

### **3. BASES CONCEPTUALES Y REVISIÓN DE LITERATURA.**

#### **3.1 CONCEPTUALIZACIÓN DE PAISAJE.**

En 1810, A. Von Humboldt definió el paisaje (Landschaft) como el “carácter íntegro de un trecho de la tierra”. Posteriormente desde la geografía se propone una aproximación horizontal al análisis espacial de los fenómenos naturales y desde la biología una aproximación vertical del análisis funcional de los sistemas naturales. Etter (1990) menciona a Troll y a Bertalanffy: Troll (1950), desarrolló el concepto de Ecotopo o mínima unidad de paisaje con funcionalidad ecológica y Karl Ludwig Von Bertalanffy (1968) desarrolló lo que sería la base epistemológica de la Ecología del Paisaje, la Teoría General de Sistemas (T.G.S.), como una respuesta a las aproximaciones atomistas. La visión de la T.G.S. se basa en la identificación de patrones de organización o la estructura de relaciones entre los elementos componentes de un sistema; la visión reduccionista precedente se basa en la identificación de aspectos comunes y componentes de las estructuras (Capra, 1996; Etter, 1990; Morin, 1990).

Según Etter (1990), son factores formadores del paisaje el clima, la litología, la hidrología, el suelo, la vegetación, la fauna y el hombre, junto con sus actividades. Las interacciones que tienen lugar entre estos factores le confieren una serie de cualidades propias a cada paisaje, de acuerdo con el estado y combinación particular de las variables. Estas propiedades se reflejan en aspectos como la forma del relieve, patrones de drenaje, fisonomía y estructura de la cobertura vegetal, biomasa, productividad del suelo, diversidad biológica y estabilidad de los geoprocesos y bioprocesos. En este sentido, un paisaje puede ser definido como una asociación característica de patrones estructurales y funcionales que responden a la interacción de los factores formadores.

Los paisajes así entendidos tienen dos componentes: el fenosistémico o conjunto de patrones visibles (geoformas, coberturas) y el criptosistémico o grupo de procesos no visibles que subyacen a la expresión fenosistémica.

Esta nueva concepción del paisaje retoma el axioma holístico de Aristóteles “el todo es más que la suma de sus partes” en un sentido cualitativo. Koestler (1968) en Etter (1990), menciona las “estructuras que encapsulan subestructuras”, un “proceso activado por subprocesos” y concluye que no existen en realidad ni todos ni partes en sentido absoluto, sino estructuras intermedias semiautónomas que componen niveles de complejidad creciente. Las características de la estructura emergen de las interacciones como de las cualidades de los elementos que las constituyen (Etter, 1990).

### **3.2 EVOLUCIÓN DEL PAISAJE.**

La geomorfología es la especialidad científica que se ocupa del estudio de las formas de la tierra (geoformas) sobre los continentes y en el interior de las cuencas oceánicas. Incluye el análisis del desarrollo e historia de las superficies planetarias. Está relacionada con procesos geológicos internos de la corteza terrestre y con fuerzas extremadamente dinámicas de viento, agua, ondas y glaciales que modifican las geoformas (Bloom, 1991; Baker, 2001; Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).

El estado de desarrollo actual de la geomorfología ha llevado a hablar de diferentes líneas de investigación de acuerdo con el área de conocimiento (Sala y Batalla, 1996).

- Conceptos y métodos: investiga principios y fundamentos de la geomorfología, métodos y técnicas de observación, descripción, experimentación y análisis.
- Geomorfología estructural: retoma aportes de la geofísica en cuanto a la estructura dinámica de la corteza y estudia las geoformas propiamente dichas.
- Geomorfología dinámica o de procesos: estudia los mecanismos y efectos de los agentes geomorfológicos y de los grandes procesos y formas asociadas.

- Geomorfología climática: se enfoca al estudio de los grandes paisajes como glaciares, periglaciares, templados – húmedos, semi – áridos, áridos, cálidos - húmedos, áreas de montaña (desarrollo altitudinal en contraposición al latitudinal).
- Geomorfología histórica: es el estudio de la evolución en la historia geológica de las formas, se ocupa de la reconstrucción de procesos y paisajes pasados por medio de la interpretación de sus restos y del impacto de los mismos en el relieve actual.
- Geomorfología ambiental: estudia los impactos naturales y antrópicos en el medio. Es de suma importancia el papel que ejercen la corteza terrestre y el relieve en los asentamientos humanos; en este sentido, el aporte de la Hidrología y la Pedología han dado a la Geomorfología una importancia cada vez más relevante en cuanto a su papel en la sociedad, la primera porque de ella procede gran parte de la renovación teórica y metodológica a partir del concepto de sistema y de su aplicación a la cuenca de drenaje; la segunda por sus aportes en cuanto a los procesos de erosión y las subsecuentes metodologías para el control y manejo de pérdida de tierras (Bloom, 1991).
- Geomorfología regional: estudio geomorfológico de grandes extensiones enfocado a regiones naturales o regiones políticas (aunque éstas últimas fragmentan a las primeras limitando un enfoque más coherente).
- Teorema de ergodicidad: los geomorfólogos infieren la naturaleza de la evolución del paisaje por comparación de formas similares de diferente edad y, dada la escala de tiempo humana, una secuencia temporal generalmente no es observada pero puede ser reconstruida a partir de bases teóricas. El concepto fundamental es que el significado de la observación de un hecho individual sobre el tiempo es igual al significado de la observación de muchos hechos individuales en un área: se substituyen observaciones en el tiempo por observaciones en el espacio. Un caso especial de ergodicidad es la alometría o estudio de cambios proporcionales correlacionados con variación de tamaños. La alometría dinámica describe cambios en las relaciones entre partes de un individuo a través del tiempo (p. ej., variaciones en una estación hidroclimática en un intervalo de tiempo). La alometría estática

describe cambios en las relaciones entre miembros de variado tamaño de un grupo en un momento en el tiempo (variaciones a lo largo del perfil de una cuenca en un momento dado). Las relaciones alométricas son relaciones cuantitativas entre formas superficiales de escalamiento no lineal. (Baker, 2001; Sauchyn, 2001; Sala y Batalla, 1996; Wood, 1999).

- Autosimilaridad y autosemejanza: la mayoría de los objetos de la naturaleza tienen un comportamiento que se puede describir con base en los conceptos de la teoría geométrica de la medida y de la geometría fractal (Bloom, 1991; Guzmán et al., 1993).

Se hace a continuación un recorrido por la historia de la evolución del pensamiento en torno a las formas de la superficie terrestre, los conceptos controversiales y la tendencia actual.

### **3.2.1 Aspectos históricos y desarrollo del pensamiento en Geomorfología.**

Entre los griegos Homero (novena centuria a.C), Pitágoras (590-510 a.C), Heródoto (484-426 a.C.) hicieron descripciones de erosión e inundaciones, que están aparentemente en el registro estratigráfico y referenciaron ideas de ciclicidad en la naturaleza, denudación de geformas y un “universo infinito”; en textos de Aristóteles (384-322 a.C) aparecen datos sobre la acción de los ríos y el mar como responsable del nivelamiento del globo y en Estrabon (63 a.C. - 21 a.C.) la idea de una formación del relieve mediante procesos de deformación. Más adelante el italiano Leonardo Da Vinci detectó tanto la lentitud de los procesos de erosión como la importancia de la acción fluvial. Los conceptos que dominaron durante siglos partieron de los textos bíblicos, es el caso del *creacionismo* (relieve como creación divina) y el *catastrofismo* (relieve como producto de grandes catástrofes, principalmente el diluvio universal). Con relación a este último, el *neptunismo* postulado por Werner (1749 – 1818) introdujo el origen marino de las rocas por sedimentación seguida de compresión; aunque ya en 1669 Nicolaus Steno's Prodomus había hablado del *principio de superposición* (las capas más antiguas se encuentran en el fondo sucedidas progresivamente por capas más jóvenes), del

*principio de horizontalidad original* (los sedimentos se acumulan horizontalmente) y del *principio de continuidad lateral* (cuerpos sedimentarios formados en lentes), él también creyó en una tierra joven y en unos paisajes formados a partir del diluvio (Baker, 2001; Chaison, 2001; Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).

El surgimiento y consolidación de la Geomorfología como una ciencia independiente de la geología y de la geofísica se dió a finales del siglo XIX y a lo largo del siglo XX; por la década de 1970, la geomorfología tuvo un crecimiento hacia la incorporación de problemas relacionados a los procesos formadores del paisaje, incluyendo movimientos de masa y procesos costeros, todos los cuales afectan a las personas que viven en regiones con cierta susceptibilidad.

Las teorías y paradigmas que reflejan el desarrollo del pensamiento alrededor de las geoformas y del paisaje evolucionaron de la descripción puramente cualitativa al modelado matemático y la teoría de sistemas; de la visión regional y planetaria a la cuenca hidrográfica como unidad fundamental y, finalmente, han retornado a una visión planetaria a partir del surgimiento de las técnicas de teledetección y de los Sistemas de Información Geográfica. En los siguientes numerales se hace un recorrido por los postulados y teorías que han motivado su desarrollo y por algunos de los conceptos que los fundamentan.

### **3.2.2 Doctrinas y postulados.**

#### **Cuvier.**

Sintetizador y defensor de la doctrina del *Catastrofismo*, que afirma que en intervalos de la historia de la tierra todas las cosas vivas han sido destruidas por cataclismos, como flujos y sísmos y han sido reemplazadas por poblaciones completamente diferentes. Durante estos cataclismos fueron formadas las características de la superficie de la tierra, tales como montañas y valles. El catastrofismo fue correlacionado con doctrinas

religiosas y permaneció por algún tiempo como la interpretación de la historia de la tierra aceptada por la gran mayoría de geólogos. Georges Cuvier, se posicionó como el geólogo más importante de su tiempo ("Catastrophism." Infoplease Dictionary © 2000).

### **Hutton.**

El geólogo escocés James Hutton concibe el *Uniformitarianismo* en oposición al Catastrofismo en su *Theory of the Earth* (1785, 1795), afirma que los cambios en la superficie de la tierra que ocurrieron en el tiempo geológico pasado se refieren a las mismas causas de los cambios que ahora son producidos sobre la superficie de la tierra. Esta doctrina fue presentada posteriormente por John Playfair en su *Illustrations of the Huttonian Theory* (1802). El uniformitarianismo, que fue ampliamente aceptado como un resultado de los esfuerzos de Lyell, está sintetizado en la frase de Geikie (1897) "el presente es la clave del pasado"; la historia de la tierra puede ser explicada a partir de las actuales observaciones y relaciones (causas) ("Uniformitarianism." Infoplease Dictionary © 2000, Sauchyn. 2001).

### **Lyell.**

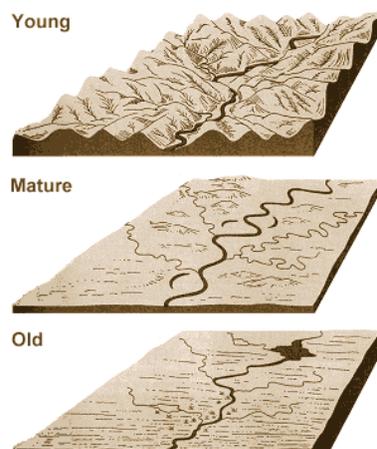
El geólogo británico Sir Charles Lyell fue un gran abanderado del Uniformitarianismo, y quién lo popularizó. Concibió la idea según la cual todos los procesos (por ejemplo biológicos y geológicos) fueron delicadamente balanceados. Su trabajo influenció fuertemente las ideas científicas en el siglo XIX, no solo específicamente en el campo de la geología: él facilitó la aceptación posterior de la teoría de la evolución de las especies de Charles Darwin ("Lyell, Sir Charles." Infoplease Dictionary © 2000).

