

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



TECNOLÓGICO
DE MONTERREY

ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A LA OCURRENCIA DE
DESLIZAMIENTOS EN LA SIERRA DE LAS MITRAS,
UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACION
GEOGRAFICA (SIG)

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES

POR
FERNANDO MARTIN QUISPE MEDINA

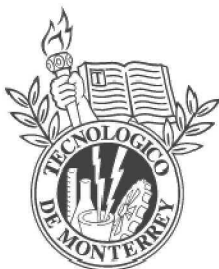
MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE 2005

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLOGICO
DE MONTERREY**

**Análisis de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos en la Sierra de las
Mitrás, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES**

POR:

FERNANDO MARTIN QUISPE MEDINA

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE DE 2005

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que el presente proyecto de tesis presentado por el Ing. Fernando Martín Quispe Medina sea aceptado como requisito parcial para obtener el grado académico de:

Maestro en Ciencias en Sistemas Ambientales

Comité de Tesis:

Dr. Martin Hermann Bremer Bremer

ASESOR

Dr. Diego Fabián Lozano García

SINODAL

Dr. Augusto Rogelio Canales Fernández

SINODAL

APROBADO

Federico Viramontes Brown
Director del Programa de Graduados en Ingeniería

Diciembre, 2005

AGRADECIMIENTOS

Al International Fellowship Program of Ford Foundation por haberme proporcionado los recursos financieros para realizar mis estudios de postgrado en la Maestría de Sistemas Ambientales del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey - ITESM.

Al Instituto de Estudios Peruanos (IEP) de manera especial a Carolina Trivelli, Cecilia Israel y Elsa Elías a quienes expreso mi gratitud, admiración y respeto por el inmejorable apoyo que me brindaron, sobre todo en los momentos difíciles que me tocaron vivir.

A los maestros del Centro de Calidad Ambiental que han enriquecido mis conocimientos y satisfecho los objetivos que me indujeron a participar en la maestría a ellos reconozco como guías en mis actividades profesionales venideras.

Al Dr. Martín Bremer Bremer, asesor de la tesis, gracias por los consejos, apoyo e iniciativa para llevar adelante la investigación.

Al Dr. Fabián Lozano García por facilitarme la información y equipos necesarios del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, sin los cuales no hubiera sido posible culminarlo satisfactoriamente.

Al Ing. Musio Rodriguez, Tania Norato y Mario Cabello del Laboratorio de Geofísica Ambiental, que siempre estuvieron predispuestos a apoyar y que hacen un gran equipo de trabajo, a ellos mis mejores deseos.

DEDICATORIA

Con especial cariño a quienes son la razón y justificación precisa para un esfuerzo de superación, aquellos que confían y tienen fe en los resultados de la meta lograda, a los que estarán siempre conmigo en todo momento, en los únicos que deposito mis esperanzas y sueños y sopesan la experiencia de soportar la distante y prolongada ausencia del hogar, ellos son: Pilar mi esposa; Noemí, Jorge Luís y Alexia mis hijos.

A la memoria de mis padres Luís y Leandra que mientras estuvieron confiaron en mí, me entregaron lo mejor de sus energías y supieron sabiamente guiarme por el camino del conocimiento ellos sabían, de los frutos que da la educación.

A mi hermana Elena y sus hijos Jason, Jimmy y Pedro, por su permanente y solidario apego familiar.

RESUMEN

Los deslizamientos, más en general movimientos de masa o también movimiento de laderas, constituyen un riesgo geológico de origen natural o inducido, donde casi siempre las pérdidas más grandes son vidas humanas y materiales. En Monterrey el caso mas reciente ocurrió en el mes de Julio de 2005, en el fraccionamiento Colinas de San Jerónimo ubicado al SE de la Sierra de las Mitras; la misma ha ocasionado enormes pérdidas económicas que llegan hasta la demolición del edificio multifamiliar denominado como Torres de San Jerónimo.

El estudio parte de dos supuestos. Que los deslizamientos son el resultado de la acción de características específicas de factores ambientales internos y de conformación morfológica de las laderas. También que el inventario de movimientos de laderas acontecidos en el pasado y los recientes, adecuadamente relacionados, mediante un modelo, con los factores ambientales internos ayudan a establecer niveles de susceptibilidad y a zonificar.

Se realiza el análisis de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos en la Sierra de las Mitras con metodologías probabilísticas y utilizando el Sistema de Información Geográfica Arc View. Para esto se aplican dos modelos en el procesamiento de datos: el teorema de Bayes (modelo principal) y mediante el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en una clase de una variable (modelo alternativo).

En los mapas de susceptibilidad, resultado de la aplicación de los modelos existen significativas diferencias. Esto induce a concluir que los factores ambientales son valorados de maneras diferentes por cada modelo, sin embargo para ambos algunas variables juegan un rol importante en la conformación de las superficies por niveles de susceptibilidad.

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DEFINICIÓN DE DESLIZAMIENTO	1
1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS	2
1.3. CRITERIOS BÁSICOS PARA DISTINGUIR DESLIZAMIENTOS	4
1.3.1. <i>Desprendimiento</i>	4
1.3.2. <i>Derrumbes</i>	4
1.3.3. <i>Deslizamientos</i>	4
1.3.4. <i>Desplazamientos laterales</i>	4
1.3.5. <i>Flujos</i>	5
1.4. FACTORES QUE CAUSAN DESLIZAMIENTOS	5
1.5. FACTORES INTERNOS O CONDICIONES.....	6
1.6. FACTORES EXTERNOS O PROCESOS	7
1.6.1. <i>Precipitaciones</i>	7
1.6.2. <i>Cambios en los niveles superficiales de los cuerpos de agua adyacentes a las pendientes.</i>	8
1.6.3. <i>Actividad sísmica</i>	8
1.6.4. <i>Erupciones volcánicas</i>	8
1.6.5. <i>Erosión</i>	9
1.6.6. <i>Caída de presas naturales</i>	9
1.6.7. <i>Actividades humanas</i>	9
1.7. RIESGO	10
1.8. REPRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD	12
1.9. ESCALA DE LOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD	12
1.9.1. <i>Escala Nacional (<1/1000000)</i>	13
1.9.2. <i>Escala regional/sinóptica (<1/100000)</i>	13
1.9.3. <i>Escala mediana (1/25000 - 1/50000)</i>	13
1.9.4. <i>Escala grande (<10000)</i>	14
1.10. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD	15
1.10.1. <i>Métodos determinísticos</i>	16
1.10.2. <i>Los métodos heurísticos</i>	17
1.10.3. <i>Métodos estadísticos o probabilísticos</i>	18
1.10.4. <i>Los métodos geomorfológicos</i>	23
1.10.5. <i>Métodos con redes neuronales</i>	24
1.11. LOS SIG EN LA VALORACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS.....	24
1.12. VALIDACIÓN DEL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD	27
II. METODOLOGÍA.....	28
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	28
2.2. JUSTIFICACIÓN.....	29
2.3. SUPUESTOS	30
2.4. OBJETIVOS DEL LA INVESTIGACIÓN	31
2.4.1. <i>Objetivo General</i>	31

2.4.2.	<i>Objetivos Específicos</i>	31
2.5.	ANÁLISIS DE DATOS.....	31
2.5.1.	<i>Superposición de capas</i>	31
2.5.2.	<i>Modelo principal de análisis de datos</i>	33
2.5.3.	<i>Elaboración de la escala y mapa de susceptibilidad</i>	35
2.5.4.	<i>Procedimiento alternativo</i>	36
2.5.5.	<i>Validación de las metodologías aplicadas</i>	37
2.6.	LA SIERRA DE LAS MITRAS	38
2.6.1.	<i>Ubicación</i>	38
2.6.2.	<i>Clima</i>	38
2.6.3.	<i>Geomorfología</i>	39
2.6.4.	<i>Litología</i>	40
2.6.5.	<i>Geología estructural</i>	44
2.6.6.	<i>Vegetación</i>	45
2.6.7.	<i>Edafología</i>	48
III.	RESULTADOS	50
3.1.	SELECCIÓN DE VARIABLES.....	50
3.2.	PREPARACIÓN DE VARIABLES	51
3.2.1.	<i>Pendiente</i>	51
3.2.2.	<i>Aspecto</i>	53
3.2.3.	<i>Drenaje</i>	55
3.2.4.	<i>Vegetación</i>	57
3.2.5.	<i>Edafología</i>	58
3.2.6.	<i>Litología</i>	59
3.2.7.	<i>Fallas y fracturas</i>	60
3.2.8.	<i>Uso de suelos</i>	62
3.2.9.	<i>Inventario de deslizamientos</i>	63
3.3.	SUPERPOSICIÓN DE VARIABLES A LA CAPA DE DESLIZAMIENTOS.....	67
3.4.	APLICACIÓN DE LOS MODELOS.....	73
3.5.	MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD.....	78
IV.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	80
4.1.	NIVELES DE SUSCEPTIBILIDAD Y ZONIFICACIÓN DEL MAPA	80
4.2.	DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS POR NIVELES DE SUSCEPTIBILIDAD.....	81
4.3.	DISTRIBUCIÓN DE DESLIZAMIENTOS POR NIVELES DE SUSCEPTIBILIDAD	83
4.4.	INFLUENCIA DE LAS VARIABLES EN EL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD	85
4.4.1.	<i>Modelo principal</i>	85
4.4.2.	<i>Modelo alterno</i>	87
4.4.3.	<i>Orden de importancia de las variables</i>	89
4.5.	LA ALTITUD Y LOS DESLIZAMIENTOS.....	90
4.6.	LA ALTITUD Y EL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD	90
4.7.	ORIENTACIÓN Y PENDIENTE DE DESLIZAMIENTOS	91

4.8.	COMPORTAMIENTO DE LAS PENDIENTES EN LA LITOLOGÍA.....	93
4.9.	EVALUACION ESTADISTICA DE LA PENDIENTE POR FORMACIONES DE ROCA.....	94
4.10.	SIMULACION DE CAIDA DE ROCAS	96
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
VII.	ANEXOS.....	107
	ANEXO 1. EVALUACION ESTADISTICA DE LA PENDIENTE POR FORMACIONES DE ROCA.....	107
	ANEXO 2: SIMULACIÓN CAÍDA DE ROCAS.....	116

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de Varnes	3
Tabla 2. Escala de velocidad de los deslizamientos	3
Tabla 3. Capas de datos análisis de susceptibilidad	14
Tabla 5. Escala de susceptibilidad	36
Tabla 6. Características de las fuentes de información primaria	50
Tabla 7. Clases de Pendiente	52
Tabla 8: Resumen de variables	67
Tabla 9. Resultados de aplicación del modelo principal	74
Tabla 10. Resultados de aplicación del modelo alterno	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismos de rotura principales	5
Figura 2. Intersección de variables	32
Figura 3. Unión de variables	33
Figura 4. Diagrama de Venn Euler para el modelo	34
Figura 5. Estratigrafía de la Sierra de las Mitras	41

INDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1. Métodos de análisis de susceptibilidad a deslizamientos	15
Diagrama 2. Métodos de Análisis Determinísticos	16
Diagrama 3. Superposición de capas	32
Diagrama 4. Procedimiento para la asignación de pesos a los polígonos	35
Diagrama 5. Metodología	37

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Análisis de pendientes	52
Gráfico 2. Análisis de orientación de las pendientes	54
Gráfico 3. Diagrama de Rosa de las fallas y fracturas	60
Gráfico 4. Relación de áreas variable Pendiente	68
Gráfico 5. Relación de áreas variable Aspecto	69
Gráfico 6. Diagrama de Rosas del Aspecto con deslizamientos	69
Gráfico 7. Relación de áreas variable Drenaje	70
Gráfico 8. Relación de áreas variable Vegetación	71
Gráfico 9. Relación de áreas variable Edafología	71
Gráfico 10. Relación de áreas variable Litología	72
Gráfico 11. Relación de áreas variable Fallas y fracturas	73
Gráfico 12. Relación de áreas variable Uso de suelos	73
Gráfico 13. Áreas y conteo de polígonos del modelo principal	81
Gráfico 14. Áreas y polígonos del modelo alterno	82
Gráfico 15. Ubicación de deslizamientos por niveles	83
Gráfico 16. Distribución por tipo de deslizamientos modelo principal	84
Gráfico 17. Distribución por tipo de deslizamientos modelo alterno	85

Gráfico 18. La altitud y los deslizamientos	90
Gráfico 19. Orientación y pendiente de los deslizamientos	92
Gráfico 20. Pendiente de las formaciones de roca	93
Gráfico 21. Comportamiento de medias formación Cupido	94
Gráfico 22. Comportamiento de medias formación Aurora	95
Gráfico 23. Comportamiento de medias formación La Peña	95

INDICE DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación del área de estudio	38
Mapa 2. Pendientes	53
Mapa 3. Mapa de orientación de las pendientes	55
Mapa 4. Drenaje	56
Mapa 5. Vegetación	57
Mapa 6. Edafología	58
Mapa 7. Litología	59
Mapa 8. Fallas y fracturas	62
Mapa 9. Uso de suelos	63
Mapa 10. Inventario de deslizamientos	65
Mapa 11. Ubicación fotográfica de los deslizamientos	66
Mapa 12. Mapa de susceptibilidad modelo principal	78
Mapa 13. Mapa de susceptibilidad modelo alterno	79
Mapa 14. Simulación de desprendimientos o caída de rocas	99

INDICE DE FOTOS

Foto 1. Área de derrumbe	97
Foto 2. Bloques desplazados por derrumbe, perfiles 1 y 2	98
Foto 3. Bloques de rocas desplazados por derrumbe, perfil 3	98

I. INTRODUCCIÓN

1.1. DEFINICIÓN DE DESLIZAMIENTO

Los deslizamientos, o más en general movimientos de masa o también movimientos de pendiente, constituyen un riesgo geológico de origen natural o inducido, donde casi siempre las pérdidas más grandes son las vidas humanas y materiales. En la National Landslide Information Center (USGS, 2004) se citan algunos registros históricos de eventos catastróficos ocurridos en el siglo XX, como: Kalut lahars (Indonesia, 1919), 5110 muertos; Haiyuan (China, 1929), 100 mil muertos; Khait (Republica de Tadzshik, 1949), 12000 – 20000 muertos; Huascarán (Perú, 1962), 4000 - 5000 muertos; reservorio de Vaiont (Italia, 1963), 2000 muertos; Huascarán (Perú, 1970), más de 18000 muertos, Nevado del Ruiz (Colombia, 1985), 20000 muertos; huracán Mitch (Honduras, Guatemala, Nicaragua y El Salvador, 1998), aproximadamente 10000 muertos. Asimismo, las pérdidas materiales y económicas son muy grandes: Mount Rokko (Japón, 1939), 130000 casas destruidas; Kanogawa (Japón, 1958), 19754 casas destruidas; Alaska (EEUU, 1964), 280 millones de dólares en pérdidas; Thistle, Utah (EEUU, 1980), 600 millones de dólares en pérdidas. Sin embargo, como fenómeno natural, comparativamente, es mayor el impacto de los sismos, inundaciones, erupciones volcánicas o huracanes que el de los deslizamientos.

Durante la investigación se utilizará como nombre genérico deslizamiento. El mismo que es definido por Kehew (1998) como una variedad de procesos involucrados en el desplazamiento de masas de rocas, detritos o tierra bajo la acción de la gravedad; cuando el esfuerzo de corte excede el esfuerzo de resistencia del material (van Westen, 1999). No obstante el término deslizamiento, específicamente, se refiere a movimientos de ladera que se producen a lo largo de una superficie de rotura bien definida.

La ocurrencia de los deslizamientos es consecuencia de un complejo campo de esfuerzos (fuerza por unidad de área) que está activo en una masa de roca o de suelo en la pendiente. Básicamente, los dos parámetros más determinantes son: un incremento en el esfuerzo de corte y una disminución en la resistencia del material (van Westen, 1999).

El incremento del esfuerzo de corte se debe a: la remoción del soporte lateral o de base (erosión, deslizamientos previos, cortes de carreteras y canteras); al incremento de carga (peso de la lluvia/nieve, rellenos, vegetación); el incremento de presiones laterales (presiones hidráulicas, raíces, cristalización, expansión de la arcilla); al esfuerzo transitorio (terremotos, vibraciones de camiones, maquinaria, explosiones); la inclinación regional (movimientos geológicos). Mientras que la disminución en la resistencia del material es producto de: la motorización, cambios en el estado de consistencia, cambios en las fuerzas ínter granulares (presión de los poros de agua, disolución), cambios en la estructura (disminución de la resistencia en el plano de falla, fracturamiento debido a “descargas”).

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS

Existen varias clasificaciones de deslizamientos, basadas todas ellas en los mecanismos de rotura y la naturaleza de los materiales involucrados, las más difundidas son: Sharpe (1938), Varnes (1978), Hutchinson (1988), el sistema de clasificación de deslizamiento unificado de Wieczorek, Corominas y García (1997). Según Varnes (1978), citado en Kehew (1998), los deslizamientos están clasificados de acuerdo al tipo de movimiento y al tipo de material del talud involucrado, los materiales del talud son divididos en: roca madre, suelos compuestos por partículas predominantemente gruesos (escombros), y suelos compuestos por partículas predominantemente de clastos finos (tierra); se utilizan seis tipos de movimientos en la clasificación, cada tipo de movimiento da el nombre a dos partes que relacionan el tipo de movimiento y el tipo de material. Sin embargo, muchos movimientos de taludes no pueden ser asignados a un simple proceso y por lo tanto deben ser incluidos en la categoría de complejos (Tabla 1). En la Tabla 2 aparece una clasificación con indicación de la velocidad del movimiento (Kehew, 1998).

Tabla 1. Clasificación de Varnes

Tipo de Movimiento			Tipo de Material		
			Roca Madre	Ingeniería de suelos	
				Predominantemente grueso	Predominante fino
Desprendimientos			Desprendimiento de rocas	Desprendimiento de escombros	Desprendimiento de tierra
Derrumbes			Derrumbe de rocas	Derrumbe de escombros	Derrumbe de tierra
Deslizamientos	Rotacional	Pocas Unidades	Hundimiento de rocas	Hundimiento de escombros	Hundimiento de tierra
	Trasnaciona l	Muchas Unidades	Deslizamiento de bloques de roca Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de bloques de escombros Deslizamiento de escombros	Deslizamiento de bloques de tierra Deslizamiento de tierras
Desplazamientos laterales			Desplazamiento de rocas	Desplazamiento de escombros	Desplazamiento de tierra
Flujos			Flujo de rocas	Flujo de escombros	Flujo de suelos
Complejos (combinación de dos o más tipos principales de movimientos)					

Clasificación de movimiento de taludes. (de D.J. Varnes, 1978, Tipos de movimientos de pendientes y procesos, en Landslides: Analysis and Control, R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds., TRB Special report 176, transportation research board, National Council, Washington, D.C.)

Tabla 2. Escala de velocidad de los deslizamientos

VELOCIDAD	DESCRIPCIÓN	NATURALEZA DEL IMPACTO
Más 3m/s	Extremadamente rápido	Catástrofe de gran violencia
0.3m/min – 3m/s	Muy rápido	Pérdida de algunas vidas gran destrucción.
1.5m/día – 0.3m/min	Rápido	Posible escape y evacuación, destrucción de estructuras, posesiones y equipos.
1.5m/mes – 1.5m/día	Moderado	Pueden resistir estructuras poco sensibles
1.5m/año – 1.5m/mes	Lento	Pueden resistir estructuras y carreteras bien construidas si tienen mantenimiento adecuado y constante.
0.06m/año – 1.5m/año	Muy lento	Algunas estructuras permanentes construidas con criterios formales de ingeniería no sufren daños o si llegan a sufrir algún agrietamiento pueden repararse.
Menor que 0.06m/año	Extremadamente lento	No hay daños a las estructuras construidas con criterios de ingeniería.

Escala de velocidades para movimientos de taludes. (De D.J. Varnes, 1978, Tipos de movimientos de taludes y procesos, en Landslides: Análisis and Control, R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds., TRB Special report 176, transportation research board, National Council, Washington, D.C.)

1.3. CRITERIOS BÁSICOS PARA DISTINGUIR DESLIZAMIENTOS

El criterio básico que permite separar los distintos tipos de deslizamiento en la mayoría de las clasificaciones son los mecanismos de rotura principales. Se pueden encontrar cinco mecanismos principales: Desprendimiento, derrumbes, deslizamientos propiamente dichos, desplazamientos laterales y flujos; y un sexto referido a los movimientos complejos (Santacana, 2001). Clasificación muy similar a la propuesta por van Westen (1999) para trabajos de fotointerpretación quien agrega como un sexto mecanismo a las avalanchas, mientras que los movimientos complejos son asociados a cada uno de los mecanismos (Figura 1).

1.3.1. Desprendimiento

Es aquel movimiento, en forma de bloques aislados o masivamente que, en una gran parte de su trayectoria desciende por el aire en caída libre, volviendo a entrar en contacto con el terreno, donde se producen saltos, rebotes y rodaduras.

1.3.2. Derrumbes

Son movimientos de rotación hacia el exterior, de una unidad o un conjunto de bloques, alrededor de un eje pivotante situado por debajo del centro de gravedad de la masa movida.

1.3.3. Deslizamientos

Son movimientos descendentes relativamente rápidos de una masa de suelo o roca que tiene lugar a lo largo de una o varias superficies definidas que son visibles o que pueden ser inferidas razonablemente o bien corresponder a una franja relativamente estrecha; se considera que la masa movilizada se desplaza como un bloque único, y según la trayectoria descrita los deslizamientos pueden ser rotacionales o traslacionales.

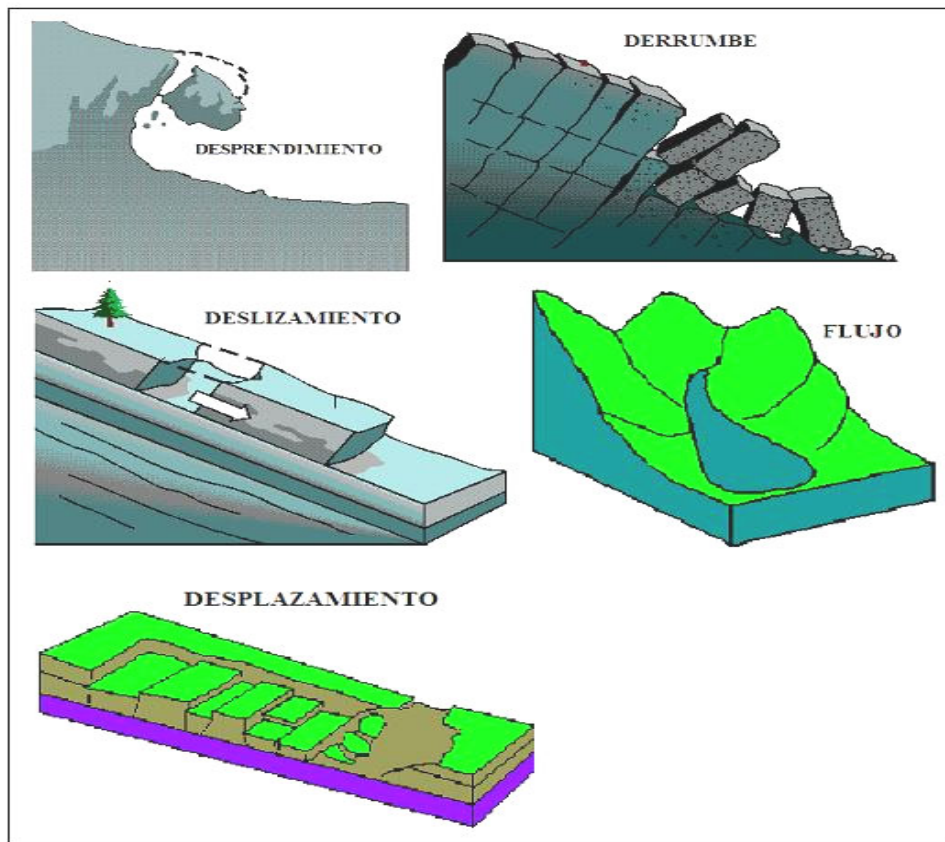
1.3.4. Desplazamientos laterales

El movimiento dominante en las expansiones laterales es la extrusión plástica lateral, acomodada por fracturas de cizalla o de tracción que en ocasiones pueden ser de difícil localización.

1.3.5. Flujos

Los flujos son movimientos de una masa desorganizada o mezclada donde no todas las partículas se desplazan a la misma velocidad ni sus trayectorias tienen que ser paralelas; por lo que la masa movida no conserva su forma durante el movimiento descendente, adoptando a menudo morfologías lobuladas.

Figura 1. Mecanismos de rotura principales



1.4. FACTORES QUE CAUSAN DESLIZAMIENTOS

Un deslizamiento puede ser causado por uno o varios factores, de los cuales son más comunes los: geológicos, morfológicos, físicos, y los procesos humanos (Alexander 1992, Cruden y Varnes 1996, Wieczorek 1996 citado en Schuster y Wieczorek 2002), pero comúnmente tiene un solo desencadenador (Varnes 1978 citado en Schuster et. al. 2002). Popescu (1996) citado en Schuster et. al. 2002, ha dividido los *factores causales* que dan como resultado la falla de un talud en *condiciones* (aquellos factores preexistentes o internos que ha largo plazo ocasionan

la inestabilidad del talud) y *procesos* (aquellos factores externos de estímulo inmediato que desencadenan el movimiento de taludes). Los procesos de largo plazo que facilitan el desarrollo de un deslizamiento se han iniciado con la formación de la roca misma, cuando sus propiedades físicas básicas son determinadas e incluye todos los eventos posteriores de movimiento de la corteza terrestre, erosión, meteorización, y desarrollo de la pendiente (Zolotarev 1974 citado en Schuster et. al. 2002). Asimismo, una acción desencadenante que puede ser trivial (Varnes 1978 citado en Schuster et. al. 2002), pone una masa de material en movimiento cuesta abajo. El término “desencadenador” de deslizamiento, comúnmente utilizado, se refiere a un estímulo externo, tal como una lluvia intensa, descongelamiento rápido, movimiento sísmico, erupción volcánica, erosión de corrientes y costera, y falla de presas naturales, que causan una respuesta inmediata o casi inmediata en la forma de deslizamientos debido al rápido incremento de los esfuerzos o presión de poros, por la aceleración del subsuelo debido a la actividad sísmica, por remoción del soporte lateral, por la reducción de la resistencia de los materiales del talud, o por la iniciación de un flujo de escombros (Schuster y Wieczoreck 2002).

1.5. FACTORES INTERNOS O CONDICIONES

Los factores internos condicionan las diferentes tipologías de deslizamiento, los mecanismos y modelos de rotura. Dentro de ellos encontramos las *características intrínsecas* relativas a las propiedades del material y a su resistencia y las *características extrínsecas* no relacionadas con el material y sí con la morfología de la ladera y condiciones ambientales de ésta (Santacana 2001). Las primeras incluyen parámetros como la litología, textura (granulometría, cementación), consolidación y espesor de los materiales y parámetros estructurales relativos a planos de estratificación y de debilidad (diaclasas, fallas, fracturas), como: orientación, buzamiento, porosidad. En las características extrínsecas podemos encontrar las morfológicas como la pendiente de la ladera y su disposición respecto a discontinuidades geológicas y la orientación (relacionada con la humedad del terreno), y factores de tipo ambiental como cambios estacionales de temperatura y vegetación (tipo de cambio, densidad, comportamiento de las raíces). La pendiente del terreno así como la morfología propia de cada ladera es un factor y

condicionante previo a partir del cual el resto de los factores se combinarán influyendo en la estabilidad.

1.6. FACTORES EXTERNOS O PROCESOS

1.6.1. Precipitaciones

La mayoría de los deslizamientos son desencadenados por la *precipitación* sea en forma de lluvia, deshielo, o combinación de ambos. En el macizo rocoso, el agua y el hielo penetran en las grietas y producen presión hidrostática; en los suelos, ocasionan el incremento de la presión de poros y reducen la resistencia tangencial. Las tormentas que producen lluvias intensas por periodos tanto cortos como largos o lluvias más moderadas que duran varios días comúnmente desencadenan abundantes deslizamientos en muchas partes del mundo; los umbrales de lluvia pueden proporcionar valores de predicción y advertencia acerca de eventos de deslizamientos, particularmente para flujo de escombros, que son de alta velocidad y alto peligro. Por lo tanto, las lluvias intensas causan deslizamientos de muchos tipos; sin embargo, lluvias muy intensas de corta duración son más aptas para causar fallas superficiales; las lluvias intensas continuas frecuentemente dan como resultado avalanchas de escombros catastróficas; las lluvias de periodo largo, o lluvias que siguen a otras pueden dar lugar a deslizamientos profundos o hundimientos sea en suelos o rocas, ocurren frecuentemente después de un tiempo de retardo que permite subir el nivel freático y la presión de poros; en áreas de escasa vegetación, desiertos o áreas recientemente quemadas el resultado común son los flujos de escombros cuando llueve. Por otro lado, el deshielo en invierno o verano causado por lluvias o repentinos periodos de calentamiento permite incrementar la infiltración de agua dentro de los taludes de las laderas y puede desencadenar una amplia variedad de actividad de deslizamientos, incluyendo desprendimiento de rocas, deslizamientos de tierra y rocas, y flujo de escombros y lodo; sin embargo, al parecer los eventos más comunes son los deslizamientos y flujos poco profundos (Schuster y Wieczoreck 2002).

1.6.2. Cambios en los niveles superficiales de los cuerpos de agua adyacentes a las pendientes.

Los cambios de elevación de la superficie de los cuerpos de agua en contacto con taludes adyacentes, frecuentemente desencadenan fallas de taludes, particularmente si los movimientos de niveles de agua son repentinos. Estas acciones pueden desencadenar deslizamientos aguas arriba de las presas de relleno naturales, a lo largo de las líneas costeras, y sobre las orillas de reservorios, lagos, ríos, y canales. Los deslizamientos que ocurren, más comúnmente, son los hundimientos o deslizamientos de tierra o roca, pero ocasionalmente suceden también como flujos o desplazamientos (Schuster y Wieczoreck 2002).

1.6.3. Actividad sísmica

En cuanto a la *actividad sísmica*, los deslizamientos suceden como resultado de la licuefacción inducida por el terremoto, un proceso que debido al sacudimiento temporal incrementa la presión de agua en los poros, por lo tanto reduce la resistencia tangencial del suelo. En ambientes sedimentarios, la edad del depósito, la profundidad del nivel freático, la distribución del tamaño de granos, densidad, y profundidad, tanto como el grado del sacudimiento, determinan si un depósito se licuaría durante un terremoto. En un estudio de los 40 mayores deslizamientos desencadenados por terremotos, Keefer (1984) hallaron que los desprendimientos de rocas, deslizamientos de suelo, y deslizamiento de rocas a partir de taludes pronunciados, involucrando suelos o rocas o ambos disgregados relativamente delgados o poco profundos han sido los productos más comunes de un terremoto. Asimismo, también puntualizó que la magnitud mínima de un terremoto que produciría un deslizamiento es de 4 en la escala de mercalli (Schuster y Wieczoreck 2002).

1.6.4. Erupciones volcánicas

Las *erupciones volcánicas* han desencadenado algunos de los deslizamientos más grandes del mundo. El resultado inmediato de una erupción volcánica tal vez sea un deslizamiento desencadenado por la caída de parte del cráter del volcán, el peligro más grande de deslizamiento en los alrededores es resultado de la avalancha de escombros a gran escala y el flujo de escombros (lahar) originados sobre los taludes

del volcán, tal como ha sido mostrado en Kelut, Mount St. Helens, y otros volcanes del mundo (Schuster y Wieczoreck 2002).

1.6.5. Erosión

La *erosión* es el principal proceso que desencadena deslizamientos, suceden dos agentes primarios de procesos, erosión debida a *corrientes* y *erosión costera*. En la erosión debida a corrientes muchos investigadores han notado que los deslizamientos se producen especialmente en el lado exterior de de los meandros; muchos de los cuales son hundimientos o deslizamientos debido al talud escarpado producido por la erosión de corrientes; dado que este tipo de erosión es un proceso progresivo, frecuentemente reactiva deslizamientos inactivos. La erosión costera es uno de los procesos que socava la línea costera debido a la acción de las ondas y mareas; ésta forma acantilados de mar, y da como resultado la desestabilización y deslizamiento, los mismos que van desde desprendimiento de rocas hasta mayores hundimientos y deslizamientos de rocas; es un proceso progresivo y el total de los efectos geomórficos de largo plazo son sustanciales (Schuster y Wieczoreck 2002).

1.6.6. Caída de presas naturales

Las caídas de muchas *presas naturales* resulta en la explosión de un flujo de escombros que incluye cantidades considerables de materiales granulares de las presas mismas o materiales ingresados durante la inundación aguas debajo de los canales. Estos flujos de escombros frecuentemente viajan considerables distancias antes de liberar mucho de su carga de sólidos y son transformados en un flujo de fluidos hiperconcentrado (Schuster y Wieczoreck 2002).

1.6.7. Actividades humanas

Por ultimo, las *actividades humanas* alteran el equilibrio de las laderas debido a cargas estáticas provocadas por construcciones de edificios, construcciones de taludes para vías de comunicación, explotaciones mineras y construcciones de presas. Asimismo los cambios en el recubrimiento vegetal como la tala de bosques, la repoblación con especies alóctonas, incendios forestales y otros también influyen en la estabilidad de las laderas (Santacana 2001).

1.7. RIESGO

El concepto de riesgo incorpora consideraciones socio económicas y se define como las pérdidas potenciales debidas a un fenómeno natural determinado (vidas humanas, pérdidas económicas directas e indirectas, daños a edificios y estructuras, etc.) (Gonzáles, Ferrer, Ortuño, Oteo 2004).

Como se expreso inicialmente, los deslizamientos constituyen riesgos geológicos nada despreciables, de esto se desprende que, su estudio con fines de prevención tiene que ser realizado desde esta perspectiva. El riesgo es a veces tomado como sinónimo de peligro, pero riesgo tiene la adicional implicación de la oportunidad de que un peligro en particular ocurra; el peligro es una parte ineludible de la vida, todos los días enfrentamos algún grado de riesgo. Es imposible vivir en un mundo totalmente libre de riesgo y la preocupación por el riesgo se irá incrementando por el hecho que la gente esta disfrutando vida más saludable; por otro lado, peligro es mejor visto como un proceso que ocurre naturalmente, o un proceso inducido por los seres humanos o el evento con el potencial para crear pérdidas (Smith 1996).

