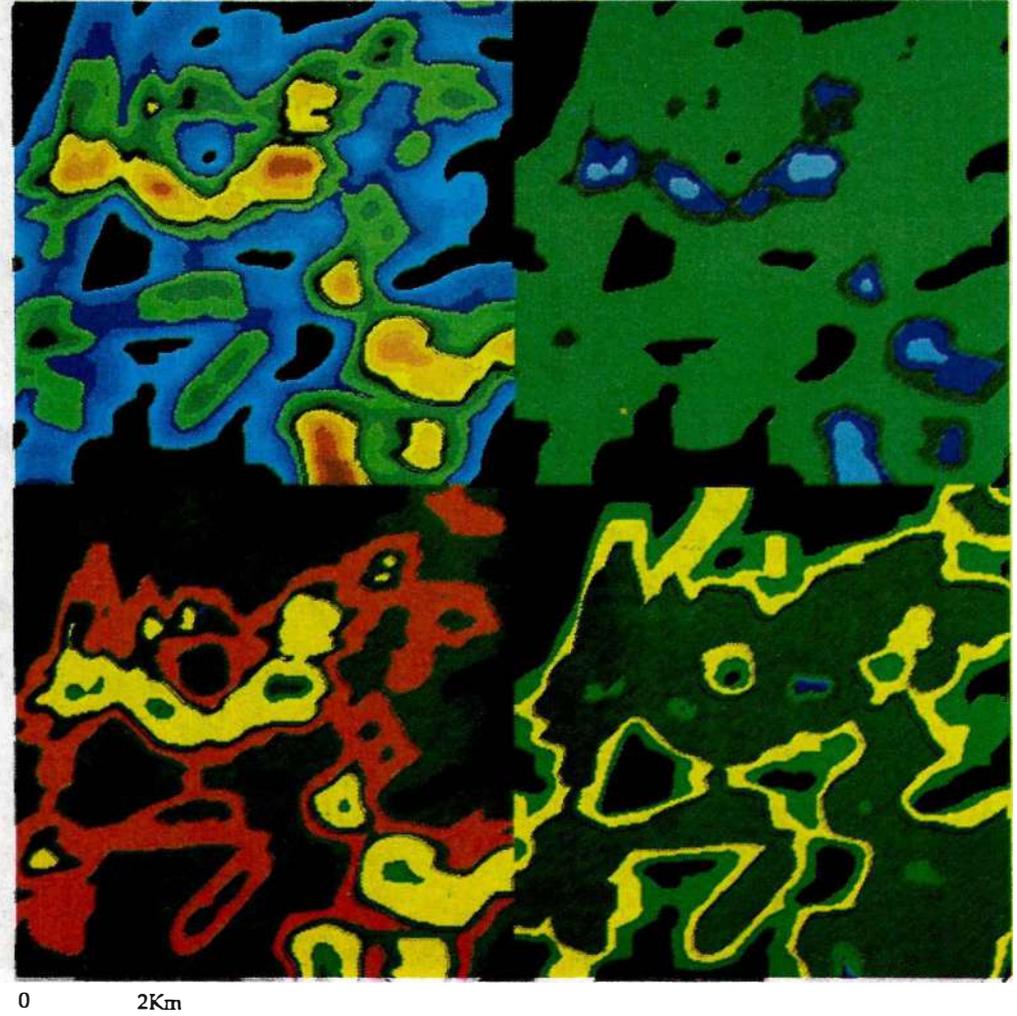


IMAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 23: IMAGENES-MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE DENSIDAD DE LINEAMIENTOS A LOS DESLIZAMIENTOS

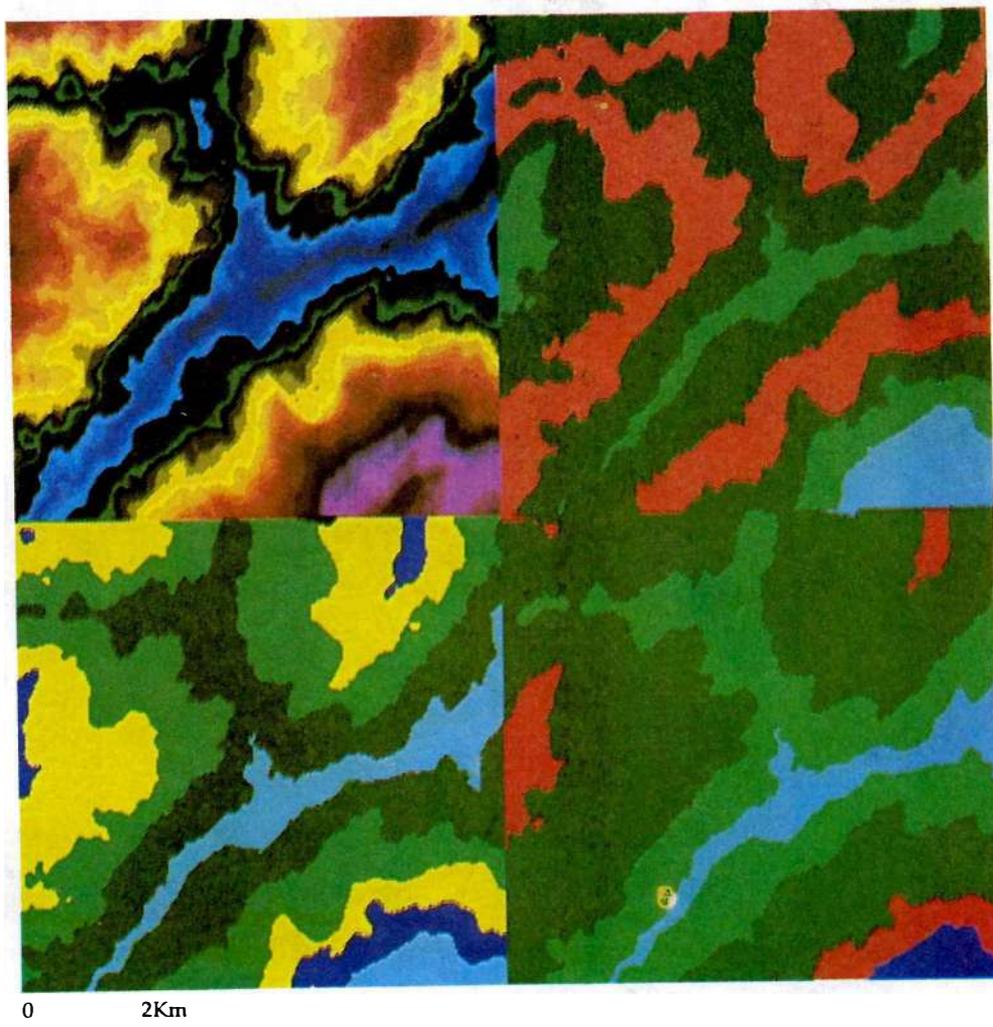


IMAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 24: IMAGENES-MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA ALTITUD RELATIVA A LOS DESLIZAMIENTOS