### **Davis.**

El *Ciclo Geográfico* (llamado también ciclo de erosión o teoría de la peneplanización) de William Morris Davis, fue publicado entre 1880 y 1938. Fue el primer modelo de evolución del paisaje de amplia aceptación: *las geoforma a través de periodos de tiempo geológicos, pasarían por estados de juventud, madurez y senectud por acción de*

*agentes erosivos*, como está representado en Figura 3. Influenciado por Lyell y Darwin, fundamentó su teoría en los conceptos de estructura, proceso y tiempo: la estructura fue considerada como una condición inicial (fuera del alcance de su modelo); los procesos fueron la suma de meteorización y transporte en el contexto de un clima “normal” (temperatura húmeda, procesos fluviales predominantes), los procesos ligados a otros climas se llamaron accidentales; el tiempo fue el tema central en el sentido del desarrollo relativo de las geoformas para completar el ciclo geográfico: *Las geoformas son el resultado de procesos constructivos o destructivos actuando sobre las estructuras en un lapso determinado de tiempo.*

Otras investigaciones indicaron que la evolución del paisaje no es cíclica y que los términos “juventud”, “madurez” y “senectud” aplicados a un paisaje son puramente cualitativo. (Bloom, 1991; Flórez, 1994; Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).



**Figura 3.** Estados del paisaje en un ciclo fluvial de erosión.

Modelo propuesto por William Morris Davis (Geomorphlist, 2000).

### **Gilbert.**

Contemporáneo de Davis, desarrolló la idea de *Tierra Esculpida*. En sus apreciaciones aparece el concepto de sistema en el sentido de que todo cambio es siempre

compensado y, por tanto, en el caso de ríos y vertientes, existe siempre un estado de equilibrio dinámico. Hizo énfasis en la acción de los procesos externos sobre las estructuras geológicas y consideró las formas del terreno como el resultado de la tensión entre la fuerza de los agentes erosivos y la resistencia de las rocas (Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).

### **Penck.**

En su obra *Die Morphologische Analyse (1924)* postuló la idea de una relación entre las geoformas y los movimientos de la corteza; relacionó la forma con la proporción de levantamiento y rechazó la afirmación de Davis acerca de que el levantamiento es seguido por la erosión en una corteza estable; él no vio una secuencia de formas desarrolladas sino varias posibles secuencias de acuerdo con las proporciones diferenciales de levantamiento y erosión. Fue cuidadoso en definir su modelo como sub – aéreo, excluyendo procesos eólicos y glaciares y variabilidad climática. Enfocó su análisis al modelamiento de perfiles de talud para diferentes combinaciones de erosión de ríos, levantamientos y resistencia de rocas, supone que las rocas mas fuertes requieren taludes más empinados para la misma proporción de denudación; modeló el perfil de flujo longitudinal controlado adicionalmente por la descarga de flujo. Definió tres categorías de geoformas de acuerdo con la historia tectónica (con un clima “normal”): plegamiento de fuerzas laterales (orogénesis), formación de cúpulas o domos sin plegamiento (epirogénesis) y regiones estables. Concibió tres geoformas resultantes de levantamientos, lentos, intermedios y rápidos, que morfológicamente fueron similares a los estados de denudación postulados por Davis, aunque con base en la historia tectónica, considerando la evolución de los paisajes desde el punto de vista tiempo independiente (Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).

### **King.**

Formado en la escuela davisiana, no estuvo de acuerdo con muchas de sus apreciaciones; postuló que el estudio de la geomorfología debe fundamentarse en el

contexto de la época estudiada. El modelo de King (1953) se basa en un perfil de talud consistente en cuatro segmentos, alguno de los cuales pueden no estar presente:

- Talud liso: segmento convexo de una cresta, dominado por deslizamientos de suelo de un manto desgastado; se requiere un incremento de ángulo de talud para transportar grandes cantidades de escombros hacia el pie del mismo.
- Cara Libre: afloramiento de roca madre; retiro paralelo de material meteorizado y remoción uniforme; puede no ocurrir en zonas de bajo relieve.
- Talud de escombros: los escombros de cara libre descansan en un ángulo de reposo, no esconden la cara libre pero se retiran con ésta.
- Decaimiento de talud: perfil suave y cóncavo controlado por lámina lavada de sedimentos sobre roca madre erodada (Sauchyn. 2001).

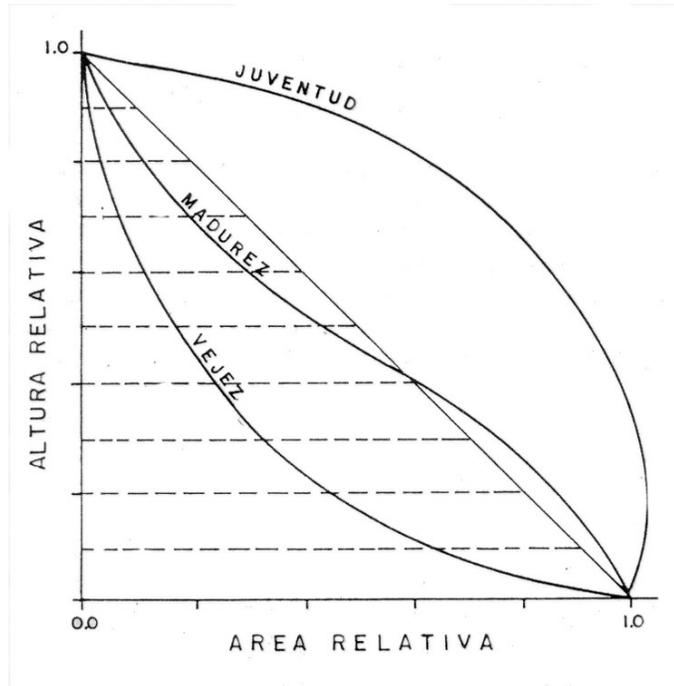
### **Horton.**

Introdujo el nivel cuantitativo a los estudios geomorfológicos en 1945; desarrolló una descripción cuantitativa de la red de drenaje fluvial con la finalidad de hacer que fuera posible predecir su comportamiento. Elaboró un modelo de escorrentía y erosión del agua en las vertientes y de los procesos hidráulicos (Sala y Batalla, 1996).

### **Strahler.**

Algunos afirman que sus postulados, expuestos en 1952, pueden considerarse las bases de la geomorfología moderna: énfasis en el estudio de los procesos que rigen el modelado de las geformas, enfoque de carácter dinámico, es decir, con base en los principios de la física, formulación de modelos matemáticos, deducción a partir de la observación y análisis en términos de sistemas abiertos. Con base en sus observaciones (1957), concluye que la curva hipsométrica de un paisaje “joven” es convexa, la de un paisaje “maduro” es más o menos recta y la de un paisaje “viejo” es

cóncava, como se observa en la Figura 4. (Sala y Batalla, 1996; Flórez, 1994).



**Figura 4.** Curvas hipsométricas típicas.

Según Strahler (1957). En línea interrumpida está el triángulo isósceles (Flórez A., 1994: p.70).

### **Hack.**

Hizo énfasis en el estudio de procesos (1960). Fuertemente influenciado por Gilbert, sus deducciones se basan en el concepto de equilibrio dinámico y procesos tiempo - independientes. Según este supuesto todas las formas del terreno están mutuamente ajustadas, de manera que reflejan el equilibrio existente entre la estructura geológica y el proceso de modelado dominante. Esta forma o formas, producto del equilibrio, prevalecen mientras prevalezcan el o los procesos que las determinan (Sauchyn, 2001).

## **Scheidegger.**

Postuló (1970) que los paisajes como sistemas están sujetos a un número relativamente pequeño de principios que gobiernan su evolución, los cuales son medibles:

- Principio del antagonismo: un paisaje representa el equilibrio instantáneo en la interacción de dos procesos antagónicos, los procesos endógenos y exógenos. Los procesos exógenos ocurren esencialmente al azar (ligados a la turbulencia en el aire y en el agua) y los endógenos son no aleatorios (ligados a la tectónica de placas). Los parámetros de intensidad de los procesos son básicamente velocidades de levantamiento y denudación.
- Principio de la inestabilidad: el equilibrio dinámico de un paisaje es generalmente inestable; las formas individuales del paisaje cambian y cualquier desviación de la uniformidad tiende a crecer, es decir que la tasa de crecimiento de una desviación de la uniformidad aumenta con la cantidad de desviación que ya había sido alcanzada. Por ejemplo, las tasas de erosión pueden crecer con el tamaño de una depresión o con la pendiente de una vertiente.
- Principio de la catena: el paisaje global se compone de catenas (secuencias precisas), cada una de las cuales consiste en una cima plana, una parte media abrupta y una parte inferior plana constituyendo una secuencia. A mayor pendiente, más rápido retrocede la vertiente, las partes planas de arriba y abajo permanecen más tiempo.
- Principio de selección (enunciado inicialmente por Gerber, 1969): en la acción ocurre cierta direccionalidad. Las formas naturales y las configuraciones en un paisaje son primariamente aquéllas que son más estables bajo su propio peso.
- Principio del control estructural: muchas formas están diseñadas por procesos tectónicos de profundidad. La erosión ocurre preferencialmente a lo largo de las direcciones del esfuerzo del campo de estrés neotectónico, por lo tanto la orientación de las formas erosionales tiende a alinearse en esas direcciones. Las

direcciones del esfuerzo del campo de estrés neotectónico son aquellas direcciones en que el material está más cerca del límite de fractura. Los procesos exógenos actúan como un generador adicional de estrés y por consiguiente la ruptura ocurre en la dirección del esfuerzo preexistente (Flórez, 1994).

### **Kirkby.**

El *Modelamiento determinístico de proceso – respuesta* de Kirkby se fundamentó en una ecuación de balance de masas. Modeló el talud como un perfil continuo en el cual la elevación cambia en función de procesos de transporte químico y mecánico del suelo. Consideró una erosión límite y un submodelo hidrológico con base en la precipitación anual y el análisis de movimientos de masa (Sauchyn, 2001).

### **Anhert.**

Anhert postuló un *Modelo matemático de evolución de pendientes* (1980) con base en el concepto de equilibrio central, sustitución y remoción de escombros. Modeló espacial y temporalmente tasas variables de producción de erosión, transporte y depositación de elementos del paisaje. Dependiendo del gradiente de la pendiente y la fluidez del material, los movimientos de masa lentos serían viscosos o plásticos. En ambos casos habría un ángulo de talud crítico que para el caso de masa viscosa sería cero. El desgaste no sería acumulativo, así se tendría un material removido a un nivel próximo más bajo donde el gradiente de la pendiente sería menor del umbral (Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).

### **Slaymaker.**

Propone clasificar los experimentos de campo de la siguiente manera: mediciones de evolución de una forma del terreno, mediciones de los cambios morfológicos en diferentes conjuntos, mediciones de la acción de un proceso bajo el control artificial de

alguna de las variables (Sala y Batalla, 1996).

### **Álvarez.**

La interpretación de Cuvier sobre los registros geológicos en términos de discontinuidades o catástrofes fue más o menos abortada durante el S XIX debido al éxito del Uniformitarismo de Lyell y de la Teoría de la Evolución Darwiniana, pero recientes teorías sobre impactos de meteoritos, asteroides y cometas que habrían provocado una gran destrucción, son semejantes a las ideas del Catastrofismo. Luis Álvarez y su grupo de investigadores publicaron (1980) sobre sus hallazgos de altos niveles del elemento Iridio en un estrato de origen marino que se encontraba separando los sedimentos del Cretáceo y el Terciario, lo cual podría ser una evidencia de impactos catastróficos ("mass extinction." Infoplease Dictionary © 2000).