Se sabe que el riesgo es solo el resultado de una multiplicación muy sencilla (Sorriso-Valvo, 2002):

$$R = P \times V \times E$$

Donde:

R = Riesgo (\$).

P = Peligro (%).

V = Vulnerabilidad (%).

E = Valor del elemento en riesgo (\$).

Los dos primeros términos de la relación indican la probabilidad de ocurrencia, mientras que el tercero es expresado en términos económicos. El peligro resulta de la combinación de dos componentes: susceptibilidad (S), y frecuencia y eficacia de los agentes causales (Sorriso-Valvo, 2002). El término susceptibilidad hace

referencia a la predisposición del terreno a la ocurrencia de deslizamiento y no implica el aspecto temporal del fenómeno (Santacana, 2001). Mientras que la frecuencia y eficacia de los agentes causales dependen del: alcance y comportamiento del deslizamiento, que se refieren al tipo de deslizamiento, tamaño y movilidad; y la potencialidad del fenómeno, relacionado con la predicción temporal del fenómeno de deslizamiento, considerado como el aspecto más difícil de definir en la evaluación de peligrosidad del deslizamiento (Santacana, 2001). No obstante, lo último puede ser estimado si se conocen las pautas temporales del proceso (por ejemplo: periodo de retorno de terremotos e inundaciones a partir de datos series históricas y/o instrumentales) o de los factores que desencadenan deslizamientos en una zona.

La vulnerabilidad implica una medida del riesgo combinado con la habilidad social y económica para hacer frente con el evento resultante; en otras palabras es el grado en que un sistema o parte de un sistema, pueden reaccionar adversamente a la ocurrencia de un evento peligroso (Smith 1996) o el grado de daños o pérdidas potenciales en un elemento o conjunto de elementos como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de intensidad determinada; los países pobres son más vulnerables por sus deficientes construcciones, alta densidad de construcciones, alta densidad de población, etc. puede evaluarse en términos de porcentaje de población afectada por un determinado proceso (González, et. al. 2004). En la literatura especializada existen varias escalas de vulnerabilidad para los diferentes tipos de deslizamientos de diferente intensidad (o magnitud) y para diferentes elementos en riesgo (Soriso-Valvo 2002).

Una vez que se ha evaluado el nivel de riesgo, el parámetro más importante que debe estar disponible para el manejo de tierras es el riesgo aceptable. Es seguro que será imposible reducir el riesgo a cero, pero es determinante un nivel máximo para el riesgo aceptable, por lo tanto, se requiere que el riesgo presente sea evaluado en una escala numérica con una alta precisión, lo cual es difícil, pero posible, para algunos taludes artificiales, aunque muy difícil o imposible, con taludes naturales (Soriso-Valvo 2002).

1.8. REPRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD

Basado en las definiciones mencionadas, las informaciones de susceptibilidad, peligro y riesgo son generalmente representados como mapas discretos. Las clases discretas representan clases de igual probabilidad, que son a la vez clases de igual peligro o riesgo. La diferenciación de clases de peligro y su agrupamiento son llamados como “zonation” (Süzen 2002). Varnes (1984) define zonation como el término referido a la división de tierras en áreas homogéneas o usos dominantes definidos y al rango de estas áreas de acuerdo a sus grados de actual potencial peligro natural.

El zoneamiento de peligros naturales esta controlado, principalmente, por dos factores: La escala del zoneamiento y el tipo de conocimiento utilizado en el zoneamiento del peligro. Antes de iniciar cualquier recolección de datos es necesario establecer: el objetivo del estudio; la escala y el grado de precisión con que el estudio debe ser presentado; y los recursos disponibles en términos de dinero, datos y mano de obra. Como el objetivo del estudio se define al principio, la escala y la precisión son definidas previas al inicio del proyecto, por lo tanto, el factor de escala tendría que ser determinado en la primera mirada para establecer como controla el tipo de los datos de entrada, la naturaleza del análisis y los datos de salida del proyecto; la precisión del resultado es dependiente de la escala seleccionada, no obstante es independiente considerando la naturaleza del proyecto; los ajustes necesarios con la escala deberían de hacerse hasta que la precisión de salida y la precisión deseada satisfagan las condiciones del proyecto; el análisis de los recursos debería efectuarse después que son fijados el objetivo y escala del proyecto (Süzen 2002).

1.9. ESCALA DE LOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD

Cuando se preparan mapas de susceptibilidad se debe valorar la influencia con que un número de factores incidirá en la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos (Rengers et. al., 1992 citado en Süzen, 2002). Cuanto más detallado sea el mapa más factores deberán ser estudiados. La escala de análisis es uno de los primeros puntos a considerar en un proyecto. De ella dependerá la metodología utilizada, los

factores o datos considerados, la unidad del terreno, etc. (Tabla 3) En general se distinguen las siguientes escalas para la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos (IAG, 1976):

1.9.1. Escala Nacional (<1/1000000)

Esta escala de análisis se usa sólo para delimitar el problema, da una idea acerca del tipo de peligro y áreas propensas a ser afectadas por el peligro. Son preparadas generalmente para todo un país y el detalle del mapa es muy bajo, en el mejor de los casos esta basado en récord en la forma de inventarios. Estos mapas son preparados, generalmente, por agencias que tienen que ver con planeamiento regional (agricultura, urbana o infraestructura) o las agencias de prevención de desastres naturales o evaluación de peligros.

1.9.2. Escala regional/sinóptica (<1/100000)

La escala es aún demasiado pequeña para el uso de cualquier método cuantitativo, pero estos mapas son usados para planeamiento regional en las primeras etapas. Las áreas investigadas son aún grandes en el orden de miles de kilómetros cuadrados y el detalle del mapa es bajo otra vez. Se utilizan sólo métodos simples en combinación con datos cualitativos y el zoneamiento esta basado principalmente en las unidades geomorfológicas del terreno/complejos (TMU) o dependiente en las unidades geológicas regionales.

1.9.3. Escala mediana (1/25000 - 1/50000).

Estos mapas son principalmente hechos por agencias de planeamiento inter municipal o compañías que tienen que ver con estudios de factibilidad para trabajos de ingeniería grandes. Las áreas a ser investigadas serían de varios cientos de kilómetros cuadrados. En esta escala se requieren considerablemente más detalles que en la escala regional. Estos mapas sirven especialmente para la selección de corredores para la construcción de infraestructura o zonas para desarrollo urbano. Son las técnicas estadísticas, las predominantemente usadas en esta escala.

1.9.4. Escala grande (<10000)

Estos mapas de peligro son generalmente producidos por autoridades que tienen que ver con el planeamiento de infraestructura, viviendas o proyectos industriales o con evaluación de riesgos dentro de una ciudad o dentro del área de un proyecto específico. Cubren áreas muy pequeñas, por lo tanto, son usados los métodos de análisis determinísticos. El nivel de detalle de los mapas se fija en lo máximo. Están basados en modelos numéricos físicos que requieren extensa recolección de datos en el campo y laboratorio.

Tabla 3. Capas de datos análisis de susceptibilidad

Capas de datos		Escala de Análisis		
		Regional	Media	Grande
Geomorfología	1. Unidades de mapeo del terreno	3	3	3
	2. Sub unidades geomorfológicos	2	3	3
	3. Deslizamientos recientes	1	3	3
	4. Deslizamientos antiguos	1	3	3
Topografía	5. Modelo digital del terreno	2	3	3
	6. Mapa de pendientes	2	3	3
	7. Mapa de dirección de la pendiente	2	3	3
	8. Longitud de la pendiente	2	3	3
	9. Concavidad/convexidad	1	1	3
Ingeniería Geológica	10. Litología	2	3	3
	11. Secuencia de los materiales	1	2	3
	12. Mapa de geología estructural	3	3	3
	13. Aceleraciones sísmicas	3	3	3
Uso de la tierra	14. Infraestructura reciente	3	3	3
	15. Infraestructura antigua	3	3	3
	16. Uso de la tierra reciente	2	3	3
	17. Uso de la tierra antiguo	2	3	3
Hidrología	18. Drenaje	3	3	3
	19. Áreas de cuencas	2	3	3
	20. Lluvia	2	3	3
	21. Temperatura	2	3	3
	22. Evapotranspiración	2	3	3
	23. Mapas de tabla de agua	1	1	3

Fuente: Introducción a los deslizamientos: Uso de los SIG en el mapeo de deslizamientos (1999). (Cees van Westen, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede, The Netherlands.

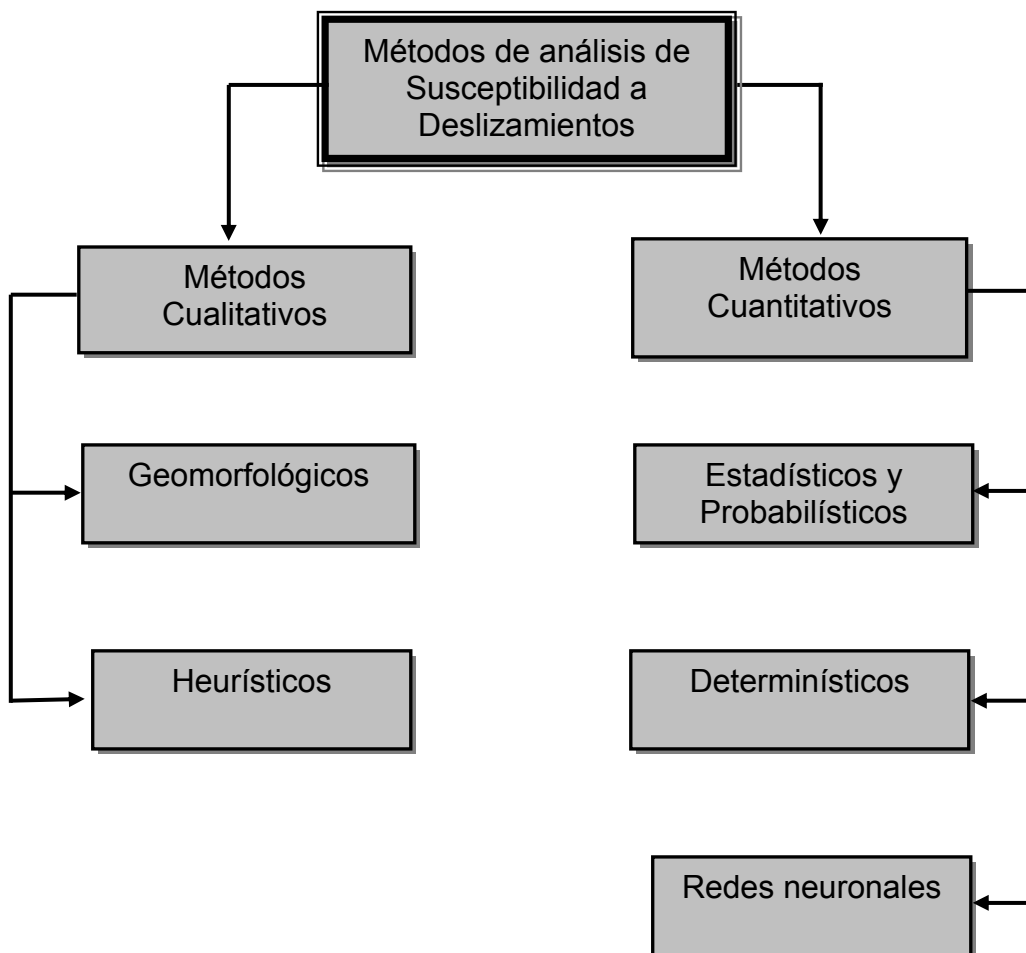
NOTA: Los números indican la posibilidad de obtención de datos 1. Pobre, 2. Moderado, 3. Buena.

1.10. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

Carrara (1983) citado en Suarez (2002), diferenció las técnicas de zonificación en tres formatos: modelos de caja blanca (White box model), los cuales se basan en modelos físicos de estabilidad de taludes y modelos hidrológicos son los modelos determinísticos; modelos de Caja negra (Black box model), los cuales se basan en análisis estadístico solamente y modelos de caja gris (Gray box model), basados parcialmente en modelos físicos y en estadística.

Los diferentes procedimientos para valorar el peligro por deslizamiento pueden ser, también, clasificados en dos grupos principales: los métodos cualitativos y los métodos cuantitativos (Begueira et. al., 1999). (Diagrama 1)

Diagrama 1. Métodos de análisis de susceptibilidad a deslizamientos



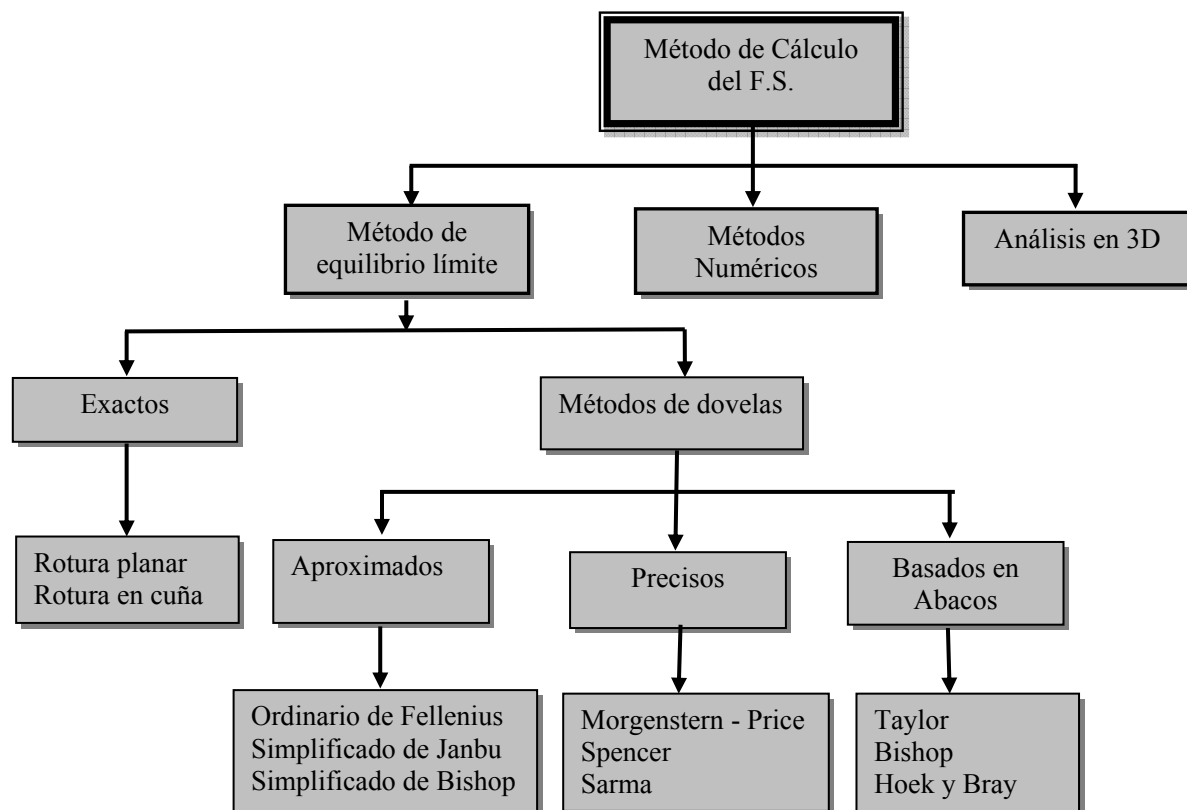
Adaptado de: Begueira, S., Lorente, A. (1999). Landslide Hazard Mapping by Multivariate Statistics: Comparison of Methods and Case Study in the Spanish Pyrenees. Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza – España, pp. 4-5.

Los métodos cualitativos incluyen los geomorfológicos y los heurísticos, estos son muy flexibles y permiten la inclusión del conocimiento de los expertos; la principal debilidad es que involucran un gran nivel de subjetividad, a tal punto, que los mapas producidos por diferentes investigadores pueden ser muy diferentes. Los métodos cuantitativos incluyen los modelos geotécnicos y los estadísticos y recientemente las aproximaciones basadas en redes neuronales; no obstante no existe un modelo completamente objetivo; estos modelos aseguran que se obtendrán los mismos resultados si se proporcionan las mismas suposiciones básicas

1.10.1. Métodos determinísticos

Existe gran variedad de métodos determinísticos disponibles para realizar análisis de estabilidad (Diagrama 2).

Diagrama 2. Métodos de Análisis Determinísticos



Adaptado de: Suarez J. (2002). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Escuela de Ingeniería Civil – Universidad Industrial de Santander - Colombia; y Gavilanes J. (2003). Parámetros Geotécnicos y Estabilidad de Taludes. Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador - AIME.

Se usan para el estudio de la estabilidad de una ladera o talud concreto. Se fundamentan en métodos basados en el equilibrio límite o en modelos numéricos hasta complejos modelos tridimensionales, tiene entonces, una base física, que le da una gran ventaja respecto a otros métodos. Los datos de entrada son derivados de ensayos de laboratorio y se utilizan para determinar el factor de seguridad de la pendiente. Estos métodos muestran un grado de confiabilidad alto en el caso que los datos usados sean correctos. Su principal inconveniente es la baja idoneidad para zonificaciones rápidas y áreas extensas o regionales (Van Westen, 1993 citado en Santacana, 2001). Permiten el análisis no sólo de la susceptibilidad a la rotura, sino también del alcance (como los modelos de caídas de bloques) y de la frecuencia del fenómeno.

Aunque los métodos determinísticos son más adecuados para evaluar la inestabilidad en áreas pequeñas (ladera única), también son utilizados en el análisis de susceptibilidad para grandes áreas (regionalización) y con el objeto de discriminar zonas con parámetros de seguridad significativamente distintos (Van Westen y Tercien 1996; Luzy y Pergalani 1996; Leroi, 1996 citado en Santacana, 2001). El análisis puede llevarse a cabo en distintas condiciones (Luzi, 1995 citado en Santacana, 2001): *estáticas*, considerando la estabilidad del deslizamiento sin introducir fuerzas dinámicas externas; *pseudestáticas*, evaluando la entidad mínima de la fuerza dinámica externa que podría desencadenar el deslizamiento y *condiciones dinámicas*, en donde se introduce una fuerza dinámica externa comparable a un terremoto.

1.10.2. Los métodos heurísticos

Se basan en el conocimiento a priori de los factores que producen inestabilidad en el área objeto de investigación. Los factores son ordenados y ponderados según su importancia asumida o esperada en la formación de deslizamientos (Santacana, 2001). Son métodos donde los resultados pueden extrapolar a zonas sin deslizamiento con una combinación de factores similar. Un procedimiento de este tipo es el análisis cualitativo basado en la combinación de mapas de factores. Cada uno de estos factores forma un mapa que se combinará con los demás para la

obtención del mapa final de zonificación de inestabilidad. El principal inconveniente de este método está en la ponderación exacta de cada uno de los factores, dado que ha menudo se basa en conocimiento insuficiente en el campo de los factores importantes para definir la estabilidad (Santacana, 2001). Estos métodos permiten la regionalización o estudio a escala regional y son adecuados en el campo de los sistemas expertos (Carrara et al., 1995 citado en Santacana, 2001). Asimismo, introducen un grado de subjetividad que imposibilita el comparar documentos producidos por diferentes autores.

1.10.3. Métodos estadísticos o probabilísticos

Süzen (2002) sostiene que en el análisis estadístico para peligro de deslizamientos, se determinan los factores que en el pasado han dirigido los deslizamientos, y se hacen predicciones para áreas actualmente libres de deslizamientos pero donde existen condiciones similares. Además, el meollo del análisis radica en la superposición de mapas de parámetros y el cálculo de las densidades de deslizamientos. La mayor parte del análisis esta basado en las relaciones entre las densidades de deslizamientos por clase de parámetro comparado con la densidad de deslizamientos sobre el íntegro del área. Cada método tiene sus reglas propias específicas para integrar los datos requeridos en la producción del mapa total de peligro del área.

A pesar que las técnicas estadísticas pueden ser aplicadas a diferentes escalas, su uso tiende a ser bastante restringido a la escala regional, donde una precisión del mapa de ocurrencias puede no estar disponible y donde la mayoría de los parámetros no pueden ser coleccionados con la precisión apropiada. En escalas grandes tendrían que ser usados diferentes factores, tales como, profundidad del nivel freático, secuencias y espesor de las capas de suelo. Estos datos son muy difíciles de obtener incluso para áreas relativamente pequeñas. Por lo tanto, la escala mediana es considerada como la más apropiada para esta técnica.

La principal ventaja es la objetividad del método. La potencia de estos métodos depende directamente de la calidad y cantidad de datos adquiridos. El principal

inconveniente es el costo de adquisición de algunos factores relacionados con la inestabilidad de laderas.

Se pueden agrupar en: métodos estadísticos bivariantes, métodos estadísticos multivariantes y análisis de frecuencia de deslizamientos.

Los métodos estadísticos bivariados, en este método la superposición de mapas de parámetros y el cálculo de densidades es el núcleo del análisis, la importancia de cada parámetro, o las combinaciones específicas de parámetros pueden ser analizados individualmente. Usando valores normalizados un mapa total de peligros puede ser hecho por adición de los pesos para parámetros individuales. Los valores de peso pueden, también, ser usados para diseñar reglas de decisión, que sean basadas en la experiencia del científico. Es posible también combinar varios mapas de parámetros en un mapa de unidades homogéneas el cual es superpuesto por el mapa de deslizamientos para lograr una combinación única de parámetros de ingreso.

La selección de parámetros tiene un importante elemento subjetivo en este método. En GIS se usa el siguiente procedimiento (van Westen, 1993 citado por Süzen, 2002):

- Clasificación del mapa de cada parámetro en un número relevante de clases.
- Combinación del mapa del parámetro seleccionado con el mapa de deslizamientos vía superposición de mapas.
- Cálculo de los valores ponderados basado en los datos de la tabla cruzada.
- Asignación de valores ponderados a los mapas de varios parámetros, o diseño de reglas de decisión que sean aplicados a los mapas y clasificación de las puntuaciones obtenidas en pocas clases de peligros.

Como se puede ver del listado el último punto es altamente subjetivo porque no está claro como definir los rangos de peligro y en este caso susceptibilidad a deslizamientos.

El análisis estadístico bivariado trata con una variable dependiente (ocurrencia de deslizamiento) y una variable independiente (parámetro). La importancia de cada factor se analiza separadamente. Combinaciones específicas de variables pueden ser probadas tratando de combinar mapas como una nueva variable. El método está

basado en la suposición de que factores importantes dirigen los deslizamientos los cuales pueden ser cuantificados calculando la densidad del deslizamiento para cada clase de variable.

Los métodos se dividen en dos grupos: los que utilizan análisis condicional y los que no lo utilizan (Santacana, 2001). Entre los que utilizan el análisis condicional están los métodos estadísticos que han sido aplicados para calcular los valores ponderados; los cuales han sido denominados como Método de susceptibilidad a deslizamientos (Brabb, 1984; van Westen, 1992, 1993), Information value method (Kobashi y Susuki, 1998; Yin y Yan, 1988), weight of evidence modeling method (Spiegelhalter, 1986; Bonham-carte, 1996). Además, existen métodos no lo suficientemente explotados como: las reglas de combinación de Bayes, Certainty factor, el método creado por Dempster y Shafer y Fuzzy logic (Süzen, 2002).

Santacana (2001) cita otros modelos estadísticos no basados en las funciones de favorabilidad como: el modelo basado en la combinación de factores de Brabb et.al (1972) considerado como el primer análisis cuantitativo de susceptibilidad a deslizamientos y modificado por (Irrigaría,1990), el modelo del valor de información – *information value* – (Kobashi y Suzuki, 1991; irrigaría, 1995), el modelo de mensaje lógico – *logical mesage model*- (Runqiu y Yuangua, 1992) y el modelo probabilístico (Gonzales, 1992; Sabto, 1991) según Van Westen (1993), así como el método de la matriz (Degraff y Romesburg, 1980; Irigaray, 1995; Fernández et al., Irigaray et al., 1999).

Métodos estadísticos multivariados, estos métodos estudian la interacción y dependencia de un conjunto de factores que actúan simultáneamente en la ocurrencia de deslizamientos, para establecer la implicación que tienen cada uno de ellos. Se trata de una aproximación más objetiva que otras situándose hoy como uno de los procedimientos con mejores resultados en la predicción espacial de deslizamientos. Las técnicas estadísticas mas utilizadas son la regresión múltiple y el análisis discriminante. El resultado de ambos métodos son funciones basadas en la combinación lineal de los factores de mayor significación estadística para definir las condiciones de inestabilidad estando basados en la presencia/ ausencia de deslizamientos.

Sorriso-Valvo (2002) sostiene que los mejores resultados han sido alcanzados mediante el análisis estadístico multivariado, presencia/ausencia de deslizamiento, porque muchas veces se convierten variables no paramétricas como: tipo de roca, geomorfología local, cubierta vegetal, uso de suelos y otros; en variables numéricas. El procedimiento consiste en obtener por medio de la superposición de capas temáticas un mapa digital basado en celdas, para luego usar el análisis discriminante; asimismo, los recientes progresos logrados utilizando el análisis de regresión logística, basado en la probabilidad siempre positiva de la dicotomía presencia/ausencia, puede llegar a ocasionar grandes avances por el uso de técnicas tales como las redes neuronales.

El análisis discriminante permite separar varias poblaciones de una misma muestra caracterizadas por las mismas variables a partir de la función discriminante; esta es una combinación lineal de las variables independientes que refleja el distinto comportamiento de los individuos dentro de la muestra. Cuando el predictor de variables tiene una distribución multivariada normal, entonces la regla discriminante es conocida como la mejor discriminante (Gorsevsky, 2000).

La regresión múltiple, por su parte, considera una única población y varios grupos de variables, siendo útil cuando se buscan relaciones explicativas entre diversas variables. El método determina la influencia de un grupo de variables dependientes (Baeza, 1994 citada en Santacana, 2001).

Otro método que puede ser utilizado es el de regresión logística. Se utiliza cuando el predictor de variables no está distribuido normalmente y algunas de las variables predictoras son categóricas (Gorsevsky, 2000).

Según la obtención y localización de los datos a tratar existen dos métodos de análisis multivariantes (Van Westen, 1993):

- a) Análisis estadístico utilizando una población de laderas cuyos atributos son recogidos y asociados a deslizamientos individuales.
- b) Análisis estadísticos realizados en unidades de terrenos que cubren el área entera de estudio. Para cada unidad se recogen los datos de un número de factores geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y morfométricos y se

analizan utilizando regresión múltiple regresión múltiple o análisis discriminante.

El siguiente procedimiento GIS es usada en la zonación de peligro de deslizamiento para la evaluación estadística multivariada (Süzen, 2002).

- Determinación de la lista de factores que serán incluidos en el análisis. Como muchos mapas son alfanuméricos, deben ser convertidos en mapas numéricos. Estos mapas pueden ser convertidos a valores de presencia/ausencia para cada unidad de tierra o presentado como porcentaje cubierto o como clase de parámetro. Por superposición los mapas de parámetros con el mapa de unidad de tierra se crea una gran matriz.
- La combinación del mapa de unidades de tierra con el mapa de deslizamientos vía superposición de mapas dividiendo las unidades en dos grupos estable e inestable.
- Exportación de la matriz al paquete estadístico para el consiguiente análisis.
- Importación de los resultados por unidad de tierra en el GIS y remodificación de las unidades. La distribución de frecuencias de unidades clasificadas como estable e inestable debe ser revisada para ver si los dos grupos están correctamente separados.
- Clasificación del mapa en algunas clases de peligro.

Análisis de frecuencia de deslizamientos, Van Westen (1993) citado por Santacana (2001), señala que el análisis de frecuencia de deslizamientos evalúa la peligrosidad a los deslizamientos, a diferencia de los comentados anteriormente que suelen utilizarse para evaluar la susceptibilidad. La valoración de la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento en un cierto lugar y dentro de un periodo de tiempo sólo es posible cuando se puede hallar la relación entre la ocurrencia de deslizamiento y la frecuencia de factores desencadenantes como lluvias intensas o terremotos.

Por otro lado, se han desarrollado diversas técnicas que determinan valores umbrales de lluvias históricas (Mayorga, 2003)

1.10.4. Los métodos geomorfológicos

Se basan en cartografía geomorfológica a partir de la cual se identifica y localiza los deslizamientos y procesos asociados a éstos directamente en el campo. Con las observaciones, se extraen unos criterios para la determinación de áreas potencialmente inestables y para la confección del mapa de susceptibilidad y/o peligro final. La elaboración de estos mapas exige conocer la morfología y tipología de movimientos (Hansen, 1984; Hansen y Frank, 1991).

Estos métodos así como los heurísticos y los probabilísticos se basan en una información de partida que es el mapa inventario de deslizamientos de un área. Este mapa se elabora a partir de fotointerpretación, trabajo de campo y recogida de información de eventos históricos. Para este tipo de cartografía resulta de vital importancia la experiencia del experto dada por el número elevado de trabajos demuestra que un investigador puede detectar y cartografiar la mayoría de deslizamientos ocurridos en un área aplicando técnicas de interpretación de foto aérea y chequeos sistemáticos de campo (Carrara et al., 1995). A pesar de ello existen cuerpos de deslizamientos latentes, deslizamientos históricos o modelados por procesos erosivos posteriores o bien áreas deslizadas modificadas por actividades ganaderas o cubiertas por una densa vegetación que no pueden ser identificados fácilmente ni clasificados de manera correcta. Ello introduce un factor de incertidumbre no evaluado y que podrá incorporar en las fases posteriores del análisis. Este factor depende la experiencia del investigador, de la calidad y escala de las fotos aéreas así como de los mapas de base utilizados (Carrara et al., 1995). También hay que tener en cuenta la existencia de deslizamientos que pueden ser indetectables dependiendo del momento de la toma de la foto aérea (Van Westen, 1993), en el caso de las técnicas que no utilicen el trabajo de campo.

Dentro de los métodos geomorfológicos se pueden mencionar a los siguientes: el análisis de densidad de deslizamientos; el análisis geomorfológico; el análisis de actividad de deslizamientos; el método de unidades de paisaje o *land system*.

1.10.5. Métodos con redes neuronales

El uso de redes neuronales artificiales es una nueva y muy prometedora aproximación para el análisis de automatizado de zonas con peligro de deslizamiento. Las redes neuronales pueden identificar diferentes tipos de movimientos de masas con una y la misma red. Las mejores redes han clasificado correctamente las áreas en valores por encima del 86%. Fernández-Steeger, et. al. (2002), ha utilizado el algoritmo de aprendizaje RPROP donde la modificación de los parámetros de aprendizaje permitió optimizar el aprendizaje y mejora las tasas de éxito; las simulaciones se realizaron en una imagen simplificada virtual del mundo real producida en un GIS, para entrenar a la red, los parámetros relevantes para el reconocimiento de deslizamientos fueron buscados y seleccionados de esta imagen sea por conocimientos expertos, métodos estadísticos o por prueba y error. Se ha desarrollado 5 capas de información homogénea en GIS; estas son: 1) El modelo de elevación digital (DEM), 2) La litología, 3) La red de drenaje, 4) las principales escarpas, 5) Las zonas de peligro y las áreas preclasificadas de deslizamientos. Algunas importantes aplicaciones en este campo han sido desarrollados en (Lee, et. al. 2001).

Los resultados son algunas veces sorprendentemente promisorios alcanzando valores de casos correctamente clasificados en más del 95%, esto puede explicar en parte porque la difusión de este método es escasa, otro hecho puede ser que las redes neuronales son métodos de caja negra donde no puede ser fácilmente entendido cuales son las relaciones entre las variables físicas, sino que estas solo pueden ser inferidas; pero para aplicaciones prácticas uno podría contentarse con saber que variables controlan la distribución de deslizamientos y con que alcance y no porqué (Sorriso-Valvo, 2002).

1.11. LOS SIG EN LA VALORACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

Los sistemas de información geográfica (SIG) son una herramienta para el archivo de datos, análisis de datos, evaluación de datos, modelación y presentación de datos. Los SIG tienen capacidad para visualizar datos geométricos como mapa digital y

datos no geométricos o atributos en la forma de mapas temáticos. La visualización depende del tipo de SIG, vector o raster. El SIG vector es útil si todos los tipos de datos son importantes para el análisis (punto, línea, área). El SIG raster esta formado por capas donde cada capa representa una cierta información cuyo valor forma el valor del píxel y se visualiza como un color del píxel, el principal problema es definir la resolución, por lo que, píxel de tamaño muy pequeño da lugar a resultados más detallados, pero ocasiona una gran cantidad de datos SIG. Píxel de tamaño muy grande ocasiona grandes imprecisiones; el SIG raster es útil y frecuentemente usada sólo sí los datos de tipo área son importantes para el análisis. Las condiciones de altura son usualmente analizadas como atributos en SIG 2-D; las alturas están representadas como datos de punto o línea de contorno, la información se usa directamente en el SIG vector, pero es necesario rasterizar a partir de formato vector para usarlo en SIG raster.

El análisis y modelamiento en SIG vector se hace en áreas detalladas donde todos los datos usados son homogéneos, por lo tanto, áreas nuevas detalladas tienen que ser determinadas. En el caso del SIG raster se limita a las operaciones en cada píxel. El SIG puede ser usado para deslizamientos como una herramienta primaria, en el cual hace todo el análisis, también puede ser usada como una herramienta para una cierta parte del procesamiento en el momento en el cual es ventajoso (Halounova, 2002). Algunos casos que sustentan las aplicaciones se mencionan brevemente.

Hroch et al. (2002), aplicó a datos procesados fuera del SIG, aquí fue utilizado para implementar el procesado de datos de diferente escala, archivos de diverso origen, mapas, mapeo geológico, interpretaciones de fotografías aéreas; toda la evaluación fue hecha antes de la implementación; es la aplicación más simple del SIG usada principalmente para una presentación agradable y entendible de resultados para especialistas y no especialistas, no ofrece la posibilidad de nuevas entradas de datos; este caso no es demasiado frecuente.

El SIG es usado como una herramienta irremplazable para la determinación de taludes, cambio de ángulo de talud, forma del talud, azimut, etc.; de esta manera el azimut y buzamiento son obtenidos a partir de DEM (Modelo Digital de Elevación) y a partir del DSM (Modelo Digital de Estructuras) para la determinación de las

propiedades geométricas y cinemáticas de del talud (Clerici et al., 2002). En efecto las características geométricas de un área difícilmente serían determinadas de manera completa y precisa de otra manera; a la vez que, todo el análisis es cuestión de una correcta definición matemática, capas de mediciones geológicas de campo y procesamiento computacional (Halounova, 2002).