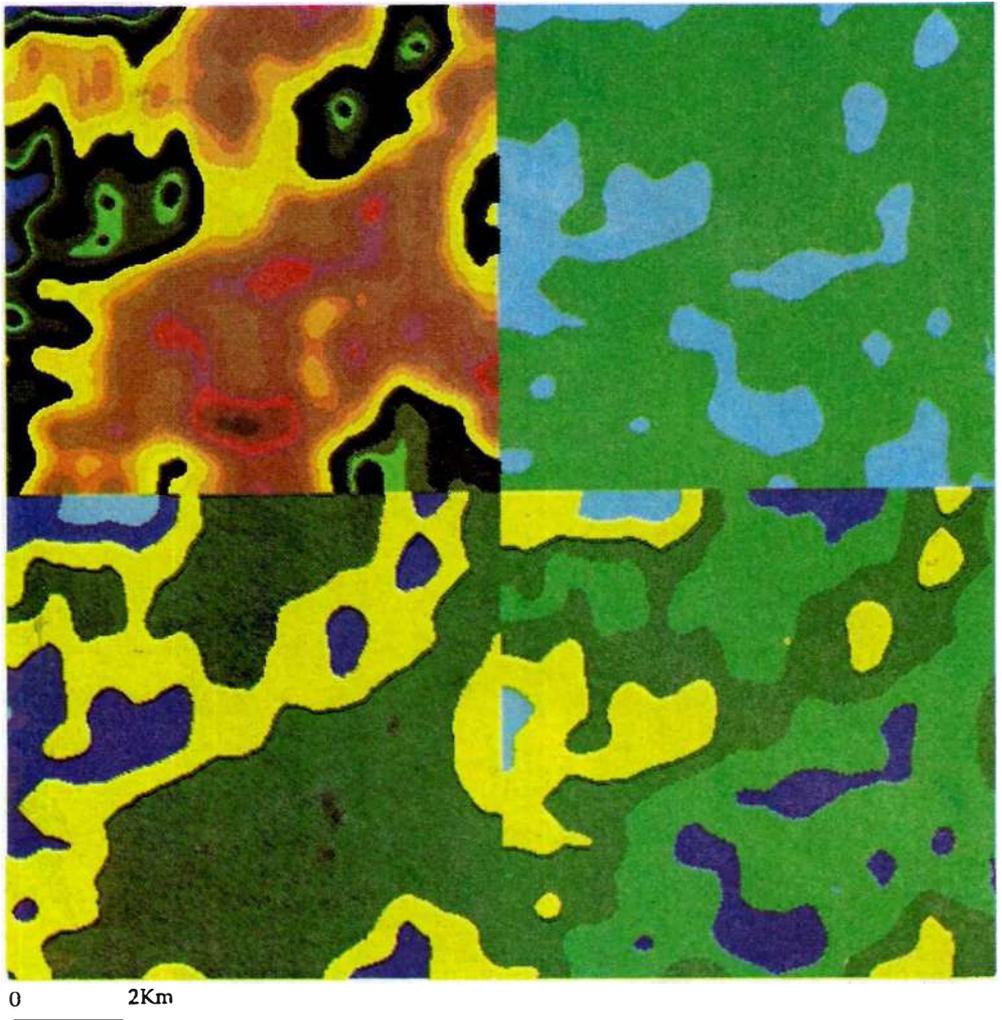


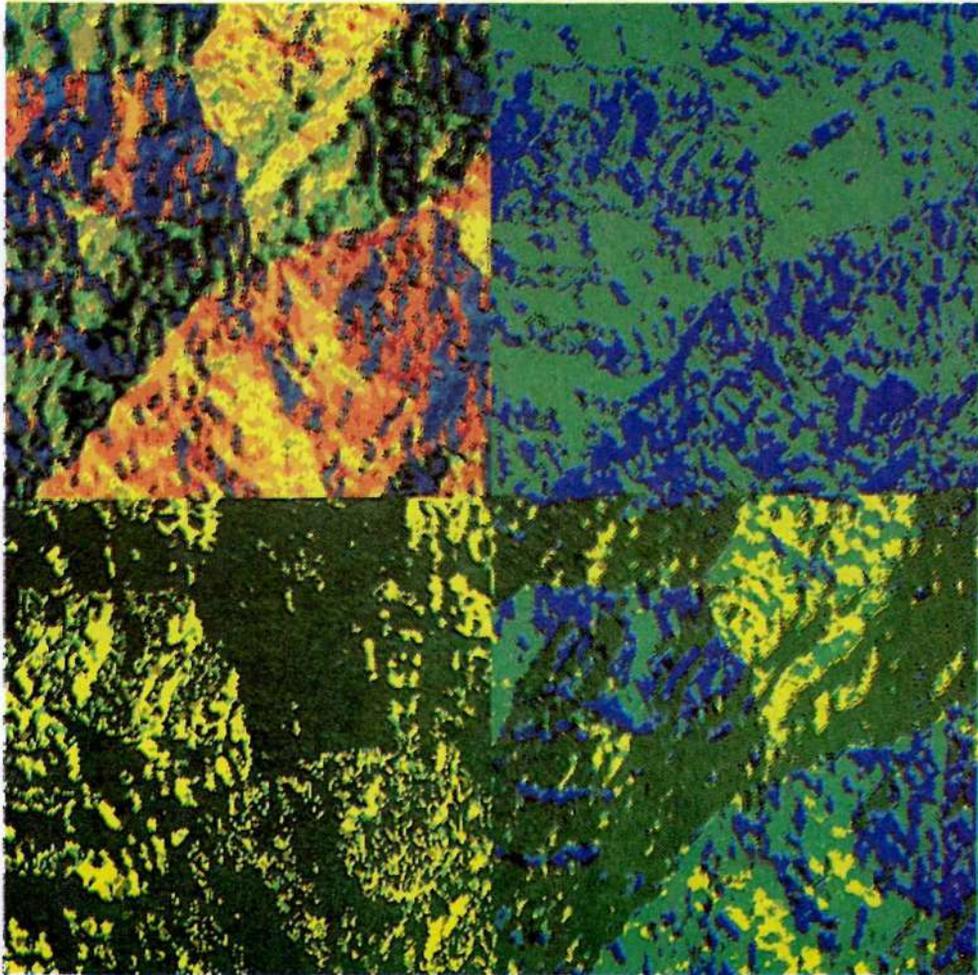
IMAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 25: IMAGENES-MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA DENSIDAD DE DRENAJE A LOS DESLIZAMIENTOS



0 2Km

IMAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 26: IMAGENES-MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA ORIENTACION DE LAS PENDIENTES A LOS DESLIZAMIENTOS

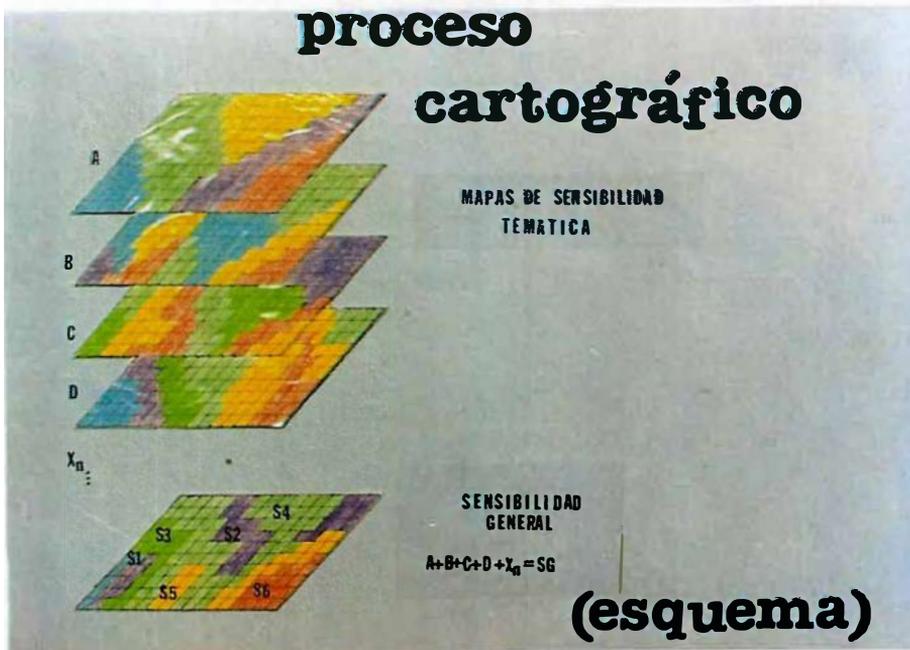


FIGURA 27: ESQUEMA DE SURPERPOSICION DIGITAL DE IMAGENES SOBRE UN SIG PARA LA ELABORACION DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