### **Bertalanffy.**

El padre de la Teoría General de Sistemas, Karl Ludwig Von Bertalanffy, introdujo sus ideas como una respuesta a las aproximaciones atomistas de la explicación de la naturaleza. Con el gradual éxito de esta teoría, las tendencias de las diferentes escuelas de geomorfología no cambiaron: estudio de los procesos y su mecánica para la escuela anglosajona, estudios climáticos para la escuela europea, temas estructurales y aplicados para la escuela soviética (Sala y Batalla, 1996). Pero a partir de la definición de sistema como grupo de objetos junto con sus relaciones y atributos, el paisaje viene a considerarse como un sistema donde los objetos son los elementos en una escala particular, las relaciones son los procesos geomorfológicos y los atributos son las propiedades físicas de los elementos. Los sistemas pueden ser aislados (condiciones ideales inexistentes en la naturaleza), cerrados (intercambio de energía pero no de masa) o abiertos (intercambio libre de masa y energía). Un sistema aislado es la base del concepto de máxima entropía, en tanto que un sistema abierto tiende a autoajustarse y a permanecer cerca del equilibrio (mantiene una condición constante a pesar de su dinámica; comportamiento que es llamado dinámica estable). Cada uno de los

procesos geomorfológicos constituye sistemas abiertos y por lo tanto las formas que modelan han de entenderse como en equilibrio dinámico (Etter, 1990; Flórez, 1994; Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).

## **NASA.**

En la actualidad, las investigaciones sobre geomorfología del National Aeronautic and Space Administration –NASA- están orientadas en una perspectiva de “mega geomorfología”, término que se introdujo en 1981. Esto significa un retorno de los geomorfólogos al estudio de los fenómenos en escalas espaciales del rango de regiones, continentes y planetas, con ayuda de la Teledetección Espacial. El programa espacial inicialmente llamado “Habitabilidad Global” surgió en 1982 de la idea de establecer un programa de cooperación internacional que entendiera a la Tierra como un sistema (Baker, 2001). Más recientemente las investigaciones se han orientado hacia el concepto de interferometría que desde el punto de vista geofísico conlleva a aplicaciones como el monitoreo de deformaciones de la corteza ocasionadas por sismos, erupciones volcánicas u otros procesos tectónicos. Desde el punto de vista geológico y medioambiental, permite el monitoreo de riesgos naturales tales como subsidencia o movimientos de masa (Baker, 2001; Massonnet, 1998).

### **3.3 EVOLUCIÓN DEL PAISAJE EN AMBIENTE TROPICAL DE MONTAÑA.**

La morfología de las zonas montañosas tropicales está caracterizada por un complejo mosaico de materiales y formas superficiales producto de la también compleja interacción entre sus factores formadores.

El estudio particular de geomorfología tropical se fundamenta en el balance entre procesos de desgaste y acumulación de materiales residuales y mecanismos de remoción y deposición que operan sobre estos productos residuales (movimientos de masa, sedimentación, etc.). Aunque algunos estudios han concluido que muchos de los procesos son químicos, o más precisamente bioquímicos - “la erosión química es el

más poderoso medio de diferenciación vertical del relieve en ambientes tropicales” -, son escasos los estudios conocidos sobre patrones e interacciones que intervienen en la alteración química de las rocas y la formación de suelo en ambientes tropicales (Thomas, 1994).

Los perfiles de meteorización involucran largos períodos de tiempo durante los cuales su desarrollo variará considerablemente. La precipitación y el brillo solar característicos de las áreas tropicales son factores críticos en la meteorización de las rocas porque constituye el control primario sobre la temperatura, la disponibilidad de agua y ácido orgánico derivado de la vegetación y del suelo. Todo lo que se sabe acerca del medio ambiente caliente y húmedo indica condiciones favorables para la meteorización química (Thomas, 1994).

Los estudios en África y América se han limitado a casos aislados; ambientes pobremente explorados en el sentido geomorfológico son los Andes y el Chocó Biogeográfico, no obstante el particular comportamiento climático de este último: precipitaciones del orden de los 300 a los 600 mm mensuales, entre 30 y 100 horas con sol mensuales, temperaturas del orden de 20 a 30 °C, evaporación entre 10 y 80 mm mensuales y humedad relativa entre el 83 % y el 96 % (CVC, 1997). Trojer (1958) planteó que la interpretación promedio de los sistemas dinámicos (en este caso el clima) permite determinar características importantes adicionales debido al reconocimiento de las causas físicas intermedias: “...éstos fenómenos locales, como todos los procesos de la atmósfera obedecen a las leyes de la física, lo cual permite generalizaciones por analogías”; sin embargo él mismo concluía “...en las condiciones actuales, es difícil que por medio de una interpretación dinámica se pueda obtener una descripción completa del clima”.

La relación entre precipitación y evapotranspiración controla muchos procesos geomorfológicos en el trópico; la mayoría de los bosques húmedos exhiben un balance hídrico anual positivo. El agua subterránea o almacenada probablemente inflencie más que ningún otro factor climático el potencial de desgaste de la roca en el trópico, por la

infiltración de grandes cantidades de agua (Thomas, 1994).

La importancia de la precipitación como factor modelador del paisaje no se reduce a su influencia en los procesos de erosión y sedimentación. De acuerdo con la experiencia costarricense y colombiana, la intensidad y la frecuencia de lluvias son factores fundamentales en la cantidad y distribución de los movimientos de masa (Mora y Mora, 1994; Restrepo y Velásquez, 1997). Los suelos residuales permanecen usualmente en estado de saturación parcial con una fase de aire continua entre sus intersticios; la presión de poros por contenido de aire se aproxima a la presión atmosférica como resultado de la capilaridad en los poros más pequeños, confiriéndole al sistema un estado de equilibrio. Esto implica efectividad en la absorción de humedad. La pérdida de capacidad de absorción de agua posterior a una fuerte lluvia predispone muchos taludes a falla, puesto que aquella implica mayor densidad, mayor presión de poros por contenido de agua y pérdida de cohesión (Thomas, 1994).

Por otra parte es importante el papel de las pendientes en la activación de eventos modeladores como movimientos de masa. Estudios alrededor del globo llevaron a conclusiones como las siguientes: taludes menores o iguales a 20 grados son aparentemente estables pero no pueden ser considerados 100 % seguros durante eventos extremos; taludes entre 26 y 28 grados se caracterizan por su gran inestabilidad; entre 38 y 50 grados son propicios para eventos de flujos de escombros en Puerto Rico; los deslizamientos en el Japón son comunes en el rango de 35 a 40 grados; en 1982 se presentó en el Gunung Mulu National Park el deslizamiento planar más grande sobre roca madre en un talud de 40 a 50 grados; pendientes más escarpadas pueden ser más o menos inestables dependiendo de la profundidad del saprolito (Thomas, 1994). En todo caso, es necesario evaluar las condiciones locales de las pendientes y su relación con la frecuencia y distribución de los movimientos de masa. En el Capítulo 6 se relacionan algunos trabajos desarrollados en los Andes colombianos.

La tectónica es un proceso global a gran escala también presente en el trópico. La

sismicidad se suma a las variables climáticas, topográficas y geológicas, adicionando complejidad a los procesos de cambio de las geoformas tropicales.

En el trópico húmedo de montaña colombiano convergen factores climáticos, topográficos, litológicos y ecosistémicos que se conjugan con procesos tectónicos haciendo de éste una unidad de paisaje con diversos niveles de complejidad que debe ser estudiada con prudencia; la extrapolación a estas áreas de los resultados de estudios en otros ambientes es un ejercicio arriesgado.

### **3.4 MOVIMIENTOS DE MASA.**

#### **3.4.1 Definición.**

Muchos investigadores tienen su propia definición de movimientos de masa. Medina (1991) los define como fenómenos geológicos que en su mecanismo involucran la movilización de volúmenes de materiales hacia niveles inferiores, bajo la acción directa de la gravitación terrestre. Para Villota (1991), son procesos denudativos relacionados con desplazamientos o transposición más o menos rápida de volúmenes variables de suelo, roca o detritos sobre una pendiente, por incidencia de fuerzas de desplazamiento y agentes geomorfológicos. Suárez (1998) afirma que son procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas que corresponden generalmente a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforma un talud de roca, suelo natural, relleno artificial o una combinación de ellos. Los movimientos ocurren generalmente a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos. Algunos segmentos de la ladera pueden moverse hacia arriba mientras otros lo hacen hacia abajo.

Estos movimientos de masa ocurren sobre una ladera o talud, términos que son usados indistintamente para referirse a una masa de tierra con cierta pendiente. La definición de Shuk (1990) se refiere a ellos como los tramos que partiendo de la cresta de los altos

topográficos (cerros, montes, riscos, etc.) llegan hasta los canales hidrográficos ubicados en su parte inferior o base; Bloom (1991) dice que la mayoría de las geoformas consisten en grandes curvas y superficies de talud formadas por movimientos de masa y la mayoría de las laderas son geoformas que resultan del paso de los ríos cortando los valles. Para Suárez (1998), una ladera o talud natural es una masa de tierra no plana sino con pendiente o cambio de altura significativo que se define como ladera si su conformación tuvo como origen un proceso natural y como talud si se conformó de manera artificial. Para Bloom (1991), los taludes son superficies irregulares que no pueden ser descritos por una simple ecuación matemática. El mejor mapa topográfico es solamente una aproximación de las infinitas irregularidades de una ladera.

### **3.5 CLASIFICACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE MASA.**

Puede decirse que existe tanta diversidad de clasificaciones de movimientos de masa, como investigadores del tema; tal vez por ello no sea raro encontrar contradicciones e inconsistencias entre ellas. La mayoría de las clasificaciones consideran dos variables básicas: el tipo de movimiento y el tipo de material involucrado.

Según Suárez (1998), se deben considerar cuatro etapas diferentes en la clasificación de los movimientos:

- Etapa de deterioro o antes de la falla, durante la cual el suelo está esencialmente intacto.
- Etapa de falla, caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.
- Etapa post-falla, incluye los movimientos de la masa involucrada en un movimiento de masa desde el momento de la falla y hasta el preciso instante en el cual se detiene totalmente.

- La etapa de posible reactivación en la cual pueden ocurrir movimientos que pueden, considerarse como una nueva falla, e incluye las tres etapas anteriores.

Millán (1998), afirma que se pueden complementar las clasificaciones al considerar elementos como: la tasa de movimiento, morfometría de área afectada y depósito resultante, la edad, el grado de alteración de la masa desplazada, las causas, el grado de desarrollo y el estado de actividad.

En Colombia la clasificación más usada es la de Varnes (1978), definida básicamente por el tipo de material y el tipo de movimiento. A continuación se presenta la adaptación de Suárez (1998), complementada con apreciaciones de otros autores:

### **3.5.1 Caídas.**

En las caídas una masa de cualquier tamaño se desprende de un talud de pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte y desciende principalmente a través del aire por caída libre, a saltos o rodando. (Suárez, 1998). Soeters y Van Westen (1996) afirman que están siempre relacionadas con pendientes mayores a 40 grados, donde la roca está directamente expuesta. Las caídas son comúnmente controladas por discontinuidades en la roca y la acumulación de talus en la parte inferior de la ladera es un fenómeno asociado a estos movimientos.

Respecto al material involucrado, Suárez (1998) dice que las caídas de roca corresponden a bloques de roca relativamente sana. Las caídas de residuos o detritos están compuestos por fragmentos de materiales pétreos y las caídas de tierra corresponden a materiales compuestos de partículas pequeñas de suelo o masas blandas.

Vargas (1999) en su adaptación de Varnes (1978), divide las caídas en tres categorías:

- Caídas: movimientos intermitentes en caída libre, asociadas a escarpes de rocas duras y fracturadas, el volumen de material es bajo y el tamaño varía de cantos a bloques.
- Desprendimientos: disgregación de una masa litológica, ya sea de suelo o de roca fracturada, mediante un descenso súbito con fragmentación del material a lo largo de la ladera.
- Desplomes: disgregación de una masa litológica, generalmente rocosa y de volumen considerable, que forma un depósito de material grueso en la base.

### **3.5.2 Volcamiento o inclinación.**

Consiste en una rotación hacia adelante de una unidad o unidades de material térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad que generalmente ocurre en las formaciones rocosas. Las fuerzas que lo producen son generadas por las unidades adyacentes, el agua en las grietas o juntas, expansiones y los movimientos sísmicos (Suárez, 1998).

Se presentan con mayor facilidad en regiones donde existen diaclasas inclinadas excesivamente con una falla alineada aproximadamente paralela al frente de la ladera. (Soeters and Van Westen, 1996).