Fernández – Steeger et al. (2002) utilizó el SIG para pasos necesarios. Al principio los datos fueron usados para codificación de datos, que fue realizada para doce factores que caracterizan la susceptibilidad a deslizamientos. Casi la mayor parte de los datos usados para los factores tuvieron que ser determinados por herramientas del SIG usadas en el DEM (talud, longitud de talud, cambio de longitud de talud, tamaño del área de captación, forma del talud, distancia a corrientes, distancia a rocas, etc.) estos datos son fácilmente logrados con funciones comunes del SIG, pero muy tediosamente sin el SIG. Las relaciones mutuas de estos datos fueron procesados fuera del SIG en redes neuronales y los resultados implementados otra vez en SIG.

Esta metodología es aplicada muy frecuentemente. Los datos son implementados en SIG, el análisis se realiza mediante procesos estadísticos o por redes neuronales; los resultados de éste procesamiento son usados finalmente para el análisis en un ambiente espacial, usualmente una reclasificación (Halounova, 2002).

Otra metodología usó el SIG raster para el modelamiento de obstrucciones por el deslizamiento de Anzola (Clerici et al., 2002) Esta metodología esta basada en el análisis raster donde son verificados los valores del píxel y de los píxeles vecinos. Los valores del píxel son cambiados bajo determinadas circunstancias de acuerdo a ecuaciones predefinidas. El valor exacto del píxel y todos los valores de los píxeles vecinos controlan la exacta aplicación de la ecuación. Este tipo de función no está dentro del SIG, por lo tanto, el modelo fue implementado dentro del GRASS (SIG raster).

En una investigación realizada por Iwao et al. (2002) se utilizó el SIG sólo para evaluación y resultados. La metodología esta basada en contornos y sus distancias como una típica tarea cuyo análisis es posible realizar fácil y confiablemente en SIG (Halounova, 2002).

Lee, et. al. (2002) en su investigación aplican, a la tarea de evaluar la susceptibilidad a deslizamientos, el modelo de probabilidad bayesiana utilizando el método de weight-of-evidence para la verificación de resultados usando GIS data; los mapas relevantes fueron construidos usando el software ARC/INFO.

Günther, et. al. (2002) desarrolla una metodología para la evaluación de taludes, el mismo, sugiere que en primer lugar a partir métodos basados en GIS se obtiene una rápida derivación de un DSM (modelos estructurales digitales) a partir de datos de tectónica de campo; en segundo lugar describe métodos para la evaluación regional de las propiedades geométricas y cinemáticas de los taludes derivados del DSM y DEM; y finalmente presenta una aplicación de la metodología propuesta.

1.12. VALIDACIÓN DEL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

La validación de los mapas de peligro y susceptibilidad conseguidos mediante procesos que utilizan los SIG, implican la comparación entre predicciones de un mapa y la ocurrencia de deslizamientos observada ; sin embargo en la literatura existe escasa información disponible acerca de la efectiva capacidad predictiva de los mapas, por lo que se hace necesario establecer procedimientos de validación (Santacana, 2002).

Para evaluar la capacidad predictiva de un mapa y el resultado del análisis de susceptibilidad están disponibles varios métodos: método temporal, método espacial, método aleatorio (Santacana, 2002). En el método temporal la validación es hecha con un grupo de deslizamientos de la misma área, desencadenados después de terminado el mapa (Luzy, 1995). En el método espacial la validación es llevada a cabo en un área diferente al usado para estimar la susceptibilidad a deslizamiento pero con atributos geológicos y geomorfológicos similares (Baeza, 1994). Con bastante frecuencia los autores dividen el área piloto en dos sectores, uno para determinar la susceptibilidad y otro para su validación (Santacana, 2002).

Finalmente, en el método aleatorio se extraen dos muestras aleatorias del área piloto, uno para definir la función de susceptibilidad y otro para validarlo.

II. METODOLOGÍA

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los deslizamientos ocasionan serias limitaciones al desarrollo socioeconómico de países donde ocurren. Por esta razón, principal, es que muchos países iniciaron, oportunamente, los inventarios de deslizamientos, siendo líderes en este campo los países de Europa del Este en las décadas del setenta y ochenta (Sorriso-Valvo, 2002). Posteriormente, otros países desarrollaron programas similares que llevaron a la necesidad de determinar el nivel de peligro de estos eventos.

En la actualidad se usan los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para construir los mapas de susceptibilidad a deslizamientos. Entre las bondades de la tecnología de los SIG destacan la rapidez y automatismo en la captura de datos y análisis de los factores relacionados con la inestabilidad. Además permiten abordar estudios en escala: nacional, regional, mediana y grande.

La selección y recolección de información inicial confiable para el procesamiento constituye la primera etapa del proceso. Se conoce que varios de los factores relacionados con la inestabilidad de las pendientes como la geometría, orientación, atributos de la cuenca pueden ser directamente obtenidos a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) que tenga la precisión y resolución adecuada. Por otro lado, es posible obtener información acerca de uso de suelos, vegetación, litología, edafología sea por digitalización a partir de información ya existente o a partir de interpretación de imágenes de sensores remotos o en el mejor de los casos a partir de información digitalizada ya existente. El inventario de deslizamientos es normalmente obtenido mediante fotointerpretación de fotografías aéreas, imágenes satelitales y trabajo de campo. La variedad de métodos de análisis y los avances que se están logrando en este campo, incrementan las ventajas de los SIG.

Existe una variedad de métodos desarrollados para efectuar este tipo de estudios como los: geomorfológicos, heurísticos, estadísticos, probabilísticos, determinísticos y recientemente redes neuronales. A excepción de los determinísticos, que son aplicables a deslizamientos propiamente dichos, los otros métodos abarcan todo el conjunto de movimientos de pendiente sin distinción específica de los mecanismos de rotura que les dio origen.

2.2. JUSTIFICACIÓN

Es bastante frecuente en Monterrey asociar los deslizamientos a la ocurrencia de precipitaciones y en algunos casos a ráfagas de vientos, que afectan a zonas urbanas, infraestructura pública como carreteras y otros. Algunos eventos, registrados por la prensa, que causaron pérdidas, principalmente, materiales fueron: el de la zona de Las Lajas, en el Cerro de las Mitras (Sept., 2003) asociado a lluvias y una falla geológica y que afectó a un edificio multifamiliar de 8 pisos ; el derrumbe parcial de dos residencias en el Cerro de las Mitras, en la Colonia Cima de las Lajas, de una barda en el Cerro de la Loma Larga, en la Colonia Independencia, donde un niño resultó con lesiones leves, y deslaves en la Sierra, en San Pedro (Sept. 2003); derrumbes en la carretera hacia Saltillo (Sept. 2002); deslaves en los sectores de Olinala y Colonial de la Sierra, además del Parque Ecológico Chipinque, que cerró por buen tiempo, ocasionado por lluvias de 10mm - 66mm (Oct. 2000); deslizamientos e inundaciones en zonas residenciales contiguas a la Sierra Madre, como consecuencias del choque de los restos del huracán "Keith" (Oct. 2000); Rachas de "fuertes vientos" ocasionaron que rocas de gran dimensión cayeran sobre el kilómetro 54 de la carretera de cuota Reynosa-Monterrey (Jul. 1995); el caso mas reciente es el ocurrido en el fraccionamiento Colinas de San Jerónimo en el Municipio de Monterrey y que ha que ha ocasionado grandes pérdidas económicas que llegan hasta la demolición de los edificios denominados como Torres de San Jerónimo (Jul. y Sept. 2005) . Estas ocurrencias evidencian la necesidad de realizar esfuerzos en la investigación de este fenómeno con la finalidad de tener conocimiento objetivo de las áreas de mayor peligro, de manera que se tomen

medidas preventivas efectivas, se realice la planificación del desarrollo urbano y de uso de suelos, se planeen, apropiadamente, obras de infraestructura entre otros.

No obstante que la información recopilada solo menciona deslizamientos ocurridos en el área urbana o muy cerca de ella y sobre carreteras, es necesario implementar trabajos necesarios para localizarlos en un mapa y realizar la investigación necesaria para ubicar aquellos que hayan ocurrido en otras áreas, de esta manera incrementar la consistencia de la información.

El estudio coadyuvará en la mejora de la calidad de la información sobre ocurrencia de deslizamientos existente. No se conoce de un estudio sistemático de mapeo de deslizamientos, pero la Dirección de Protección Civil de Monterrey señala 104 puntos de riesgo a deslizamientos, información que se encuentra en el Atlas de esta institución, del mes de Julio del 2004.

Por otro lado, realizar un estudio de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos mediante métodos ya establecidos como los heurísticos, estadísticos o determinísticos en un entorno de herramientas como los SIG, incentivará que en el futuro se realicen investigaciones de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo, que constituyen elementos de trabajo básicos en el desarrollo local y regional.

2.3. SUPUESTOS

- Los deslizamientos son el resultado de la acción de características específicas de factores ambientales internos, que al interactuar producen diversos niveles de susceptibilidad
- El inventario de deslizamientos ocurridos en el pasado y los recientes, adecuadamente relacionados, mediante un modelo, con la acción de los factores ambientales internos ayudan a establecer niveles de susceptibilidad y zonificar áreas de interés.

2.4. OBJETIVOS DEL LA INVESTIGACIÓN

2.4.1. Objetivo General

Realizar el análisis de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos en la Sierra de las Mitras, aplicando metodologías probabilísticas, y mediante Sistemas de Información Geográfica.

2.4.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos conducentes al logro del objetivo general son:

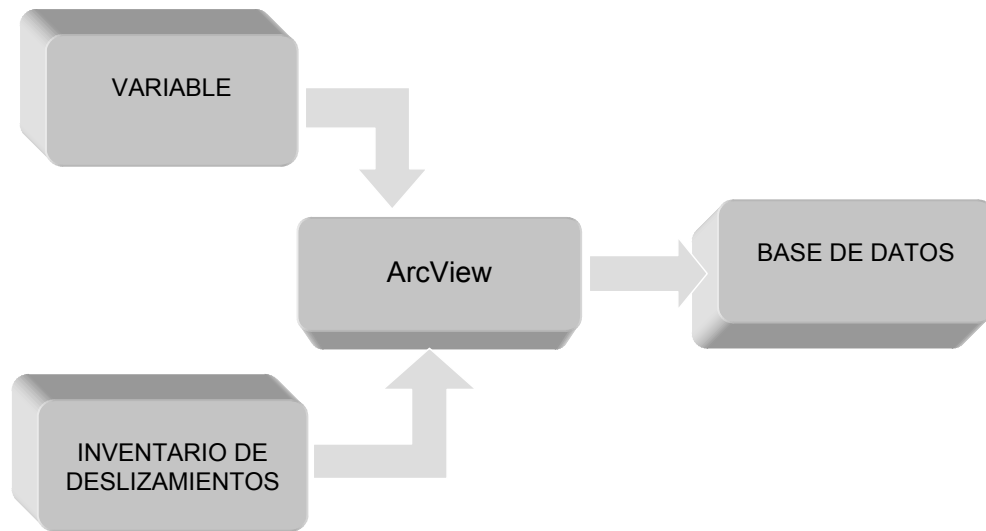
- Realizar el inventario de deslizamientos mediante trabajos de interpretación de fotografías aéreas, reconocimiento de campo, y elaboración del mapa respectivo.
- Aplicar modelos de análisis de susceptibilidad a los datos obtenidos en el SIG (ARCVIEW) y hoja de cálculo.
- Exhibir los resultados en un mapa de zonificación de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos.
- Aplicar un método de validación de los resultados.

2.5. ANÁLISIS DE DATOS

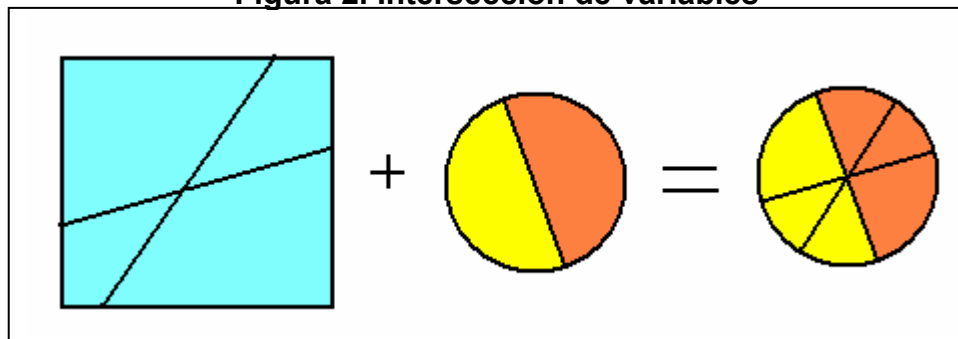
El proceso de análisis de datos está compuesto básicamente por tres etapas: superposición de capas, aplicación de modelos de análisis de datos, y determinación de los niveles y mapa de susceptibilidad.

2.5.1. Superposición de capas

La variable inventario es superpuesta a cada una de las otras variables una a una, en Arc View, de esta manera se obtendrá la base de datos necesaria para la aplicación del modelo, en función del área que ocupan, para cada una de las variables y según las clases o categorías establecidas (Diagrama 3) .

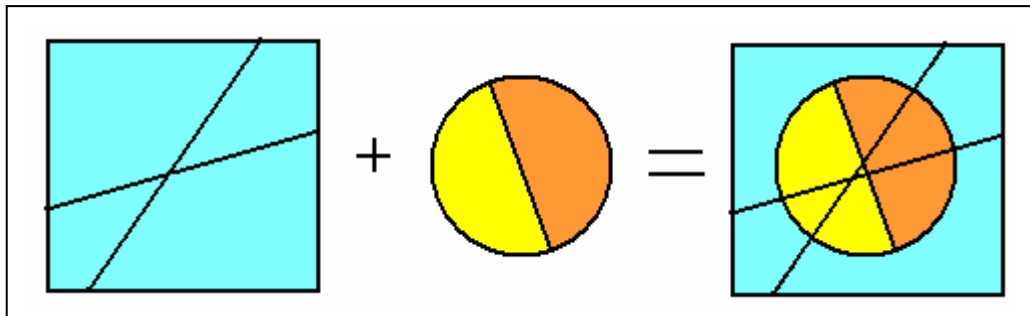
Diagrama 3. Superposición de capas

En esta etapa Arc View procederá a la intersección de las áreas comunes de la variable y el inventario, definiendo polígonos según el esquema ideal presentado en la Figura 2.

Figura 2. Intersección de variables

Asimismo, se efectuará la superposición de todas las variables excepto la variable inventario de deslizamientos; esta capa se utilizará para en ella introducir los resultados del modelo y obtener finalmente el mapa de susceptibilidad. El procedimiento que sigue Arc View para realizar esta operación está esquematizado en el Gráfico 3.

Figura 3. Unión de variables



2.5.2. Modelo principal de análisis de datos

El análisis de datos que conlleve a la asignación de valor a cada clase de una variable se realizará mediante el cálculo de la probabilidad a posteriori a partir de probabilidades a priori y probabilidades condicionales, esto es posible mediante la aplicación del Teorema de Bayes. La regla general para tales cálculos, que es una aplicación simple de la regla de la multiplicación de probabilidades para eventos no independientes, fue desarrollada por el reverendo Thomas Bayes en el siglo XVIII. (Devore, 2001)

TEOREMA DE BAYES

Sea A_1, A_2, \dots, A_k un conjunto de k elementos mutuamente excluyentes y exhaustivos con $P(A_i) > 0$ para $i=1, \dots, k$. Entonces para cualquier otro evento B , para el que $P(B) > 0$ se cumplirá que: (Bradley, Thomas, 2000)

$$P(A_j/B) = \frac{P(A_j \cap B)}{P(B)} = \frac{P(B/A_j)P(A_j)}{P(B)} = \frac{P(B/A_j)P(A_j)}{\sum_{i=1}^k P(B/A_i) * P(A_i)}; j = 1, \dots, k$$

Donde:

$P(A_j/B)$ = Probabilidad a posteriori, indica la probabilidad de que ocurra un deslizamiento en la clase A_j dado que la probabilidad total ocurrió.

$P(A_j)$ = Es la probabilidad de que un deslizamiento ocurra en la clase A_j ó probabilidad a priori. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P(A_j) = \frac{S_j}{ST}$$

S_j = Área de la clase A_j

ST = Área total de la zona en estudio

$P(B/A_j)$ = Es la probabilidad condicional de que ocurra un deslizamiento dado que la probabilidad A_j ocurrió.

$$P(B/A_j) = \frac{SD_j}{ST_D}$$

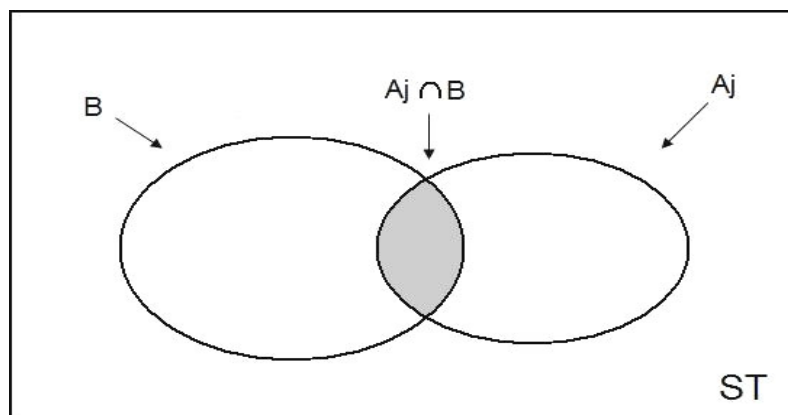
SD_j = Área que ocupan los deslizamientos ocurridos, en la clase A_j

ST_D = Área total que ocupan los deslizamientos ocurridos.

$P(B)$ = Conocida como la ley de probabilidad total; si A_1, \dots, A_k son eventos excluyentes y exhaustivos.

Una representación del teorema de Bayes mediante un diagrama de Venn para este caso, se puede ver en el Gráfico 4:

Figura 4. Diagrama de Venn Euler para el modelo



B: área total que ocupan los deslizamientos; $A_j \cap B$: área de la clase A_j en que ocurren deslizamientos; A_j área que ocupa esta clase del total de del área en estudio; ST: área total en estudio.

2.5.3. Elaboración de la escala y mapa de susceptibilidad

Los resultados conseguidos en la fase de aplicación del modelo facilitan la tarea de elaborar una escala de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos, el proceso a seguir, consiste en que:

- Las probabilidades calculadas por clase en cada variable se multiplican por 10 y se redondean al entero superior, los valores así conseguidos se constituyen en valores de entrada a la capa obtenida por superposición de todas las variables y a su vez representan el peso W_i que se le asigna a cada clase en una variable.
- Los valores calculados por clase para cada variable, se asignan a los polígonos correspondientes en la tabla de atributos de la capa de superposición de todas las variables.

Diagrama 4. Procedimiento para la asignación de pesos a los polígonos



- Los campos que contienen a los W_i son sumados y luego divididos entre el número de variables en un nuevo campo, de esta manera se consigue un valor promedio entero para cada polígono. La finalidad de esta fase es

proporcionar los valores para establecer la escala de susceptibilidad y la obtención del mapa respectivo (Diagrama 4).

- Seguidamente, se determina el valor mínimo y máximo del campo de cocientes y se establece una escala de susceptibilidad de 5 intervalos que será la manera como se represente el mapa respectivo. (Tabla 5).

Tabla 4. Escala de susceptibilidad

CLASE	NIVEL
Min. – C ₁	Baja
C ₁ – C ₂	Media
C ₂ - C ₃	Alta
C ₃ - C ₄	Muy alta
C ₄ – Max.	Extrema

2.5.4. Procedimiento alternativo

Este procedimiento, básicamente, consiste en utilizar la base de datos obtenida en el modelo anterior para proceder de la siguiente manera:

- Calcular la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en una clase de una variable. Según la siguiente relación matemática:

$$P(D_j) = \frac{SD_j}{S_j}$$

SD_j = Área que ocupan los deslizamientos ocurridos, en la clase A_j

S_j = Área total que ocupa la clase A_j .

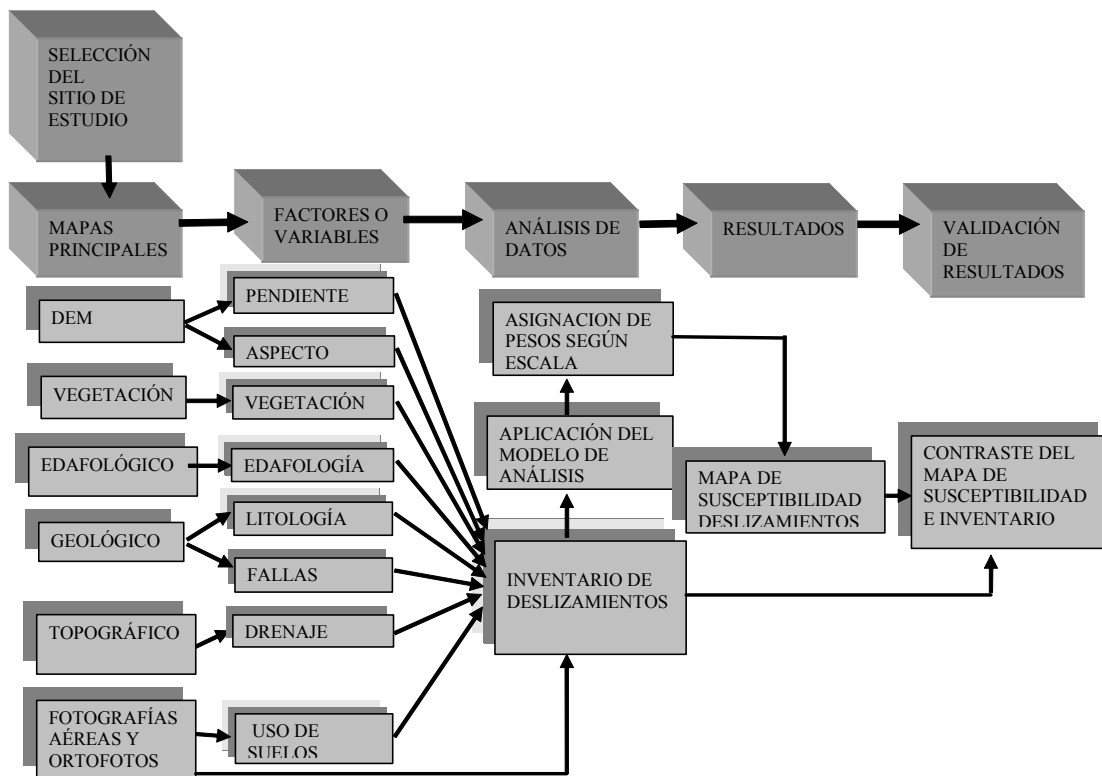
- Seguidamente, se multiplican los valores hallados por 1000 y se redondean al entero superior.
- Se introducen estos valores en los campos creado para este fin de la tabla de atributos de la capa de superposición de todas las variables.

- De la misma manera que en el caso anterior se suman los valores asignados y se dividen entre el número de variables en un nuevo campo.
- Finalmente, se determina el valor mínimo y máximo del campo de cocientes y se establece una escala de susceptibilidad de 5 intervalos que será la manera como se represente el mapa respectivo.

2.5.5. Validación de las metodologías aplicadas

La validación del método aplicado para ambas alternativas se efectuará contrastando el mapa de inventario de deslizamientos con el mapa de susceptibilidad resultante, en el cual se efectuarán los análisis respectivos. El esquema general de la metodología se observa en el Diagrama 5.

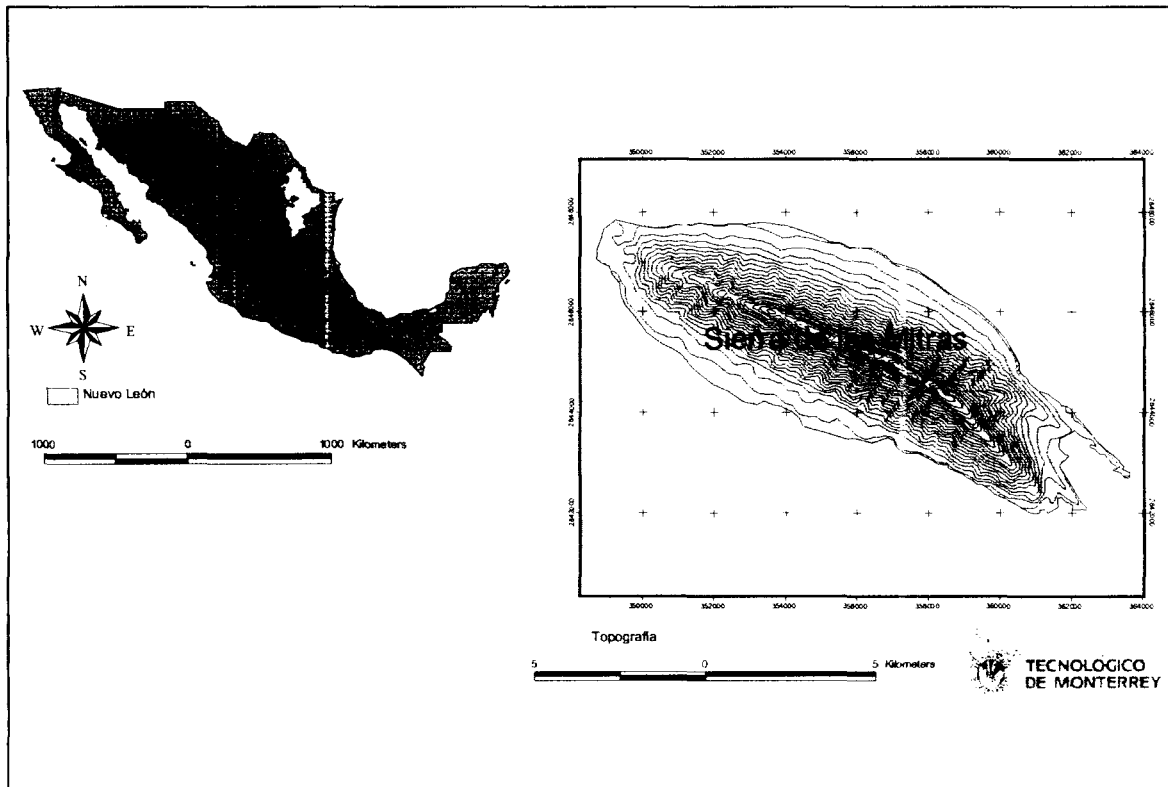
Diagrama 5. Metodología



2.6. LA SIERRA DE LAS MITRAS

2.6.1. Ubicación

El área seleccionada para el estudio es un polígono que abarca la Sierra de Las Mitras, ubicada entre los paralelos 100°23' y 100°32' de longitud Oeste y 25°41' y 25°45' de latitud Norte, dentro del Área Metropolitana de Monterrey y entre los municipios de San Pedro Garza García, Santa Catarina, General Escobedo y García; con una extensión de 63.7Km²; y altitud entre los 600msnm a 2060msnm.



2.6.2. Clima

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) se caracteriza por tener un clima cálido seco; donde la temperatura promedio anual para el periodo de 1993 - 2005 (SIMA) es de 22.1 °C; mientras que la temperatura promedio del año más frío fue de 20.5°C y la temperatura promedio del año más caluroso ocurrió en 1958 con 24°C (INEGI).

Sin embargo la temperatura media diaria varía en forma importante dependiendo de la estación del año, llega a tener temperaturas por arriba de los 40 grados Centígrados durante el verano y temperaturas mínimas por debajo de los 0 grados Centígrados en el invierno.

Por otra parte, los vientos predominantes para el AMM se dirigen hacia el oeste entre los N 270° E y N 292.5° E medidos en las cinco estaciones hasta el año 1992. Por otra parte, para la zona centro los vientos predominantes van hacia el suroeste. Para las estaciones del noroeste y noreste casi una cuarta parte de los vientos se dirigen hacia direcciones entre el Oeste y el Noroeste, aunque para la estación noroeste existen vientos fuertes dirigiéndose al sureste. Por otro lado la mayoría de los vientos captados en las estaciones del sureste y suroeste se dirigen de este a oeste. Los vientos dominantes son los alisios provenientes del Noreste y en segundo lugar se encuentran aquellos que vienen del Sureste. (Obregón, 2004)

Las precipitaciones varían de 500mm a 700mm al año; la menor incidencia de lluvias se registra en los meses de Diciembre a Marzo, oscilando en valores de 12.2mm. y 14.3mm, mientras que los valores máximos ocurren durante el paso de los ciclones. El número de días con precipitación apreciable varía entre 55 a 60 días al año, encontrándose despejado el resto de días del año (Obregón, 2004). La precipitación promedio para el año 2004 fue de 732.7mm (SIMA); y asimismo, se sabe que el año más seco fue 1988 con 147.4mm, y el año más lluvioso 1933 con 1311.3mm (INEGI).

2.6.3. Geomorfología

El AMM se localiza en tres diferentes regiones geomorfológicas: el valle, las montañas de mediana altura y montañas de gran altura. La zona del valle de Monterrey muestra la transición de la provincia de la Sierra Madre Oriental hacia la provincia de la Planicie Costera del Golfo, que desciende paulatinamente hasta alcanzar la costa en el Este.

El valle comprende el centro de la ciudad de Monterrey, así como la ciudad de San Nicolás de los Garza y Guadalupe hacia el Norte y Noreste, respectivamente; mientras que la Suroeste está el municipio de San Pedro Garza García y al Oeste el

municipio de Santa Catarina. El material predominante en esta zona son los sedimentos fluviales con escasos afloramientos de lutitas del Cretácico Superior. El centro de la ciudad de Monterrey está rodeado de por algunas elevaciones de mediana altura y por montañas altas, formando una estructura de valle amplio con una salida hacia el Noreste.

Las principales elevaciones de mediana altura que enmarcan el valle de Monterrey son: la Loma Larga hacia el Sur; el Cerro del Obispado hacia el Suroeste; y las prolongaciones de la Sierra de las Mitras, la Loma de Vista Hermosa y la Zona de San Jerónimo al Oeste de la ciudad. Estas elevaciones tienen una altura promedio de 700msnm.

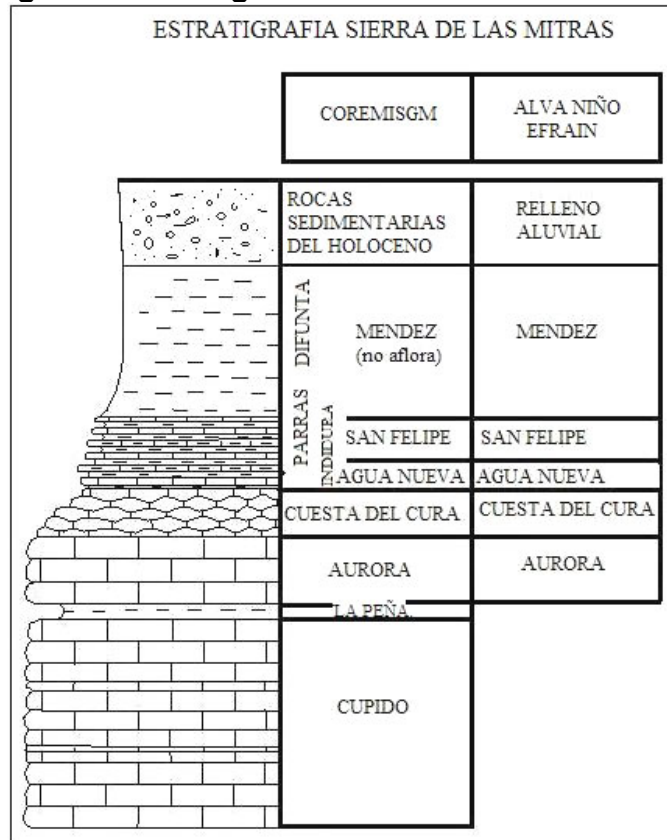
Posterior al levantamiento de la Sierra Madre Oriental el relieve del AMM de Monterrey no difiere grandemente de las formas actuales, aunque existen elevaciones mayores en las márgenes de la sierra donde la erosión y el desgaste en masa han movido materiales. Los depósitos fluviales observados en algunos afloramientos revelan la existencia de antiguos ríos, que depositaron grandes volúmenes de sedimentos como gravas, arenas y limos que forman parte de los rellenos del valle en el cual se formaron seguramente algunas planicies de inundación (Alva, 1997).

2.6.4. Litología

El área de estudio se encuentra enmarcada por tres provincias geológicas: la Sierra Madre Oriental, la Provincia costera del Golfo y las Sierras y Cuencas de Coahuila.

En la Sierra de Las Mitras, los estratos forman una secuencia normal, que va desde la Formación (Fm) Aurora (Cretácico Inferior Tardío) hasta la Fm. Mendez (Cretácico Superior Tardío), así como depósitos del cuaternario (Alva, 1997). Mientras que el COREMISGM, en la Carta Geológico-Minera Monterrey, G14-7 Nuevo León y Coahuila, Esc. 1:250,000, señala una secuencia que va desde la Fm. Cupido, La Peña, Aurora, Cuesta del Cura, Agua Nueva, San Felipe y rocas sedimentarias indiferenciadas del Holoceno (Figura 3).

Figura 5. Estratigrafía de la Sierra de las Mitras



a) Formación Cupido

De manera general, constituida por calizas arcillosas de color gris amarillento de estratificación mediana con escasas intercalaciones arcillosas y margosas, continuando con una secuencia monótona de calizas de estratificación gruesa, color gris, con estilotitas paralelas a la estratificación y abundantes nódulos de pirita, hematita y pedernal gris claro.