El mapa de susceptibilidad del terreno específico a un movimiento, se realiza recodificando la imagen en términos de las seis categorías de susceptibilidad definidas. Ej: los pixeles con valores menores que siete se recodifican con el valor 1 (gráficamente se le asigna un color de escena azul claro), los pixeles con valores entre 8 y 14 se recodifican a 2 y se le asigna un color azul oscuro etc.

En las figuras 28, 29, y 30 se presentan los mapas de susceptibilidad del terreno hacia los deslizamientos de tipo 1, 2, y 3.

Un tercer mapa de susceptibilidad del terreno que involucra todos los movimientos clasificados (tipo 1, 2, y 3) fue realizado mediante el mismo proceso anterior de adición de imágenes. Aquí las imágenes de entrada fueron las imágenes de suscepti-

bilidad del terreno específicas a cada movimiento. (Figura 31).

#### 4.1. VALIDACION DEL METODO

La validación de mapas regionales de susceptibilidad a los movimientos es compleja debido a que se requiere de un seguimiento en el tiempo y el espacio de los movimientos del terreno existentes y la observación continua de las áreas sin procesos de remoción en masa actual, pero susceptibles en un cierto grado a estos.

Sobre el área de prueba se cuenta con varios factores que han facilitado validar el método aquí propuesto. Entre estos factores se cuentan la poca extensión del área, su facilidad de acceso, los valiosos registros de inventarios y estudios de zonas inesta-

### Mapas temáticos de susceptibilidad

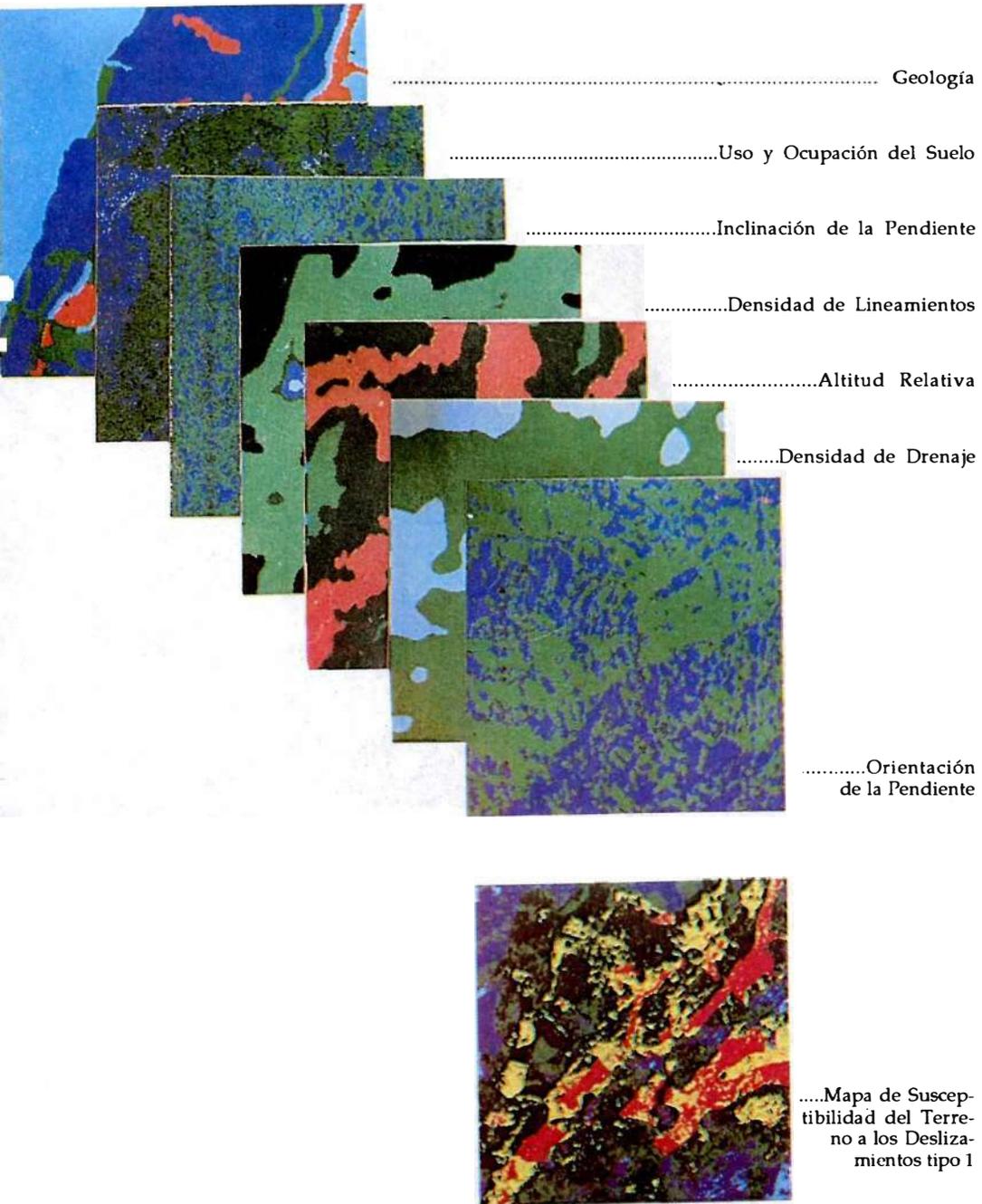


FIGURA 28: SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LOS DESLIZAMIENTOS DE TIPO 1