### **3.5.3 Deslizamientos.**

Este movimiento consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies. El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a la largo de toda la superficie de falla. Los deslizamientos pueden ser de una sola masa que se mueve, o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes (Suárez, 1998).

Los deslizamientos se dividen en dos subtipos, de acuerdo con el mecanismo de ruptura:

- Deslizamiento rotacional: la superficie de falla está formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo en movimiento. Posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El deslizamiento rotacional presenta en su parte superior hundimientos y en su parte inferior se producen flujos de materiales que se acumulan en la pata de la ladera o son transportados (Suárez, 1998). Soeters y Van Westen (1996) dicen que un deslizamiento rotacional está principalmente asociado con pendientes entre 20 y 40 grados y su relación profundidad-longitud D/L (Depth/Length), es del orden de 0.3 a 0.1. Además ocurren usualmente en suelos homogéneos, sean naturales o artificiales (Suárez, 1998).
- Deslizamiento traslacional ó planar: el movimiento de la masa se desplaza hacia fuera o hacia abajo a lo largo de una superficie mas o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación. Son generalmente controlados por superficies de debilidad tales como diaclasas, fallas, planos de estratificación (Suárez, 1998).

Suárez también tipifica las subclases de deslizamiento traslacional: si ocurren sobre discontinuidades sencillas en roca se les conoce como deslizamientos de bloque, cuando ocurren a lo largo de dos discontinuidades se les conoce como cuñas de roca (Suárez, 1998).

Suárez (1998) y Soeters and Van Westen (1996) coinciden al afirmar que la relación D/L es mucho menor en deslizamientos traslacionales que en rotacionales, generalmente menos que 0.1 y que este tipo de deslizamiento es propio de ambiente rocosos.

#### **3.5.4 Esparcimientos laterales.**

El modo de movimiento dominante es la extensión lateral acomodada por fracturas de corte y tensión. El mecanismo de falla puede incluir elementos no solo de rotación y traslación, sino también de flujo (Suárez, 1998). Soeters y Van Westen (1996) explican mejor este proceso: son movimientos de masa que ocurren en laderas suaves o moderadas donde una deformación plástica lenta ocurre en una subsuperficie horizontal extendida sobre una capa más coherente. Esta capa superior es rota por los movimientos del material subyacente y se mueve y desliza hacia afuera sobre la capa subyacente. Los esparcimientos laterales pueden ocurrir en masas de roca sobre suelos plásticos, como también en suelos finos (Suárez, 1998; Soeters and Van Westen, 1996).

#### **3.5.5 Flujos.**

En los flujos existen movimientos laterales de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla (Suárez, 1998). Generalmente asociados a la presencia de agua, se subdividen en:

- Flujos de roca. Comprenden las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas. Este tipo de movimiento ocurre en laderas muy empinadas mayores a 45 grados. Son ligeramente húmedos y de velocidad rápida a muy rápida (Suárez, 1998).
- Flujos de detritos (escombros). Se pueden considerar como la terminación de un flujo de rocas; fragmentos de roca se van formando debido al transporte del material. (Suárez, 1998).
- Flujo de lodo: los materiales transportados son muy finos y el contenido de humedad es muy alto. Suárez caracteriza este movimiento diciendo, “un flujo de lodo posee tres unidades morfológicas: un área de origen que generalmente es un

deslizamiento, un camino o canal de flujo y finalmente una zona de acumulación, a semejanza de un abanico de depositación” (Suárez, 1998).

### **3.5.6 Avalanchas.**

Son movimientos de una masa de hielo o nieve sobre una ladera, asociada a zonas glaciares de alta montaña. El principal agente es la gravedad y pueden variar desde un pequeño flujo hasta una gigantesca masa destructiva (Vargas, 1999).

### **3.5.7 Movimientos complejos.**

Se les denomina complejos, debido a que se producen por una combinación de dos o más de los tipos descritos anteriormente (Suárez, 1998).

Un movimiento de masa, no incluido en esta clasificación, es el conocido como reptación (creep), que por sí sólo puede afectar grandes áreas y preceder otros tipos de movimientos de masa. Pueden ser movimientos desde lentos hasta extremadamente lentos (unos pocos centímetros por año) del suelo subsuperficial, sin una superficie de falla definida (Suárez, 1988).

Keefer (1984), al exponer las características de los movimientos de masa, también realiza una adaptación de la clasificación de Varnes (1978), en la que, además del tipo de material y el tipo de movimiento, tiene en cuenta otros parámetros como el grado de ruptura interna, contenido de agua, velocidad del movimiento y profundidad. Esta clasificación se presenta en la tabla 1 y permite comparar los diferentes tipos entre sí.

**Tabla 1.** Características de los movimientos de masa inducidos por sismos.

Nombre	Tipo de Movimiento	Ruptura Interna <sup>1</sup>	Humedad <sup>2</sup>				Velocidad <sup>3</sup>	Profundidad <sup>4</sup>
			D	U	PS	S		
<b>DESGLIZAMIENTOS EN ROCA</b>								
<b>Caídas y Rupturas</b>								
Caída de Roca	Rebote, rodamiento o caída libre.	Alta o muy alta	X	X	X	X	Extremadamente rápido	Superficial
Deslizamiento de Roca	Deslizamiento traslacional sobre superficie de cizalla	Alta	X	X	X	X	Rápido a extremadamente rápido	Superficial
Avalancha de Roca	Flujo de fragmentos de roca	Muy alta	X	X	X	X	Extremadamente Rápido	Profundo
<b>Deslizamientos Coherentes</b>								
Desplome de Roca	Deslizamiento sobre una superficie de cizalla con una componente rotacional	Escasa a moderada	?	X	X	X	Lento a rápido	Profundo
Deslizamiento de Bloque de Roca	Deslizamiento traslacional sobre una superficie de cizalla	Escasa a moderada	?	X	X	X	Lento a rápido	Profundo
<b>DESGLIZAMIENTOS EN SUELO</b>								
<b>Caídas y Rupturas</b>								
Caídas de Suelo	Rebote, rodamiento o caída libre.	Alta o muy alta	X	X	X	X	Extremadamente rápido	Superficial
Rupturas de Suelo	Deslizamiento traslacional sobre superficie de cizalla o sobre una zona debilitada.	Alta	X	X	X	X	Moderada a rápido	Superficial
Avalanchas de Suelo	Deslizamiento traslacional con flujo	Muy alta	X	X	X	X	Muy rápido a extremadamente rápido	Superficial
<b>Deslizamientos Coherentes</b>								
Desplomes de Suelo	Deslizamiento sobre una superficie de cizalla con una componente rotacional	Escasa a moderada	?	X	X	X	Lento a rápido	Profundo
Deslizamiento de Bloque de Suelo	Deslizamiento traslacional sobre una superficie de cizalla	Escasa a moderada	?	?	X	X	Lento a muy rápido	Profundo
Flujos de Tierra Lentos	Deslizamiento traslacional sobre una superficie de cizalla con un flujo interno mínimo	Escasa			X	X	Muy lento a moderado	Generalmente superficial.
<b>Desprendimientos Laterales y Flujos</b>								
Desprendimientos Laterales de Suelo	Traslación sobre una zona de materiales blandos.	Generalmente Moderada			X	X	Muy rápido	Variable

Flujos de Suelo Rápido	Flujos	Muy alta	?	?	?	X	Muy rápido a extremadamente rápido	Superficial.
Deslizamientos Subacuosos	Complejo. Desprendimiento lateral y/o flujos. Ocasionalmente desplomes y deslizamientos de desplomes.	Generalmente Alta			X	X	Generalmente rápido a extremadamente rápido	Variable

Traducido de Keefer (1984) según Varnes (1978).

1. Ruptura interna: "Escasa" significa que el movimiento de masa consiste de uno o unos pocos bloques coherentes; "Moderada", varios bloques coherentes; "Alta" significa numerosos pequeños bloques, granos individuales o fragmentos de roca; "Muy Alta" significa completa desagregación en granos finos o pequeños fragmentos de roca.

2. Contenido de Humedad: D significa Seco; U significa Mojado pero no saturado; PS significa Parcialmente saturado; S significa Saturado.

3. Velocidad: "Extremadamente Lento" significa < 0.6 m/año; "Muy Lento" significa entre 0.6 y 1.5 m/año; "Lento" significa entre 1.5 m/año y 1.5 m/mes; "Moderada" significa entre 1.5 m/mes y 1.5 m/día; "Rápido" significa entre 1.5 m/día y 0.3 m/minuto; "Muy rápido" significa entre 0.3 m/minuto y 3 m/seg; "Extremadamente rápido" significa > 3 m/seg.

4. Profundidad: "Superficial" significa espesor < 3 metros; "Profundo" significa espesor > 3 metros.

### 3.6 FACTORES QUE CONTROLAN LA ESTABILIDAD.

La distribución espacial y temporal de los movimientos de masa está condicionada por la presencia de diversos factores, propios de la ladera y externos a ella.

Suárez (1998), agrupa estos factores en tres grupos:

- Condiciones originales del talud, que determinan la susceptibilidad al deterioro.
- Factores de deterioro, que producen una modificación lenta de las condiciones originales del talud y son capaces de producir movimientos leves.
- Factores detonantes, los que activan el movimiento; pueden traslaparse con los factores de deterioro.

Otros autores como Mora y Vahrson (1993), Soeters and Van Westen (1996) distinguen solo dos tipos de factores, los de susceptibilidad y los de disparo. Mora y Vahrson

(1993) los definen así:

- Factores de susceptibilidad: aquellos que intrínsecamente forman parte de las propiedades y comportamiento del medio, es decir, que constituyen los elementos pasivos. Tal es el caso del relieve del terreno, su constitución geológica y las condiciones naturales de humedad.
- Factores de disparo: los que inducen desde el exterior, hacia un comportamiento dinámico activo que, a partir de las condiciones iniciales generarán, con mayor o menor intensidad, los fenómenos de movilización. Se trata de la intensidad de los sismos y lluvias (Mora y Vahrson, 1993).

### **3.6.1 Factores de susceptibilidad.**

- Topografía: son las características morfológicas de la superficie terrestre. En el proceso de los movimientos de masa, interesan parámetros como la pendiente, altura, amplitud de la ladera, éstas nos dan una idea del grado de equilibrio de los materiales que la componen. Por ejemplo, se espera que ocurran movimientos de masa en pendiente moderadas a muy fuertes (Medina, 1991).
- Constitución geológica: tipo de material que se encuentra en la ladera, sus propiedades químicas y físicas, resistencia al esfuerzo y a su modo de evolución en cada ambiente natural; incluye las estructuras de los materiales del sitio, fracturas, fallas, pliegues, planos de estratificación y foliación y cómo estos pueden favorecer o no los procesos de inestabilidad y, por último, la capacidad de drenaje de los materiales y el grado de meteorización de los materiales (Medina, 1991; Mora y Vahrson, 1993).
- Contenido de humedad: tiene la capacidad de acelerar la meteorización y disminuir la resistencia mecánica de los suelos. Deben estudiarse la intensidad, frecuencia y magnitud de precipitaciones; la acción de la escorrentía superficial, subterránea y la infiltración; en general, todos los procesos de carácter climático e hidrológico

presentes en la ladera, que afectan su contenido de humedad (Medina, 1991; Mora y Vahrson, 1993).

Otro parámetro considerado es la vegetación, aunque su influencia en los movimientos de masa es objeto de discusiones y, en el trópico húmedo, apenas objeto inicial de investigación (Restrepo y Velásquez, 1997). Para Suárez (1998) el tipo de vegetación, tanto en el talud como en el área por encima de él, es un parámetro importante para la estabilidad. La vegetación cumple dos funciones principales: en primer lugar, tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y, en segundo, da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces. La deforestación afecta la estabilidad en varias formas: disminuye las tensiones capilares de la humedad superficial, elimina el factor de refuerzo de las raíces y facilita la infiltración masiva de agua. Sin embargo, esta parece ser una aseveración simplista, pues no considera el papel que la masa vegetal, aérea y subaérea, puede cumplir en la preparación de la inestabilización de una ladera.