En un estudio realizado en el Cañón de la Boca, Santiago (Ángeles, Hinojosa, López, Valde y Livas 2005) se encontró que la formación Cupido presenta un espesor de 556 m. En toda esta secuencia se presentan calizas grises (pardas al intemperismo), en capas de 1 a más de 3m en su mayoría, ocasionalmente en estratos más delgados. Estas calizas en parte presentan vetas de calcita blanca, así como escasos nódulos de pedernal negro; en algunos niveles se observan rudistas (Mollusca, Bivalvia). La estratificación es paralela y continua, presentando planos de estratificación estilolíticos claramente distinguible.

b) Formación La Peña

Está constituida en su parte inferior por calizas de estratificación delgada muy semejante a la caliza Cupido, pero se diferencia de éstas por contener nódulos de pedernal gris oscuro a negro y presentar algunos ejemplares de *Inoceramus* sp. La parte superior de la formación se encuentra formada por calizas arcillosas y limolitas calcáreas de color café amarillento con algunos ejemplares de *Dufrenoyia* sp. Su espesor se considera en 55 metros aproximadamente.

c) Formación Aurora

Son las calizas más antiguas, fueron depositadas en un ambiente de cuenca, constan de estratos gruesos (1m - 3m) a masivos (>3m), son muy competentes y con color de intemperismo gris claro, mientras que en fractura fresca presentan un color gris oscuro. Algunos estratos presentan restos de conchas braquiópodos, además de marcas de disolución (Karren) y presión (estilolitas). Hacia el contacto superior comienzan a reducir su espesor cambiando a medianos (0.5m) a gruesos, con aparición de pequeños nódulos de pedernal y de fierro (1 – 10 cm. de diámetro).

La Fm. Aurora tiene un espesor mínimo aflorante de 200m y ocupa las partes topográficas más altas de la Sierra de las Mitras. Asimismo, están fuertemente deformados y diaclasados, lo que ha permitido la disolución superficial de las discontinuidades de la caliza facilitando la infiltración del agua meteórica y consecuentemente la formación de cavidades de tamaño variable, desde pequeñas oquedades (1cm – 5cm) hasta la formación de pequeñas grutas (1m -5m en promedio) distribuidas de manera irregular.

d) Formación Cuesta del Cura

Aflora en las laderas de los altos topográficos y es concordante en su contacto litológico con la Fm. Aurora. Los sedimentos han sido interpretados como de cuenca profunda, y están compuestos por calizas de estratos medianos a gruesos con color de intemperismo gris claro, y un color gris oscuro en fractura fresca. Muestra intercalaciones de estratos delgados a medianos de lutita arcillosa, con lentes y

bandas de pedernal negro paralelo a la estratificación que tienen un promedio de 5cm a 10cm de espesor.

El límite estratigráfico inferior de la Fm. Cuesta del Cura es concordante y gradual con la Fm. Aurora, al igual que su límite superior con la Fm. Agua Nueva. Tiene un espesor aproximado de de 70m en la zona.

e) Formación Agua Nueva

Presenta en el área un espesor de 65m, su límite superior subyace concordantemente con la Fm. San Felipe. Esta conformado por sedimentos de plataforma abierta, que consisten de estratos calcáreo arcillosos, color gris oscuro en fractura fresca, de espesor delgado a laminar y de lutitas carbonosas, así como también de lutitas arcillosas laminares y estratos delgados de margas. Debido a sus características es menos resistente a la erosión, por lo que geológicamente forma depresiones. El contacto es gradual y concordante con la Fm. San Felipe.

f) Formación San Felipe

Presenta una alternancia de sedimentos de calizas arcillo-margosas, compactas, delgadas, con intercalación de horizontes lutíticos y bentoníticos, al igual que la Fm. Agua Nueva son de plataforma abierta solo que con más aporte de terrígenos que cálcicos. Esta formación presenta un espesor mínimo de 45m – 50m aunque se calcula que su espesor real alcanza hasta los 270m – 300m, no aflorando su contacto superior con la Fm. Méndez, además presenta un marcado fracturamiento, el cual es rellenado por calcita. Es característica la presencia de horizontes silicificados y de bentonita, ambos con espesores promedio de 10cm – 30cm.

g) Formación Méndez

El contacto inferior de esta formación es transicional y no aflora, pero se supone concordante con la Fm. San Felipe. Consiste de sedimentos de mar somero con un gran aporte de material terrígeno (lutitas pobremente estratificadas), así como margas de espesor delgado a mediano, con un gran fracturamiento en la parte superior de la formación y produciendo así estructuras aciculares en forma de agujas

conocidas regionalmente como “almendrillas” el espesor aflorante en la Sierra de las Mitras es de 60m. Pero en el Cerro de la Silla llega a 300m.

h) Conglomerados

En las laderas de los altos topográficos se localizan depósitos de piedemonte en forma discordante a los depósitos del Mesozoico, los cuales son datados de edad terciaria, son identificados como una brecha sedimentaria de composición variada en sus clastos, predominando los de origen calcáreo fuertemente cementados en una matriz calcáreo-arcillosa. El espesor de estos sedimentos varía entre 0.5m a 2.5m en la mayoría de los casos.

i) Depósitos Cuaternarios

Ampliamente distribuidos en la planicie, consisten de clastos de origen aluvial de composición calcárea, medianamente cementados a sueltos, con una matriz arcillo-arenosa la cual actúa como cementante en gran parte de los casos.

2.6.5. Geología estructural

La Sierra de las Mitras, dentro de sus límites, es una estructura braquianticlinal cuyo eje dirigido hacia el Noroeste-Sureste tiene una inmersión muy suave en sus extremos, en el extremo Sur este sufre una bifurcación en la estructura anticlinal, formando dos estructuras alargadas con la misma orientación general, llegando a formar el Cerro del Obispado y la Loma Larga. Asimismo en la parte Sur del área metropolitana de Monterrey, se puede observar la estructura conocida como “Curvatura de Monterrey, en la cual las estructuras geológicas cambian abruptamente a una dirección de Este – Oeste; esta estructura muestra el flanco Norte del anticlinal de Los Muertos con un buzamiento vertical y en ciertas zonas con buzamientos invertidos hacia el valle de Monterrey.

En el extremo Noroeste se tiene una estructura con la misma orientación, llamada el Cerro El Durazno, una estructura de poca elevación (aprox. 150m de desnivel), de formas suaves y litología similar a la Sierra de Las Mitras.

En el estereograma de Schmidt realizado en la Sierra de las Mitras (Alva, 1997) se observa que los planos de estratificación definen claramente el eje del anticlinal, el cual muestra una dirección de $138^{\circ}/14^{\circ}$. Asimismo, las diaclasas muestran que son de tipo ac y bc.

2.6.6. Vegetación

a) Bosques (B)

Es un tipo de vegetación que se encuentra generalmente en las zonas montañosas del país a lo largo de la Sierra Madre Occidental, Oriental y el eje Neovolcánico. En el área de estudio se encuentran dos tipos: bosque de encino (Bq) y bosque de encino-pino (Bqp).

El bosque de Encino (Bq) clasificado por Rzedowsky de esta manera, menciona que para México se conocen más de 150 especies de encinos y que constituyen el elemento dominante de la Sierra Madre Oriental. Ocupa gran parte de la Sierra de las Mitras, se distribuye aproximadamente desde una altitud de 800msnm hasta los 1900msnm, ocupando exclusivamente la ladera Norte, donde se desarrolla en los cañones más protegidos, sombreados y húmedos; con suelos un tanto profundos (40cm a 50cm) y el horizonte superficial rico en materia orgánica.

Comparte gran parte de la extensión con el matorral subinerme, así se encuentra asociado con elementos de tascate y pino en las partes más altas (entre 1300msnm y 1900msnm), donde la humedad es aportada por las nubes que son retenidas por las altas crestas de esta sierra. Los elementos que constituyen este bosque son árboles que llegan a medir hasta 6m de altura, con diámetros de 15cm a 30cm. Es común encontrar un estrato arbóreo bien representado que varía de los 3m a los 6m, un arbustivo de 1m a 4m y un estrato herbáceo sumamente variado.

El Bosque de Pino – Encino – Pino, señala la presencia de bosques mixtos, que varían de 4m a 8m de altura a altitudes que varían de los 1300msnm a los 1900msnm, sin embargo la frecuencia de éste tipo de bosque es baja en comparación al bosque de encino. El pino presente en el área es un árbol robusto,

que varía de 4m a 8m de altura; habita en lugares escarpados únicamente en la ladera Norte, comparte su área de distribución además del encino con el táscate.

b) Matorral Submontano (MSM)

Comunidad formada, principalmente, por elementos inerme y caducifolios por un breve periodo del año; se encuentra generalmente entre los límites de matorrales áridos, bosques de encino y selva baja caducifolia. Esta caracterizado por la predominancia de arbustos altos o árboles bajos, deciduos generalmente por un periodo breve. Su composición florística es “francamente neotropical” (Rzedowsky, 1966). En esta zona presenta cuatro fisonomías:

La fisonomía de matorral Subinerme (Mb) se distribuye desde los 700msnm y es aún común a los 1700msnm. Es una comunidad compuesta, principalmente, por plantas espinosas o inermes cuya proporción de unas a otras es mayor de 30% y menor del 70%. El estrato superior esta integrado por plantas leñosas de 3m a 6m de alto, siendo principalmente arbustos aunque son muy comunes los árboles bajos. Su densidad y cobertura son variables; esta comunidad vegetal generalmente se encuentra asociada con: el matorral desértico rosetófilo y el pastizal natural en la ladera Sur; y con el bosque de encino en la ladera norte.

La fisonomía de matorral Inerme (Mi) se caracteriza por la presencia de arbustos de hasta 4m de altura, con más del 70% de las especies sin espinas; se localizan en la parte Este de la Sierra de las Mitras desarrollándose a altitudes mayores de 700m en laderas no muy pronunciadas y suelos arcillosos y por lo general pedregosos de 30cm a 50cm de profundidad.

La fisonomía Izotal (Mz) esta conformada por plantas altas de 6m a 8m y robustas; se localizan en las partes más bajas de la ladera norte, en suelos un tanto profundos, bien drenados y pedregosos de las zonas áridas y semiáridas, las especies más comunes son las palmas.

La fisonomía de matorral Crasi – Rosulifolio Espinoso (Mr), prospera casi siempre en las laderas rocosas en la parte Sur de la Sierra de las Mitras aunque también es común en el Norte. Principalmente se encuentra asociada a litosoles. Es una asociación vegetal caracterizada por las hojas dispuestas en rosetas, carnosas y

espinosas, fisonomía muy similar a la del MATORRAL DESERTICO ROSETOFILO (MDR); esta conformada por magueyes, guapillas, lechuguilla, el espadín y sotol.

c) Matorral Desértico Micrófilo (MDM)

Comunidad caracterizada por elementos arbustivos de hojas pequeñas, que se encuentran generalmente en terrenos aluviales. Esta ampliamente distribuida en las zonas áridas y semiáridas del Norte del país.

Algunas de las plantas más conspicuas de este tipo de vegetación son la gobernadora, el hojaseñ, hierba del burro, uña de gato, chaparro prieto, etc.

d) Chaparral (MI)

Este tipo de vegetación prospera en la parte más alta de la Sierra de las Mitras (1700msnm a 1900msnm) desarrollándose sobre los escasos manchones de suelos o entre las grietas de las rocas. La humedad es proporcionada principalmente por el contacto de las nubes. Presenta la fisonomía de matorral crasi-rosulifolio espinoso, la cual es más común en la ladera de sotavento. De manera general, son asociaciones de encinos bajos, densas, acompañado de manzanita y otras especies arbustivas. Comúnmente se encuentran en la zona de contacto del clima templado subhúmedo con los climas cálido, templado y semiárido; crecen por arriba de los matorrales de las zonas áridas, de los pastizales naturales, y en ocasiones mezclados con los bosques de pino y encino.

e) Pastizal (P)

En la Sierra de las Mitras se encuentran dos tipos de pastizal: el Pastizal Natural y el Pastizal Inducido.

Pastizal natural (Pn) es aquel que se desarrolla como producto natural de las condiciones ambientales preponderantes en determinada región. En la Sierra de las Mitras se halla compartiendo su área de distribución con el matorral subinermes y el izotal en las faldas de la ladera norte a altitudes que varían de 700msnm a 900msnm. P (Pi) surge cuando la vegetación original que anteriormente dominaba es eliminada. Puede aparecer como consecuencia de desmontes de cualquier tipo de vegetación,

también puede establecerse en áreas agrícolas abandonadas o bien como producto de áreas que se incendian con frecuencia.

2.6.7. Edafología

De acuerdo con la información del INEGI se consideran relevantes para el estudio la clase textural y la clasificación de suelos. La clase textural de suelos que corresponde al área de estudio es la 2, esta se refiere a suelos con textura media parecida a los limos de los ríos; donde abunda, precisamente, el limo y es la textura con menos problemas de drenaje, aireación y fertilidad. Esto significaría en términos del estudio que la clase textural 1 representa a los suelos más permeables, los de textura 2 a los de permeabilidad media y los suelos de tipo 3 a los de baja permeabilidad.

Según la clasificación de suelos de la FAO, en la Sierra de Las Mitras existen las siguientes unidades y subunidades:

a) Litosol (I)

Son suelos que se encuentran en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación. Se caracterizan por tener una profundidad menor de 10cm hasta la roca, tepetate caliche duro. Se localizan en todas las sierras de México, en mayor o menor proporción en laderas, barrancas y malpaís, así como en lomeríos y en algunos terrenos planos.

Tienen características muy variables, en función del material que los forma. Pueden ser fértiles o infértiles, arenosos o arcillosos. Su susceptibilidad a erosionarse depende de la zona en donde se encuentren, de la topografía y del suelo mismo, y puede ser de moderada hasta muy alta.

El uso de estos suelos depende principalmente de la vegetación que los cubre. En bosques y selvas su utilización es forestal; cuando presentan pastizales o matorrales se puede llevar a cabo algún pastoreo más o menos limitado, y en algunos casos se usan con rendimientos variables para la agricultura, sobre todo para los frutales, café y nopal. Este empleo agrícola se halla condicionado a la presencia de suficiente agua y se ve limitado por el peligro de erosión que siempre existe.

b) Regosol (R)

Son suelos que se pueden encontrar en muy distintos climas y con diversos tipos de vegetación. Se caracterizan por no presentar capas distintas. En general son claros y se parecen bastante a la roca que los subyace, cuando no son profundos. Se encuentran en las playas, dunas, y en mayor o menor grado en las laderas de todas las sierras mexicanas, muchas veces acompañado de litosoles y de afloramientos de roca o tepetate.

Frecuentemente son someros, su fertilidad es variable y su uso agrícola esta principalmente condicionado a su profundidad y al hecho de que no presenten pedregosidad. En las sierras encuentran uso pecuario y forestal con resultados variables, en función de la vegetación que exista.

Son de susceptibilidad variable a la erosión. En el área de estudio esta presente el Regosol calcárico Rc, un suelo rico en cal, son los suelos más fértiles en esta unidad.

c) Rendzina (E)

Estos suelos se presentan en climas cálidos o templados con lluvias moderadas o abundantes. Su vegetación natural es de matorral, selva o bosque.

Se caracterizan por tener una capa superficial abundante en humus y muy fértil, que descansa sobre roca caliza o algún material rico en cal. No son muy profundos, generalmente arcillosos.

Si se desmontan se pueden usar en la ganadería con rendimientos bajos o moderados, pero con gran peligro de erosión en las laderas y lomas.

El uso forestal de estos suelos depende de la vegetación que presentan. Su susceptibilidad a la erosión es moderada.

III. RESULTADOS

3.1. SELECCIÓN DE VARIABLES

Para el desarrollo de la investigación se utilizó la siguiente información primaria, en formato digital: modelo digital de elevaciones (DEM), mapa de vegetación, mapa edafológico, mapa geológico, mapa de fallas y plegamientos, fotografías aéreas y orto fotografías.

Algunas de las características de las fuentes de información primaria se hallan resumidas en la Tabla 6

Tabla 5. Características de las fuentes de información primaria

FUENTE PRIMARIA	ESCALA	ORIGEN
Modelo Digital de Elevaciones (DEM)	1/50000	INEGI
Mapa de vegetación	1/50000	INEGI (2000)
Mapa edafológico	1/50000	INEGI (1983)
Mapa geológico	1/250000	INEGI y COREMI (1983 y 2001)
Mapa de fallas y fracturas	1/50000	INEGI (1983)
Fotografías aéreas	1/75000, 1/20000 y 1/40000	INEGI (1999, 2004 y 2004)
Mapa topográfico	1/50000	INEGI (2000)
Ortofotografías	1/50000	INEGI (2002)

Los criterios que se tuvieron en cuenta para la selección de la información a partir de las cuales se derivan las variables son: disponibilidad, accesibilidad, confiabilidad, utilidad y costo.

3.2. PREPARACIÓN DE VARIABLES

Las variables seleccionadas a partir de las fuentes primarias de información y que serán utilizadas para el análisis de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos son: pendiente, aspecto, drenaje, topografía, vegetación, edafología, litología, fallas, uso de suelos e inventario de deslizamientos.

3.2.1. Pendiente

La variable pendiente es derivada del DEM, se logra utilizando la extensión Spatial Analysis de ArcView, expresa el ángulo que hacen la superficie del terreno con la horizontal en este caso de un grid de 50m X 50m. Se puede expresar en términos de grados de 0 a 90 ó en porcentajes, en el trabajo se utilizan los porcentajes.

La pendiente está muy relacionada con la aparición de roturas dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad. La variable se relaciona directamente con las tensiones de corte tangencial y normal en la formación superficial, e influye en la distribución de agua en la ladera. Ocurre que cuanto mayor es la pendiente mayor debería de ser la susceptibilidad a la rotura de la formación superficial; sin embargo se observa que a partir de 45° ó 100% ocurre lo contrario y la pendiente de la ladera es demasiado empinada para retener la formación superficial; por este motivo en las pendientes elevadas solo aflora el substrato rocoso y la posibilidad de aparición de roturas se restringe a la caída o derrumbe de rocas.

A partir de la tabla de atributos de la capa de pendientes generada con la finalidad de explorar la posibilidad de categorizar los datos en una escala cualitativa se efectuó un análisis de pendientes; de donde se desprende que el comportamiento de las mismas es bimodal con una alta frecuencia de valores de grid alrededor del 20% y 70% y valores bajos y muy bajos de grid a partir del 100% (Gráfico 1). Una aproximación de rangos seleccionados para cada clase o categoría de datos y la asignación de un valor cualitativo se puede observar en la Tabla 7; mientras que la representación en el Mapa 2.

Gráfico 1. Análisis de pendientes

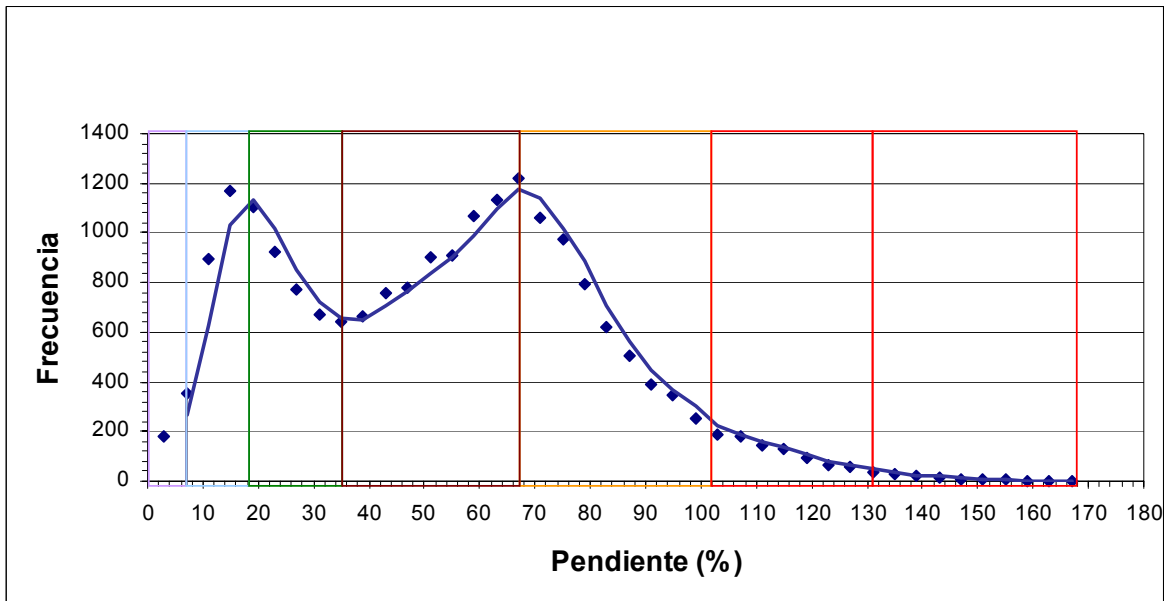
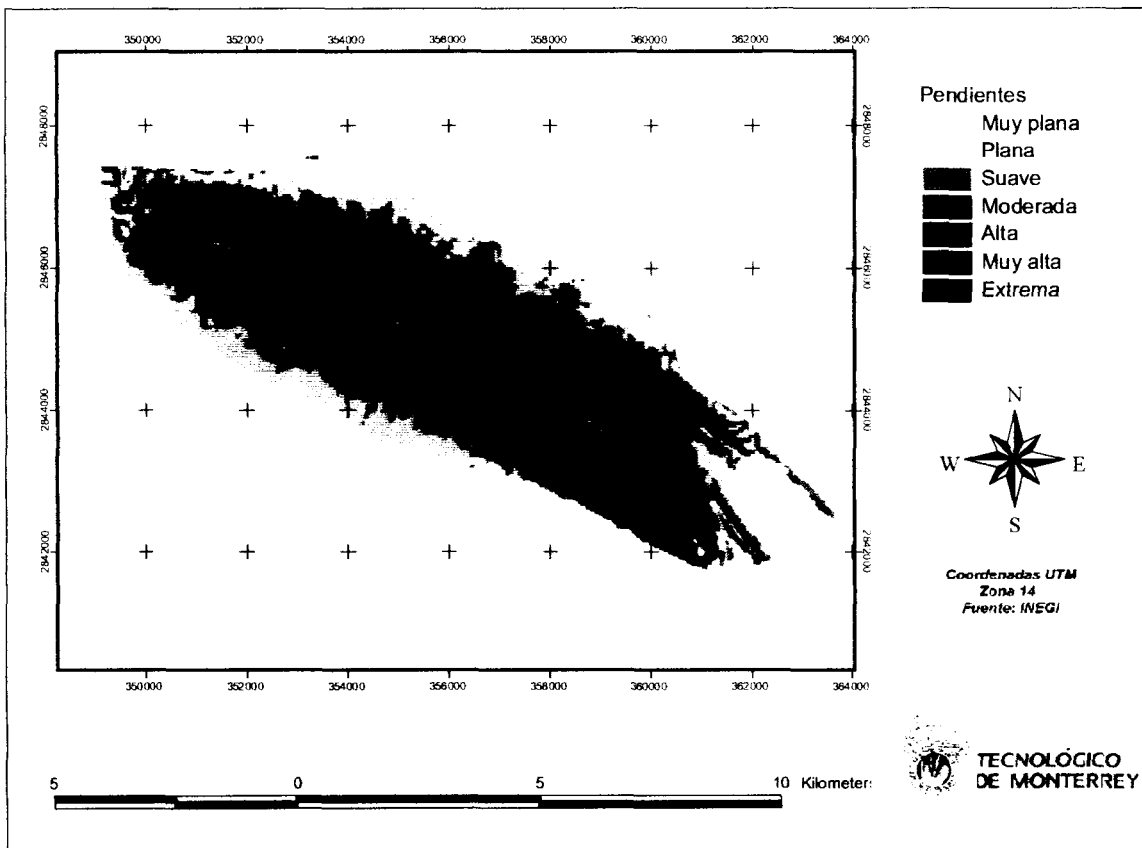


Tabla 6. Clases de Pendiente

CLASE O CATEGORIA (%)	DENOMINACION
$0 \leq X < 7$	Muy plana
$7 \leq X < 19$	Plana
$19 \leq X < 35$	Suave
$35 \leq X < 67$	Moderada
$67 \leq X < 103$	Alta
$103 \leq X < 131$	Muy alta
$131 \leq X < 166$	Extrema



Mapa 2. Pendientes

3.2.2. Aspecto

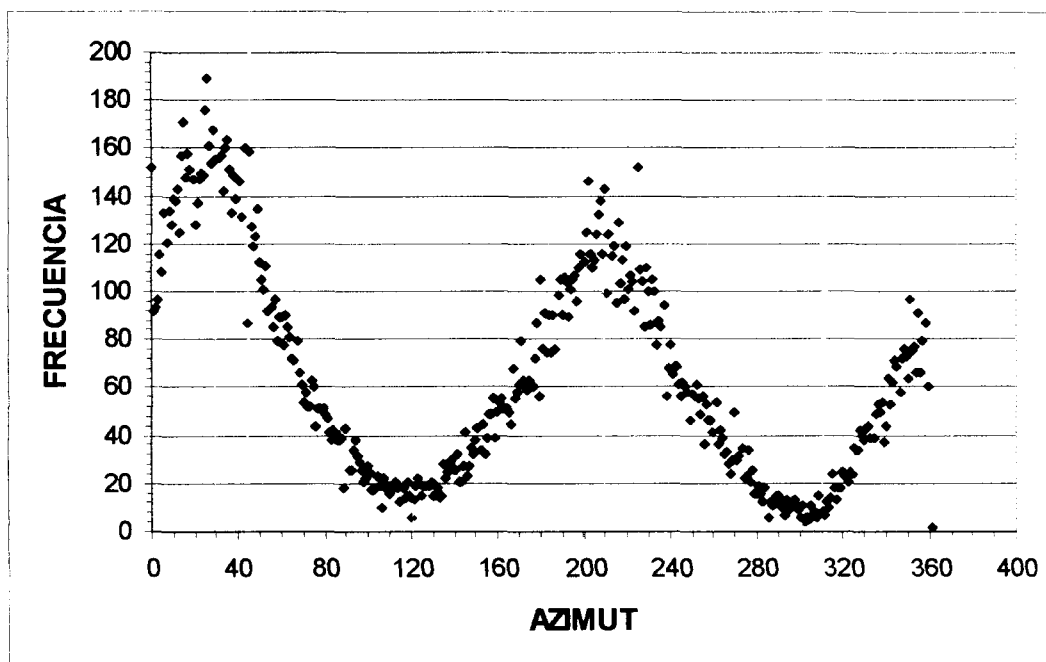
Es una variable derivada del DEM, utilizando la extensión Spatial Analysis de Arc View. Representa la dirección u orientación de la máxima pendiente o la dirección de la máxima tasa de cambio en elevación de cada celda, tiene un rango de valores de 1 a 360 grados azimutales, también se puede encontrar el valor de 361 para aquellas celdas de pendiente 0.

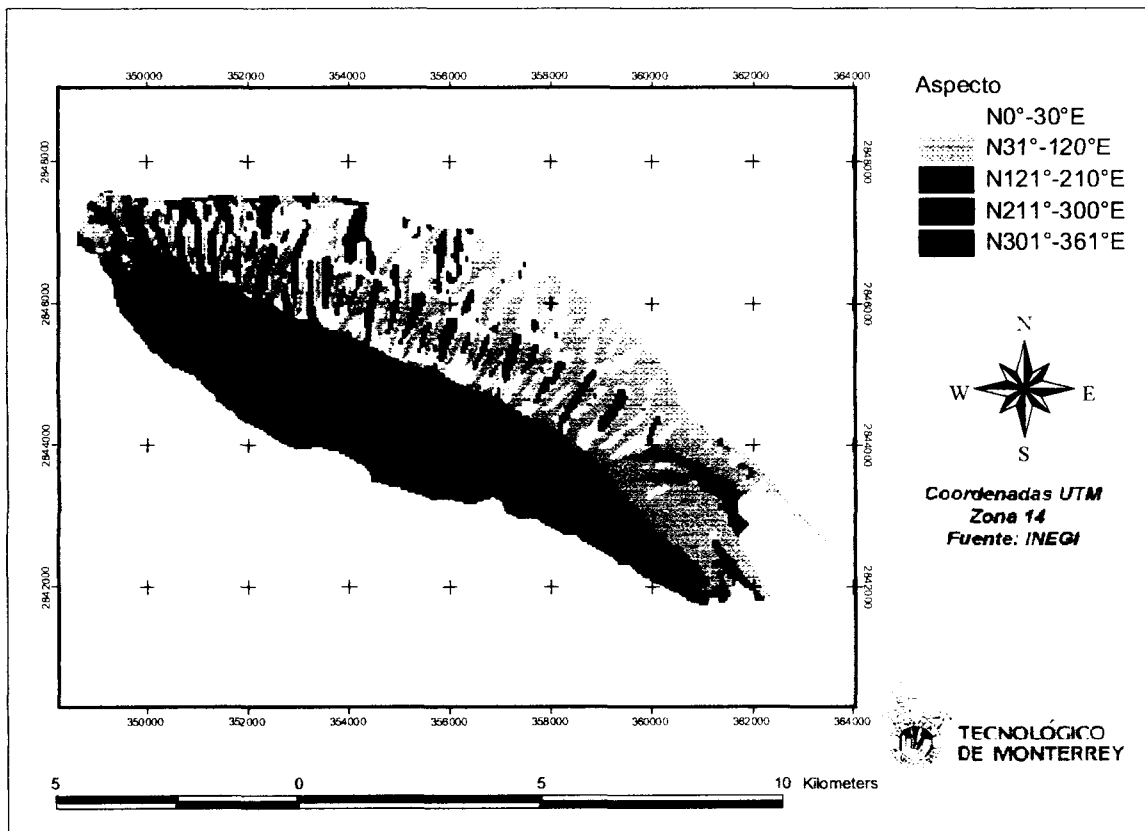
La orientación indica de manera indirecta la situación de una ladera en cuanto a su insolación y, por lo tanto, si una ladera se encuentra húmeda o seca con mayor frecuencia. También se puede interpretar en términos de cantidad de vegetación, por ejemplo en zonas umbrías suele existir más bosque o matorral y una mayor estabilidad de la formación superficial por la presencia de raíces. La orientación

también influirá en la cantidad de lluvia recibida, según la dirección de avance de los frentes nubosos (Santacana, N., 2001).

Se generó a partir de un grid de 50m X 50m. De manera similar que las pendientes, se hizo un análisis de aspectos (Gráfico 2); en el gráfico se observa que es bimodal con valores de frecuencia más altos de azimuth concentradas en N 30° E y N 210° E, mientras que los valores de frecuencia más bajos en azimuth están en N 120° E y N 300° E; tomando en cuenta estas características resaltantes, los rangos representativos para cada clase en la capa de aspectos son cinco: de 0 a 30; de 31 a 120; de 121 a 210; de 211 a 300; y de 301 a 361. (Mapa 3)

Gráfico 2. Análisis de orientación de las pendientes





Mapa 3. Mapa de orientación de las pendientes

3.2.3. Drenaje

Presenta un sistema de drenaje superficial paralelo a sub paralelo, propio de zonas donde predominan rocas carbonatadas como las calizas. En general, el carácter de las corrientes es intermitente. Se determinó el orden hidrológico de las corrientes de agua, según el método de Strahler existe hasta de tercer orden; y de acuerdo al método de Shreve los órdenes llegan hasta cinco.

La longitud de corrientes de agua se calcula en 153,337m, la corriente de menor longitud tiene 38m, mientras que la más larga 2781m, asimismo se cuentan 150 tramos de corrientes de diverso orden.

Para determinar las categorías existen dos criterios básicos: el concepto de densidad de drenaje y el de la distancia más corta, esta distancia es ortogonal. La densidad de

drenaje se calcula para toda una cuenca y es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca y el área total de la cuenca, expresada por la ecuación:

$$D = \frac{L}{A} = 2.41$$

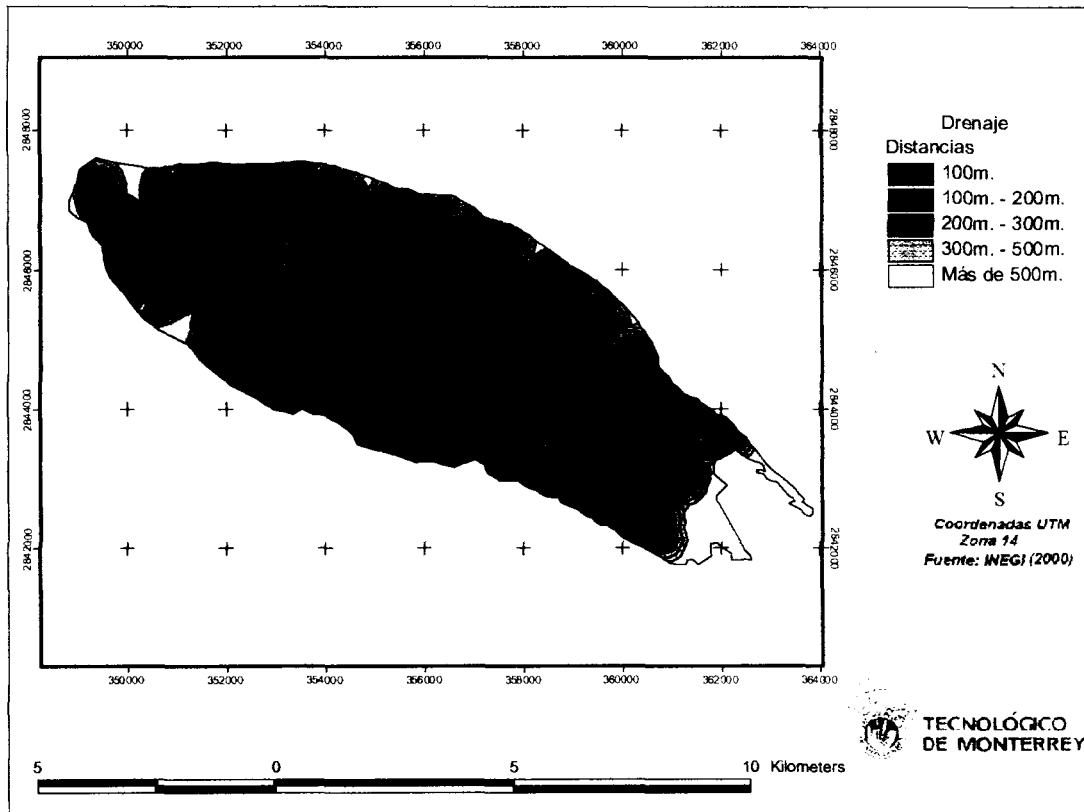
Donde:

D= Densidad de drenaje de la cuenca en Km./Km².

L= Longitud de corrientes de agua en la cuenca en Km.

A= Área de toda la cuenca en Km².

No obstante el área de estudio no configura una cuenca, la estimación realizada indica que se trata de una zona bien drenada. Aplicando el criterio de la distancia ortogonal más corta, se han establecido seis categorías ver Mapa 4.