### Mapas temáticos de susceptibilidad

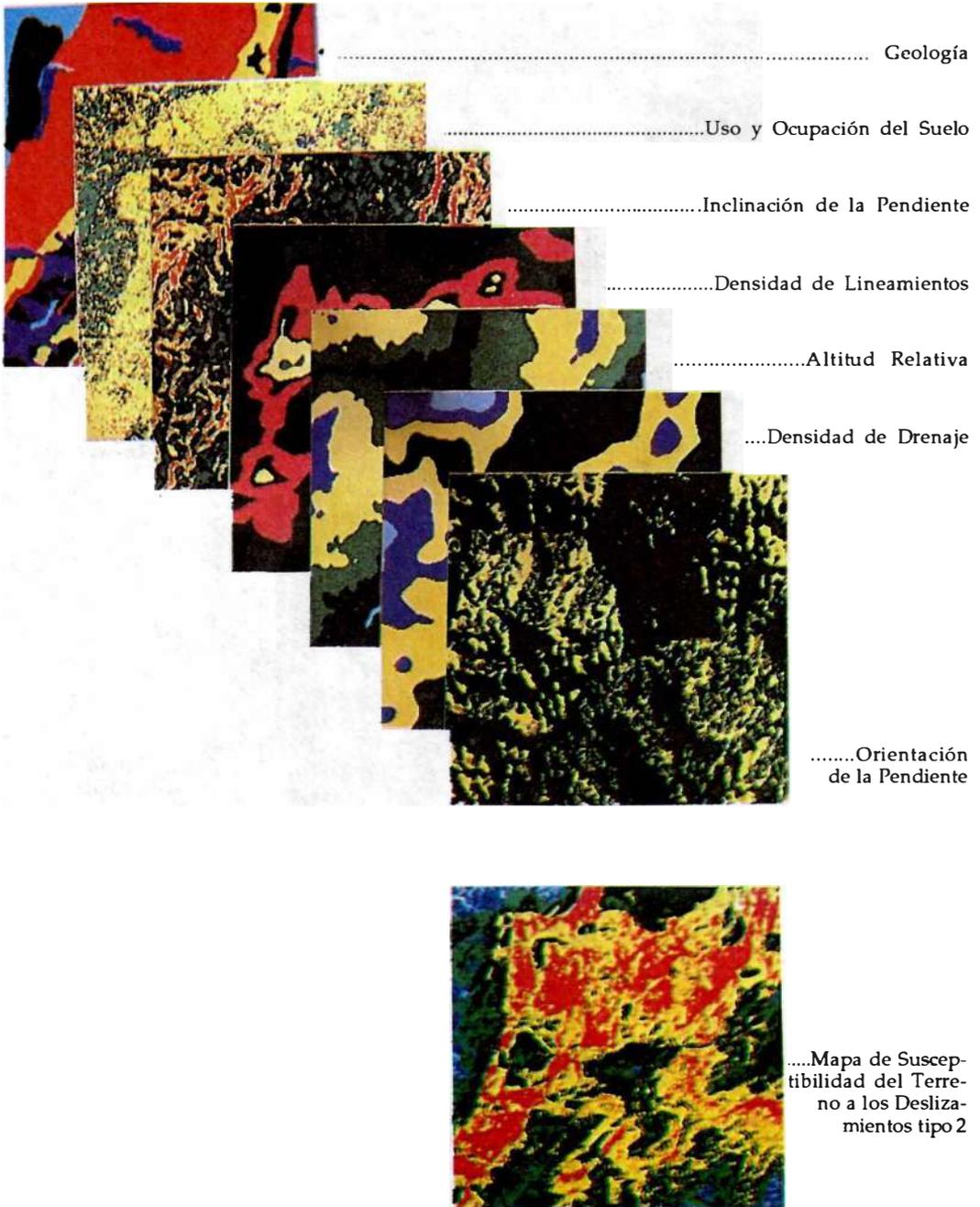


FIGURA 29: SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LOS DESLIZAMIENTOS DE TIPO 2

### Mapas temáticos de susceptibilidad

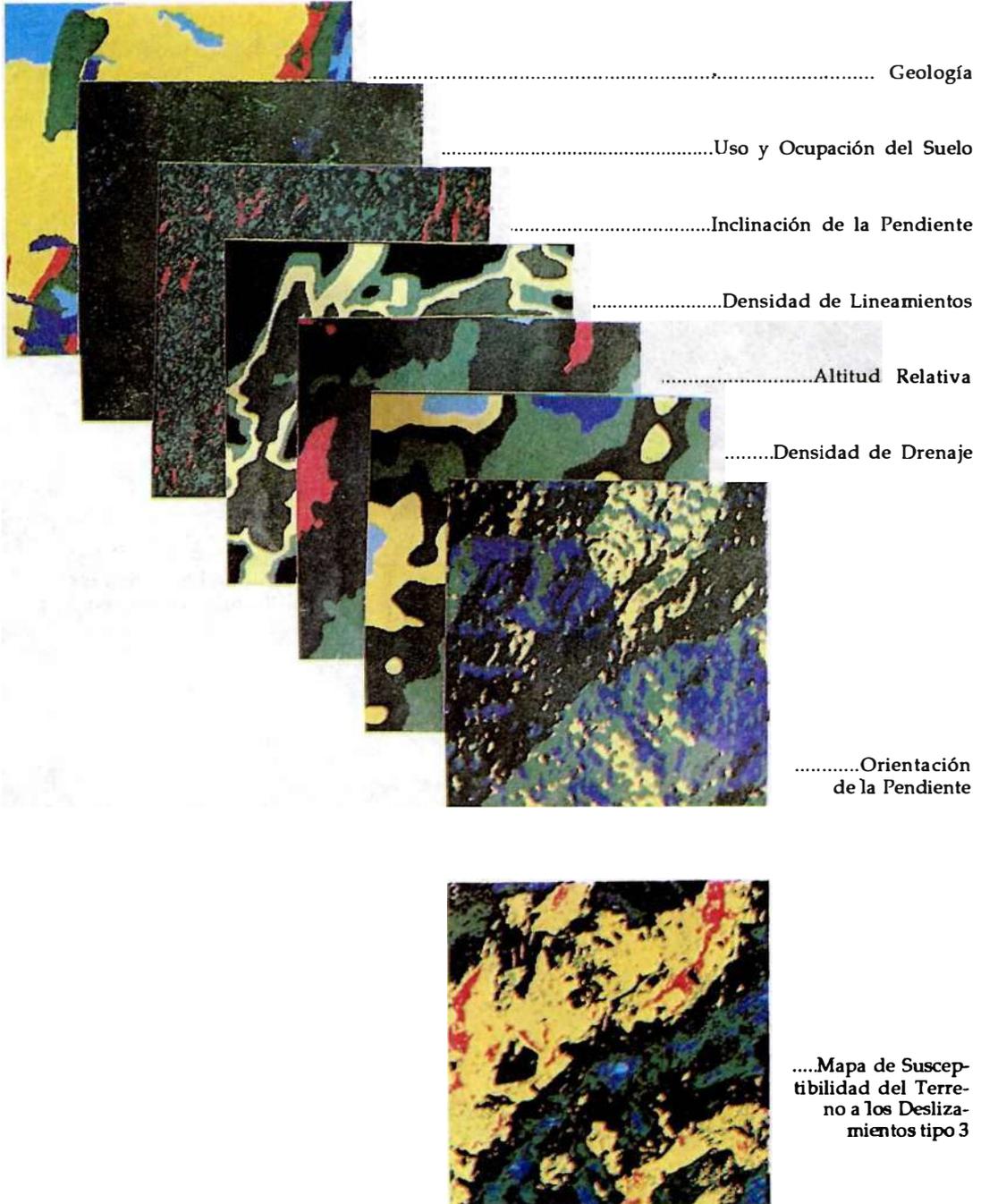


FIGURA 30: SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LOS DESLIZAMIENTOS DE TIPO 3