### **3.6.2 Factores de disparo.**

Los factores de disparo son variables decisivas en la activación de los movimientos de masa, desencadenando movimientos, aún en una ladera en equilibrio. Aunque se tratarán con mayor detalle la vibración sísmica y las lluvias como disparadores de movimientos de masa, se dará un breve repaso por algunos otros mecanismos de disparo, como son la actividad antrópica y volcánica:

- **Actividad volcánica:** los movimientos de masa pueden estar relacionados con la erupción o con sismos previos a ésta en un volcán. En las primeras etapas de la erupción se depositan flujos piroclásticos, los cuales forman nuevos depósitos o amplían algunos existentes, produciéndose movimientos de material en las faldas del volcán.

En los volcanes nevados las altas temperaturas producidas por una erupción funden los depósitos de hielo y nieve, éstos se mezclan con los materiales piroclásticos

preciamente expulsados, de tal manera que generan avalanchas (en sentido estricto), y flujos de lodo que pueden recorrer grandes distancias, como en el caso del Nevado del Ruiz en 1985 (entre la numerosa literatura al respecto, ver, IGAC, 1993).

- Actividad antrópica: el hombre ha sido un permanente modificador de los elementos que conforman la superficie de la tierra y el efecto sobre los taludes ha sido el de agente desestabilizador.

La acción del hombre sobre las laderas puede clasificarse en cuatro tipos:

- Cambios en la topografía y cargas del talud. Ocasionados por la extracción de suelos y rocas para la construcción; aumento del peso de la ladera debido a los procesos de urbanización o rellenos ineficientes y por los efectos de la actividad subterránea, como la minería.
- Cambios en las condiciones de humedad. Debido a la alteración de los drenajes naturales por la construcción de zanjas y canales; alteración de los drenajes subterráneos y la presencia de infiltración y aumento de aguas superficiales por la deficiente instalación de acueductos y alcantarillados.
- Vibraciones. En la construcción de carreteras e infraestructura; explosiones, transportes y movimiento de maquinaria pesada, que inducen vibración en la ladera, desestabilizándola.
- Cambios en la cobertura vegetal. Se manifiesta en los procesos de deforestación; prácticas agrícolas y ganaderas inadecuadas y en modificaciones en el uso del suelo que resultan perjudiciales para la ladera (Medina, 1991; Suárez, 1998).

### **3.7 MOVIMIENTOS DE MASA DISPARADOS POR LLUVIAS.**

Los movimientos de masa cobran importancia a partir de su papel en la historia de fenómenos naturales de consecuencias desastrosas; han provocado numerosas

pérdidas materiales y de vidas humanas. En Colombia la base de datos de DESINVENTAR, para la década de 1990 reporta 1524 movimientos de masa, los cuales han afectado 9986 viviendas, destruído 4711 y han causado la muerte a 1000 personas.

Diversos factores de tipo hidrometeorológico afectan la estabilidad de las laderas. Cuando la precipitación cae sobre una ladera un porcentaje de ella es interceptado por la vegetación, otro se filtra en el suelo o se almacena en las depresiones para luego infiltrarse; el proceso de infiltración continúa aún después que cesa la lluvia y en algún momento pueden crearse condiciones críticas, ya que la humedad del suelo y la posición del nivel freático han aumentado, aumentando la presión de poros, disminuyendo los esfuerzos efectivos y, por consiguiente, la resistencia al esfuerzo cortante. Entonces se pueden alcanzar los umbrales de inestabilidad que disparan el movimiento de una parte o toda la ladera (González y Millán, 1998).

### **3.7.1 Parámetros hidrometeorológicos.**

- Precipitación: la precipitación se define como el volumen o altura de agua que se cae en la superficie terrestre proveniente de la atmósfera en un periodo de tiempo. Incluye todos los hidrometeoros tales como lluvia, nieve, granizo y aguanieve. La precipitación tiene influencia directa en la infiltración y en el régimen de agua subterránea y, a su vez, afecta la estabilidad. La medición de la precipitación consiste en la determinación de la cantidad de agua precipitada en un tiempo dado, sobre una superficie dada. Se determina el espesor en milímetros de la lámina de agua que queda en el sitio en ausencia de infiltración, escorrentía y condensación (Jiménez, 1986; Wisler y Brater, 1969).

El estudio de las precipitaciones para analizar su efecto sobre las laderas se realiza desde varios punto de vista:

- ✓ Lluvias promedio y lluvias máximas anuales. Con base en datos pluviométricos observados en una red de estaciones se calcula el espesor de la lámina de agua promedio y anual que cae sobre un sitio, para lo cual se requieren datos de periodos largos de observación. Se espera que en las áreas de mayor precipitación, se presenten más movimientos de masa.
- ✓ régimen de lluvias. Cada región posee un sistema de lluvias que se repite aproximadamente cada año y permite identificar los periodos de alta y baja precipitación. Se obtiene del análisis de los promedios mensuales de precipitación durante varios años de observación.
- ✓ Lluvias acumuladas. Registro de lluvias durante varios días o con pocos días de diferencia, por lo que ocurre acumulación de agua, disminuyen la tasa de infiltración y aumenta la escorrentía. Las lluvias acumuladas se calculan en función de la intensidad y duración de la precipitación.

Larsen y Simon (1993), desarrollaron una relación empírica, para la lluvia acumulada en ambientes tropicales, definida por la expresión:  $R = 91.46D^{0.18}$ , donde  $R$  es la lluvia acumulada en mm; y  $D$ , es la duración de la lluvia en horas.

- ✓ intensidad de la lluvia. Definida como la relación entre la altura de la lluvia observada,  $h$  y la duración de la lluvia,  $t$ :  $I = \frac{h}{t}$ . La intensidad es uno de los parámetros más usados para el análisis de estabilidad de laderas. Se han establecido relaciones entre la intensidad y duración y los movimientos de masa en diversos lugares del mundo.

Caine (1980), en Larsen and Simon (1993), desarrolló una relación umbral, usando los datos de 73 tormentas en todo el mundo, definida por la expresión:  $I = 14.82D^{-0.39}$ . Larsen and Simon (1993), usando datos de 256 tormentas para el

trópico húmedo, desarrollaron una relación umbral, para ambientes tropicales, según la expresión:  $I = 91.46D^{0.82}$  (Jiménez, 1986; Suárez, 1998; Larsen and Simon, 1998).

- Humedad. Agua retenida en el suelo mediante la atracción molecular. El contenido de humedad hace variar la permeabilidad y la capacidad de infiltración de una ladera. Está controlada por tipo de suelo, clima, factores del talud y cobertura vegetal (Suárez, 1998; Wisler y Brater, 1969).
- Infiltración. Proceso mediante el cual el agua penetra los estratos del suelo hasta llegar al nivel hidrostático. Una parte de esta agua contribuye a aumentar la humedad del suelo y el resto a recargar acuíferos; está controlada por diversos factores como, tipo, intensidad, ritmo y duración de la precipitación, vegetación, pendiente, estructura y permeabilidad de las rocas y suelos (Suárez, 1998).
- Nivel freático. Corresponde a la línea de presión de poros igual a cero, equivalente a que la presión neta en el sitio es igual a la presión atmosférica. Sigue una línea aproximadamente paralela a la superficie del terreno. El agua subsuperficial se divide en presión de poros positiva, para presiones mayores que la presión atmosférica y negativa para presiones menores que la presión atmosférica. La línea divisoria corresponde al nivel freático. Desempeña un papel fundamental en la estabilidad de laderas y puede ascender o descender bruscamente durante un periodo de lluvias fuertes (Suárez, 1998).
- Presión de poros. Presión interna del agua de saturación que depende de la localización del nivel freático, y características geológicas del sitio, entre otros factores. Los cambios en la presión de poros dependen de los regímenes de lluvias e infiltración; implican una disminución en la resistencia a los esfuerzos cortantes y, por lo tanto, de la estabilidad de la ladera (Suárez, 1998).

El equilibrio de los factores mencionados anteriormente en la ladera, en un proceso conocido como "Ciclo Hidrológico del Talud", definen en buen grado la estabilidad de una ladera. El componente humedad condiciona la susceptibilidad de la ladera por un lado y, por otro, en eventos fuertes (como lluvias torrenciales o prolongadas),

desencadena movimientos de masa. Se requiere un conocimiento detallado de todas estas variables para poder correlacionar las precipitaciones con la distribución de movimientos de masa. Los datos de redes hidrometeorológicas deben extenderse por largos periodos de tiempo para poder modelar el ciclo hidrológico.

Durante lluvias fuertes o prolongadas un movimiento de masa se puede disparar por saturación de la masa de suelo o por aumento de la presión de poros. En el primer caso, debido a la eliminación de la succión del suelo, cuando se satura el frente húmedo de infiltración. En el segundo, cuando ha transcurrido un tiempo tal que permite que el frente húmedo dentro del suelo llegue hasta el nivel freático, alterándolo, de tal manera que se disminuya la resistencia al corte de la masa de suelo (Suárez, 1998).

### **3.8 MOVIMIENTOS DE MASA DISPARADOS POR SISMOS.**

Una de las principales amenazas de segundo orden o inducidas después de un terremoto es la activación de movimientos de masa en la región epicentral. Keefer (1984) señala que los terremotos han sido reconocidos como una de las mayores causas de movimientos de masa. Han sido documentados desde los años 373 a 372 a.C., y han causado innumerables muertos y billones de dólares en pérdidas económicas durante el S XX, entre los muchos casos documentados se mencionan los siguientes:

En 1949 en Khait (Rusia) un sismo de magnitud 7.6 Ms, localizado entre 20 y 28 km de profundidad (Keefer, 1984), disparó un movimiento de rocas que mató 20 000 personas (Suárez, 1998). En 1970 un sismo de 7.9 Mw, localizado 130 km de la costa de Perú, entre 35 y 43 km de profundidad (Keefer, 1984), disparó una avalancha en los montes Nevados Huascarán en la Cordillera Blanca de los Andes Peruanos, cuyo volumen se estimó entre 50 y 100 millones de m<sup>3</sup>, con una longitud de 16 km, devastó un área de 22,5 km<sup>2</sup>, mató a más de 18 000 personas (Hansen y Franks, 1991), y sepultó los pueblos de Yungai y Ranrahira; originó, además, movimientos de masa en un área de aproximadamente 30 000 km<sup>2</sup> (Suárez, 1998). En 1987 un sismo en El Napo

(Ecuador), de 7.1 Mw, a una profundidad de 5 km (Rodríguez et al., 1999), disparó deslizamientos de lodo y roca que cubrieron un área de 2000 km<sup>2</sup> y destruyeron 70 km de un oleoducto y varias carreteras (Suárez, 1998). Uno de los casos más recientes se documentó después del sismo en San Salvador el 13 de enero del 2001, originado en la zona de subducción a 45 km de la costa Pacífica, con una magnitud de 7.7 Mw, a una profundidad de 90 km; disparó un gran número de deslizamientos a lo largo de la Cordillera del Bálsamo y fenómenos de licuación en el área del Bajo Lempa, afectando la infraestructura de la región (Camacho et al., 2001).