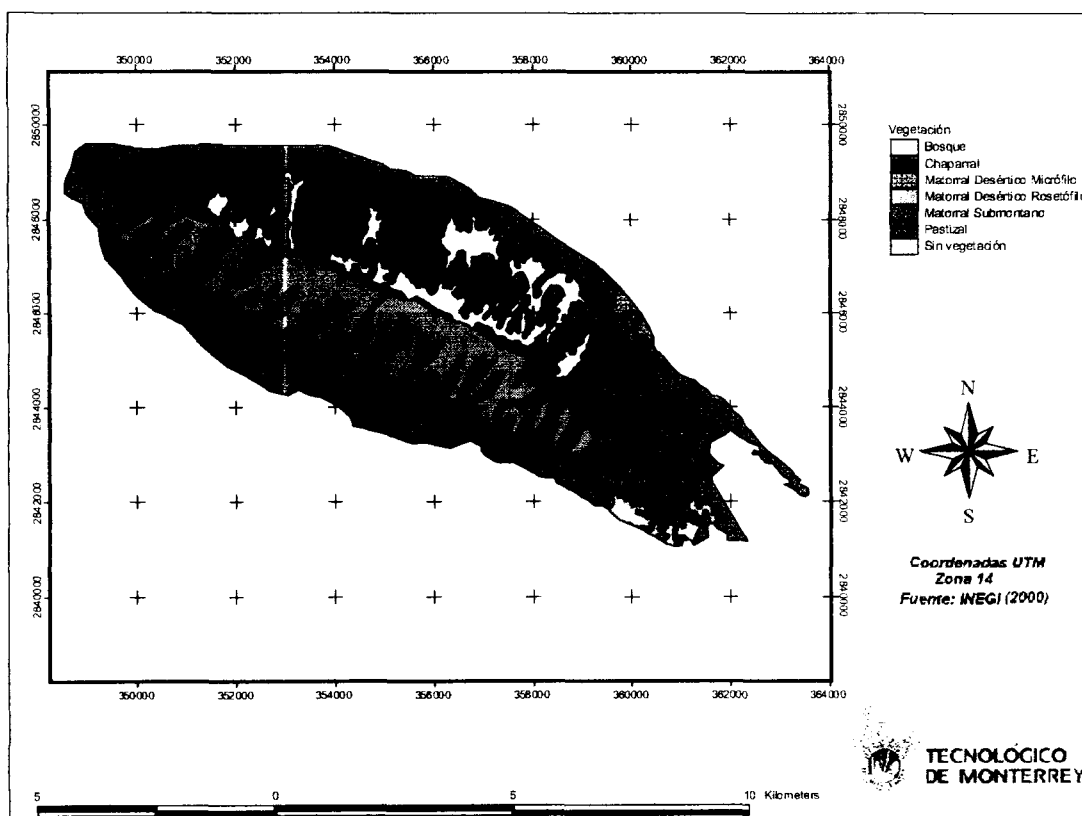
Mapa 4. Drenaje

En el mapa, hacia el SE tanto de la falda Norte como de la falda Sur de la Sierra de las Mitras se observan tramos de la red de drenaje cortados, es decir, que no

presentan continuidad aguas abajo. Esta anomalía en la falda Sur se debe a las pedreras que desaparecieron los cursos naturales de agua, mientras que en la falda Norte al avance de la mancha urbana.

3.2.4. Vegetación

Esta variable hace referencia a la vegetación o cobertura vegetal que cubre el suelo. Se considera desde el punto de vista de los principales estratos vegetales como bosque, chaparral, matorral, pastizal, también incluye las zonas sin vegetación y que tienen otros usos, los cuales son detallados en la variable uso de suelo, específicamente; se consideran 7 categorías (Mapa 5).



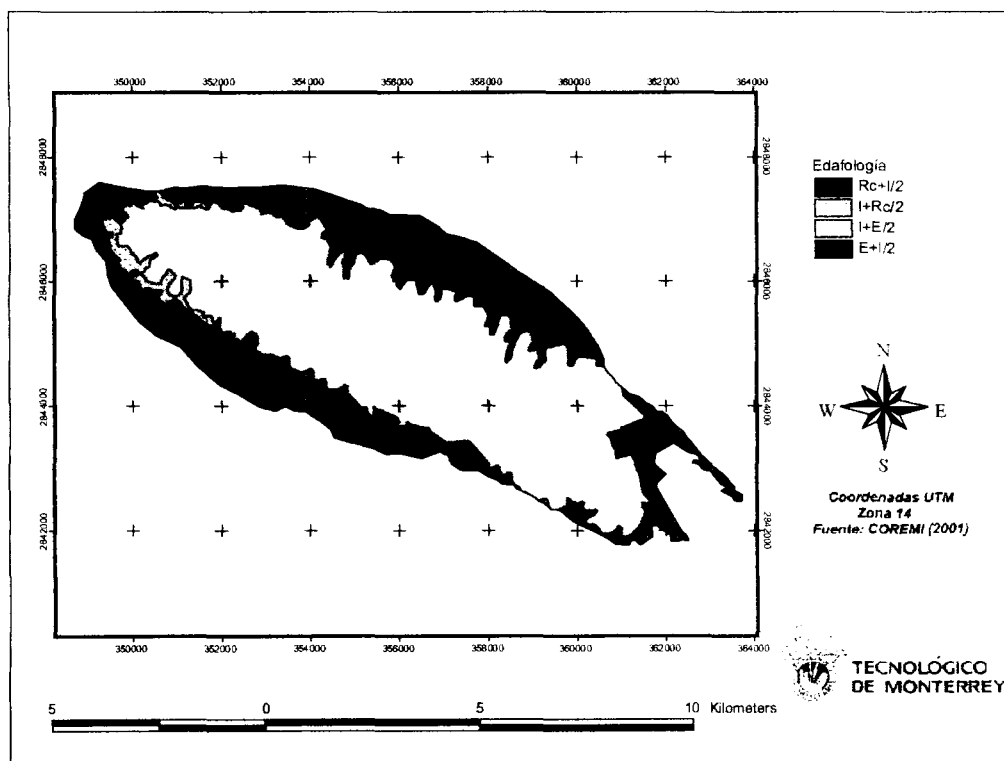
Mapa 5. Vegetación

La cobertura vegetal y su densidad influyen en la estabilidad de la formación superficial mediante mecanismos que se pueden clasificar como hidrológicos y mecánicos. Los hidrológicos comprenden: la capacidad de infiltración en el suelo, la

humedad del suelo, evapotranspiración, entre otros, mientras que los mecánicos traducen el aumento de la resistencia que proporcionan las raíces y la protección frente a la erosión (Greenway, 1987; Mulder, 1991). La vegetación puede influir de manera beneficiosa o adversa en la estabilidad de las laderas, dependiendo de cómo actúen los mecanismos mencionados (Baeza, 1994). Un ejemplo de lo último es mientras que las raíces aumentan la resistencia del suelo, al mismo tiempo favorecen una mayor infiltración de agua de lluvia.

3.2.5. Edafología

La variable edafología hace referencia al sistema de clasificación de suelos de la FAO/UNESCO, se considera desde el punto de vista de las principales asociaciones de suelo presentes en la zona de estudio. No se incluye la variable textura de los suelos dado que en el área están presentes suelos con textura 2. Se consideran 4 categorías (Mapa 6).

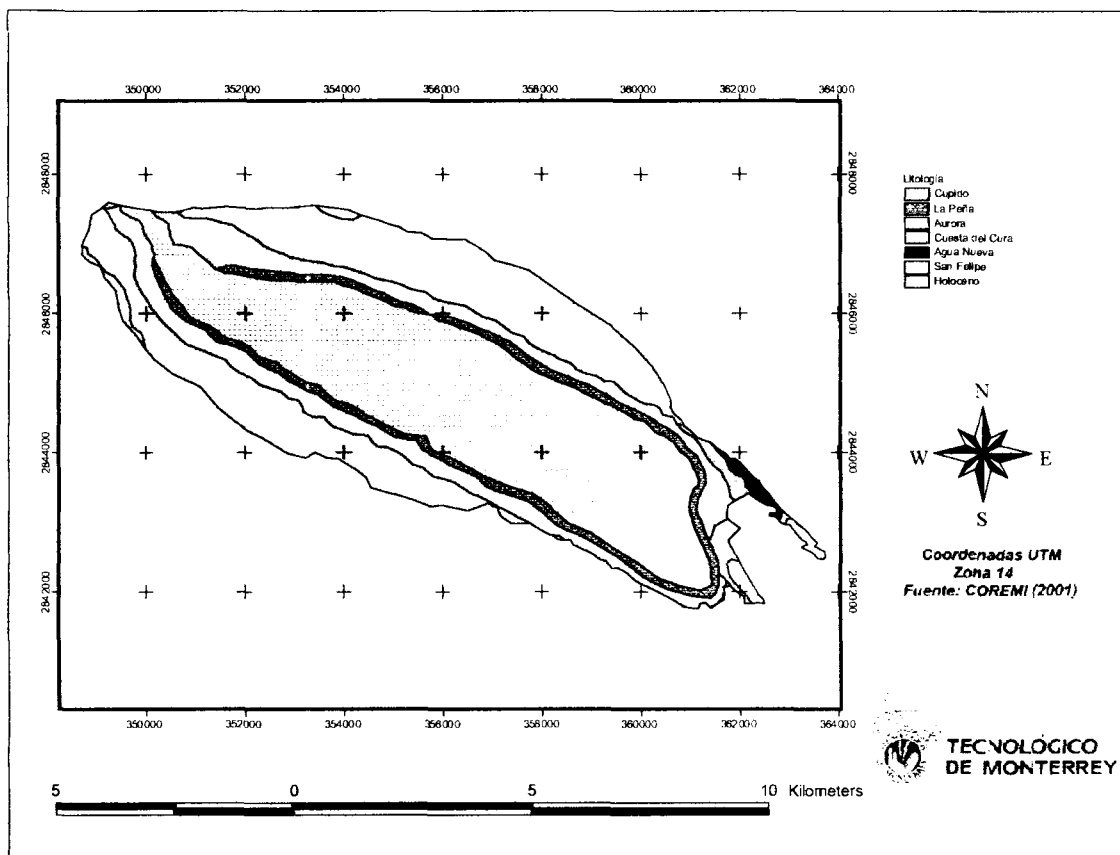


Mapa 6. Edafología

La variable es importante dado que permite ubicar la presencia de rotura o deslizamientos superficiales y por tanto indica diversos niveles de susceptibilidad, principalmente, a variaciones en la textura y grosor; sin embargo la categorización por asociación de suelos está relacionada con el tipo de vegetación y los dos factores antes mencionados.

3.2.6. Litología

El mapa geológico se compiló de reportes e información digital disponible, se halló que entre ellas existe concordancia parcial en las formaciones que afloran en la Sierra de Las Mitras, lo que afecta en el análisis de las características de los tipos de roca presentes.



Mapa 7. Litología

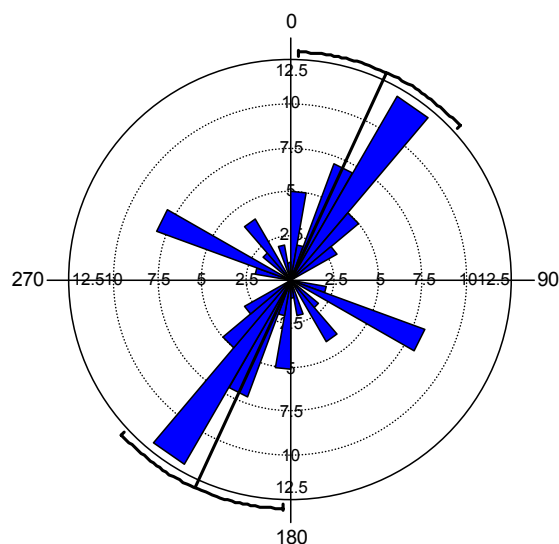
La categorización de la variable fue efectuada en base a la información del COREMISGM, tomando en cuenta las formaciones señaladas en el mismo, decisión asumida para salvaguardar la integridad de la información obtenida, mientras se resuelvan las discrepancias; se consideran 7 clases (Mapa 7).

La importancia de la variable se debe a que constituye el material dentro del que se producen los deslizamientos de todo tipo, excepto los muy superficiales que afectan a los suelos, y donde actúan los factores desencadenantes para producirlos, afectando las condiciones de estabilidad.

3.2.7. Fallas y fracturas

Las fallas y fracturas son consideradas como potenciales fuentes de agua y como factor desencadenante de deslizamientos, en el mapa no se toman en cuenta las consideraciones genéticas o que dieron origen a las fallas y/o fracturas, dado que este factor no parece relevante en la determinación de la susceptibilidad a deslizamientos. Se ha calculado que en el área de estudio existen 53 segmentos de fallas y/o fracturas, con una longitud total de 33900m, longitud promedio de 639.6m., el segmento más corto tiene 25.038m, mientras que el más largo 1567.18m de longitud. La dirección principal esta generalmente confinada en una tendencia de NE – SW y una secundaria de NW – SE, (Gráfico 3).

Gráfico 3. Diagrama de Rosa de las fallas y fracturas



BASIC STATISTICS	
Analysis begun: martes, 01 de noviembre de 2005 10:01:44 p.m.	
Variable	Axial
Number of Observations	53
Data Grouped?	No
Group Width (& Number of Groups)	
Mean Vector (μ)	24.651°
Length of Mean Vector (r)	0.307
Median	34.297°
Concentration	0.645
Circular Variance	0.347

Elaborado con el software de evaluación ORIANA V2.
A partir de información de fallas y fracturas
INEGI(1983).

Para establecer las clases de la variable se conocen dos métodos: el primero es la distancia más cercana a una falla o fractura y la segunda la densidad de fallas. En el primero se establece una distancia que puede ser raster u ortogonal, mientras que el segundo, es la relación entre la longitud total de las fallas y/o fracturas y el área total, se calcula en kilómetros de falla y/o fractura por kilómetro cuadrado de superficie, mediante la siguiente ecuación:

$$D = \frac{L}{A} = 0.53 ;$$

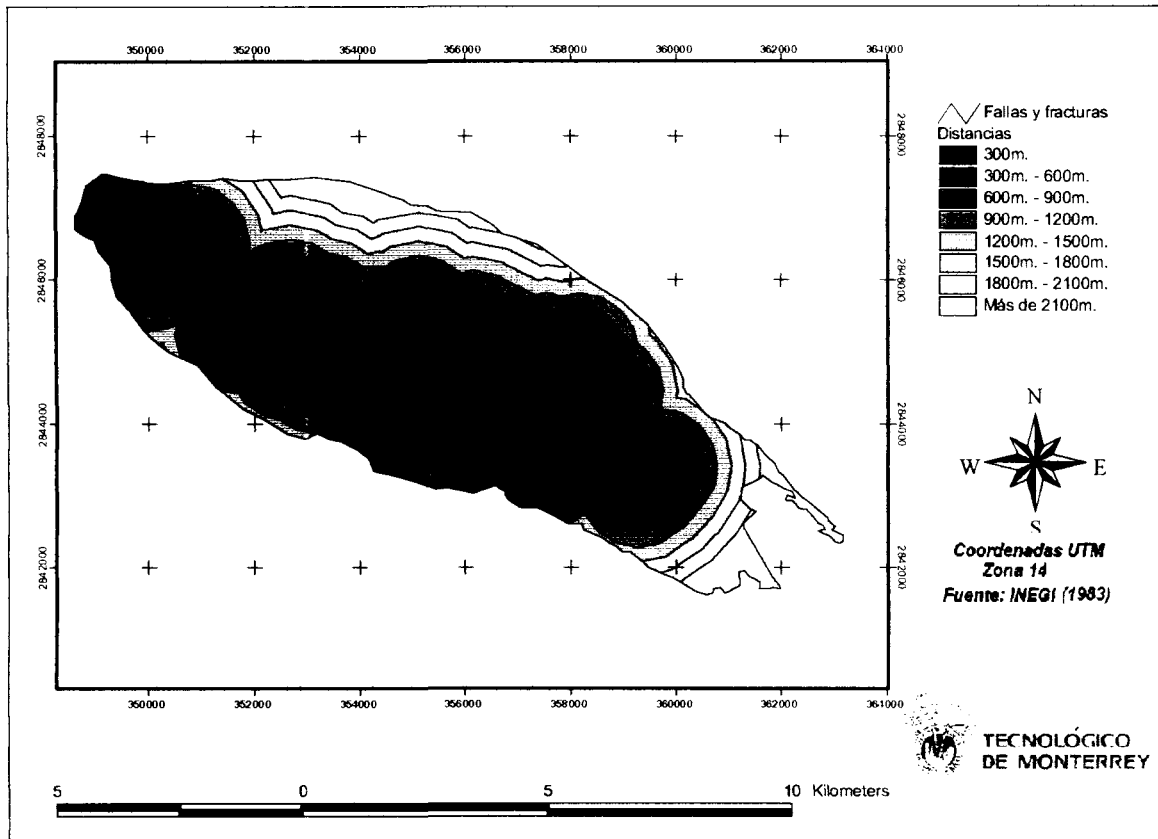
Donde:

D = Densidad en Km./Km²

L= Longitud total de las fallas, en Km. (33.9)

A = Área total, en Km² (63.7)

Por razones de aplicabilidad, se ha optado por el criterio de la distancia, y entonces se ha asumido una distancia ortogonal de 300m, de esta manera se han generado 8 categorías. El criterio tomado para elegir el método de la distancia más corta se debe al supuesto de que tan cerca o lejos de una falla y/o fracturas pueden ocurrir deslizamientos (Mapa 8).



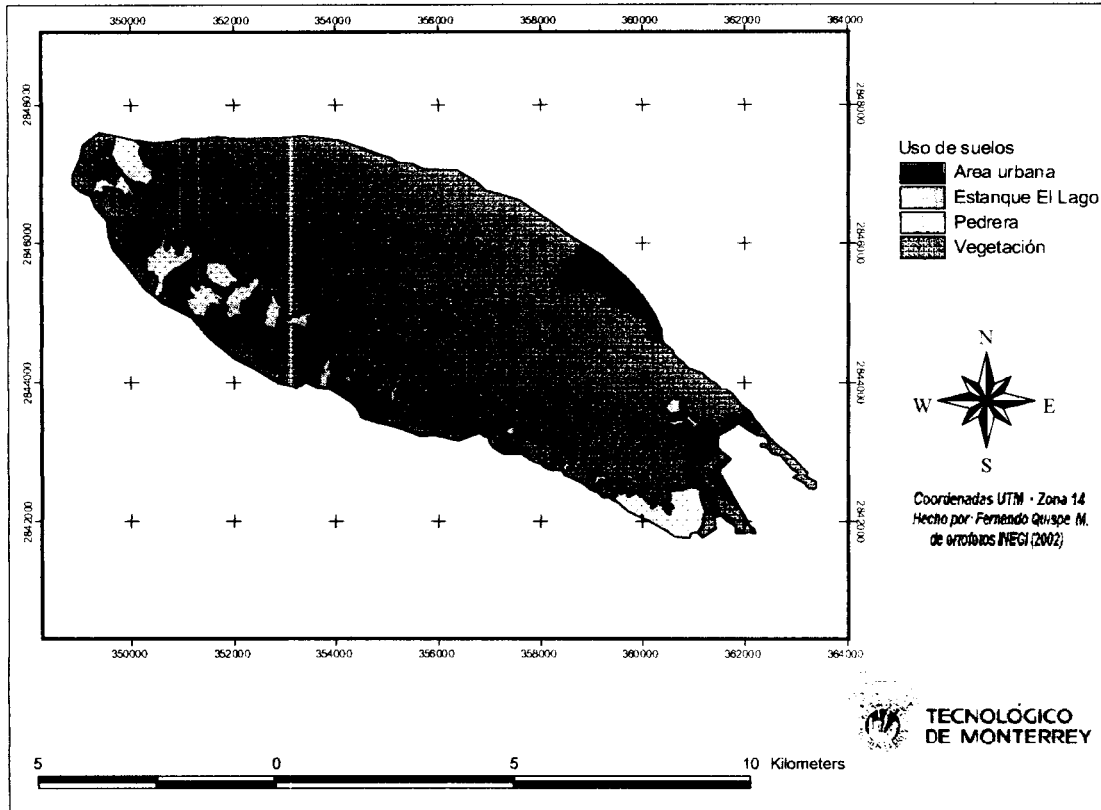
Mapa 8. Fallas y fracturas

3.2.8. Uso de suelos

Se considera importante introducir esta variable separada de vegetación, con el propósito de destacar la importancia de las actividades humanas que han ido alterando la morfología de la Sierra de la Mitras como son: las explotaciones de materiales conocidas como pedreras a los que se les denomina como minas y el avance de la zona urbana; y principalmente, hacer que intervengan en el análisis de susceptibilidad.

Esta variable se ha construido por digitalización, utilizando como fuente de información primaria ortofotografías del área; se distinguen cuatro clases o

categorías: área urbana, estanque, pedrera y vegetación (Mapa 9).



Mapa 9. Uso de suelos

3.2.9. Inventario de deslizamientos

Bajo condiciones ambientales similares, la distribución espacial de deslizamientos del pasado y los recientes es la clave para predecir estos movimientos en el futuro. Por esta razón el procedimiento fundamental es la identificación y mapeo de todos los deslizamientos ocurridos en el área de estudio, compilándolo en un inventario. Esta tarea se cumple de manera más efectiva distribuyendo el estudio en trabajo de laboratorio y campo; el primero mediante la interpretación de fotografías aéreas y en el campo mediante el mapeo geomorfológico; depende del tamaño, tiempo y fondos disponibles.

El inventario es de principal importancia, no obstante, constituye una tarea que acarrea bastantes imprecisiones que afectan a los resultados del estudio. Los errores de interpretación están en el rango de 42% al 68% (Carrara, Guzzetti, Cardinali,

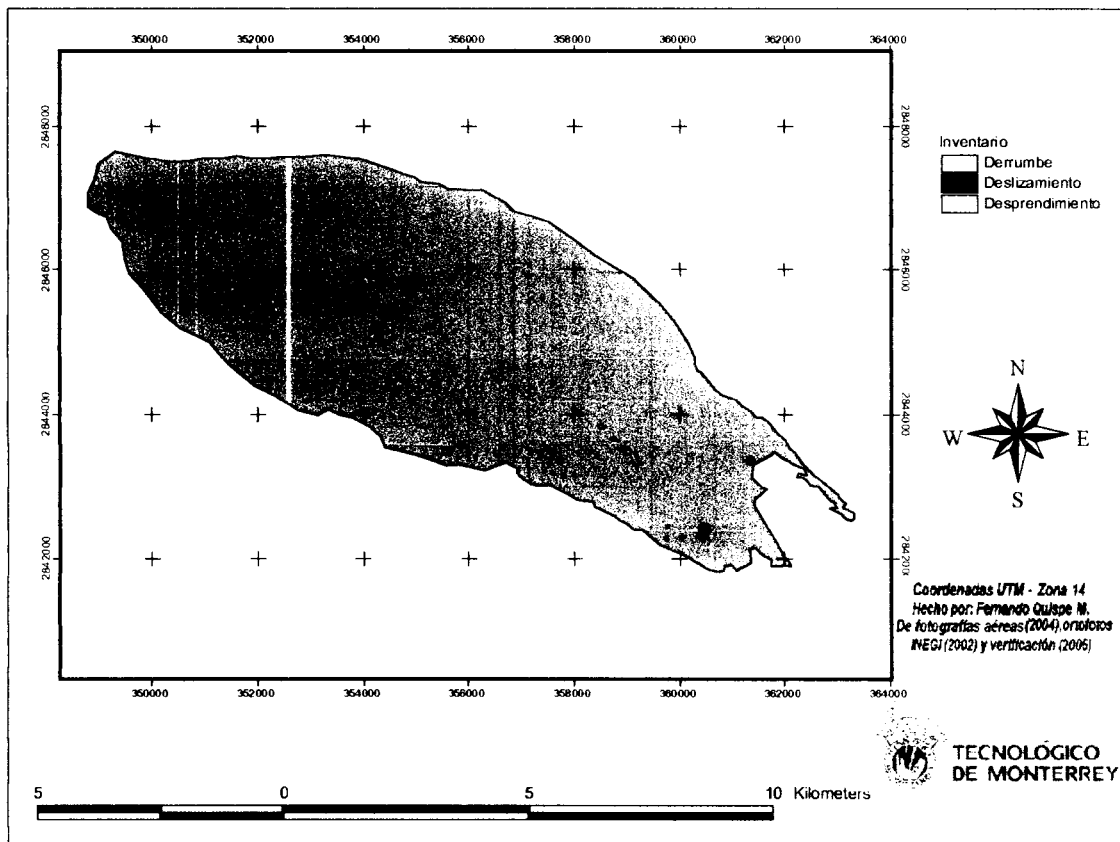
Reinchenbach, 1995) pero se han encontrado discrepancias hasta del 90%. Estas consideraciones evidencian la necesidad de poner énfasis en esta tarea para garantizar resultados confiables.

Para la interpretación de deslizamientos se necesitan las fotografías aéreas, los datos de satélite son útiles solo cuando los elementos son grandes. Para analizar la inestabilidad de la pendiente, La foto-escala más apropiada es 1:15.000 y la menor escala 1:25.000. Se puede considerar utilizar escalas más pequeñas si el tamaño y el contraste son suficientemente grandes. La cantidad de información analítica que permite al intérprete hacer conclusiones en el tipo y las causas del deslizamiento sería muy limitada a escalas menores de 1:25.000, además que una cantidad considerable de movimientos de pendiente no se observarían (van Westen, 1999).

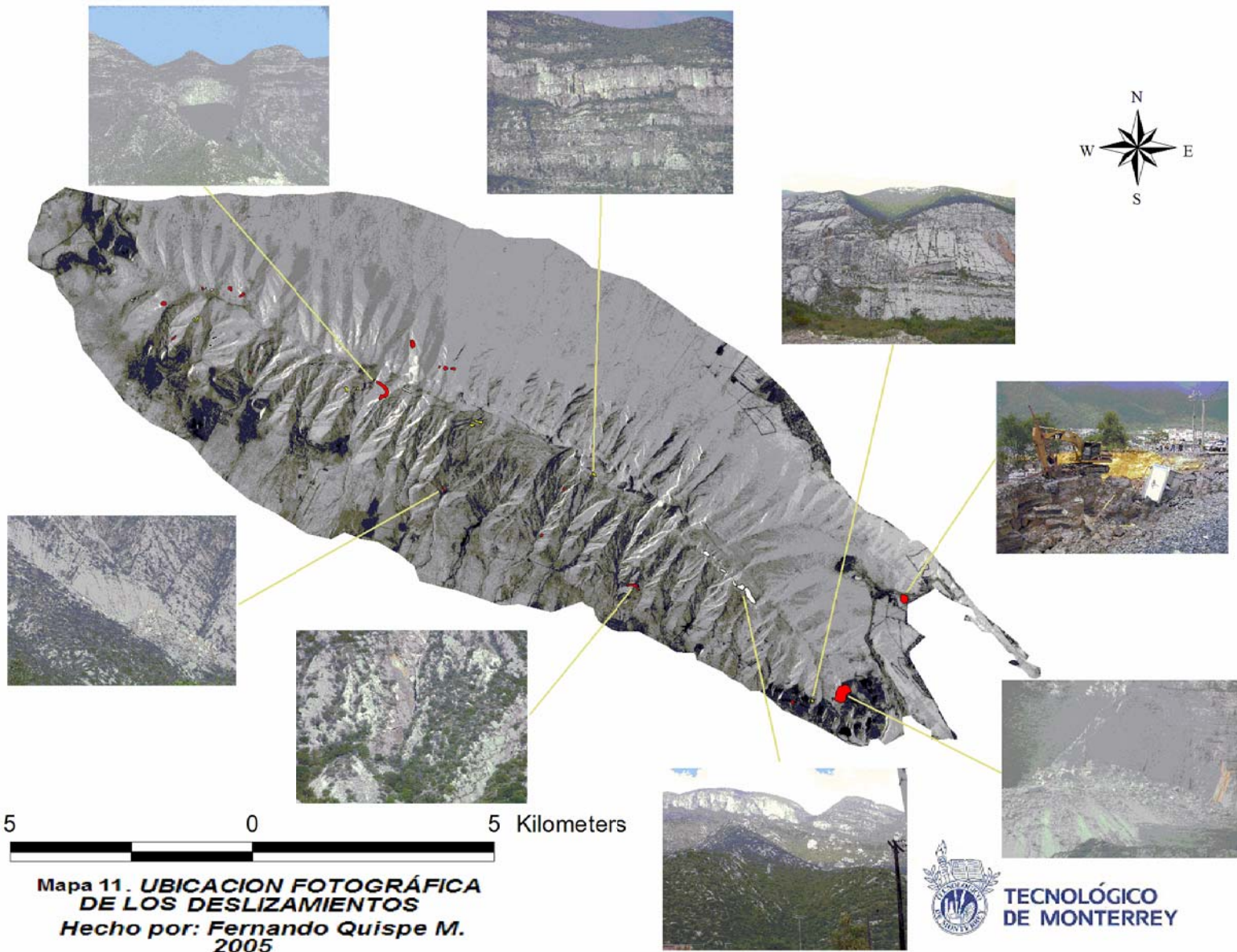
Por otro lado, es necesario establecer las características que guíen la tarea de mapeo y reconocimiento. La información de deslizamientos que se extrae de las imágenes de los sensores remotos esta basada en: morfológicas, de vegetación y las condiciones de drenaje de la pendiente. Los rasgos morfológicos que se deben observar son: concavidad y convexidad de las pendientes, nichos semicirculares, inclinación en retroceso de las caras de la pendiente, relieve ondulado, formación de craquelados, taludes escarpados; de la vegetación se puede evaluar: vegetación desordenada y parcialmente muerta, cobertura vegetal interrumpida de un lado a otro del talud y coincidiendo con la morfología, áreas de vegetación menos densa alineadas y con tonos claros, diferencias en la vegetación dentro y fuera del deslizamiento y cambios de la vegetación relacionadas con el drenaje; mientras que del drenaje: desarreglos en el drenaje o líneas de drenaje cortadas, zonas de estancamiento de aguas, zonas de filtración o apariencia de pozos y masas excesivamente drenadas (van Westen, 1999).

La capa ha sido desarrollada utilizando fotografías aéreas escala 1:75000, 1:40000 y 1:20000 en blanco y negro del INEGI, en esta etapa, es preciso indicar que algunas áreas no fueron cubiertas debido al alto grado de distorsión (flattered) de las fotografías aéreas (1:20000). Posteriormente, se ha efectuado la verificación y complementación del inventario por reconocimiento visual y documentación fotográfica en la ladera Sur, el mismo, ha permitido corregir lecturas erróneas y

realizar la limpieza correspondiente; asimismo, se determinó que los principales tipos de eventos son: los desprendimientos de rocas, derrumbes de rocas y deslizamientos de rocas. Con la finalidad de aplicar la metodología de análisis, los deslizamientos fueron mapeados tomando en cuenta su forma para estimar el área de cada uno de ellos. La información es clasificada en dos categorías: deslizamiento y no deslizamiento (Mapa 10 y 11). Se puede denominar a esta capa como la variable predictora como se verá más adelante.



Mapa 10. Inventario de deslizamientos



Un resumen de las principales características de cada una de las variables se puede ver en la Tabla 8.

Tabla 7: Resumen de variables

VARIABLE	CLASES	VARIABLE	CLASES
Pendiente	Muy plana	Edafología	Rendzina – Litosol
	Plana		Litosol – Rendzina
	Suave		Litosol - Regosol calcárico
	Moderada		ND
	Alta		Regosol calcárico – Litosol
	Muy alta	Litología	Agua Nueva
	Extrema		Aurora
Aspecto	0 – 30		Cuesta del Cura
	31 – 60		Cupido
	61 – 120		Rocas sed. Holoceno
	121 – 210		La Peña
	210 – 300	San Felipe	
	301 – 361	Fallas y fracturas	0 -300
Drenaje	0- 100		300 – 600
	100 – 200		600 – 900
	200 – 300		900 – 1200
	300 – 400		1200 – 1500
	400 – 500		1500 – 1800
	500 – 1000		1800 – 2100
Vegetación	Bosque	Más de 2100	
	Chaparral	Uso de suelos	Área urbana
	Matorral desértico micrófilo		Estanque
	Matorral desértico rosetófilo		Pedreira
	Matorral submontano		Vegetación
	Pastizal	Inventario	Con deslizamientos
	Sin vegetación		Sin deslizamientos

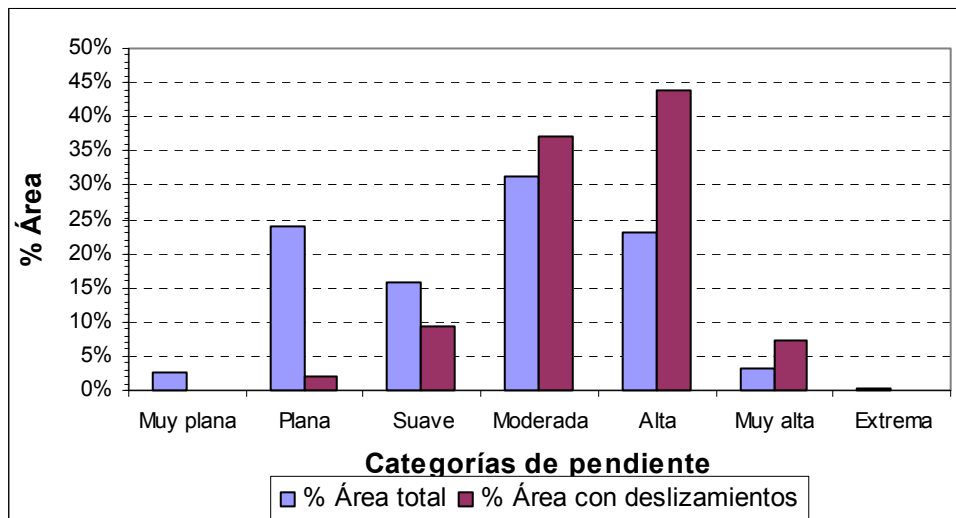
3.3. SUPERPOSICIÓN DE VARIABLES A LA CAPA DE DESLIZAMIENTOS

Como parte del proceso de aplicación del modelo propuesto, se procedió a la superposición de cada una de las variables al inventario de deslizamientos. El análisis de los resultados obtenidos en esta fase, expresado en términos de

porcentaje del área ocupada por cada clase de una variable del total del área en estudio (63.7Km²) y el porcentaje de área con deslizamientos presentes en cada clase de una variable del total de área con deslizamientos (0.19 Km²), dan una idea de la frecuencia con que ocurren los eventos estudiados en cada una de las variables.