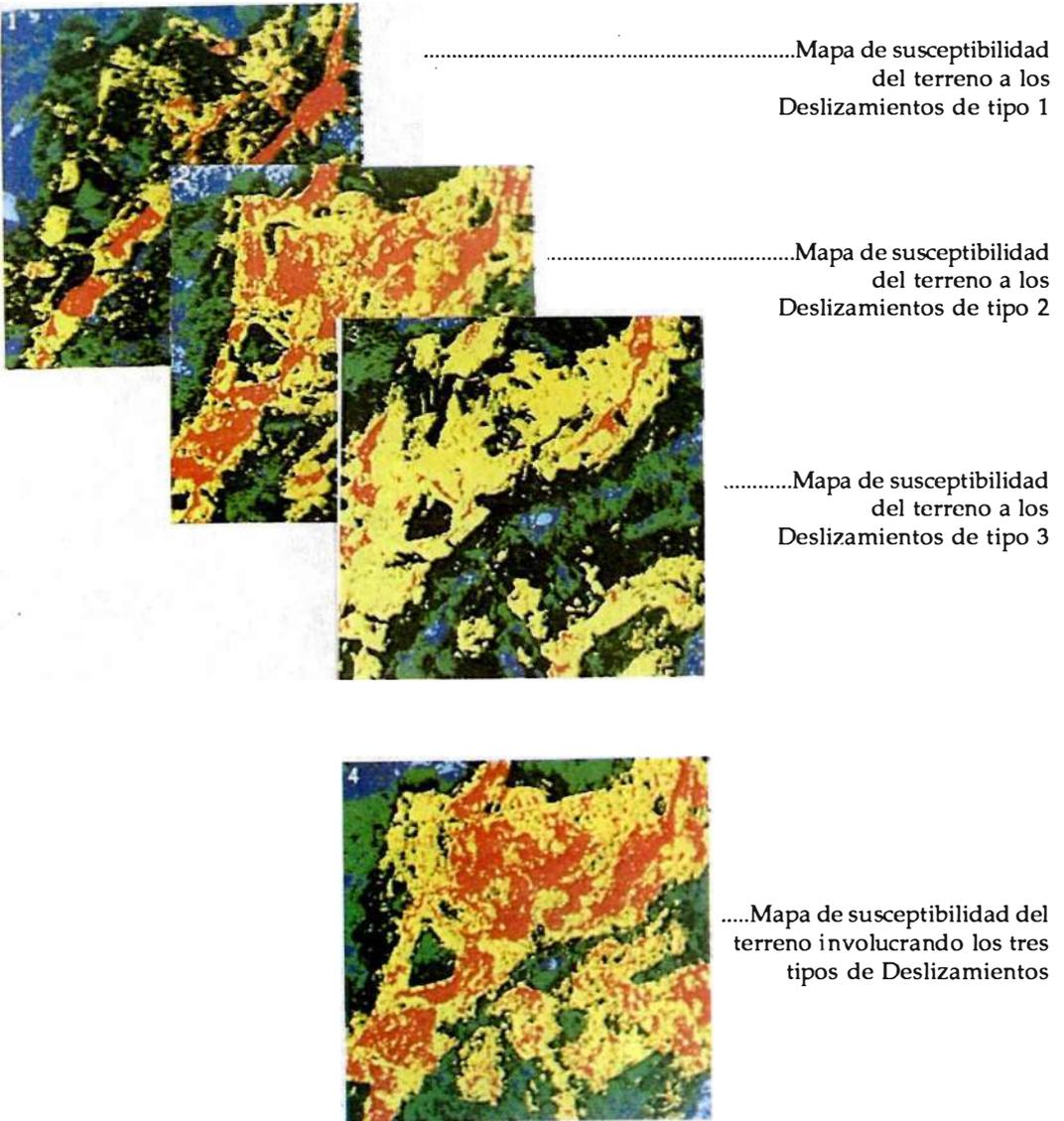


FIGURA 31: SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO HACIA LOS DESLIZAMIENTOS EN GENERAL

bles en un lapso de más de 60 años, la disponibilidad de fotografías aéreas a escalas detalladas, e imágenes de satélite de buena calidad y un buen conocimiento y experiencia en el terreno.

La cartografía de zonas inestables en este trabajo fue soportada en registros de campo (1989-1990) e imágenes de satélite de 1988. Los resultados de esta investigación fueron posteriormente evaluados sobre el terreno en noviembre de 1991 por una comisión de expertos Franceses y Colombianos. De esta visita se establecieron varias observaciones importantes:

Las áreas donde actualmente existe mayor inestabilidad por remoción en masa corresponden sobre el mapa de susceptibilidad a zonas de mayor grado.

Se verificó la importancia en la diferenciación de los movimientos en masa para el análisis y cartografía de los mapas de susceptibilidad; por ejemplo las zonas de alta susceptibilidad hacia los movimientos antiguos se relacionan más a factores naturales en las zonas de mayor altitud, donde imperaron condiciones climáticas y geoambientales muy particulares en épocas pasadas, que se relacionan principalmente a ambientes fluvio-glaciares.

Se identificaron nuevos movimientos de pequeña extensión localizados sobre las áreas que indicaban alta susceptibilidad a los deslizamientos de tipo 2 (menores activos).

#### 4.2. DISCUSION DE RESULTADOS

En este aparte se discuten las ventajas y limitantes en el método aquí propuesto para la cartografía digital de mapas de susceptibilidad a los movimientos en masa, usando técnicas de sensores remotos y SIG.

En primer lugar la posibilidad cartográfica de un área por sensores remotos depende

en principio de tres factores físicos de las imágenes como: disponibilidad de la imagen(es) adecuada (SPOT-PAN, SPOT-XS o LANDSAT-TM), la calidad (% de cobertura de nubes), y el nivel de corrección radiométrica y geométrica.

La disposición de imágenes ópticas sobre la región Andina, constituye en muchos casos una limitante, en especial por las difíciles condiciones atmosféricas que imperan. Al iniciar esta investigación se tuvo este inconveniente en la adquisición de una segunda imagen SPOT-XS para conformar la estereoscopia, la cual en más de un año de programación no fue posible su registro. Sin embargo, la estereoscopia se obtuvo por el sinergismo gráfico con LANDSAT-TM y sintéticamente mediante la generación de imágenes a diferente vista perspectiva por métodos artificiales (software VUE3D) utilizando la ortoimagen Spot y el modelo numérico de terreno.

Otro punto importante es el nivel de corrección radiométrica y geométrica que debe tener la imagen base. La necesidad de combinar productos de diferentes sistemas cartográficos, hace indispensable contar con ortoimágenes o imágenes georreferenciadas al mismo sistema cartográfico. Aquí se utilizó una nueva técnica desarrollada para el proyecto "GARS" que consiste en obtener una ortoimagen y un MNT por correlación automática entre imágenes SPOT-XS y Landsat-TM.

De otra parte, un modelo numérico o digital de terreno constituye un producto indispensable para estos estudios. Su obtención más convencional se realiza mediante la digitalización de curvas de nivel, aunque en nuestro país existen aun áreas sin cubrimiento topográfico. En ausencia de mapas topográficos se puede obtener un MNT por las técnicas de correlación automática de imágenes de satélite que formen estereoscopia, como el utilizado en esta investigación. Cabe anotar que el MNT debe ser geoméricamente correlacionable a los otros productos cartográficos involucrados en el estudio.

En la cartografía morfodinámica digital, las imágenes de satélite mostraron una gran capacidad en la identificación de deslizamientos activos especialmente en donde se ha removido material rocoso y la vegetación es mínima. Esto se refleja sobre la imagen con una alta respuesta espectral. Mientras que para la identificación de movimientos antiguos o zonas de reptación, existen limitantes que hacen necesarios los controles de campo y realizar análisis estereoscópicos.