En Colombia varios eventos sísmicos se han destacado por los importantes movimientos de masa que han activado. El sismo del Huila en noviembre de 1827 produjo un deslizamiento que represó el río Suaza durante 55 días (Ramírez, 1975). El sismo de enero de 1906 en Tumaco ocasionó deslizamientos submarinos que rompieron en unos 17 sitios el cable oceánico entre Panamá, Buenaventura y Esmeraldas, grietas y hundimientos en la zona costera entre Punta Manglares y Tumaco, además de licuación de arenas y tsunami (Meyer, 1983). El sismo de diciembre de 1979 en la misma región generó soliflucción, licuación del suelo, deslizamientos en la Cordillera Occidental y asentamientos y grietas en las bajas planicies litorales del suroeste colombiano (Meyer, 1983). El sismo de 1991 en el Delta del Río San Juan indujo licuación en una extensión de 60 km, entre Punta España y Boca Orpua (OSSO, 1991). El sismo de 1992 en el Atrato Medio ocasionó licuación a lo largo de 150 km desde el norte de Puerto Arquía hasta el Noroccidente de Bajirá y movimientos de masa en las estribaciones de la Cordillera Occidental y de la Serranía de Abibe (OSSO, 1993). El sismo de 1994 en Páez (Cauca), produjo innumerables movimientos de masa que generaron avenidas torrenciales en el río Páez y sus tributarios que afectaron un área de 250 km<sup>2</sup> (Rodríguez et al., 1999), así como centenares de víctimas fatales. El sismo de 1995 en Tauramena disparó movimientos de masa en una área de 4550 km<sup>2</sup> (Rodríguez et al., 1999). Finalmente, el sismo de 1999 en el Eje Cafetero disparó deslizamientos en un área de 1402 km<sup>2</sup> a una distancia máxima del epicentro de 30 km. En el Anexo D: Reportes de efectos geológicos inducidos por sismos, se citan otros eventos que ha ocasionado movimientos de masa en Colombia.

### 3.8.1 Parámetros sísmicos.

Diversos autores han estudiado los movimientos de masa inducidos por sismos, intentando establecer relaciones entre los parámetros sísmicos y la distribución de los movimientos de masa disparados, usando para esto bases de datos de terremotos a los cuales se les ha documentado los procesos de inestabilidad generados. Se han realizado análisis en diversas partes del mundo por autores como Keefer (1984), Wilson and Keefer (1989), Brabb and Harrod (1989), Rodríguez et al., (1999), Sitar and Khazai (2001) y Bommer and Rodríguez (2002). Otros autores han estudiado las relaciones en regiones específicas, como Yasuda and Sugitani (1988), en Japón, Ishihara and Nakamura (1987), en Ecuador, Mora y Mora (1992), en Costa Rica, Papadopoulos and Plessa (2000), en Grecia y Prestininzi and Romeo (2000), en Italia, entre otros.

El parámetro sísmico más usado en éstas relaciones es la magnitud. La magnitud representa el tamaño del terremoto y depende de la energía liberada en el proceso de ruptura, es un valor único independiente del sitio de observación y es calculada con base en la amplitud de la onda sísmica (Bolt, 1981; Sauter, 1989). Se han encontrado las siguientes relaciones:

- Magnitud del terremoto más pequeño capaz de producir movimientos de masa.

Keefer (1984), Rodríguez et al., (1999) y Sitar and Khazai (2001), coinciden en que todos los tipos de movimientos de masa pueden ser disparados por causas no sísmicas, y que si la falla de la ladera es inminente antes de un terremoto, un movimiento de masa puede ser iniciado con una vibración débil. Encontraron que las caídas, deslizamientos de rocas y rupturas en suelos son disparados con el menor umbral de magnitud (4.0 MI) y las avalanchas con el mayor umbral de magnitud (6.0 MI) (Keefer, 1984; Rodríguez et al., 1999; Papadopoulos and Plessa, 2000). La menor magnitud reportada fue para un evento superficial de  $M = 2.9$  en 1984 (Feng, 1985, en Rodríguez et al., 1999).

- Magnitud y área afectada por movimientos de masa.

Los diferentes relaciones propuestas (Li, 1979; Keefer, 1984; Wilson and Keefer, 1989; Keefer, 1994; Rodríguez et al., (1999), entre otras, muestran que existe una fuerte correlación entre el área afectada por movimientos de masa y la magnitud del sismo. Las áreas afectadas son irregulares en forma y asimétricas con respecto al epicentro y zona de ruptura, ésto se debe a factores como la influencia de la geología (Li 1979 en Hansen and Franks, 1991), la profundidad focal de sismo, efecto de campo cercano, dirección de la ruptura, efecto topográfico y atenuación de la vibración sísmica (Li, 1979; Keefer, 1984; Rodríguez et al., 1999; Bommer and Rodríguez, 2002), así como las condiciones de susceptibilidad previas al sismo (Bommer and Rodríguez, 2002) y, en general, a la influencia de las condiciones ambientales donde ocurre el sismo. Keefer (1994) aclara que más del 95 % de los movimientos de masa producidos por un terremoto están concentrados en menos de la mitad del área total afectada.

- Magnitud y máxima distancia al epicentro de los movimientos de masa.

Al igual que el área afectada por movimientos de masa, la máxima distancia al epicentro muestra una significativa relación con la magnitud del sismo (Tamura, 1978; Ishara and Nakamura, 1987; Yasuda and Sugitani, 1988; Keefer, 1984, Mora and Mora, 1992; Rodríguez et al., 1999), entre otros. Yasuda and Sugitani (1988, en Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1993), encontraron que la máxima distancia al epicentro es mayor para "deslizamientos superficiales" que para "deslizamientos profundos", bajo la acción de un sismo de igual magnitud. Keefer (1984) y Rodríguez et al., (1999), sugieren que las rupturas y caídas pueden ser disparadas por vibraciones más débiles y que los desprendimientos laterales y flujos por vibraciones más fuertes; los terremotos con profundidades focales mayores o iguales a 30 km generan rupturas y caídas a distancias al epicentro mayores o iguales que los generados por eventos más superficiales de igual magnitud. Diversos autores, comparando relaciones encontradas para ambiente secos y húmedos para sismos de igual magnitud, sugieren que las mayores distancias al epicentro se presentan en

ambientes húmedos (Keefer, 1984; Yasuda and Sugitani, 1988; JMS, 1993; Rodríguez et al., 1999; Sitar and Khazai, 2001; Bommer and Rodríguez, 2002).

- Magnitud y volumen deslizado.

Existe una fuerte correlación entre la magnitud del evento sísmico y el volumen de material desplazado. Keefer and Wilson (1989) y Keefer (1994), propusieron correlaciones entre magnitud y volumen máximo que proveen una estimación de la contribución de los movimientos de masa inducidos por sismos a la erosión en una región y a la evolución del paisaje. Sin embargo, varían de región a región, en función del ambiente geológico y la susceptibilidad previa existente antes del sismo y, por lo tanto, deben usarse con precaución (Keefer and Wilson, 1989; Keefer, 1994).

- Movimientos de masa y mínima intensidad capaz de producirlos.

La intensidad sísmica representa la fuerza del movimiento sísmico, en función del grado de vibración sentida y de los efectos que causa en un área específica. No es una variable única sino que varía de acuerdo con el sitio de observación; generalmente es mayor en el área epicentral y disminuye con la distancia (Bolt, 1981; Sauter, 1989). Algunos autores compararon la intensidad sísmica con los tipos de movimientos de masa comunes en cada valor de intensidad.

Keefer (1984) y Rodríguez et al., (1999), concluyen que la intensidad mínima a la que se generan rupturas y caídas es VI; la intensidad mínima para deslizamientos coherentes, desprendimientos laterales y flujos es VII y la intensidad más baja reportada para cualquier movimiento de masa ha sido IV. Un estudio realizado en Italia, usando los datos del Catálogo Nacional de Pérdidas de Suelo Inducidos por Terremotos Fuertes (CEDIT), con datos del último milenio, concluyó que la más baja intensidad a la cual ocurren movimientos de masa y agrietamientos es V y que la mayor cantidad de reportes se encuentran entre las intensidades VIII y IX. Este estudio concluye que los agrietamientos se producen a las mayores distancias con las menores intensidades y pueden considerarse como el límite inferior al cual se producirían movimientos de masa, porque su evidencia empírica indica que éstos se disparan a distancias menores para

un mismo valor de intensidad (Romeo and Prestininzi, 2000). La Escala Macrosísmica Europea, EMS - 98, establece que los movimientos de detritos (escombros) se encuentran a partir de la intensidad VII; pequeños movimientos de masa a partir de la intensidad V; caídas de rocas desde la intensidad VI, siendo comunes en la intensidad VIII, y, deslizamientos y caídas masivas de rocas desde la intensidad VII (ESC, 1998).

Las relaciones que usan la intensidad sísmica no son confiables, debido a que no existe información suficiente para correlacionarla con los movimientos de masa disparados (Rodríguez et al., 1999), además de las incertidumbres propias de la estimación de la intensidad sísmica, por lo que su uso no es recomendable, si se dispone de mejores fuentes de información.

- Aceleración sísmica.

La aceleración sísmica es una medida instrumental de la intensidad del terremoto, expresada en porcentaje de la gravedad terrestre, registrada en acelerógrafos, cuyos registros muestran la aceleración del terreno en función del tiempo (Bolt, 1981; Sauter, 1989). Todavía no se han propuesto relaciones directas entre la aceleración y los movimientos de masa disparados por sismos, pero Sitar and Khazai (2001), encontraron que son comunes en zonas con aceleración vertical mayor a 0.2 g y aceleración horizontal mayor a 0.15 g. OSSO (1995), encontró que importantes movimientos de masa disparados por sismos en Colombia, ocurrieron en zonas con aceleraciones esperables de 0.25 g, aunque no provee información sobre las aceleraciones reales ocurridas.

Comúnmente se ha utilizado la Intensidad de Arias para correlacionar los movimientos de masa disparados por sismos. La intensidad de Arias está definida como la suma de todos los valores cuadrados de la aceleración de un acelerógrama, incorporando toda la información de amplitud, frecuencia y duración en un único valor, el cual es proporcional a la energía disipada en el sitio de registro. Está definida por la expresión:

$I_a = \pi / 2g \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt$ , donde  $a(t)$  es una componente de la aceleración de un acelerógrama,  $T_d$  es la duración total en segundos,  $t$  es el tiempo del movimiento fuerte en segundos y  $g$  la aceleración de la gravedad (Harp y Wilson, 1995).

Wilson and Keefer (1985) y Wilson and Keefer (1989), concluyeron que los umbrales en términos de intensidad de Arias, son más bajos para caídas y rupturas ( $I_a = 0.15$  m/s) y más altos para desprendimientos laterales y flujos (0.54 m/s). El uso de la Intensidad de Arias está restringida a un análisis previo de las condiciones geográficas de la zona de estudio y de la calidad de la información sísmica disponible (Harp and Wilson, 1995).

Los umbrales discutidos son una guía con base en catálogos regionales, que no tienen en cuenta características específicas y, por lo tanto, es muy probable que, en circunstancias especiales, un evento sísmico genere más ó menos movimientos de masa que los esperados, o que estos mismos se encuentren a distancias no esperadas. Además, están sujetos a incertidumbres debido a la condiciones geológicas locales, la susceptibilidad de la región y los parámetros del sismo. Documentar los movimientos de masa disparados por sismos de manera eficiente suministraría la información necesaria para futuros estudios que perfeccionen las relaciones anteriores. Esto es aún más necesario en ambientes tropicales de montaña, donde la ocurrencia de sismos es frecuente, como es el caso de Colombia.

- Análisis sísmico de laderas.

Predecir con precisión cuales laderas se moverán y el grado de severidad del movimiento que se producirá bajo la influencia de determinada vibración sísmica es difícil. El comportamiento sísmico de una ladera puede evaluarse desde varios caminos y puede ser usado para estudios de amenaza regional o para estudios de movimientos de masa disparados por un evento en particular. Las tres aproximaciones básicas para analizar el comportamiento sísmico de una ladera son:

- ✓ Aproximación estadística, en la cual la amenaza es evaluada a través de una correlación de los movimientos de masa ocurridos en el pasado con varios factores de influencia (Smiles and Keefer, 1999);
- ✓ Análisis pseudo-estático, que busca por medio de un análisis de factor de seguridad, identificar la aceleración crítica y, después, la máxima aceleración del terreno bajo la cual ocurriría el desplazamiento (Harp and Wilson, 1995; Smiles and Keefer, 1999);
- ✓ Métodos de desplazamientos permanentes, los cuales proveen información que considera el desempeño actual de la ladera, a través del cálculo de índices de desplazamiento actual o relativo, con base en caracterizaciones comunmente aceptadas de la severidad de la vibración sísmica (Jibson, 1993; Smiles and Keefer, 1999).
- ✓ Método de Newmark. Es un método de análisis intermedio, entre el análisis pseudo-estático y las técnicas de desplazamientos permanentes que provee una predicción cuantitativa de los desplazamientos inerciales que resultarían de un nivel dado de vibración sísmica (Harp and Wilson, 1995; Smiles and Keefer, 1999).