En el caso de la variable Pendiente, (Gráfico 4) la categoría moderada ocupa más del 30% del área total, enseguida están en orden decreciente las pendientes planas, altas y suaves respectivamente, también se aprecia que las clases muy plana y extrema tienen una presencia pobre en el área. Por otro lado, algo más del 80% de los deslizamientos sucede en pendientes moderadas y altas, la diferencia se da en pendientes suaves, muy altas y planas; no se detectó ningún evento que involucre a pendientes muy planas y extremas. Se puede asumir que existe alguna relación del tipo: a mayor presencia de pendientes, mayor ocurrencia de deslizamientos en las mismas.

Gráfico 4. Relación de áreas variable Pendiente



Las orientaciones de pendiente o Aspecto presentan una distribución de frecuencias donde, relativamente, es más abundante la categoría 31 - 120 grados azimutales y la de menor presencia la categoría de 301 – 361. Por otro lado, la mayor ocurrencia de deslizamientos está asociada a las clases de 121 – 210 y 211 – 300 grados azimutales que en conjunto suman más del 82% de eventos inventariados, mientras que en las otras clases la presencia de estos es de alrededor del 6%, en cada una de

ellas (Gráfico 5). Un desglose más preciso de la orientación más frecuente de las pendientes se puede ver en el Grafico 6, de él se desprende que estas se hallan entre los 202 – 247 grados azimutales que corresponde a los tramos final e inicial de las dos clases señaladas como de mayor ocurrencia de deslizamientos, asimismo, es posible suponer que esta orientación, preferida, tiene relación directa con el flanco sur de la Sierra de las Mitras donde ha sido posible detectar el mayor número de deslizamientos, así como es notoria la perpendicularidad con respecto al eje del anticlinal.

Gráfico 5. Relación de áreas variable Aspecto

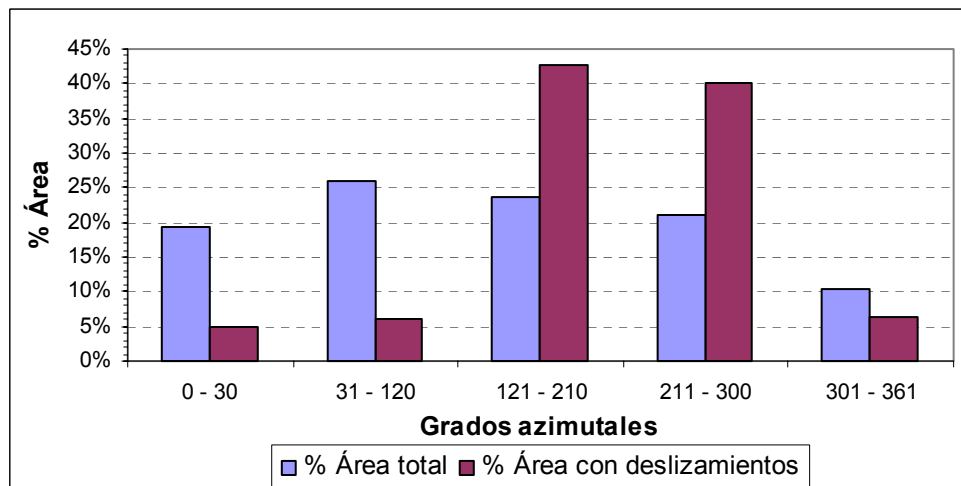
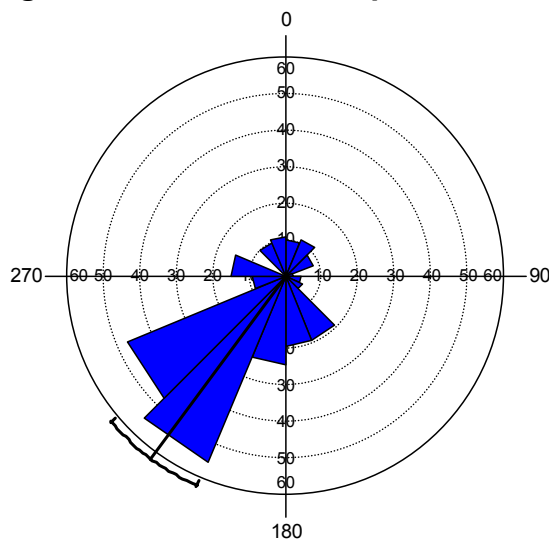
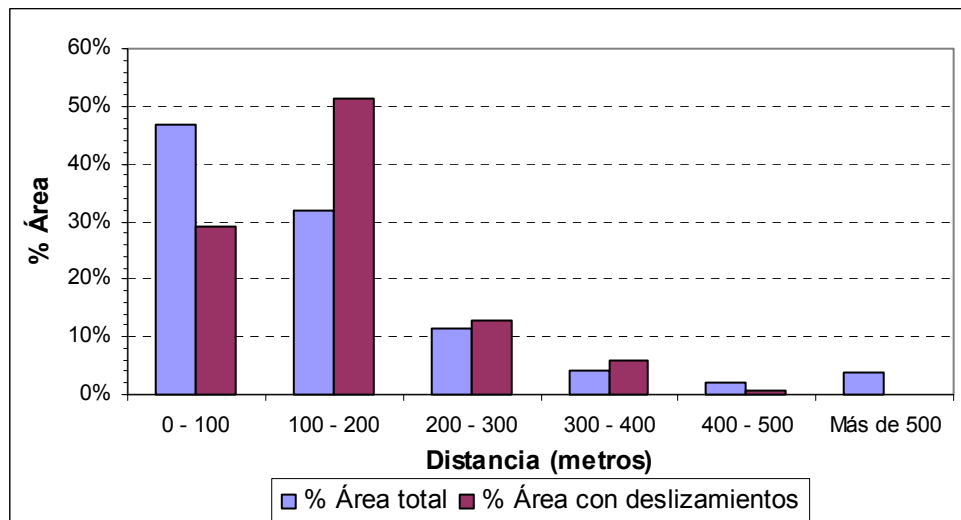


Gráfico 6. Diagrama de Rosas del Aspecto con deslizamientos



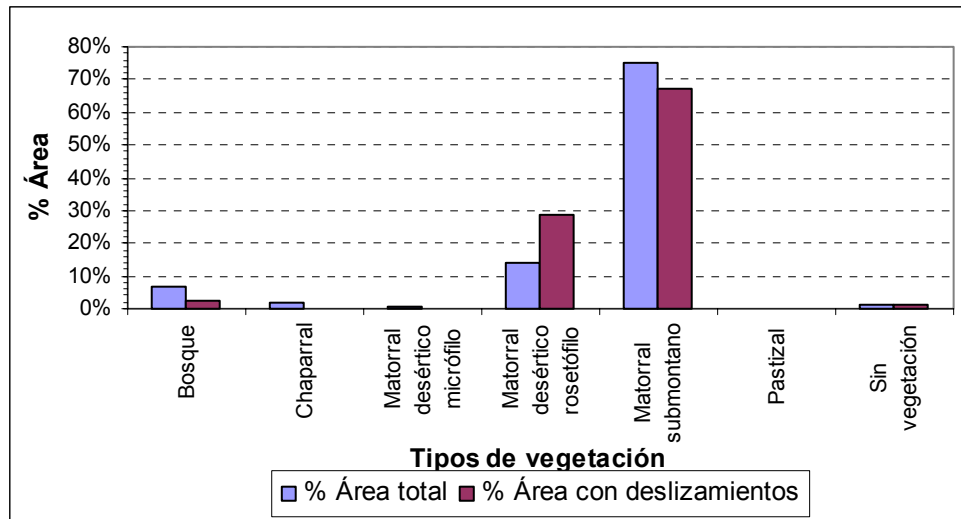
El estudio de la influencia de la variable Drenaje en la ocurrencia de deslizamientos a partir de la división del área de estudio en otras menores diseñadas en base a la distancia que se encuentran de las líneas de drenaje, entrega como resultado que casi el 80% del total del área esta entre los 0 y 200 metros, asimismo en la misma superficie se ubicaron más del 80% de los deslizamientos, por lo tanto, existe relación directa entre distancia más corta y los eventos hallados (Gráfico 7).

Gráfico 7. Relación de áreas variable Drenaje



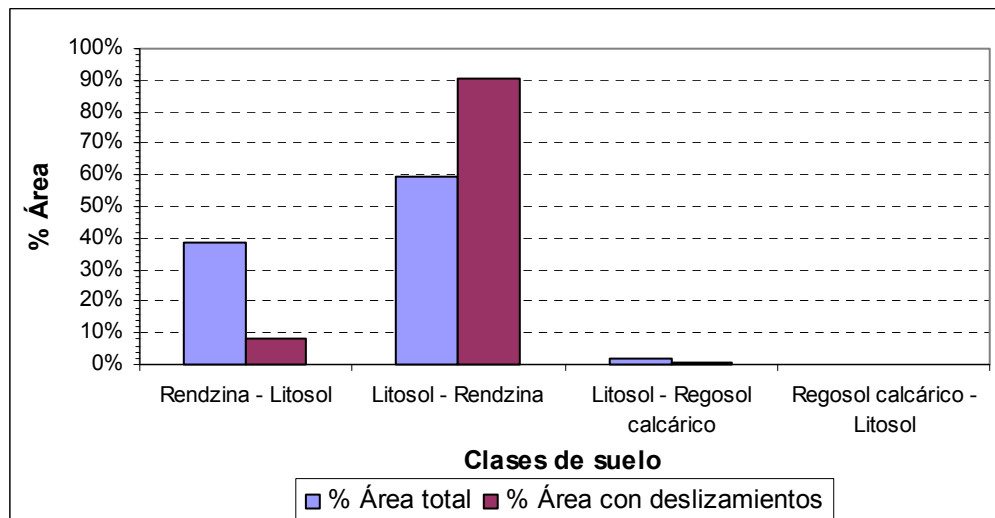
En el Gráfico 8 se puede apreciar que el tipo de vegetación predominante en la Sierra de las Mitras es el Matorral Submontano, el mismo ocupa el 75% del área total, seguido por el Matorral Desértico Rosetófilo con casi el 15%; asimismo, existe una alta concentración de deslizamientos detectados donde prevalecen estos dos tipos de vegetación, es así que cerca al 70% han ocurrido en el Matorral Submontano y casi el 30% dentro de los dominios del Matorral Desértico Rosetófilo. La influencia de estos dos tipos de vegetación sobre las demás en el área en estudio se muy fuerte, en tanto, no se han encontrado eventos en las categorías de vegetación: Matorral Desértico Micrófilo, Chaparral y Pastizal.

Gráfico 8. Relación de áreas variable Vegetación



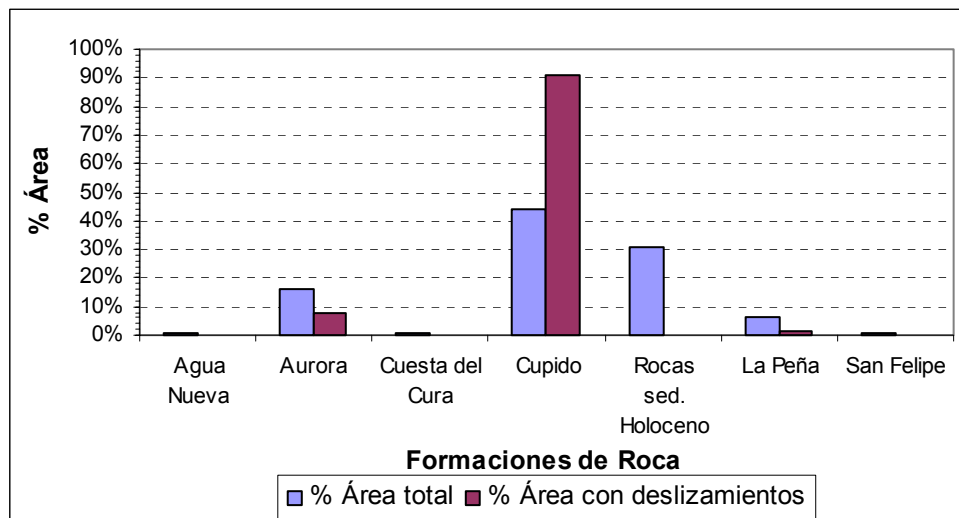
En la variable Edafología el suelo del tipo de asociación Litosol-Rendzina esta presente en casi el 60% del área y dentro de él se encuentran algo más del 90% de los deslizamientos mapeados, mientras que Rendzina – Litosol ocupa cerca al 40% del área total y menos del 10% del área de deslizamientos. Los suelos de tipo Litosol – Regosol calcárico están presentes en apenas el 2% del área, y ocupan menos del 1% del área con deslizamientos.. En el inventario no se han registrado casos en las clases Rendzina-Litosol y Regosol calcárico-Litosol (Gráfico 9).

Gráfico 9. Relación de áreas variable Edafología



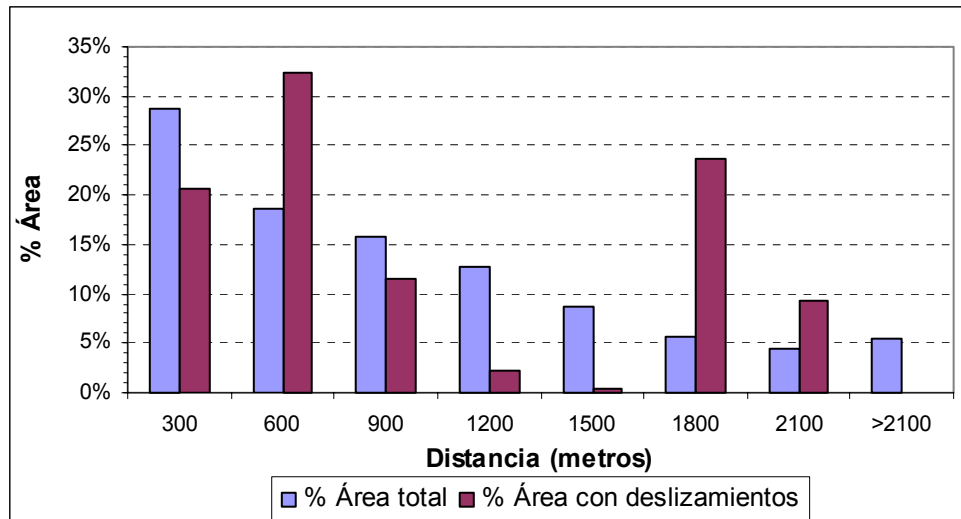
En la variable Litología la formación con mayor presencia en el área es Cupido con casi el 45%, seguida de las rocas sedimentarias del Holoceno con el 30%; en un segundo grupo se puede mencionar a la formación Aurora y La Peña que juntos superan el 20% y en un tercer grupo se encontrarían las formaciones: Agua Nueva, Cuesta del Cura y San Felipe. Por otro lado, el 90% de los deslizamientos inventariados se hallan en la formación Cupido, mientras que en las rocas sedimentarias del Holoceno, la segunda más abundante, no se registran eventos, tal como sucede con las formaciones Agua Nueva, Cuesta del Cura y San Felipe, el restante 10% se distribuyen entre las formaciones Aurora y La Peña (Gráfico 10).

Gráfico 10. Relación de áreas variable Litología



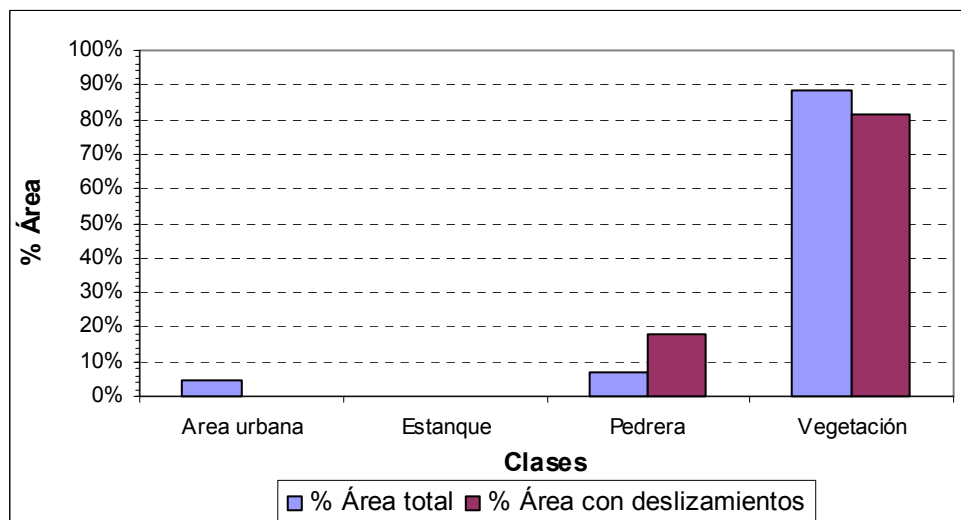
Los resultados del análisis en la variable Fallas y fracturas muestran que la distribución de áreas gradan desde cerca al 29% para distancias hasta 300 metros de las fallas a algo menos del 5% para distancias entre 1800 a 2100 metros, sin embargo este patrón no se cumple en el caso de presencia de deslizamientos, donde la clase con mayor concentración de eventos es el intervalo entre 300 a 600 metros de distancia con casi el 33% seguido de la clase que comprende al intervalo de 1500 a 1800 metros con el 24% el mismo que refleja una situación muy particular de la asociación existente entre distancia entre deslizamientos a las fallas y fracturas, que será discutido más adelante (Gráfico 11).

Gráfico 11. Relación de áreas variable Fallas y fracturas



Finalmente, en el Gráfico 12 correspondiente a la variable Uso de suelos, se observa que a mayor área ocupada por la clase denominada como vegetación (89%) le corresponde mayor presencia de deslizamientos ((82%), en menor proporción los eventos se registran en la categoría pedreras y área urbana.

Gráfico 12. Relación de áreas variable Uso de suelos



3.4. APLICACIÓN DE LOS MODELOS

Los resultados de la aplicación del modelo están en la Tabla 9 donde, se ilustra el desarrollo del mismo paso a paso, la última columna representa los pesos que son asignados a cada una de las clases en cada una de las variables. Del mismo modo en la Tabla 10 están exhibidos los resultados de la aplicación del modelo alternativo.

Tabla 9. Resultados de aplicación del modelo principal

Variables	Clases	(Sj)	Área total	SDj		P(B/Aj)*P(Aj)	P(B)	P(Aj/B)		Wi(modelo)
Pendiente	Muy plana	1682531		0		0.0000		0.0000	0.0000	0
	Plana	15184622		4048		0.0051		0.0211	0.2107	1
	Suave	10025197		18106		0.0149		0.0622	0.6223	1
	Moderada	19862500		71095		0.1161		0.4841	4.8412	5
	Alta	14715000		83894		0.1015		0.4232	4.2323	5
	Muy alta	1975000		13804		0.0022		0.0093	0.0935	1
	Extrema	247500	63692350	0	190947	0.0000	0.2398	0.0000	0.0000	0
Aspecto	0 - 30	12292500		9410		0.0095		0.0441	0.4407	1
	31 - 120	16545584		11292		0.0154		0.0712	0.7118	1
	121 - 210	14982500		81492		0.1004		0.4652	4.6519	5
	211 - 300	13360000		76375		0.0839		0.3888	3.8876	4
	301 - 361	6530000	63710584	12377	190946	0.0066	0.2157	0.0308	0.3079	1
Drenaje	0 - 100	29913020		55938		0.1375		0.4329	4.3290	5
	100 - 200	20284188		97770		0.1629		0.5131	5.1308	6
	200 - 300	7191354		24760		0.0146		0.0461	0.4607	1
	300 - 400	2613681		11013		0.0024		0.0074	0.0745	1
	400 - 500	1355267		1462		0.0002		0.0005	0.0051	1
	Más de 500	2387851	63745361	0	190943	0.0000	0.3176	0.0000	0.0000	0
	Vegetació	Bosque	4460382		5022		0.0018		0.0034	0.0337
Chaparral		1228121		0		0.0000		0.0000	0.0000	0
Matorral desértico m		436788		0		0.0000		0.0000	0.0000	0
Matorral desértico r		8862669		54946		0.0401		0.0732	0.7316	1
Matorral submontan		47920434		128238		0.5056		0.9232	9.2320	10
Pastizal		74316		0		0.0000		0.0000	0.0000	0
Sin vegetación		668157	63650867	2737	190943	0.0002	0.5477	0.0003	0.0027	1

Variables	Clases	(Sj)	P(Aj)	SDj	(P(B/Aj)	P(B/Aj)*P(Aj)	P(B)	P(Aj/B)		Wi(modelo)
Edafología	Rendzina - Litosol	24632503	0.3864	16243	0.0851	0.0329		0.0576	0.5764	1
	Litosol - Rendzina	37822098	0.5933	172904	0.9055	0.5373		0.9420	9.4204	10
	Litosol - Regosol calcárico	1273820	0.0200	1793	0.0094	0.0002		0.0003	0.0033	1
	Regosol calcárico - Litosol	16941	0.0003	0	0.0000	0.0000	0.5703454	0.0000	0.0000	0
Litología	Agua Nueva	361899	0.0057	0	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0
	Aurora	10227215	0.1604	15037	0.0788	0.0126		0.0304	0.3040	1
	Cuesta del Cura	514542	0.0081	0	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0
	Cupido	28240235	0.4430	173298	0.9076	0.4021		0.9675	9.6748	10
	Rocas sed. Holoceno	19797430	0.3106	0	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0
	La Peña	4110996	0.0645	2605	0.0136	0.0009		0.0021	0.0212	1
	San Felipe	492509	0.0077	0	0.0000	0.0000	0.4156019	0.0000	0.0000	0
Fallas y fracturas	0 -300	18253590	0.2864	39229	0.2055	0.0588		0.3722	3.7223	4
	300 - 600	11862847	0.1861	61813	0.3237	0.0602		0.3812	3.8118	4
	600 - 900	10026785	0.1573	21885	0.1146	0.0180		0.1141	1.1407	2
	900 - 1200	8160867	0.1280	4211	0.0221	0.0028		0.0179	0.1786	1
	1200 - 1500	5484361	0.0860	929	0.0049	0.0004		0.0026	0.0265	1
	1500 - 1800	3640558	0.0571	45259	0.2370	0.0135		0.0857	0.8565	1
	1800 - 2100	2878655	0.0452	17615	0.0923	0.0042		0.0264	0.2636	1
	Más de 2100	3437698	0.0539	0	0.0000	0.0000	0.1580499	0.0000	0.0000	0
Uso de suelos	Area urbana	2850735	0.0447	360	0.0019	0.0001		0.0001	0.0011	1
	Estanque	9983	0.0002	0	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0
	Pedreira	4340692	0.0681	34700	0.1817	0.0124		0.0168	0.1680	1
	Vegetación	56543948	0.8870	155880	0.8164	0.7242	0.7366134	0.9831	9.8309	10
Deslizamientos	Con deslizamientos	190940								
	Sin deslizamientos	63554421								

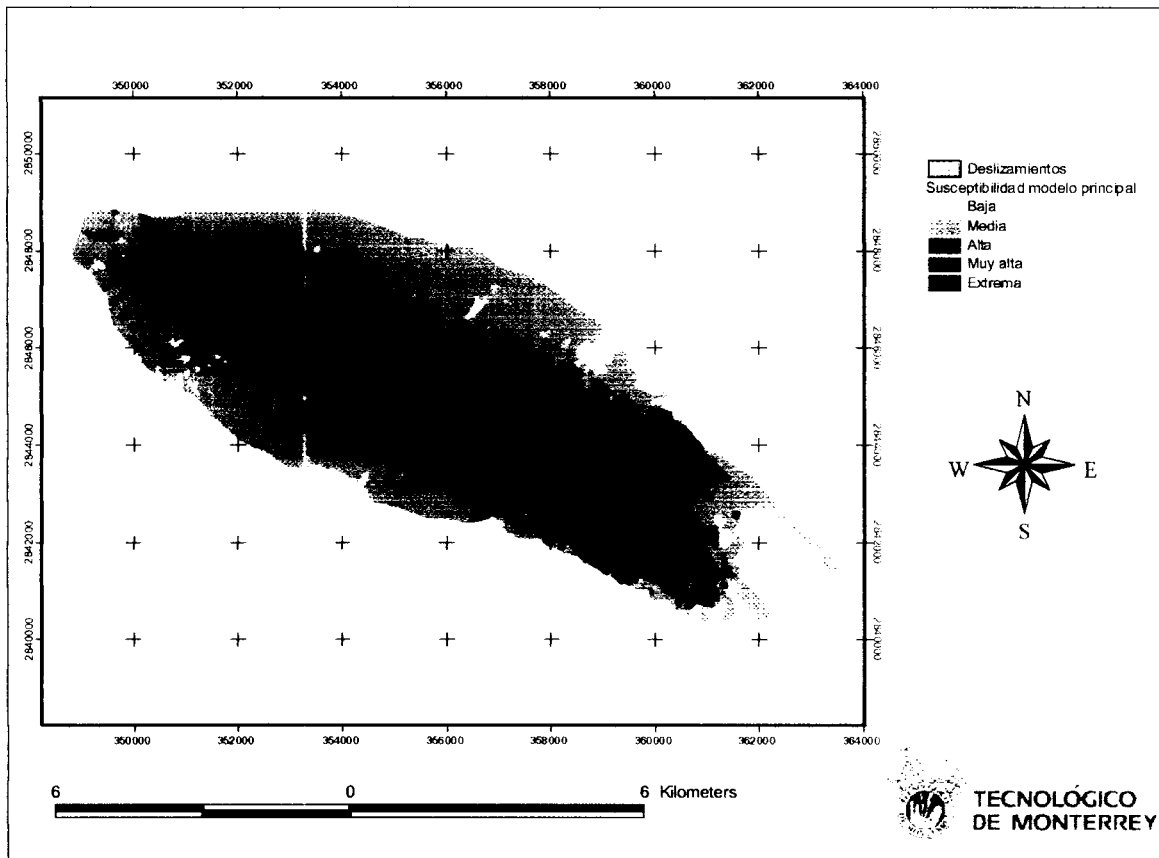
Tabla 10. Resultados de aplicación del modelo alterno

Variables	Clases	(Sj)	SDj	SDj/Sj	(SDj/Sj)*1000	Wi (alterno)
Pendiente	Muy plana	1682531	0	0.0000	0.0000	0
	Plana	15184622	4048	0.0003	0.2666	1
	Suave	10025197	18106	0.0018	1.8060	2
	Moderada	19862500	71095	0.0036	3.5794	4
	Alta	14715000	83894	0.0057	5.7013	6
	Muy alta	1975000	13804	0.0070	6.9894	7
	Extrema	247500	0	0.0000	0.0000	0
Aspecto	0 - 30	12292500	9410	0.0008	0.7655	1
	31 - 120	16545584	11292	0.0007	0.6825	1
	121 - 210	14982500	81492	0.0054	5.4391	6
	210 - 300	13360000	76375	0.0057	5.7167	6
	301 - 361	6530000	12377	0.0019	1.8954	2
Drenaje	0- 100	29913020	55938	0.0019	1.8700	2
	100 - 200	20284188	97770	0.0048	4.8200	5
	200 - 300	7191354	24760	0.0034	3.4430	4
	300 - 400	2613681	11013	0.0042	4.2136	5
	400 - 500	1355267	1462	0.0011	1.0788	2
	500 - 1000	2387851	0	0.0000	0.0000	0
Vegetación	Bosque	4460382	5022	0.0011	1.1259	2
	Chaparral	1228121	0	0.0000	0.0000	0
	Matorral desértico micrófilo	436788	0	0.0000	0.0000	0
	Matorral desértico rosetófilo	8862669	54946	0.0062	6.1997	7
	Matorral submontano	47920434	128238	0.0027	2.6761	3
	Pastizal	74316	0	0.0000	0.0000	0
	Sin vegetación	668157	2737	0.0041	4.0963	5

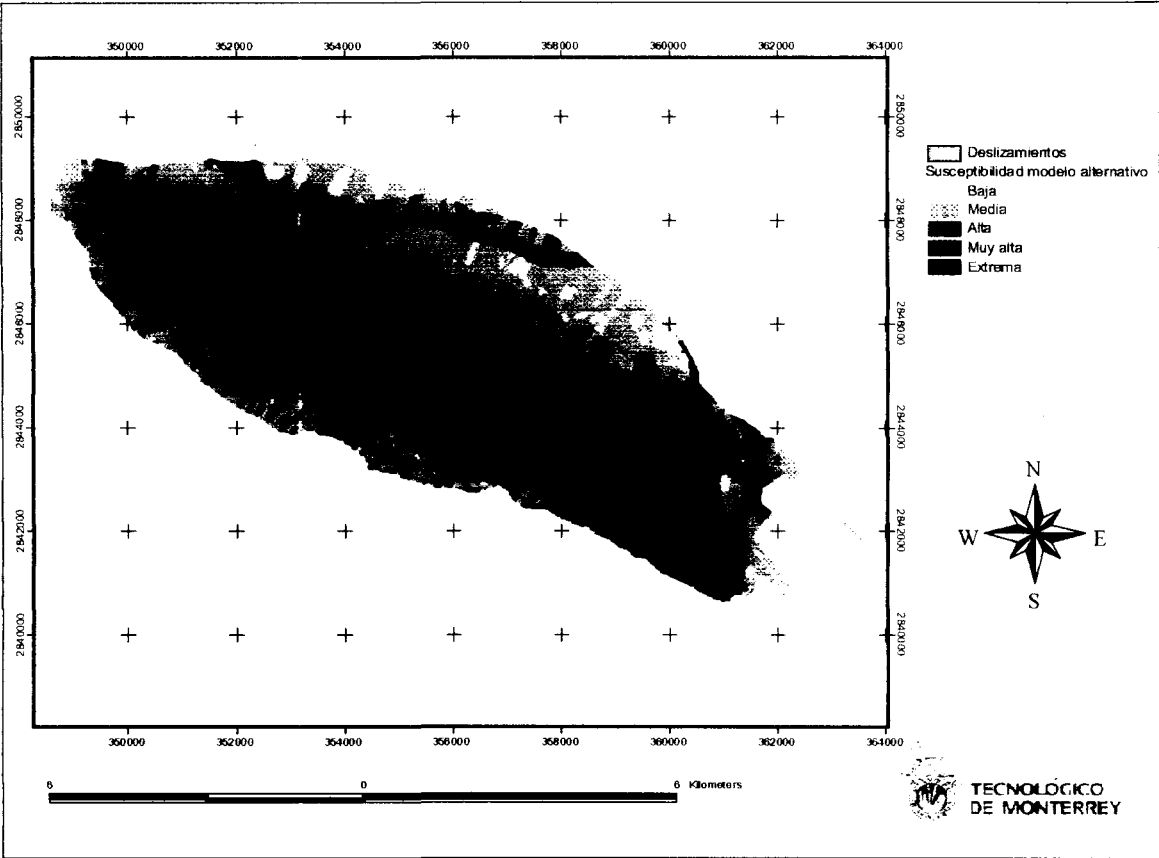
Variables	Clases	(Sj)	SDj	SDj/Sj	(SDj/Sj)*1000	Wi (alterno)
Edafología	Rendzina - Litosol	24632503	16243	0.0007	0.6594	1
	Litosol - Rendzina	37822098	172904	0.0046	4.5715	5
	Litosol - Regosol calcárico	1273820	1793	0.0014	1.4076	2
	Regosol calcárico - Litosol	16941	0	0.0000	0.0000	0
Litología	Agua Nueva	361899	0	0.0000	0.0000	0
	Aurora	10227215	15037	0.0015	1.4703	2
	Cuesta del Cura	514542	0	0.0000	0.0000	0
	Cupido	28240235	173298	0.0061	6.1366	7
	Rocas sed. Holoceno	19797430	0	0.0000	0.0000	0
	La Peña	4110996	2605	0.0006	0.6337	1
	San Felipe	492509	0	0.0000	0.0000	0
Fallas y fracturas	0 -300	18253590	39229	0.0021	2.1491	3
	300 - 600	11862847	61813	0.0052	5.2106	6
	600 - 900	10026785	21885	0.0022	2.1827	3
	900 - 1200	8160867	4211	0.0005	0.5160	1
	1200 - 1500	5484361	929	0.0002	0.1694	1
	1500 - 1800	3640558	45259	0.0124	12.4319	13
	1800 - 2100	2878655	17615	0.0061	6.1192	7
	Más de 2100	3437698	0	0.0000	0.0000	0
Uso de suelos	Area urbana	2850735	360	0.0001	0.1263	1
	Estanque	9983	0	0.0000	0.0000	0
	Pedrera	4340692	34700	0.0080	7.9941	8
	Vegetación	56543948	155880	0.0028	2.7568	3
Deslizamientos	Con deslizamientos	190940				
	Sin deslizamientos	63554421				

3.5. MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD

Luego de asignar los pesos correspondientes a cada clase en todas las variables, se han producido los mapas de susceptibilidad tanto para el modelo desarrollado mediante el teorema de Bayes como para el modelo alternativo. Se ha visto por conveniente utilizar el natural breaks de Arc View, para realizar la zonificación de acuerdo a los niveles de susceptibilidad.



Mapa 12. Mapa de susceptibilidad modelo principal



Mapa 13. Mapa de susceptibilidad modelo alterno

IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. NIVELES DE SUSCEPTIBILIDAD Y ZONIFICACIÓN DEL MAPA

En los mapas, la susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos en la Sierra de las Mitras es representada en una escala cualitativa de 5 niveles: baja,, media, alta, muy alta y extrema. Esta, ha sido asumida, no se halló en la bibliografía revisada una especificación de criterios a tomarse en cuenta para generarla, que básicamente considere el número de niveles, además, dependerá de las condiciones ambientales del lugar en estudio y principalmente del tipo de factor desencadenante. Tal vez, es más importante definir cada uno de los niveles a efectos de que los mapas de este tipo sirvan para la toma de decisiones; una de la formas sería describir la magnitud de la infraestructura o trabajos a realizar para mitigar las condiciones de susceptibilidad; los mismos serían determinados como resultado de los estudios geológicos, geotécnicos y de estabilidad de pendientes que sean requeridos, legal y técnicamente, para construir obras o realizar actividades; y son independientes de los nuevos factores de susceptibilidad que se introducen por acción de la nueva actividad u obra; a manera de ensayo de descripción de los niveles de susceptibilidad se introducen las siguientes definiciones:

- **Baja.-** Cuando solo es necesario realizar trabajos y/o infraestructura preventiva o de pequeña magnitud.
- **Media.-** Cuando los trabajos y/o infraestructura necesaria para mitigar la acción de los factores de susceptibilidad es de magnitud significativa.
- **Alta.-** Cuando las condiciones obligan a realizar trabajos y/o infraestructura de magnitud importante conducentes a mitigar las condiciones de susceptibilidad.
- **Muy alta.-** Cuando los trabajos o infraestructura a realizar son de gran magnitud y aún así la mitigación de las condiciones de susceptibilidad es parcial.
- **Extrema.-** Cuando aún después de efectuar trabajos y construir infraestructura de magnitud extraordinaria, la mitigación de la susceptibilidad es muy pobre.