Para la caracterización y cartografía de las unidades de uso u ocupación del suelo, las imágenes de satélite mostraron su mayor utilidad cartográfica. La influencia de la vegetación sobre la inestabilidad de un área es de gran importancia, por lo tanto su cartografía debe ser lo más objetivamente posible. La imagen SPOT realizada, aportó claras diferencias en cuanto a textura y respuesta espectral entre estos tipos de vegetación.

Otra clara diferenciación ocurre sobre los suelos desnudos que pueden representar desde capas de rocas resistentes, suelos agrícolas o áreas erosionadas. En este estudio se diferenciaron claramente dos zonas de remoción en masa, suelos residuales, zonas de rocas desnudas y afloramientos de hierro sobre los cuales existe una alta actividad minera.

El modelo numerico de terreno es un producto de gran capacidad cartográfica, en especial en la cartografía morfométrica e hidrográfica. La facilidad de modificación de las variables o intervalos facilitó el análisis hacia las zonas inestables y la selección de los mejores intervalos o unidades de terreno.

Los mapas de densidad (lineamientos, drenaje, deslizamientos) obtenidos por métodos digitales de filtraje de imágenes introducen un nuevo sistema cartográfico que permite evaluar la información de parámetros lineales bajo una forma areal.

El análisis digital estadístico de las coronas de deslizamientos sobre los diferentes mapas temáticos digitales permitió determinar cuantitativamente el peso o susceptibilidad de cada parámetro de terreno hacia tres tipos de deslizamientos. Este método se fundamenta en un sistema tradicional de cálculo de movimientos por unidad de área o de terreno.

El mayor aporte se refiere en la exactitud del cálculo, que está soportado en un análisis raster (malla) con una unidad mínima de un pixel, el cual representa un área de 20x20 m. La definición de las coronas de los movimientos como elemento de análisis, permitió definir exactamente los sectores en donde se combinaron una serie de parámetros de terreno que intervinieron en la formación del movimiento.

Igualmente, la clasificación de estas coronas de deslizamientos en tres tipos permitió establecer que en la formación de estos movimientos intervienen factores de terreno particulares en cada uno de ellos.

El concepto y utilización de un SIG en estudios de este tipo, resultó ser una herramienta indispensable, facilitando el almacenamiento estructurado de la información cartográfica y el análisis espacial para la determinación de la susceptibilidad de los factores y su expresión cartográfica.

Finalmente, cabe anotar que esta metodología ha sido desarrollada con siete factores básicos del terreno que involucran parámetros geológicos, estructurales, geomorfológicos e hidrográficos. Sin embargo existen otros factores no contemplados aquí, como el meteorológico, sismológico y geotécnico que pueden representar un papel importante en la inestabilidad de las laderas. La determinación del "peso" o influencia de estos otros factores representa una perspectiva para la complementación de este método.

### 4.3. PERSPECTIVAS

En el curso de ésta investigación se demostró el potencial y las limitaciones de las imágenes de satélite para la cartografía temática y la elaboración de mapas de susceptibilidad a los movimientos en masa.

El desarrollo progresivo de estos nuevos productos satelitarios pronostica a corto plazo la superación de sus limitantes en cuanto a su resolución espacial, capacidad estereoscópica y baja calidad por nubosidad; igualmente, un mejoramiento de sus bandas espectrales.

Entre estos productos, el más promisorio es el satélite japonés JERS-1, puesto en órbita el 11 de febrero de 1992. Presenta una capacidad estereoscópica, una resolución de 18 m, un sensor óptico con 7 bandas espectrales que abarcan desde el visible, cercano infrarrojo, onda corta-infrarrojo y un instrumento SAR (Synthetic Aperture Radar) de microondas que supera los problemas atmosféricos y conserva la resolución de 18 m.

Otros satélites que muestran buenas perspectivas son el ERS-1 (ESA), MOS-1 (japonés), y los futuros productos de Landsat y Spot.

Así mismo el desarrollo de los sistemas de Información Geográfica ofrece cada día mejores capacidades para el manejo y análisis de información, en la zonificación de fenómenos naturales.

Como perspectiva de complementación de ésta investigación se contempla la evaluación de otros factores de tipo físico (meteorología y sismología) y geotécnico, en un nivel más regional.

### 5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a INGEOMINAS por apoyar y colaborar en todos los aspectos técnicos y logísticos en el desarrollo de esta

investigación; a la oficina de Cooperación Técnica y Científica de la Embajada de Francia en Colombia y al centro de Estudios Espaciales (CNES) de Francia por el financiamiento de mis estudios en Francia; Mi gratitud a todos los integrantes de comité GARS por su cooperación en el desarrollo de esta investigación; un especial reconocimiento al personal científico y administrativo del departamento de teledetección del BRGM en Orleans por su amabilidad, acogimiento y colaboración en la solución de inquietudes y aportes recibidos en la formación en este campo de la teledetección. Al profesor Jean Chorowicz de la Universidad de París 6, mi gratitud y agradecimientos por apoyar la continuación de esta investigación bajo la dirección de una tesis de Doctorado que actualmente adelanto.

### 6. CONCLUSIONES

El principal resultado de este trabajo es la aplicación exitosa de un método basado en sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG) que cuantifica el "peso" o susceptibilidad de las diferentes unidades y parámetros del terreno hacia varios tipos de movimientos. Esta información es básica para el diseño de planes de control y manejo de zonas inestables.

El método aquí desarrollado permite obtener en menor tiempo y a menores costos, evaluaciones confiables de la inestabilidad geológica-geomorfológica actual y potencial en regiones de interés a nivel regional (zonas Departamentales, cuencas hidrográficas, corredores en proyectos de obras civiles, etc) y escala media (en Municipios, veredas, etc).

También se ha demostrado en esta investigación que las imágenes de satélite y modelos numéricos de terreno son una herramienta de gran capacidad cartográfica en estudios de ciencias de la tierra aplicados a la zonificación de fenómenos de remoción en masa y la prevención de desastres naturales.

La determinación de la susceptibilidad temática hacia tres movimientos y características diferentes, ha permitido comprobar la diferencia de "peso" de los factores de terreno sobre estos movimientos, perfeccionando y haciendo más exacta su cartografía.

Los mapas de susceptibilidad sobre el área de aplicación, muestran que un 10.3% de su extensión presenta una muy alta susceptibilidad a los deslizamientos de tipo 1 (mayores activos), un 21% hacia los movimientos de tipo 2 (menores activos) y un 4.5% hacia los movimientos de tipo 3 (antiguos).

Las áreas que presentan mayor susceptibilidad a los deslizamientos se ubican preferencialmente sobre las laderas de la margen izquierda del río Chicamocha y en las laderas medias de la margen derecha de este río.

De estos resultados se resaltan dos observaciones importantes.

Existe una notable diferencia en el valor del "peso" de una misma unidad de terreno hacia los tres tipos de movimientos involucrados, lo cual determina la importancia de su clasificación.

Se demuestra igualmente que ciertos factores denominados "críticos" no tienen la misma incidencia sobre todos los tipos de deslizamientos. Por ejemplo el "peso" del parámetro inclinación de la pendiente para los deslizamientos de tipo 1 (menores activos) no es tan significativo ( $W = 046 - 060$ ) como para los otros tipos de movimientos, que muestran un mayor valor ( $W = 062-143$ ) y una relación directa a mayor pendiente.