Debe seleccionarse con cuidado el modelo a usar, con base en la información sísmica disponible y, en general, en el conocimiento de las características geotécnicas locales de la región de estudio.

Para el estudio de los movimientos de masa inducidos por sismos, es necesario tener un conocimiento de las causas no sísmicas, que podrían afectar las laderas en regiones sísmicas. Las laderas son un sistema dinámico y complejo, donde las diferentes variables se encuentran en equilibrio; la vibración sísmica es tan solo una de las variables que pueden afectarlas, desencadenando el movimiento del material.

### **3.9 MODELAMIENTO DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS DE MASA.**

La zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza es una herramienta útil y es usada en casi todos los lugares del mundo, donde existe propensión a los movimientos de masa. Se han elaborado diversas técnicas para desarrollar la zonificación, teniendo en cuenta factores como la escala de trabajo, la relación costo-beneficio, el objeto del estudio, información disponible, tiempo requerido, precisión de los resultados, capacidad de análisis, experiencia de los investigadores, etc.

La zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza requiere un detallado inventario de los procesos de inestabilidad; el estudio de estos procesos en relación con su marco ambiental; el análisis de los factores de susceptibilidad y disparo; la representación espacial de los factores y de los procesos de inestabilidad (Mora y Vahrson, 1993; Soeters and Van Westen, 1996).

Nuevas herramientas como los Sistemas de Información Geográfica y el uso de sensores remotos, agilizan cada vez el tratamiento de la información, permitiendo rápidamente la actualización de la misma. Estudios de susceptibilidad y/o amenaza multitemporal permiten predecir con más confiabilidad las áreas, observando el desarrollo de la inestabilidad en el tiempo y más rapidez en la captura de variables involucradas en los análisis. Las técnicas de zonificación están en desarrollo constante, y cada día surgen nuevos métodos, más precisos y confiables, que pueden ser usados en diversas regiones a un costo razonable.

#### **3.9.1 Definición de términos.**

Los términos usados en este capítulo forman parte de las definiciones propuestas por Varnes (1984), adaptados con base en Soeters and Van Westen (1996):

- Susceptibilidad. Facilidad con que un fenómeno puede ocurrir con base en las condiciones locales del terreno.
- Amenaza. Probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, en un periodo específico de tiempo, en una área determinada.
- Zonificación. División de un territorio en zonas homogéneas según el grado de susceptibilidad y/o amenaza para cada una.
- Riesgo. Pérdidas esperables en vidas humanas y económicas por daños a propiedades e infraestructura o por interrupción de actividades, debidas a la ocurrencia de una amenaza.

### **3.9.2 Escala de trabajo.**

Está determinada por los requerimientos del usuario y la aplicación que se le pretende dar a la investigación; por una relación costo – beneficio razonable que garantice la aplicabilidad práctica; por el tipo específico de problema; por la calidad y cantidad de información; por los recursos financieros; por la disponibilidad de tiempo y por la experiencia de los investigadores, entre otras (Millan, 1998).

Para los estudios de susceptibilidad y/o amenaza se han establecido (Soeters and Van Westen, 1996; Millan, 1998), las siguientes escalas de trabajo:

- ☞ Escala Nacional (>1:1 000 000). Inventario general de las áreas problemáticas para todo un país. El nivel de detalle es muy bajo, porque los análisis son hechos sobre reglas generales.
- ☞ Escala Regional (1:100 000 a 1: 500 000). Para desarrollos regionales. Las áreas son de aproximadamente 1000 km<sup>2</sup> o más. El nivel de detalle es bajo, el mapa sólo indica áreas en las cuales los movimientos de masa podrían afectar desarrollos regionales y se supone que la susceptibilidad y/o amenaza es uniforme en toda la

unidad de zonificación.

- ☞ Escala Intermedia (1:25 000 a 1:50 000). Para la determinación de zonas de susceptibilidad y/o amenaza donde existen infraestructuras, caminos, y procesos de urbanización. El área cubre unos pocos cientos de kilómetros cuadrados. Se tiene un nivel de detalle medio, de tal manera que se puede identificar niveles de susceptibilidad y/o amenaza entre segmentos de ladera de acuerdo con sus características ambientales.
- ☞ Escala grande (1:5000 a 1: 15 000). El tamaño del área es de pocas decenas de kilómetros cuadrados. El nivel de detalle es alto y los resultados se presentan como clases de susceptibilidad y/o amenaza, que indican la propensión o la probabilidad del fenómeno en cada unidad.

La determinación de la escala es fundamental en cualquier estudio de susceptibilidad y/o amenaza y es una de las primeras preguntas que deben contestarse al iniciar una zonificación, teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente.

### **3.9.3 Datos de entrada.**

Los fenómenos de inestabilidad de laderas están relacionados con una gran variedad de factores del medio físico e interacciones con el hombre. Por lo tanto, la evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa requiere el conocimiento de estos factores, lo que conlleva a que estos estudios sean proyectos interdisciplinarios. La selección de los datos de entrada es de gran importancia y depende, entre otras cosas, de la escala de trabajo, que a su vez define la cantidad de datos y la técnica de análisis por utilizar.

Los datos de entrada pueden ser divididos en cinco grupos básicos: geomorfología, topografía, geología, uso del suelo e hidrología. Cada grupo está subdividido en subtemas, que pueden ser representados cartográficamente. Por supuesto, los datos

requeridos para un análisis de susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa, pueden variar de acuerdo con las características de las diferentes condiciones medio ambientales. La Tabla 2, muestra una lista de las diferentes variables, métodos de recolección de la información y escalas de trabajo recomendadas (Soeters and Van Westen, 1996)

**Tabla 2.** Datos de entrada para un análisis de susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa.

Datos de Entrada	Tabla de datos Relacionales	Técnica Aplicada <sup>2</sup>	Escala de Trabajo <sup>1</sup>		
			Regional	Media	Grande
Geomorfología					
1. Unidades de terreno	Unidades de terreno	ISS + Reconocimiento	3	3	3
2. Unidades Geomorfológicas	Descripción geomorfológica	FAF + TC	2	3	3
3. Movimientos de masa (recientes)	Tipo, grado de actividad, profundidad, dimensiones, etc.	FAF + TC	1	3	3
4. Movimientos de masa (antiguos)	Tipo, grado de actividad, profundidad, dimensiones, etc.	FAF + TC + archivos históricos	1	3	3
Topografía					
5. Modelo digital de terreno. (MDT).	Diferencias de altura	SIG del mapa topográfico	2	3	3
6. Pendientes	Intervalos de ángulos	SIG del MDT	2	3	3
7. Dirección de laderas	Intervalos de dirección de laderas	SIG del MDT	2	3	3
8. Longitud de las laderas	Intervalos de longitud de laderas	SIG del MDT	2	3	3
9. Concavidades y	Concavidad /	SIG del MDT	1	1	1

convexidades	Convexidad				
Geología					
10. Litología	Litología, resistencia del material, esparcimiento, discontinuidad	Mapa existente + FAF + TC + pruebas de laboratorio	2	3	3
11. Materiales superficiales	Tipo de material, profundidad, clasificación, distribución granulométrica, coeficientes.	Modelación del mapa litológico + mapa geomorfológico + mapa de pendientes + descripciones de campo + pruebas de laboratorio	1	2	3
12. Geología Estructural	Tipo de falla, longitud, buzamiento, orientación, etc.	ISS + FAF + TC	3	3	3
13. Aceleración Sísmica	Máxima aceleración sísmica	Datos sísmicos + datos de ingeniería geológica	3	3	3
Usos del Suelo					
14. Infraestructura (reciente)	Tipos de vías, líneas vitales, urbanización, etc.	FAF + Mapa topográfico + TC + ISS	3	3	3
15. Infraestructura (antigua)	Tipos de vías, líneas vitales, urbanización, etc.	FAF + Mapa Topográfico	3	3	3
16. Usos del suelo (reciente)	Tipo de usos del suelo, densidad de vegetación, etc.	FAF + ISS + TC	2	3	3
17. Usos del suelo (antiguo)	Tipos de usos del suelo	FAF + ISS	2	3	3

Hidrología					
18. Drenajes	Tipo, orden, longitud.	FAF + Mapas topográficos	3	3	3
19. Area de drenaje	Orden, tamaño	FAF + Mapas topográficos	2	3	3
20. Precipitación	Registros históricos de precipitación	Estaciones meteorológicas	2	3	3
21. Temperatura	Registros históricos de temperatura	Estaciones meteorológicas	2	3	3
22. Evapotranspiración	Registros históricos de evapotranspiración	Estaciones meteorológicas	2	3	3
23. Nivel Freático	Registros históricos de nivel freático	Medidas de campo + modelos hidrogeológicos	1	1	2

(Adaptado de Soeters and Van Westen, 1996).

**Notas:** 1. Las últimas tres columnas indican la posibilidad de obtención de datos para las tres escalas de trabajo: 3: buena, 2: moderada; 1: pobre.

Abreviaturas usadas: FAF: Fotointerpretación Aerofotográfica; TC: Trabajo de Campo; ISS : Interpretación de Sensores Remotos; SIG: Sistemas de Información Geográfica; MDT: Modelo Digital de Terreno.

### 3.9.4 Técnicas de análisis para el modelamiento de la susceptibilidad y/o amenaza.

Un mapa ideal de susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa, debería proveer información sobre la probabilidad de ocurrencia espacial y temporal, tipo, magnitud, velocidad, distancia de recorrido, y límite de regresión de los movimientos de masa en cierta área de interés (Suárez, 1998).

Las diferentes técnicas actualmente en uso proveen una evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza con base en el estudio de las condiciones naturales de

una área y en el análisis de los posibles factores involucrados en los procesos de inestabilidad.

Van Westen (1993) citado por Soeters and Van Westen (1996), revisó diferentes aproximaciones metodológicas, como se reseña a continuación.

- Inventario de movimientos de masa.

Es el método más directo para la zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza, con base en la ocurrencia de movimientos de masa en un área. Se puede realizar por fotointerpretación de fotos aéreas, trabajo de campo o base de datos históricos del área de estudio. El producto final debe ser la distribución espacial de los movimientos, representados por áreas afectadas o puntos.

Proveen información por un periodo corto de tiempo y no dan ninguna idea de los cambios temporales en la distribución de movimientos de masa.

Se pueden clasificar en análisis de distribución de movimientos de masa; análisis de densidad usando mapas de isodensidades y análisis de actividad, si se dispone fuentes de información multitemporales.

Estos inventarios son la base de cualquier estudio de zonificación de susceptibilidad y/o amenaza, aunque su aplicación a escala regional es limitada (Soeters and Van Westen, 1996; Millán, 1998).

- Aproximación heurística.

Con base en la opinión de un experto. Combina un inventario de movimientos de masa con su marco geomorfológico como el principal factor de entrada en la evaluación. La calidad de la zonificación depende del conocimiento que se tenga de la zona de estudio

y de la experiencia de los investigadores. Se puede aplicar a cualquier escala, pero es más útil a escalas nacional y regional. Se clasifican en dos tipos de técnicas:

- ☞ Análisis geomorfológico: conocido como método directo. La susceptibilidad y/o amenaza es determinada directamente en el campo por las observaciones del experto, con base en su experiencia personal y uso de razonamiento por analogías. Tiene un alto nivel de subjetividad, baja repetibilidad y el error depende del conocimiento que se tenga de la zona de estudio. Tiende a ser usados en escalas grandes y se vuelven impracticables en estudios de zonificación a escalas menores, por la complejidad de la toma de las decisiones. Se les conoce también como técnicas de evaluación empírica (Hartlen y Viberg, 1988) o Metodologías de Cartografía Directa (Cuervo, 1999).
- ☞ Combinación cualitativa de mapas: usa el conocimiento del experto para asignar pesos a una serie de mapas-parámetro. Las condiciones del terreno son representadas por la suma de los pesos y la evaluación del grado de zonificación se realiza por clases. Esta técnica ha sido muy popular, pero la desventaja es la determinación exacta del peso para cada mapa parámetro, que requiere un conocimiento detallado de los factores en la zona de estudio (Soeters and Van Westen, 1996; Millán, 1998). Se los conoce también como métodos de cálculo de peso de los factores (Gee, 1992) o metodologías de cartografía indirecta (Cuervo, 1999).