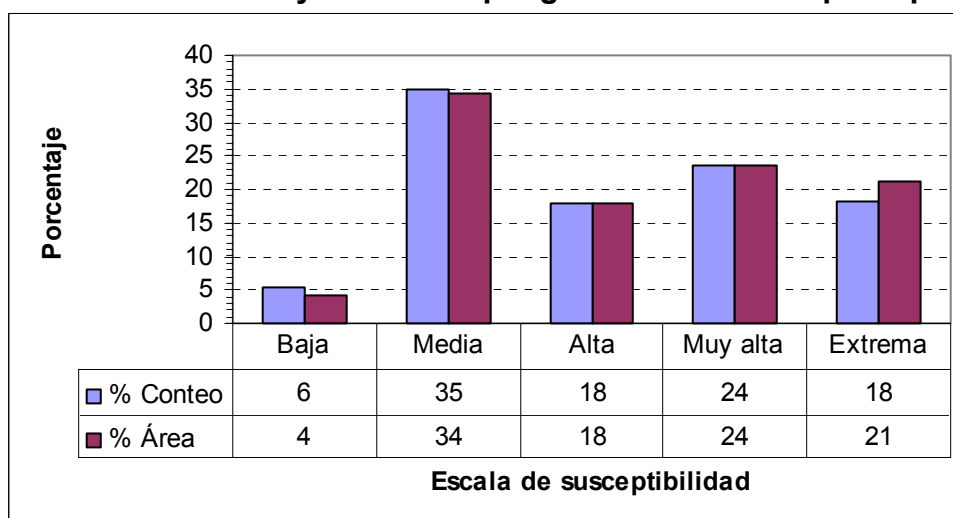
Asimismo, es evidente que a mayor nivel de susceptibilidad le correspondería un mayor costo y por lo tanto las inversiones en estabilizar pendiente podrían ser negativas en términos de costo beneficio.

También es importante, tomar en cuenta, el criterio ha adoptar para establecer los intervalos que definan cada uno de los niveles, puesto que de ella depende la zonificación. Existen al respecto algunas alternativas que ofrece Arc View (natural breaks, equal áreas, equal interval, quantiles, Standard deviation), además es posible utilizar el criterio del experto. En la investigación se ha optado por natural breaks; de esta manera en el modelo los cortes asignados por el programa a los niveles son: baja (0 a 2), media (3, 4), alta (5), muy alta (6) y extrema (7,8); mientras que en el modelo alternativo estos son: baja (0,1), media (2), alta (3), muy alta (4) y extrema (5 a 7). No obstante que el juicio del experto puede ser de gran utilidad en una decisión de este tipo, la incertidumbre acerca de cómo la naturaleza actúa, persiste, y se introduce como una variable adicional el obvio subjetivismo que podría sesgar los resultados.

4.2. DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS POR NIVELES DE SUSCEPTIBILIDAD

Desde el punto de vista del comportamiento de los factores ambientales, es poco probable que se pueda establecer un patrón de distribución de áreas para cada nivel de susceptibilidad.

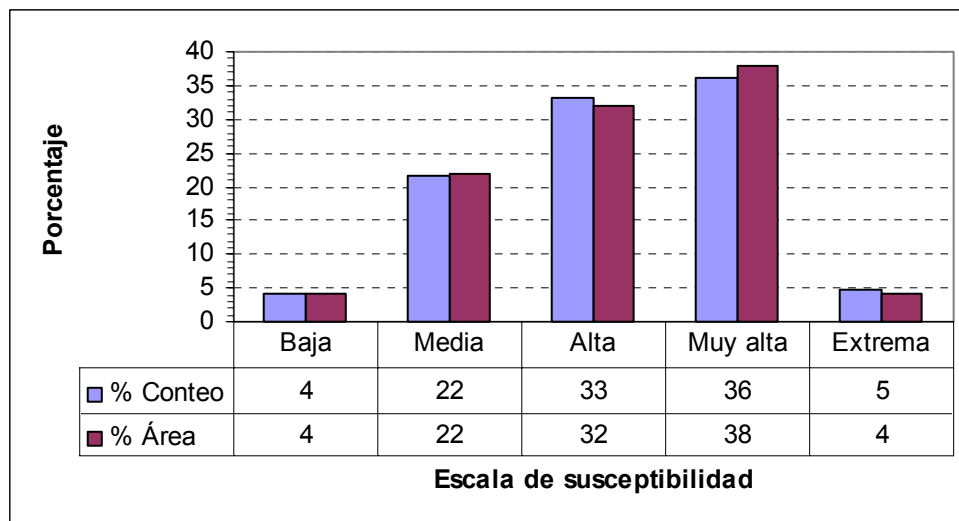
Gráfico 13. Áreas y conteo de polígonos del modelo principal



En el Gráfico 13, es posible observar que la mayor concentración de polígonos y área se encuentra en el nivel de susceptibilidad medio, mientras que la menor está en el nivel bajo, asimismo los niveles alto, muy alto y extremo tienen distribuciones bastante parecidas. Otra característica del gráfico son los valores muy similares en términos de porcentaje para las distribuciones tanto de áreas como del conteo de polígonos.

En el Gráfico 14, correspondiente a la distribución de áreas y conteo de polígonos para el modelo alternativo, se ve que los niveles de la escala baja y extrema tienen concentraciones pequeñas, y en orden creciente se hallan media, alta y muy alta; al igual que en el modelo principal, las distribuciones de áreas y conteo de polígonos toman valores similares.

Gráfico 14. Áreas y polígonos del modelo alternativo

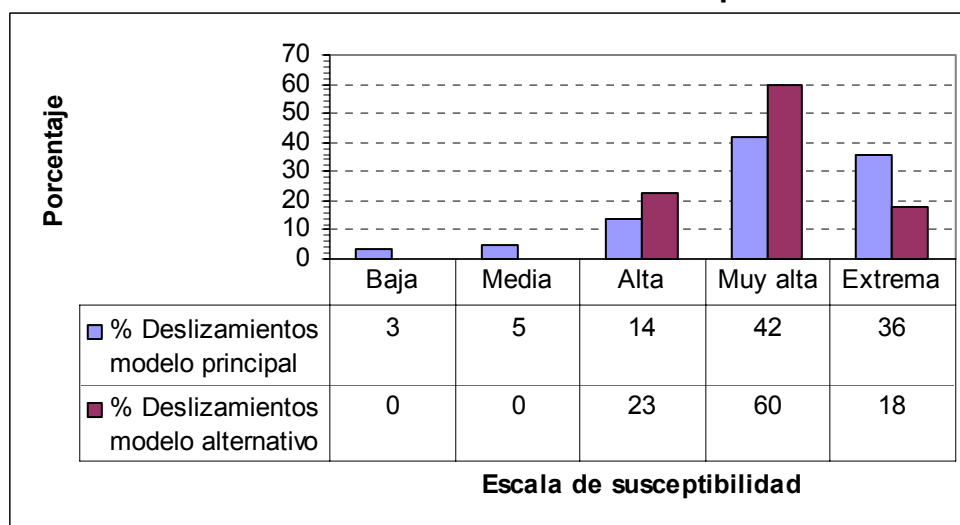


Algo que llama la atención y merece ser analizado es que habiendo aplicado ambos modelos a una misma área de estudio y con la misma información, excepto los que son resultado de operación de los modelos en sí, es de esperar que los resultados en términos de distribución de áreas sean parecidos para cada nivel; sin embargo de los gráficos anteriores se desprenden diferencias bastante pronunciadas para los niveles: medio, alto, muy alto y extremo; y solo existe coincidencia en el nivel bajo. Esto implica que existen serias discordancias en la manera como están calificando los modelos a las variables.

4.3. DISTRIBUCIÓN DE DESLIZAMIENTOS POR NIVELES DE SUSCEPTIBILIDAD

Se realizó el análisis de la distribución de deslizamientos en cada uno de los niveles de susceptibilidad para los dos modelos. Destaca que el mayor porcentaje de deslizamientos son ubicados en el nivel de muy alta susceptibilidad para ambos modelos; sin embargo hay mayor concentración en el modelo alternativo, 60% contra 42% del modelo principal. Asimismo, se observa que en el modelo alterno no existen deslizamientos en los niveles de muy baja y baja susceptibilidad (Gráfico 15).

Gráfico 15. Ubicación de deslizamientos por niveles



Por otro lado, se puede decir en el caso del modelo principal que: el 3%, 5%, 14%, 42% y 36% de deslizamientos dispuestos en cada nivel de susceptibilidad explican la zonificación de áreas con valores del 4%, 34%, 18%, 24% y 21% respectivamente. De la misma manera, en el caso del modelo alterno, el 0%, 0%, 23%, 60% y 18%, pretender justificar las áreas asignadas a cada nivel en porcentajes del: 4%, 22%, 32%, 38% y 4% respectivamente. El hecho de calificar un área como de susceptibilidad baja o media no implica de que en dicha superficie la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos sea cero, tal como podría suponerse de una lectura rápida del modelo alternativo; aquí el modelo principal muestra mayor consistencia para explicar este tipo de razonamientos y nos proporciona elementos para explicar los niveles de susceptibilidad, entonces se puede decir que: bajo, representa la

probabilidad de que ocurran el 3% de los deslizamientos sobre las áreas así definidas; medio, que sucedan el 5% de los eventos; asimismo, que en las áreas denominadas de nivel alto acontezcan el 14% de los deslizamientos; también que en las superficies señaladas como de nivel muy alto sobrevengán el 42%; y en el nivel extremo el 36%.

De acuerdo a la distribución de deslizamientos por niveles de susceptibilidad, el deslizamiento en el fraccionamiento Colinas de San Jerónimo, el más actual, según el modelo principal queda clasificado como de susceptibilidad media, mientras que en el modelo alterno como de susceptibilidad muy alta. En el primer caso se explica porque en el inventario se registran pocos deslizamientos acontecidos bajo las condiciones que lo califican como tal. En el modelo alterno la clasificación en una zona de muy alta susceptibilidad se debe, principalmente, al fuerte peso asignado por el modelo a la variable fallas en el rango de 1500m. a 2100m que de por sí el modelo no puede explicar, constituyéndose en una de sus limitaciones .

Asimismo, se han construido los gráficos correspondientes a distribución de deslizamientos por tipo: desprendimientos, deslizamientos y derrumbes, para los dos modelos (Gráficos 16 y 17).

Gráfico 16. Distribución por tipo de deslizamientos modelo principal

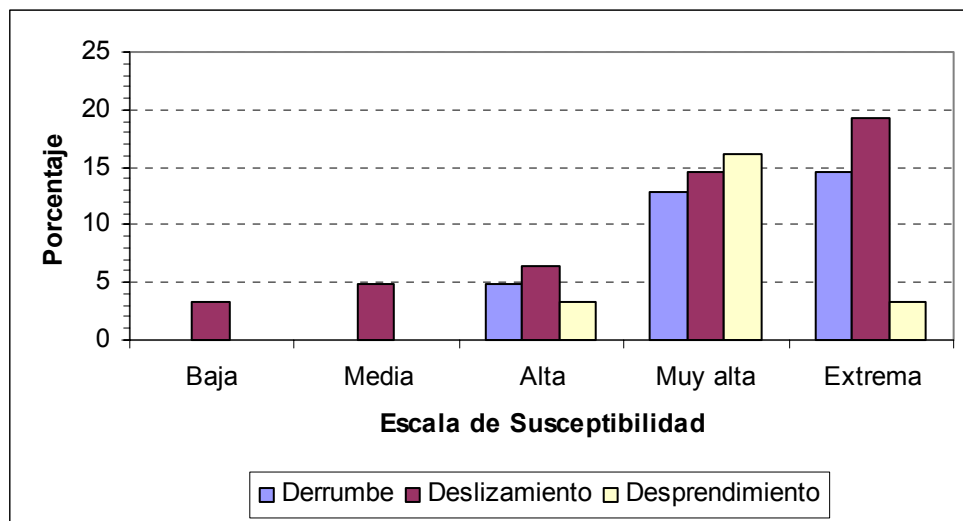
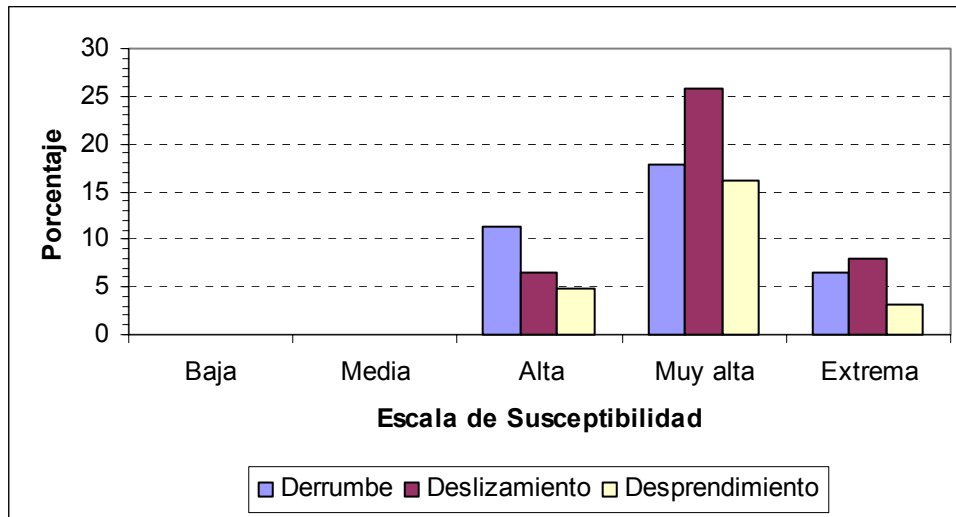


Gráfico 17. Distribución por tipo de deslizamientos modelo alternativo

4.4. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES EN EL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

4.4.1. Modelo principal

Se han superpuesto las variables al mapa de susceptibilidad para tener idea del grado de influencia que han tenido en la configuración de la misma; los resultados de este análisis demuestran que unos factores tienen mayor incidencia que otros, por lo tanto, podrían ser considerados como variables principales para el área de estudio.

La variable vegetación muestra que: los bosques tienen presencia en el flanco Norte de la Sierra de las Mitras y están asociados con el nivel muy alto y en menor proporción con el nivel alto cuando esta encima de la formación Cupido; y fuera de la formación Cupido esta asociado al nivel medio y bajo. El Matorral Desértico Micrófilo es afín con el nivel bajo; mientras que el Matorral Desértico Rosetófilo encima de la formación Cupido esta ligado al nivel muy alto y fuera de él al nivel alto principalmente y también a media; por otra parte el Chaparral esta confinado a la parte superior del flanco Norte y abarca escalas muy alta y alta; asimismo, el Matorral Submontano el más abundante del área, encima de la formación Cupido determina el nivel extremo y fuera de ella involucra los demás niveles; finalmente el Pastizal, de escasa presencia, se encuentra en la escala media y baja.

En relación a la variable litología es evidente que la formación Cupido actúa como el límite para la existencia del nivel extremo, no es posible hallar este nivel en las otras

formaciones; asimismo, dentro de ella se da la mayor parte del nivel muy alto y hacia la cumbre de la sierra el nivel alto. La formación La Peña comprende áreas con los niveles muy alto, alto y medio; similar distribución tiene la formación Aurora agregándole el nivel bajo. Las formaciones Cuesta del Cura, Agua Nueva y San Felipe en los niveles medio y bajo y las rocas sedimentarias del Holoceno entre alto, medio y bajo.

Con respecto a la variable edafología la asociación de suelos Regosol – Litosol se halla, principalmente, en el nivel medio y bajo; mientras tanto el Litosol – Regosol mantiene una fuerte relación con extrema y muy alta y también con el nivel medio presente en la parte superior de la sierra. Por otra parte Rendzina – Litosol, en el nivel bajo, medio y en menor proporción alta y confinada a las partes más bajas de la sierra.

Los rasgos saltantes en la capa de uso de suelos son: debido al predominio de la categoría vegetación ella involucra a todos los niveles; mientras que la clase pedreras está entre el nivel alto a medio; así como las zonas urbanas de medio a bajo.

En cuanto a la variable fallas y fracturas se puede mencionar lo siguiente: las fallas que tienen un rumbo NE – SW presentan alguna relación con la escala muy alta y extrema; mientras que las de rumbo NW – SE al parecer no ejercen influencia sobre el mapa.

La variable drenaje da indicios de una estrecha relación con los niveles muy alto y extremo encima de la formación Cupido, especialmente el nivel extremo sigue la trayectoria de las líneas de drenaje.

El mismo tipo de análisis en la variable aspecto da evidencias de que la orientación de N 0° – 120° E se presenta en el flanco Norte, hacia la parte baja en los niveles bajo y medio y hacia arriba asociado a los niveles alto, muy alto y extremo; la clase N 121° - 300° E, abundante principalmente en el flanco Sur presenta los niveles muy alto y extremo hacia la parte superior y alto, medio y bajo en la parte inferior; y la clase N 301° - 361° E se manifiesta en el flanco Norte con la misma conducta. No se encuentra una asociación nítida entre categorías y niveles.

Finalmente, para la variable pendiente se tienen que la clase de 0%-18%, abundante en las partes bajas y escasas en la cima de la sierra, se encuentra vinculado con los niveles medio y bajo y pobremente al nivel alto; entre el 19%-34% existen los niveles bajo, medio, alto y muy escasamente el muy alto y extremo; en el intervalo de 35%-66% en orden descendente se hallan los niveles extremo, alto, muy alto, medio y bajo; entre el 67%-102% existe dominio del nivel muy alto, seguido de extremo, son mas escasos los otros niveles; el rango de 103%-166%, esta confinado a la parte superior de la sierra, es muy escasa y comprende los niveles de alta, muy alta y extrema. No es muy obvia la asociación entre categorías y niveles.

Del análisis efectuado, aparecen como variables que delimitan las áreas de susceptibilidad por niveles: litología, vegetación, edafología, drenaje en diverso grado; mientras que la contribución de aspecto y pendiente no ha podido ser determinada por este método, pero las variables fallas y uso de suelos no parecen influir demasiado en los resultados.

4.4.2. Modelo alterno

Se ha procedido de manera similar que con el modelo principal superponiendo las variables al mapa de susceptibilidad para tener idea del grado de influencia que han tenido en la configuración de la misma; los resultados del análisis demuestran que unos factores tienen mayor incidencia que otros, por lo tanto, podrían ser considerados como variables principales para el área de estudio.

En la variable Vegetación se observa que: los Bosques con presencia en el flanco Norte están asociados con el nivel muy alto y alto cuando están encima de la formación Cupido; y fuera de la formación Cupido con el nivel alto, medio y bajo; pero también con el muy alto al NW. La zona sin vegetación aparente esta vinculada a los cinco niveles de la escala; por otra parte el Matorral Desértico Micrófilo muy escaso en el área esta ligado a los niveles alto y medio; mientras que el Matorral Desértico Rosetófilo predominante en el flanco Sur, tiene fuerte relación con los niveles muy alto y alto en orden de importancia y en menor grado con extremo y medio; asimismo el Chaparral confinado a la parte superior y central de la sierra abarca los niveles muy alto y alto; en tanto que, el Matorral Submontano el más

abundante del área, encima de la formación Cupido, principalmente, con el nivel muy alto, en menor grado extremo y fuera de ella involucra a todos niveles; finalmente el pastizal de escasa presencia se encuentra en la escala media y baja.

En la variable Litología es evidente que la formación Cupido determina en gran medida al nivel muy alto y extremo, también esta presente el nivel alto; La formación La Peña en orden decreciente de importancia involucra los niveles alto, muy alto medio, extremo y bajo; en la formación Aurora sucede algo similar con el siguiente orden: alto, medio, muy alto, extremo y bajo. Las formaciones Cuesta del Cura, Agua Nueva y San Felipe en los niveles: alto, medio muy alto; bajo, medio y alto; y bajo y medio respectivamente y las rocas sedimentarias del Holoceno entre media, alta, baja y también muy alta.

Con respecto a la variable Edafología en la asociación de suelos Regosol – Litosol, principalmente se hallan los niveles medio, alto, bajo, muy alto y extremo; mientras tanto el Litosol – Regosol define en gran medida los niveles muy alto y extremo; también esta presente el nivel alto; en las áreas de Rendzina – Litosol se observan los niveles alto, medio y bajo en menor proporción muy alto y extremo. El Litosol – Regosol calcárico presente al NW de la sierra están presentes los niveles alto, muy alto y medio.

Los rasgos saltantes en la capa de Uso de suelos se deben al predominio de la categoría vegetación ella involucra a todos los niveles; mientras que la clase pedreras está entre el nivel alto, muy alto y extremo; mientras que las zonas urbanas en bajo, medio, alto y muy alto.

En cuanto a la variable Fallas y fracturas vale mencionar que: en la parte intermedia de la sierra dentro de los primeros 300m se halla una pronunciada influencia de las fallas con la existencia del nivel muy alto, mientras que hacia el SE del flanco Sur a una distancia de entre 1500m – 2100m se califica un área como extrema, en la misma es posible apreciar lo determinante de la variable falla.

La variable Drenaje da indicios de una estrecha relación con el nivel muy alto en el flanco Sur y muy alto y alto en el lado Norte encima de la formación Cupido. Asimismo el nivel extremo en casi todos los casos ha sido determinado en el rango de 100-200m de distancia de las líneas de drenaje.

El mismo tipo de análisis en la variable Aspecto da evidencias de que la orientación de N 0° – 120° E se presenta en el flanco Norte, por encima de la formación Cupido predominan los niveles muy alto y alto, mientras que fuera de él se encuentran el nivel alto, medio y bajo y en menor proporción muy alto y extremo. El azimut entre N 121° - 300° E, ocupa el flanco Sur, encima de la formación Cupido predomina el nivel muy alto, seguido de extremo y luego alto; en la parte inferior de manera decreciente están presentes los niveles alto, medio, muy alto y extremo. El intervalo N 301° - 361° E se manifiesta en el flanco Norte, encima de la formación Cupido hay presencia de niveles muy alto y alto y fuera de él medio, alto y muy alto.

Finalmente, para la variable Pendiente se tienen que entre el 0%-18% se encuentra vinculado con los niveles alto, medio y bajo y en menor proporción muy alto. En las pendientes entre el 19%-34% existen los niveles medio y alto son menores las áreas calificadas como muy altas y bajas; las pendientes entre 35%-66% presentan niveles altos, muy altos y medios y más escasamente extremo. En el rango de 67%-102% existen dos características, mientras que en el lado Norte de la sierra predominan los niveles alto y muy alto, en el lado Sur los niveles muy alto y extremo; y el rango de 103%-166%, esta confinado a la parte superior de la sierra, es muy escasa y comprende los niveles de muy alto, extremo y alto.

En el modelo alterno aparecen como variables que delimitan las áreas de susceptibilidad por niveles: litología, vegetación, edafología, drenaje y fallas y fracturas en diverso grado; mientras que la contribución de aspecto, pendiente y uso de suelos no ha podido ser establecida por este método.

4.4.3. Orden de importancia de las variables

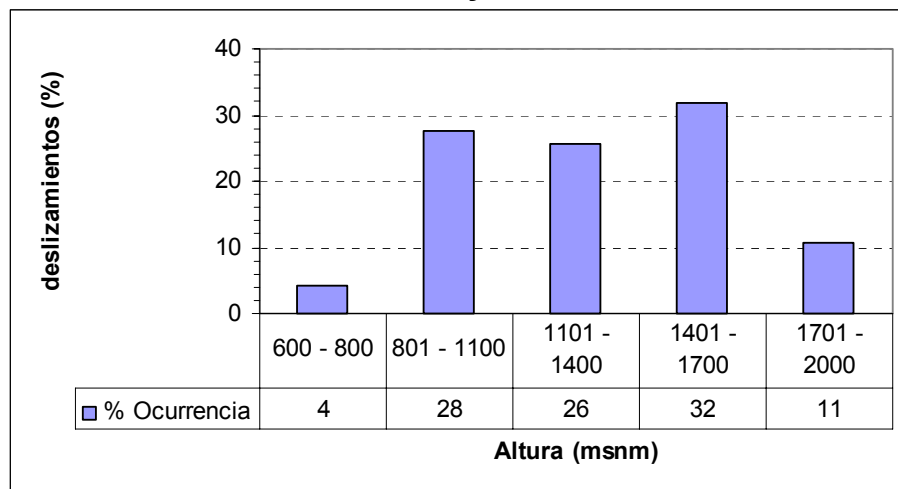
Desde el punto de vista del autor, en orden de importancia, las variables principales serían: litología y pendiente; en segundo término uso de suelos, drenaje y fallas; seguidos por aspecto, vegetación y edafología. Por lo que habría que esperar que la influencia en la zonificación se de en ese mismo orden; sin embargo, algunas de las variables como vegetación lo hacen de manera muy importante.

Por otro lado la variable fallas en el modelo alternativo no puede explicar como resulta determinante en la zonificación de las áreas entre los 1500 y 2100 metros de distancia de las fallas.

4.5. LA ALTITUD Y LOS DESLIZAMIENTOS

La distribución de deslizamientos en la Sierra de las Mitras tiene una relación característica en función de la altura en que ocurrieron. En el Gráfico 16, se observa entre los 600 a 800 metros sobre el nivel del mar acontecieron el 4% todos ellos relacionados con actividades humanas como el avance urbanístico y la explotación de pedreras; entre los 801 – 1100 sucedieron el 28% de los mismos algunos de los cuales consecuencia de actividades humanas (pedreras); mientras que en el intervalo de 1001 – 2000 se puede decir que las causas que desencadenaron los eventos fueron naturales. Asimismo, se aprecia que es posible esperar acontecimientos de este tipo con mayor frecuencia entre los 801msnm y 1700msnm que en los extremos de menor altura y mayor altura (Gráfico 18).

Gráfico 18. La altitud y los deslizamientos



4.6. LA ALTITUD Y EL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

Asimismo se ha explorado la relación altura y mapa de susceptibilidad para los dos modelos desarrollados. En el modelo principal se distingue que existen diferencias en cuanto a la distribución por niveles entre los flancos Norte y Sur. En el lado Norte sucede que entre los 600 y 800msnm predominan las escalas media y baja también se halla la alta; entre los 801 y 1100msnm predominan en orden de importancia las

escalas alta, muy alta y media y hacia el SE aparece la extrema; mientras que en el rango de 1101 y 1700 la preponderancia esta del lado de muy alta, extrema y alta; y por encima de 1700msnm el dominio es de los niveles extremo y alto. En el lado Sur, entre los 600 y 800msnm los niveles presentes son medio, bajo y alto; los 801 y 1000 metros de altura alojan a los niveles alto, muy alto y medio; por su lado el intervalo de altura entre 1001 y 1700 es tipificado en los niveles muy alto y extremo; encima de los 1700msnm se encuentran niveles muy alto, alto y extremo.

En el modelo de susceptibilidad alternativo, entre los 600 y 800msnm prevalecen los niveles alto, medio y bajo, al SE se observan el muy alto y extremo. Luego en el flanco Norte se dan las siguientes características: que entre los 801 y 1100msnm se hallan los niveles alto, medio y bajo, hacia el SE es posible encontrar el extremo y al NW el nivel muy alto; por encima de los 1101msnm prevalecen los niveles muy alto y alto. Mientras tanto en el flanco Sur ocurre: que entre los 801 y 1000msnm están los niveles alto y muy alto y al SE el extremo; de 1001 a 1700 existe preponderancia de los niveles muy alto y extremo; por encima de los 1700msnm se encuentran los niveles muy alto y alto.

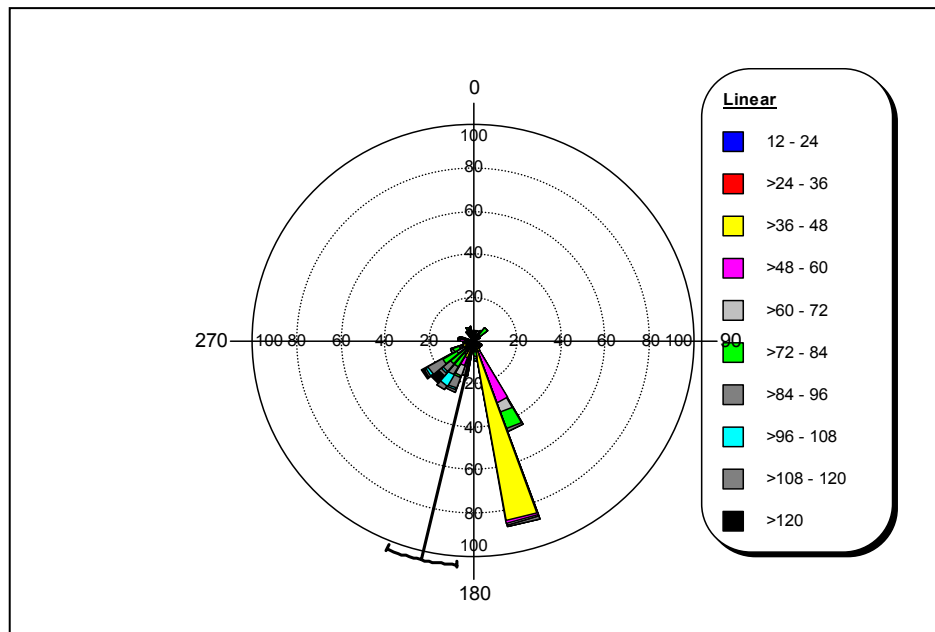
En los dos modelos se encuentran determinadas conexiones entre altura y distribución de niveles de la escala de susceptibilidad.

4.7. ORIENTACIÓN Y PENDIENTE DE DESLIZAMIENTOS

Con el objeto de juzgar de mejor manera, el comportamiento de las variables pendiente y aspecto u orientación de las pendientes en el análisis de susceptibilidad, se ha elaborado el Gráfico 19 que relaciona la dirección de las pendientes con la frecuencia con que se presentan las pendientes en una escala lineal. La lectura del gráfico nos dice que la dirección preferida del aspecto de las pendientes es hacia el SSE, principalmente y una secundaria hacia el SW; ambas pueden ser explicadas debido a que en gran medida los deslizamientos históricos han sido localizados en el flanco Sur de la Sierra de las Mitras, por tanto el buzamiento en esas direcciones es justificable. Por otro lado, llama la atención que la pendiente más frecuente en la dirección predominante esté entre el 36% y 48% que en grados equivale a 16° y 22° y que la segunda más importante esté entre 48% y 60% (22° y 28°), porque entre los

materiales pétreos y de suelos estas pendientes corresponden a niveles de estables en términos de pendiente; la explicación hallada a la ocurrencia de este fenómeno es el hecho de que durante el inventario de deslizamientos se han mapeado los lugares de donde se han desplazado materiales, desconociéndose la configuración de pendientes previa al evento, es decir, producido el evento las pendientes que quedan son probablemente las mas estables, no obstante este criterio no se cumple, plenamente, si se habla de áreas que ocupan las pendientes con deslizamientos como se vio en el gráfico 4.

Gráfico 19. Orientación y pendiente de los deslizamientos

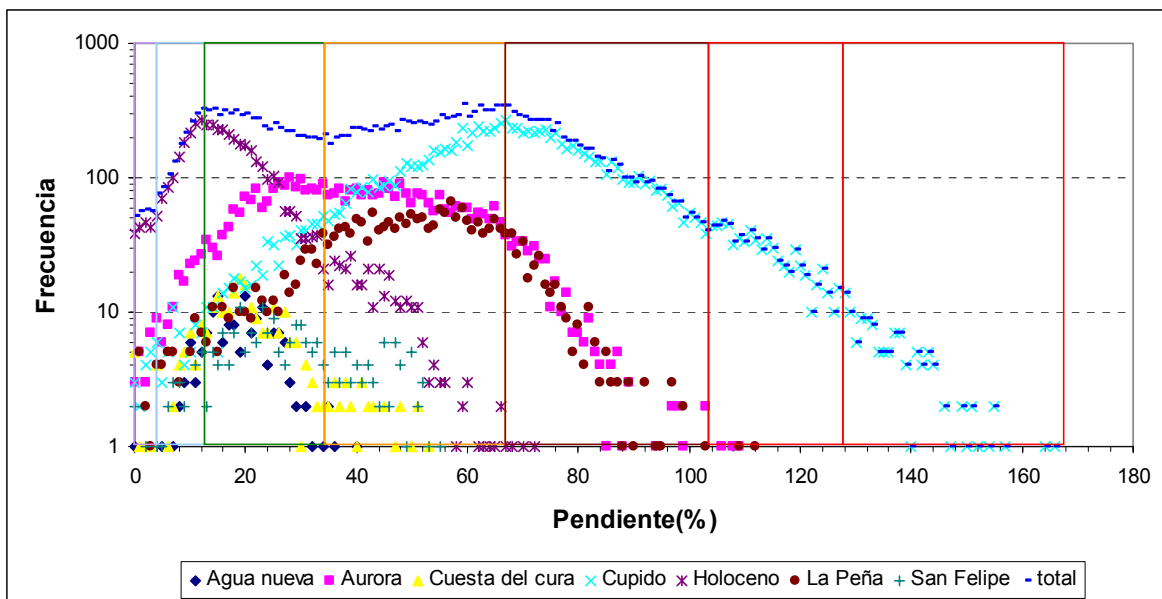


Por otro lado, Los desprendimientos se espera sucedan en pendientes por encima del 100% y principalmente en las extremas, sin embargo en los dos modelos la probabilidad de que ocurran deslizamientos en este rango es nula, esto de debe probablemente porque se trabajó con un grid de 50x50 metros y entonces las pendientes extremas ha sido suavizadas por las más bajas. Es posible que utilizando grid menores se puedan lograr representaciones más reales de las pendientes en los deslizamientos, especialmente cuando se traten de los rangos extremos.