## 7. REFERENCIAS

- ALVARADO, B., 1955.- *Informe sobre los deslizamientos en la hoya del río Chicamocha, entre las poblaciones de Tasco y Paz de Río*. Ingeominas, Bogotá.
- ANBALAGAN, R., 1992.- *Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain*. Engineering Geology, 32, pp. 269-277.
- BAND, L.E., 1986.- *Topographic partition of watersheds with digital elevation model*. Water Resour. Res, 22, pp.15-24.
- CAPELLINI, V., ALPARONE, L., GALLI, LANGE, P., NECOCCI, A. and MENICHETTI, L., 1991.- *Digital processing of stereo images and 3-D reconstruction techniques*. International journal of remote sensing. Vol. 12 N) 3, pp 477 - 490.
- CARDENAS L.A, VARGAS J., 1989.- *Estudio de estabilidad en el Alto Chicamocha, sector Tasco-Paz de Río-Socha, Boyacá*. Univ. de Sogamoso. Tesis de grado.
- CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V. and RECHENBAH, P., 1991.- *Gis techniques and statistical models in evaluating landslide hazard*. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 16, pp. 427-445.
- CENDERO, A., SANCHES, J., & ANTOLIN, C., 1990.- *Geopcientific maps for planning in semiarid regions: Valencia and Gran Canaria, Spain*. Engineering Geology, 29, pp. 291-319.
- CHOROWICZ, J., 1984.- *Importance of pattern recognition for geological remote sensing*. Remote sensing for Geological Mapping. Publication IUGS, 18 pp 29-40.

- CHOROWICZ, J., KIM J., MANOUSSIS S., RUDAN J.P., FOIN P., VEILLET I., 1989.- *A new technique for recognition of geological and geomorphological patterns in digital elevation models*. Remote Sensing and Environment, Vol. 29, Nº 3, pp 229-239.
- CHOROWICZ, J., BREARD, Y. J. GUILLANDE, R., ROGER, C., PRUDON, D., and RUDANT, J.P., 1991.- *Dip strike measured systematically on digitized three-dimensional geological maps*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 57, Nº 4, pp. 431-446.
- COLLINS, S.H., 1975.- *Terrain parameters directly from a digital terrain model*. Canadian Surveyor 29(5), pp.507-508.
- DOUGLAS, D.H., 1986.- *Experiments to locate ridges and channels to create a new type of digital elevation model*. Cartographica 23,(4) pp.29-61.
- DUFOUR, H.M., et ABGRALL, F. 1983.- *Éléments remarquables du relief; définitions numériques utilisables*. Com. Franá. Cartogr., fascicule no 95, pp. 57-79.
- DUPERET, A. 1990/91.- *Utilisation Géomorphométrique d' un Modéle numérique de Terrain calculé par corrélation automatique d'images Spot*. Photo-Interprétation fas. 4, pp.31-34.
- EHLERS, M., and WELCH. 1987.- *Stereocorrelation of Landsat Tm Images*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 53, pp. 1231-1237.
- EVANS, I.S. 1980.- *An Integrated System of terrain analysis and Slope Mapping*. Z. Geomorphology, N. F. Suppl. Bd. 36, pp. 274-295.
- EVELYN, B., NEWMAN, E.B. PARADIS, A.R. and BRABB, E.E. 1978.- *Feasibility and Cost of Using a computer to prepare Landslide susceptibility Maps of the San Francisco Bay Region, California*. Geological Survey Bulletin 1443. 24 pp. and 1 color map.
- GUPTA, R.P. and JOSHI, B.C. 1990.- *Landslide hazard zoning using the GIS approach- a case Catchment, Himalayas*. Engineering Geology, 28, pp. 119-131.
- HARALICK, R.M., 1983.- *Ridges and valleys on digital images*. Computer Vision Graphics and Image processing, 22, pp. 28-38.
- HANSEN, A. 1984.- *Landslide Hazard Analysis*. In Brunsten, D. and Prior, B. (eds) Slope Instability Wiley & Sons, New York. pp. 523-602.
- HUBACH, E., Y ALVARADO, B., 1933.- *La destrucción de los sitios de reconstrucción de la Paz, Boyacá*. Informe 222. Ingeominas, Bogotá, y Compilación de Estudios Geológicos Oficiales de Colombia, tomo VI, pp 60-69.
- IGAC. - INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZI, 1984.- *Estudio Regional integrado del Altiplano Cundiboyacense, valle Alto del Chicamocha*. Publicaciones IGAC, Bogotá.
- JENSON, S.K. 1985.- *Automated derivation of hydrologic basin characteristics from digital elevation model data*. Proceedings of Auto-Carto VII ASP publication, Washington, D.C. pp. 301-310.
- JENSON, S.K., et DOMINIGUE, J.O., 1988.- *Extracting topographic structure from digital elevation model data for geographic information system analysis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54, pp. 1593-1600.

- JULIEN P., 1987.- *Exploitation des images par corrélation automatique pour la réalisation de MNT*. Rap PERS N°89, aux Marseille.
- LEROI, E., ROSEAU, O., SCANVIC, J., WEBER, C. and VARGAS, G. 1992.- *Remote sensing and GIS technology in Landslide hazard mapping in the Colombian Andes*. Episodes, V 15 No. 1 p. 32-35.
- LOBO-GUERRERO, U.A., y RODRIGUEZ P.J.A., 1978.- *Análisis geológico del deslizamiento de el Salitre, Municipio de Paz de Río, y elaboración del mapa potencial de amenaza por avalancha de detritos o inundaciones*. Informe inédito Ingeominas.
- LLINAS, R. PRECIADO, A. 1988.- *Estudio geomorfológico y geotécnico del área de Paz del Río-Boyacá*. Estudios y proyectos Ambientales S.A. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1989.- *Casos del deslizamiento de Coradales - El Salitre y de la remoción en masa de La Chapa*. V Congreso Colombiano de Geología. Bucaramanga.
- MARK, D. M. 1975.- *Geomorphometric Parameters: A review and evaluation*. Geog. Ann., Vol. 3-4, pp. 165-177.
- MARTZ, W.L. DE JONG. 1978.- *CATCH: A FORTRAN program for measuring catchment area from Digital Elevation Models*. Computers and Geosciences. 14(5), pp. 627-640.
- MASSON D'AUTOME 1978.- *Construction du modèle numérique d' une surface par approximations successives*. Bull. Société Française de Photogrammétrie et Télédétection 3:4, pp. 33-41.
- \_\_\_\_\_, 1984.- *Correction numérique d' images quelconques selon les lignes quasi épipolaires par approximations successives*. Bull. Soc. Franc. Teled., N° 95, pp 23-24.
- MOURRIS, D.J. and MERDEGEN, R.G., 1988.- *Automatically derived catchment boundaries and channel networks and their hydrological application*. Geomorphology, 2, pp.134-141.
- ORDOÑES, R., 1962.- *Deslizamiento en Tasco, Boyacá*. Ingeominas, Bogotá.
- PACHAURI, A.K. and PANT, M. 1992.- *Landslide hazard mapping based on geological attributes*. Engineering Geology, 32, pp. 81-100.
- PACHECO, A. 1971.- *Informe sobre los deslizamientos del municipio de Paz del Río-Boyacá*. Ingeominas. Bogotá.
- PAPO, H.B., and GELBMANE E. 1984.- *Digital Terrain Models for slope and curvatures*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 35, pp. 695-701.
- PANTON, D.J. 1978.- *A flexible Approach to Digital Stereo Mapping*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 45, No 12, pp.1499-1512.
- PERTL, A., 1985.- *Digital image correlation with and analytical plotter*. Photogrammetria 40, pp 9-19.
- PIKE, R.J. and ROZEMA, W.J. 1975.- *Spectral Analysis of Landforms: Ann. Assoc. Amer. Geog.*, vol. 65, pp. 499-516.
- PIKE, R.J., 1986.- *Geometric signatures of Intermediate-Scale Topography*. Geol. Soc. Amer. Abst. prog., Vol. 18, pp. 171.
- \_\_\_\_\_, 1988.- *The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models*. Mathematical Geol., 20, PP. 491-511.
- RADBRUCH-HALL, D.H., VARNES, D.J. and SAVAGE, W.Z., 1976.- *Gravitational Spreading of steep-sided ridges (Sackung) in Western United States*. Bull. Int. Ass. Engin. Geol. N° 14, pp 23-35.