Un avance de estas técnicas es el de las evaluaciones semicuantitativas, que incluyen análisis aritméticos e interpretaciones cualitativas de los diferentes parámetros (Millán, 1998), conocidas también como modelos de Caja Gris (Grey Box) (Carrara, 1983).

Tienen la ventaja de poder ser aplicadas en regiones con insuficiente información, pero no es recomendable aplicar metodologías de este tipo con los valores preestablecidos de otros estudios, sino obtenidos del conocimiento del área específica de estudio (Vargas, 1999). Algunos ejemplos de estas técnicas han sido las desarrolladas por Ramírez y González (1989), en Colombia, Mora y Vahrson (1992), en Costa Rica y

OSSO (1995b, c), también en Colombia.

- Análisis estadísticos.

La combinación de factores que generan los movimientos de masa en el pasado se hace estadísticamente y se generan predicciones cuantitativas. El inventario de movimientos de masa es la base del estudio. Su aplicabilidad se encuentra en estudios de escala intermedia a grande y tiene la ventaja de su alta reproducibilidad y objetividad, lo que permite verificar los resultados. También se conocen como modelos de Caja Negra (Black Box) (Carrara, 1983) o técnicas de evaluación relativa (Hartlen y Viberg, 1988). Existen dos tipos de técnicas para realizar análisis estadísticos:

- ☞ Análisis estadístico bivariado: depende de la distribución de movimientos de masa; la asignación de pesos se hace a partir de correlaciones con la densidad de movimientos de masa. Con base en la suposición de que la importancia de los principales factores (variables - parámetro) sobre la estabilidad de una zona pueda ser cuantificada por el cálculo de la densidad de movimientos de masa. La base del método es el cálculo de densidad de movimientos de masa para cada variable - parámetro. Entre las técnicas usadas para el cálculo de los pesos están: método de susceptibilidad a movimientos de masa, método de valor de información, y método de evidencia de peso.
- ☞ Análisis estadístico multivariado: se fundamenta en la presencia o no de factores de inestabilidad en cada unidad morfométrica. La matriz resultante es analizada por regresión múltiple o análisis discriminantes. NO se basa en la experiencia del experto y se pueden esperar buenos resultados en zonas homogéneas o con poco movimientos de masa, debido principalmente a la gran y detallada información requerida y a la necesidad de complejos cálculos estadísticos. Los análisis pueden hacerse por regresión múltiple y análisis discriminante, La implementación de los Sistemas de Información Geográfico ha facilitado el uso de esta técnica (Soeters and Van Westen, 1996; Millán, 1998; Vargas, 1999).

- Aproximación determinística.

Son métodos indirectos, que emplean modelos físicos de estabilidad de laderas para evaluar la susceptibilidad y/o la amenaza. Son aplicables sólo cuando las condiciones geológicas y geomorfológicas son homogéneas sobre el área de estudio y los tipos de movimientos de masa son simples. La ventaja de esta técnica es que está basada en análisis cuantitativos. El principal problema es su alto grado de simplificación. Generalmente requiere el uso de modelos hidrológicos. No obstante la cantidad de información detallada que requieren, su uso se ha incrementado, debido a la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica, que permiten la manipulación de gran cantidad de datos y rapidez en los cálculos, facilitando su aplicación a escalas regionales (Soeters and Van Westen, 1996; Millán, 1998). Fue aplicada por Van Westen and Terlien (1996), en Manizales (Colombia). También se conocen como modelos de Caja Blanca (White Box) (Carrara, 1983).

- Análisis probabilísticos o de frecuencias de movimientos de masa.

Consisten en determinar la probabilidad o recurrencia de los movimientos en un lugar y en un periodo de tiempo dado. El cálculo se realiza con la ayuda de la modelación de los factores presentes en la formación de los movimientos de masa ocurridos en el pasado con características similares (Millán, 1998). También se conocen como técnicas de evaluación absoluta (Hartlen y Viberg, 1988).

- Metodología de taludes naturales.

Se enmarca dentro del campo natural de la macrogeotecnia y constituye un conjunto metodológico que permite la determinación y cálculo de parámetros geomecánicos y de estabilidad, a partir de información detallada. Permite el cálculo directo del factor de seguridad y su correspondiente probabilidad de falla. Se aplica a diferentes escalas, siempre y cuando la información requerida esté disponible (Millán, 1998). También se

conocen como técnicas por monitoreo (Hartlen y Viberg, 1988) o métodos de evaluación de inestabilidad de taludes (Gee, 1992).

Existe diversidad de métodos para el cálculo del factor de seguridad, como el método de tajadas, de talud infinito, del bloque deslizante y el de elementos finitos (Cuervo, 1999).

### **3.9.5 Selección de la técnica.**

No todas las técnicas son aplicables a todas las escalas de trabajo. Algunas requieren información detallada pero son aplicables sólo a pequeñas áreas, debido al costo de recolección y análisis de la información. La técnica debe elegirse según la escala de trabajo y una relación costo – beneficio aceptable. La Tabla 3 presenta una comparación entre las técnicas según la escala de trabajo. De esta tabla se concluye que:

- Uno de los tipos de análisis más accesible y más utilizado, es la aproximación heurística a escalas grandes.
- Para escalas regionales se recomienda el uso de aproximaciones cualitativas, a partir de estudios de densidad de movimientos de masa.
- Para escalas intermedias se recomienda el uso de análisis estadísticos, si se cuenta con información detallada. De lo contrario, se recomienda el uso de la combinación cualitativa de mapas.
- Para escalas de detalle se recomienda el uso de aproximaciones determinísticas, si se trata de un ambiente homogéneo (Soeters and Van Westen, 1996; Millan, 1998).

**Tabla 3.** Técnicas de análisis en relación con la escala de trabajo.

Tipo de Análisis	Técnica	Características	Datos Requeridos (a)	Escala de Trabajo		
				Regional (1:100.000)	Intermedia (1:25.000)	Grande (1:10.000)
INVENTARIO DE MOVIMIENTO DE MASA	Análisis de distribución de movimiento de masa	Análisis de clasificación y distribución de movimientos de masa	3	SI (b)	SI	SI
	Análisis de actividad de movimientos de masa.	Análisis de cambio temporal en el patrón de los movimientos de masa	4,5,14,15,16,17	NO	SI	SI
	Análisis de densidad de los movimientos de masa	Cálculo de densidad de movimientos de masa en unidad de terreno o como mapa	1,2,3,	SI (b)	NO	NO
ANÁLISIS HEURÍSTICO	Análisis geomorfológico	Opinión del experto en campo	2,3,4	SI	SI (c)	SI (c)
	Combinación cualitativa de mapas	Calificación de los mapas parámetro según la experiencia	2,3,4,4,5,6,7,8,9,10,12,14,16,18,	SI (d)	SI ©	NO
ANÁLISIS ESTADÍSTICO	Análisis estadístico bivariado	Cálculo de la influencia de los factores contribuyentes	2,3,5,6,7,8,9,10,12,14,16,18	NO	SI	NO
	Análisis estadístico multivariado	Estimación de la formula de predicción de la matriz de datos	2,3,5,6,7,8,9,10,12,14,16,18	NO	SI	NO

ANÁLISIS DETERMINÍSTICO	Evaluación del factor de seguridad	Aplicación de modelos hidrológicos y de estabilidad de taludes.	6,11,12,13 16,21, 22,23	NO	NO	SI (e)
----------------------------	--	---	-------------------------------	----	----	--------

Tomado de Soeters and Van Westen (1993)

**NOTA:**

a. Se refiere a los parámetros de entrada en la Tabla 2. b. Únicamente con datos confiables en la distribución de movimientos de masa. c. Pero soportado con otras técnicas cuantitativas d. Únicamente si existen datos confiables en la distribución espacial de movimientos de masa. e. Bajo condiciones de terreno homogéneas.

En general, la selección de la técnica de análisis sólo puede realizarse de acuerdo con el ambiente geomorfológico de la zona, las evidencias de procesos morfodinámicos, el nivel de detalle de la información disponible de los factores involucrados, la precisión deseada, la relación costo - beneficio y la escala de trabajo.

**3.9.6 Precisión y objetividad.**

La precisión de los resultados es la pregunta más importante en cada estudio de susceptibilidad y/o amenaza. El término indica si el resultado (mapa, tabla, matriz, o cualquiera sea su representación) de la zonificación hace una distinción correcta entre las áreas libres o no de movimientos de masa. Depende de las siguientes variables, todas ellas relacionadas:

- Precisión del modelo.
- Precisión de los datos.
- Experiencia del investigador.

- Tamaño del área de estudio.

La precisión de un mapa de susceptibilidad y/o amenaza sólo puede ser evaluada por observaciones directas de movimientos de masa en el tiempo pero, como siempre, se requiere la evaluación de los resultados. Un método muy usado para hacerlo consiste en comparar el mapa de susceptibilidad y/o amenaza con un mapa que contenga el patrón de movimientos de masa en la zona (inventario de movimientos de masa): se calcula el número de movimientos de masa encontrados en las zonas predichas como estables en valor de porcentaje y éste se supone como el error del análisis, para áreas libres o no afectadas por movimientos de masa (Soeters and Van Westen, 1996).

Relacionada con la precisión esta la objetividad del análisis. El término objetividad se usa para indicar si los pasos usados en la determinación del grado de susceptibilidad y/o amenaza, son verificables y reproducibles. La objetividad no siempre implica precisión. El grado de objetividad depende de las técnicas usadas en la recolección y análisis de los datos. Las características propias de la evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa implican cierto grado de subjetividad, el cual no tiene que significar imprecisiones (Soeters and Van Westen, 1996).

### **3.10 USO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO EN EL MODELAMIENTO DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y/O AMENAZA.**

Un SIG está definido como una herramienta para recolectar, ordenar, recuperar, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real, con un propósito específico. Generalmente un SIG, está compuesto de los siguientes componentes:

- Entrada de datos y verificación.
- Almacenamiento de datos y tratamiento de base de datos.
- Transformación de datos y análisis.

- Salida de datos.

Existen diferentes sistemas los cuales se diferencian principalmente por el tipo de estructura de datos, la técnica de compresión de los datos, dimensión, hardware, e interfaces con el usuario (Soeters and Van Westen, 1996).

Las ventajas del uso de los SIG para la evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza, son principalmente la capacidad de almacenar ordenadamente gran cantidad de datos georreferenciados, la rapidez de procesamiento y actualización de los mismos, así como la facilidad para la combinación y representación gráfica de ellos, incluyendo el procesamiento de múltiples fases del modelo que de otra manera tomarían demasiado tiempo.

El mayor peligro en la utilización de los SIG se encuentra en usuarios que pueden tender a reemplazar el razonamiento, la calidad de los datos, el análisis, y hasta los modelos conceptuales mismos, por la herramienta

La primera aplicación del uso de SIG para la zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza, fue reportada por Newman (1978). Actualmente los SIG, son usados para casi todos los estudios de susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa en el mundo y se siguen desarrollando metodologías para la aplicación de las técnicas de análisis, la mayoría de las aplicaciones para análisis cualitativos.

Cada metodología y técnica de modelamiento puede aportar valiosos resultados al conocimiento del problema, si se establecen con claridad tanto la escala de trabajo, como una objetiva recolección y manejo de los datos, sumado a una adecuada presentación de los resultados.