- RENGERS, N., SOETERS, R., and VAN WESTEN, J. 1992.- *Remote sensing and gis applied to mountain hazard mapping*. Episodes. Vol. 15, N° 1, pp. 36-44.
- REYES, I. 1971.- *El deslizamiento de Costa Rica (k283 + 300 del Ferrocarril Belencito-Paz de Río)*. informe inedito Acerías Paz del Río, S.A. Belencito, Boyacá.
- \_\_\_\_\_, 1983.- *Los deslizamientos en el sector "El Limo" Ferrocarril Belencito-Paz del Río*. Informe inédito Acerías Paz del Río, S.A. Belencito, Boyacá.
- \_\_\_\_\_, 1984.- *Geología de la región de Duitama - Sogamoso - Paz del Río (Departamento de Boyacá)*. Belencito. Inédito.
- \_\_\_\_\_, 1987a.- *Control geotécnico del Ferrocarril de Paz del Río*. VIII CPMSIF-PCSMFE, Cartagena-Colombia.
- \_\_\_\_\_, 1987b.- *El deslizamiento de Carichana, municipio de Paz del Río, Departamento de Boyacá, Acerías Paz del Río, S.A. Belencito*.
- RIAZANOF, S., JULIEN, P., CERVELLE, B., CHOROWICZ, J. 1992.- *Extraction et analyse automatiques d'un réseau hiérarchisé de talwegs. Application A un modèle numérique de terrain dérive d'un couple stéréoscopique SPOT*. Int. J. Remote Sensing, Vol. 13, N° 2, pp. 337-364.
- RITCHIE A.M., 1958.- *Recognition and identification of landslides. Landslides and engineering practices*. Nat. Research Council, Highway Research board Spec. Rept. No 29, pp. 48-68.
- RODRIGUEZ, A. 1987.- *Estudio geológico y mapa de riesgos, quebrada la Chapa, área de los municipios de Socha, Tasco y Paz del Río, Departamento de Boyacá*. Ingeominas.
- SARMIENTO A., 1973.- *Informe sobre la selección del terreno para la construcción de un Instituto Industrial en el area de Paz de Río, Boyacá*. Ingeominas, Bogotá.
- SCANVIC, Y.J., 1983.- *Utilisation de la télédétection dans le ciencias de la terre*. BRGM Mannuels et Methodes Fr., N° 7 pp 823-85.
- SCANVIC, Y.J., GIRAULT F., 1989.- *Imagerie Spot 1 et inventaire des mouvements de terrain: l'exemple de la Paz (Bolivie)*. Revue Photo-interpretation 1989-2, fasc. 1, editions technip, París.
- SCANVIC J. Y. et al, 1990.- *Spot, outil d'aménagement exemple de réalisation par télédetection et analyse multicritère d'une cartographie des zones sensible aux mouvements de terrain le site de la Paz - Bolivie*. Rapport BRGM.
- SCANVIC, J.Y., MOTTI, E., 1990.- *Mapping the vulnerability of ground to landslides. Potential use of Spot stereoscopy data for la Paz, Bolivia*. ERIM, proceeding, 23° symposium on remote sensing of environment, Bangkok, Thailande.
- SIMARD. R., and KRISHNA, V.G., 1983.- *Successful Approach in three dimensional perception of stereo Landsat-MISS Images ouer Cordilleran Relief*. Proceedings of the 9th International Symposium on machine processing of Remotely Sensed Data.
- SIMARD. R.R., OLIVER and E. PINA. 1984.- *Digital Elevation Modeling with Landsat- RBV Data*. Proceedings of Enviroment, París, France. pp 825-834.
- SOCIETE INSTAR. 1990.- *Manuel de référence logiciel VUE3D version 3.1*.

- SOCIETE INSTAR. 1990.- *Manuel de référence logiciel ARBORESCENCE.*
- TAUD, H. and PARROT, J.F., 1991.- *Analyse numérique des formes sub-circulaires sur l'images satellitaires. 2e journées de télédétection ORSTON. "Caractérisation et suivi des milieux terrestres en région aride et tropicale" pp. 293-329.*
- \_\_\_\_\_, 1991/92.- *Analyse numérique des loupes d'arrachement sur les images satellitaires, étude d'une zone à risque des Andes Péruviennes. Photo-interpretation N° 1, pp.9-13.*
- \_\_\_\_\_, 1992.- *Detection of circular structures on satellite images. Int. J. Remote Sensing, Vol 13, N° 2, pp. 319-335.*
- UNGAR, S.G., MERRY, C.J., STRAHLER, A.H., MCKIM, H.L., GAUTHIER, B., WEILL, G. and MILLER, M.S. 1983.- *Extraction of topography from side-looking satellite systems; a case study with SPOT simulation data. Proc. Int. Sysmp. Rem. Sens. Environm. 17, pp. 535-550.*
- ULLOA C, RODRIGUEZ E, GUERRA A., 1973.- *Plancha geológica 172, Paz del Río. Ingeominas.*
- VAN WESTEN C.J., 1989.- *Using the "Ilwis" Geographical information system for a medium scale mountain hazard mapping in the Andean environment, using Geographical Information System. Decision Makers Seminar, 11-16 December 1989 IGAC, Bogotá, Colombia.*
- VARGAS CUERVO G., 1989.- *Estudio geológico-geomorfológico y zonificación de amenazas de la cuenca alta del río Chicamocha entre Socha y Belencito, Departamento de Boyacá, Colombia. Informe Ingeominas. 176 p., tres anexos.*
- \_\_\_\_\_, 1991.- *Methodologie pour l'establissement de cartes de sensibilité aux mouvements de terrain fonde sur L'utilisation d' un couple stereographique Spot Xs/Landsat Memoire DESS. Universite Pierre et Marie Curie, 30 p. Paris (France).*
- \_\_\_\_\_, 1992.- *Los modelos numericos de terreno y su aplicación al estudio de los deslizamientos. Memorias II Simposio Latinoamericano Sobre Riesgo Urbano. II Conferencia Colombiana de Geología Ambiental. 17 p.*
- VARNES, D.J., 1984.- *Landslides hazard zonation. Review of principles and practice. Serie N° 3, UNESCO, Paris, pp. 1-55.*
- VILLIERS DE A. and LAYMARIE, P. 1984.- *Cartographie automatique des situations topographiques en vue d'utilisations géologiques. Computer in Earth Sciences for Natural Resources Characterization (J.J. Royer, Editor), Nancy, pp. 333-350.*
- WELCH, R., 1985.- *Cartographic potential of Spot image data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 51 N° 8, pp 1085 - 109.*