4.8. COMPORTAMIENTO DE LAS PENDIENTES EN LA LITOLOGÍA

Con el propósito de establecer la correspondencia que pueda existir entre la litología y las pendientes, se ha confeccionado el Gráfico 20 de pendiente de las formaciones rocosas presentes en la Sierra de las Mitras según la clasificación del COREMI. Del análisis realizado se desprende que la formación Cupido la más abundante está presente en toda el área de estudio con una distribución que tiende a la normal tiene una muy fuerte influencia en la configuración del la gráfica entre los 66% y 103% e influencia total en las pendientes superiores a ese rango. La formación Aurora está presente entre el 0% y 108%, presenta una meseta de mayor frecuencia entre el 24% y 66% influye fuertemente en el suavizado de la depresión existente en el 34% de la curva total; una composición similar pero con distribución más normal es la que presenta la formación La Peña; las rocas del Holoceno están presentes hasta una pendiente del 66% y su pico de frecuencia mas alto se encuentra en el 16% tiene muy fuerte influencia en la conformación del primer tramo de la curva total. Las formaciones Agua Nueva, Cuesta del Cura y San Felipe tienen casi el mismo comportamiento y están presentes en el tramo de hasta el 56% en el caso de San Felipe y Cuesta del Cura y hasta el 30% en el caso de Agua nueva.

Gráfico 20. Pendiente de las formaciones de roca

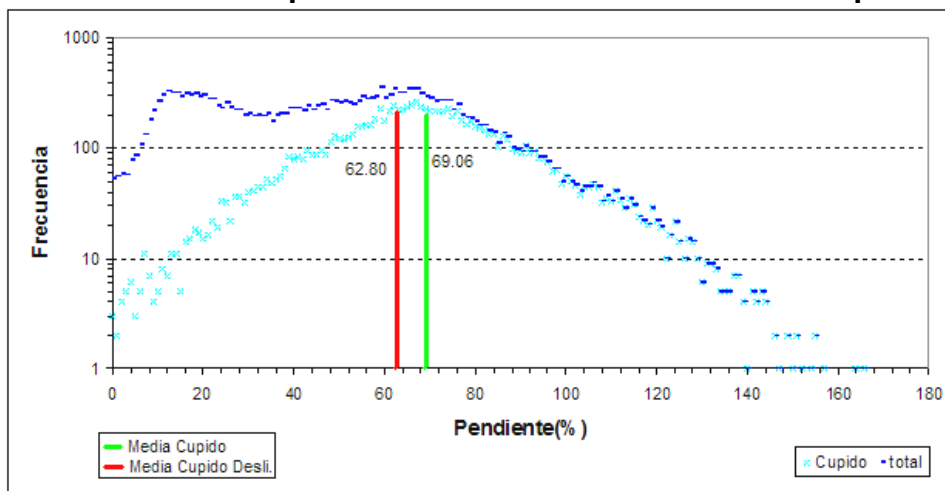


4.9. EVALUACION ESTADISTICA DE LA PENDIENTE POR FORMACIONES DE ROCA

Dado que los deslizamientos ocurren en determinado tipo de pendientes, se ha formulado la siguiente hipótesis general: “Que la pendiente mas frecuente en cada formación de roca de la Sierra de las Mitras es la pendiente más estable, donde es menos probable que ocurran deslizamientos”. Se han procesado los datos, previo análisis exploratorio, mediante técnicas de estadística bivariada para los pares: Cupido desli. - Cupido, Aurora desli. - Aurora y La Peña desli. - La Peña; que son las formaciones de rocas donde se presentan deslizamientos. De la comparación de medias efectuada los resultados como conclusión final señalan que: Los deslizamientos ocurren en pendientes con media igual a la media de las pendientes de la Sierra de las Mitras solo en la formación Aurora. Mientras que en las formaciones Cupido y La Peña ocurren en pendientes diferentes a la media.

Entonces, es posible afirmar que los deslizamientos ocurrirán en pendientes diferentes a la media de la población en las formaciones Cupido y La Peña, mientras que en la formación Aurora es posible esperar que estos eventos sucedan en pendientes alrededor de la media. Asimismo, siempre que las pendientes medias de las formaciones Cupido y La Peña sean las más frecuentes entonces se confirmaría que son las más estables, pero no sería una regla general para todas las formaciones como pasa con la formación Aurora (Ver Anexo 1).

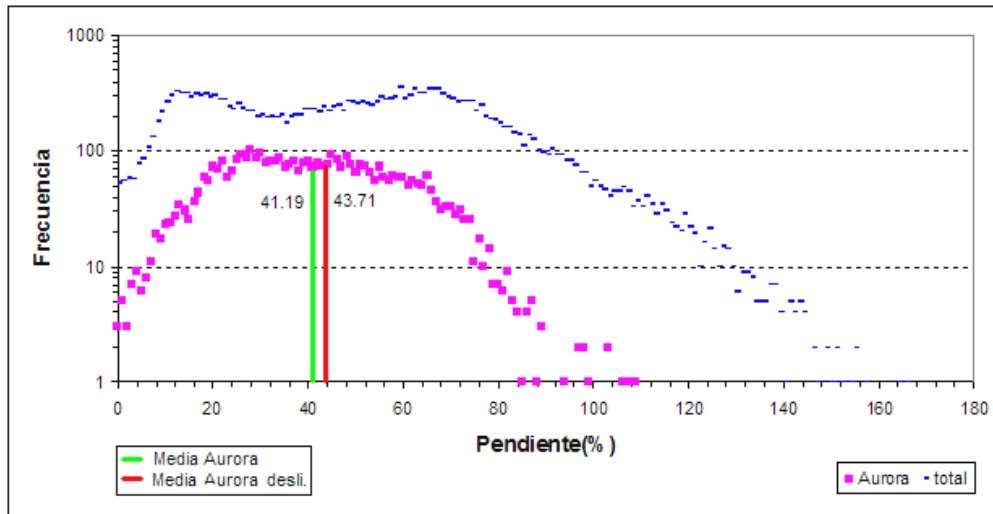
Gráfico 21. Comportamiento de medias formación Cupido



En el Gráfico 21 se observa que si bien es cierto las medias son diferentes desde el punto de vista estadístico, sin embargo los dos valores tienen frecuencia similar en el área de estudio.

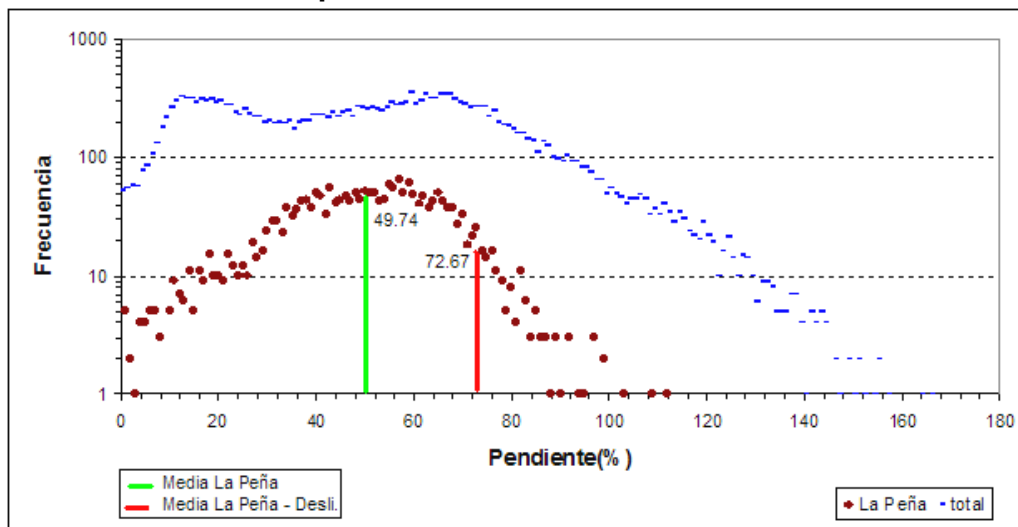
De igual manera, la formación Aurora muestra que las dos medias tienen aproximadamente la misma frecuencia, como es de esperarse dado que conforme a la evaluación estadística estas son iguales (Gráfico 22).

Gráfico 22. Comportamiento de medias formación Aurora



En la formación La Peña se tiene que existe marcada diferencia entre las frecuencias de las medias, en este caso se evidencia que la pendiente media de los deslizamientos es menos frecuente que la pendiente media de toda la formación (Gráfico 23).

Gráfico 23. Comportamiento de medias formación La Peña



Finalmente, es posible concluir que solo en la formación La Peña se cumple que las pendientes más estables son las más frecuentes.

4.10. SIMULACION DE CAIDA DE ROCAS

Para ilustrar la diferencia entre susceptibilidad y peligro y dar idea de cómo efectuar una zonificación de peligros de manera local, se ha realizado una simulación de desprendimientos o caída de rocas, utilizando el software Colorado Rockfall Simulation Program (CRSP) de la Colorado School of Mines (Jones, Higgins y Andrew 2000).

El programa opera tomando en consideración los supuestos siguientes:

- El perfil de la pendiente debe seguir la trayectoria más probable de caída de rocas como fue establecido durante las investigaciones de campo. Por lo tanto, todos los cálculos pueden ser en dos direcciones.
- Debido a que el tipo de roca no cambia durante la caída de rocas y el rango de las características materiales de la ladera es mucho más grande que el de las propiedades de las rocas, los coeficientes asignados al material de la ladera (R_n y R_t) pueden servir para ambos, las propiedades de la roca y pendiente.
- El peor escenario es que las rocas más grandes permanezcan intactas mientras viajan cuesta abajo. Por lo tanto, se asume que las rocas no se parten durante la caída.
- El tamaño y forma se suponen constantes para el análisis de caída de rocas de una fuente dada. Los valores asignados a estos parámetros son determinados por estudios de campo del área fuente y materiales de la cuesta.
- Para la determinación del volumen e inercia de la roca, se puede usar una esfera porque rinde un mayor volumen para un radio dado, tenderá hacia el peor caso. CRSP permite también el uso de rocas de forma discoidal o cilíndrica.

Los parámetros de entrada que exige el programa son:

- Un perfil de la pendiente, ingresado como un conjunto de segmentos de línea recta, referidos como celdas, designados por las coordenadas cartesianas (x, y) de los puntos finales de cada línea.
- Una estimación de la rugosidad de la superficie de la pendiente (relativo al radio de la roca) dentro de cada celda.
- El coeficiente normal de restitución (R_n) y el coeficiente tangencial de resistencia a la fricción (R_t), que determinan la pérdida de energía de la roca durante el impacto con la ladera.
- El tamaño, forma, y ubicación inicial de las rocas comprendidas en los eventos de caída de rocas.

Foto 1. Área de derrumbe



Foto 2. Bloques desplazados por derrumbe, perfiles 1 y 2

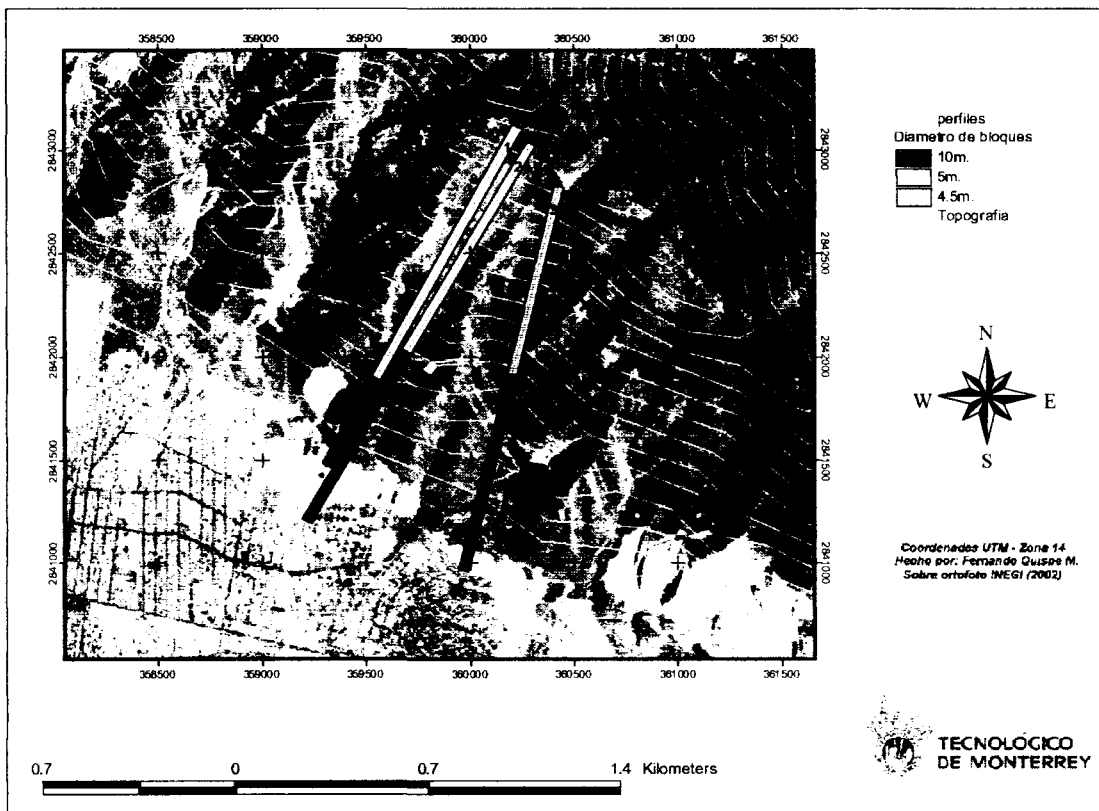


Foto 3. Bloques de rocas desplazados por derrumbe, perfil 3



La simulación se realizó para tres trayectorias o perfiles, los cuales fueron obtenidos con la ayuda del DEM y la extensión Profile extractor de Arc View; la rugosidad fue estimada según los criterios proporcionados por los autores y las características de la pendiente, mientras que los coeficientes R_n y R_t fueron extrapolados a partir de las tablas disponibles en el manual del usuario; se asumieron bloques de roca de forma cilíndrica y diámetros de 5m. y 10m. en los perfiles 1 y 2 y de 4.5m. y 10m. en el perfil 3. En cada uno de los casos se asumió la caída de 100 bloques de roca uno a uno con el fin de que los resultados representen el comportamiento de los materiales en un movimiento de este tipo.

El objetivo: Estimar qué tamaño de bloques cayeron en eventos pasados en las pendientes seleccionadas, para responder la interrogante de por qué se desplazaron a la distancia que se encuentran del lugar de origen, además que sucede si se lanzan bloques de mayor tamaño.



Mapa 14. Simulación de desprendimientos o caída de rocas

Los resultados gráficos de la simulación se muestran en el Mapa 13, y los detalles de la corrida del programa en el Anexo 2.

A manera de conclusión del análisis de la información proporcionada por el programa se desprende que en los perfiles 1 y 2 los bloques de roca de 5m. de diámetro son coincidentes con la disposición de los bloques caídos con anterioridad; en el caso del perfil 3 el tamaño de roca determinado fue de 4.5m. Para los tres perfiles, en el supuesto de que cayeran bloques con diámetros de 10m. existe muy alta probabilidad de que afecte a la mancha urbana dispuesta al pie de estas laderas, especialmente si sigue la trayectoria del perfil 2 donde 56 bloques de los 100 lanzados sobrepasan el punto de control AP1.

Existen algunas experiencias de zonificación de peligros desarrollado en el Centro de Calidad Ambiental (CCA), como el de HABITAT, que abarca a las colonias de: La Ermita, Lomas del Mirador, Ampliación Raúl Salinas, y Lomas de la Fama. Se encuentra al poniente del AMM, en el Municipio de Santa Catarina, N.L. al pie de la Sierra de las Mitras en su lado sur, desarrollado a nivel de barrio (CCA, 2004).

La expectativa futura de la investigación es generar los mapas de peligro a mediana escala. Para ello se tendrían que integrar herramientas como el CRSP al Arc View para que de manera automática luego de efectuado el análisis de susceptibilidad se logren los mapas de peligro. En el caso específico de la Sierra de las Mitras podrían obtenerse hasta dos de ellos, uno para desprendimientos y derrumbes y otro para deslizamientos propiamente dichos, de esta manera el manejo de las variables mediante modelos podría dar resultados más confiables, finalmente se deberá estudiar la forma de integrarlos en uno solo.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El procesamiento de la gran cantidad de datos generados durante el estudio fue posible al Sistema de Información Geográfica (SIG) Arc View, una herramienta que además de ofrecer una variedad de posibilidades, permite hacer parte o todo el proceso.
- Para garantizar la calidad de los resultados es recomendable utilizar información actualizada de las variables seleccionadas y de la misma escala, de preferencia en estudios de escala mediana se debe optar por la de 1:25 000 para evitar la pérdida excesiva de detalles.
- Los métodos de análisis aplicados son muy sensibles a la variable “inventario de deslizamientos”. Por esto, es importante que el levantamiento sea representativo, fidedigno y confiable, porque actúa como variable predictora y de validación.
- Los resultados de los dos modelos aplicados al caso de la Sierra de las Mitras, difieren significativamente; esto evidencia que pese a haber trabajado con las mismas variables, los modelos califican de manera diferente a cada una ellas.
- En el modelo bayesiano las variables que delimitan en gran medida las áreas por niveles de susceptibilidad son: litología, vegetación, edafología y drenaje. No se observan tendencias marcadas de la influencia de la variable fallas y fracturas y uso de suelos. Pese a la importancia de la variable pendiente no ha sido posible determinar su forma actuar al igual que en el caso de la variable aspecto.
- En el caso del modelo alterno es notoria la influencia de la variable fallas y fracturas en la zonificación por niveles de susceptibilidad. Principalmente a una distancia entre 1500m a 2100m de la falla o fractura más cercana, que se manifestó en el histograma bimodal de áreas de esta variable y es una evidencia de su influencia y otras fuentes diferentes. Otras variables importantes son litología, vegetación, edafología y drenaje. mientras que la forma como actúan las variables pendiente y aspecto no ha sido determinada.

- La zonificación vertical de la Sierra de las Mitras demuestra que la mayor concentración de eventos naturales están entre los 801 – 1700msnm. Mientras que un porcentaje pequeño de los deslizamientos ocurren entre los 600 – 800msnm, pero todos ellos como consecuencia de actividades antropogénicas.
- El tamaño de celda es muy importante en el estudio de las pendientes y la determinación de su comportamiento dentro del modelo. Los desprendimientos se espera sucedan en pendientes por encima del 100% y principalmente en las extremas, sin embargo en los dos modelos la probabilidad de que ocurran deslizamientos en este rango es muy baja, esto se debe probablemente porque se trabajó con un celdas de 50x50 metros y entonces las pendientes extremas ha sido suavizadas por las más bajas. Es posible que utilizando celdas menores se puedan lograr representaciones más reales de las pendientes en los deslizamientos, especialmente cuando se traten de los rangos extremos.
- El modelo que entrega resultados más satisfactorios, desde el punto de vista probabilístico, es el principal que aplica el teorema de Bayes. Porque zonifica el área de manera mas apropiada, proporciona argumentos para definir probabilísticamente cada uno de los niveles de susceptibilidad. En el modelo alterno se aprecia un sesgo en la manera como se realizan los cálculos para la asignación de pesos.
- Se identificaron tres tipos de eventos: desprendimientos, derrumbes y deslizamientos de rocas, para mejorar los resultados, se sugiere realizar el análisis por tipo de evento, luego los resultados parciales pueden ser integrados en un solo mapa de susceptibilidad.
- Se recomienda aplicar a la Sierra de las Mitras otras metodologías de análisis en escala mediana, para verificar la correspondencia con los resultados aquí obtenidos y establecer el modelo apropiado para la zona.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alva, E., (1997). Estudio Geológico - Hidrogeológico de la Región Noroeste (Sierra de Las Mitras – Cerro El Topo – Cerro El Durazno) de Monterrey, Nuevo León/México. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey - México.

Ángeles M., Hinojosa J., López J., Valdés A., Livas M. (2005). Estratigrafía y microfacies de la parte sur del Cañón La Boca, Santiago, Nuevo León, México. En: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 22: 2: 272-281.

Baeza, C. (1994). Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartografía ETSCCPB-UPC.

Begueira, S., Lorente, A. (1999). Landslide Hazard Mapping by Multivariate Statistics: Comparison of Methods and Case Study in the Spanish Pyrenees. Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza – España, pp 4-5.

Bradley, P.C. y Thomas, A.L. (2000). Bayes and empirical bayes method for data analysis (2d ed.). New York: Chapman & Hall/ CRC.

Camilo Lizcano y Hugo Martinez. El Norte. Monterrey, México: Sep 21, 2003. pp. 1.

Carrara A., Cardinalli M., Guzzetti F., Reichenbach P. (1995). GIS Technology in mapping landslide hazard. En: Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Carrara and Guzzetti (eds). Kluwer Academic Publishers. 135-175 pp.

Centro de Calidad Ambiental (2004). Riesgos hidrometeorológicos y geológicos del Polígono 1304, La Ermita, Lomas del Mirador, Ampliación Raúl Salinas, Lomas de La Fama, (Municipio de Santa Catarina). N.L., Monterrey. Trabajo inédito ITESM.

Clerici, A., Mandrone, G., Tellini, C., y Vescovi, P. (2002). Simulation of the Ceno R. blockage by the Anzola landslide (Northern Apennines, Italy). En: Rybar, J., Stemberk, J. & Wagner, P. (eds) Landslides Proceedings of the first European conference on landslides, Prague, Czech Republic, pp. 137 – 142.

Devore, J.L. (2001). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias (5ta ed.). México: Internacional Thompson editores S.A.

Fernández – Steeger T.M., Rohn J., Czurda K., (2002), Identificación of landslides areas with neural nets for hazard analysis. En: Rybar, J., Stemberk, J. & Wagner, P.

(eds), Landslides (Proceedings of the first European conference on landslides, Prague, Czech Republic, pp 163 – 168.

Flores, D. El Norte. Monterrey, México: Sep 12, 2002. pp. 12.

García, M.. El Norte. Monterrey, México: Oct 8, 2000. pg. 1.

Gonzales, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2004). Ingeniería Geológica. España: Pearson Education, S.A.

Gorsevski, P.V., Gessler, P., Foltz, R.B. (2000). Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Discriminant Analysis and GIS. GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop applications for the 21st Century. Denver, Colorado, September 25-27, 2000.

Gorsevski, P.V., Gessler, P., Foltz, R.B. (2000). Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and GIS. 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000.

Greenway, J. (1984). Methods of stability analysis. En: Slope Stability. Anderson and Richards (eds). John Wiley and Sons Ltd, 187 – 231 pp.

Günther, A. F., Carstensen, A. & Pohl, W. (2002), GIS – Applications in slope stability assessments. 175 – 184.

Halounová L. (2002), GIS as a tool for landslide analyses. En: Rybar, J., Stemberk, J. & Wagner, P. (eds), Proceedings of the First European Conference in Landslides, pp 185 – 187.

Hroch, Z. Kycl, P. & Sebesta, J. (2002). Landslide Hazard in North Bohemia. En: Rybar, J., Stemberk, J. & Wagner, P. (eds), Landslides Proceedings of the first European conference on landslides, Prague, Czech Republic, pp. 207 – 212.

INEGI, (1990). Guías para la Interpretación de Cartografía, Uso de Suelos. Aguas Calientes – México.

INEGI, (1990). Guías para la Interpretación de Cartografía, Edafología. Aguas Calientes – México.

INEGI, (1992). Guías para la Interpretación de Cartografía, Geología. Aguas Calientes – México.

Iwao Y., Gunatilake J., Abeysinghe B., Mochida S. (2002). Statistical Analysis as a successful tool to be used in discrimination landslide area in topographical maps. En:

Rybar, J., Stemberk, J. & Wagner, P. (eds) Landsides Proceedings of the first European conference on landslides, Prague, Czech Republic, pp. 79 – 93.

Jones, C.L., Higgins, J.D. y Andrew, R.D. (2000). Users Manual CRSP versión 4.0 (for Windows). Colorado: Colorado Department of transportation.

Juárez, O. El Norte. Monterrey, Mexico: Jul 31, 1995. pg. 1.

Kehew A.L. (1998). Geology for Engineers and Environmental Scientists. Second Edition, Ed. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, pp 358.

Lee, S., Choi, J., Min K., (2002), Landslide susceptibility análisis and verification using the Bayesian probability model. En: International Journal of Geosciences – Environmental Geology, 43:1-2: 120-131.

Lee, S., Ryu, J., Min, K. y Won, J. (2001). Development of Two Artificial Neural Network Methods for Landslide Susceptibility Analysis. National Geosciences Information Center, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM) y Department of Earth System Sciences, Yonsei University.

Mayorga, R. (2003). Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. Tesis de Maestría, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogota.

Mulder, H.F.H.M. (1991). Assesment of landslide hazard. Nederlandse Geografische Studies. PhD Thesis, University of Utrecht, 150pp.

National Landslide Information Center http://landslides.usgs.gov/html_files/majorls.html, accesado el 04/10/2004.

Ramirez, E. (1984). Unidades Fisonómico – Florísticas de la Sierra de Las Mitras Nuevo León, México, Tesis para el título de Biólogo, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey - México.

Reyes, D. El Norte. Monterrey, México: Oct 12, 2003. pp. 1.

Santacana, N. (2001). Análisis de la Susceptibilidad del Terreno a la Formación de deslizamientos Superficiales y Grandes Deslizamientos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. Tesis doctoral Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España, pp 16.

Santacana, N., Corominas, J. (2002). Example of validation of landslide susceptibility maps. En: Rybar, J., Stemberk, J. & Wagner, P. (eds), Proceedings of the First European Conference in Landslides, pp. 305 – 310.

Schuster, R.L., Wieczoreck, G.F. (2002). Landslide triggers and types. En: Rybar, J., Stemberk, J. & Wagner, P. (eds), Landslides Proceedings of the First European Conference on Landslides, Prague, Czech Republic, pp 59 – 78.

Sergio Muniz. El Norte. Monterrey, México: Oct 15, 2003. pg. 1.

Sima http://www.ni.gob.mx/?P=med_amb_mej_amb_sima , accesado el 13 de octubre 2005.

Smith, K. (1996). Hazard in the environment. En. Environmental Hazards, pp 3-22.

Sorriso-Valvo, M. (2002). Landslides: from inventory to risk. En: Rybar, J., Stemberk, J. & Wagner, P. (eds), Landslides Proceedings of the first European conference on landslides, Prague, Czech Republic, pp. 79 – 93.

Suarez, J. (2002). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Escuela de Ingeniería Civil – Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga – Santander – Colombia, pp 355-356.

Süzen M.L. (2002). Data Driven Landslide Hazard Assessment Using Geographical Information Systems And Remote Sensing. Tesis Doctoral. Middle East Technical University, Turquía, pp 6.

van Westen C. (1999). Introducción a los deslizamientos. El uso de los sensores remotos en el mapeo de deslizamientos. Proyecto de capacitación UNESCO–RAPCA. International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC). Enschede, The Netherlands.

van Westen, C. (1999). Introducción a los deslizamientos: Tipos y causas. En: UNESCO – RAPCA. International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC). The Netherlands, pp. 1.

VII. ANEXOS

ANEXO 1. EVALUACION ESTADISTICA DE LA PENDIENTE POR FORMACIONES DE ROCA

PROBLEMA

“LA PENDIENTE MÁS FRECUENTE EN CADA FORMACIÓN DE ROCA DE LA SIERRA DE LAS MITRAS ES LA PENDIENTE MÁS ESTABLE, DONDE ES MENOS PROBABLE QUE OCURRAN DESLIZAMIENTOS”

FORMACION CUPIDO

DESCRIPCION DE LAS VARIABLES

Cupido desli: Pendientes en la formación Cupido donde han ocurrido deslizamientos, en %.

Cupido: Pendientes en la formación Cupido en la Sierra de las Mitras, en %.

ANALISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS

Descripción	Estadísticos descriptivos	
	Cupido desli.	Cupido
Número de datos (N)	337	10784
Media	62.80	69.06
Mediana	60	68.00
Varianza	429.48	512.071
Desviación estándar	20.74	22.629
Mínimo	13	0
Máximo	129	166
Rango	116	166
Rango intercuartil	32	27
Asimetría	0.768	0.250
Curtosis	0.180	0.592

En la tabla de descriptivos observa que los valores de la media y mediana en la población de Cupido desli. son diferentes con valor superior para la media, lo que hace suponer sesgo a la derecha de la distribución; en la población de Cupido la mediana se encuentra ligeramente a la izquierda de la media. Se puede suponer que existe distribución normal de los datos, corroborado con los valores muy bajos de asimetría, curtosis; mientras que las desviaciones estándar son grandes lo que indica dispersión en ambas distribuciones.

M-Estimators

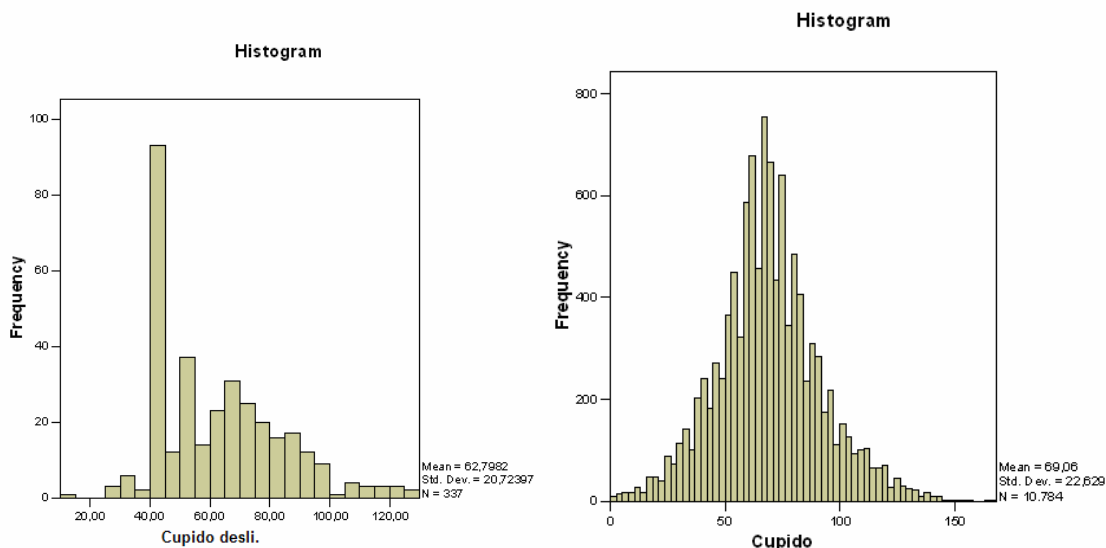
	Huber's	Tukey's	Hampel's	Andrews' Wave
Cupido desli.	60.51	60.09	61.30	60.07
Cupido	68.28	67.93	68.26	67.92

Dado que los valores de los M-estimadores no se encuentran muy cerca de la media en ambos casos se puede afirmar que las distribuciones no son razonablemente normales, no obstante para las dos poblaciones los estimados robustos son bastante cercanos a la mediana.

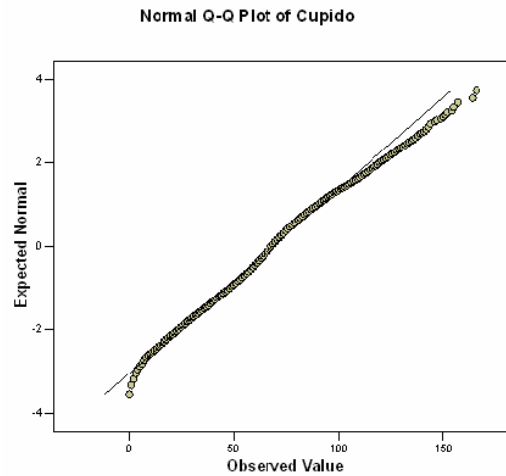
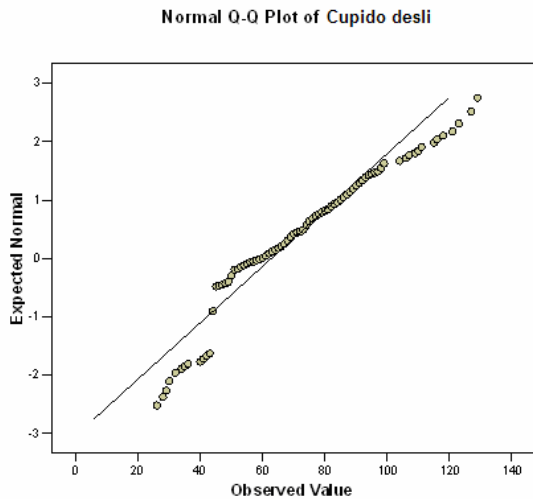
Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Cupido desli.	0.153	337	0.000	0.926	337	0.000
Cupido	0.050	10784	0.000	-	-	-

De las pruebas de normalidad se desprende que para las dos poblaciones Cupido desli y Cupido la prueba es significativa, por lo tanto, los datos se ajustan pobremente a la curva normal.



En los histogramas se observa que: la población Cupido muestra un marcado sesgo a la derecha, mientras que Cupido total presenta, aproximadamente, una distribución normal de los datos.



La curva normal Q-Q plot de la población Cupido desli. y Cupido indican que el percentil de la normal es más grande que el percentil de la distribución de los datos, en este caso los datos tienen colas más largas que la normal.

Del análisis exploratorio se desprende que existen evidencias para suponer la distribución normal de los datos en las dos poblaciones, situación que es reforzada con el teorema de límite central, también que las varianzas son diferentes.

SUPUESTOS

El supuesto principal es la distribución normal de los datos en las dos poblaciones, para este caso, debido al gran número de datos (≥ 30), sustentado por el Teorema de Límite Central y donde no es necesaria la prueba de varianzas, dado que, ésta es sensible al supuesto de normalidad.

HIPÓTESIS

μ_1 = Media de las pendientes en la formación Cupido con ocurrencia de deslizamientos (%).

μ_2 = Media de las pendientes en la formación Cupido en el área de estudio (%).

$$H_o : \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

ESTADÍSTICO DE PRUEBA

$$Z_{ep} = \frac{\bar{x} - \bar{y} - \Delta_o}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n} + \frac{S_2^2}{m}}} = 0.8729$$

$$\text{Valor - p} = 2(1 - \varphi(Z \leq Z_{ep})) = 0.000$$

$$\text{Valor - p} = 0.000$$

CONCLUSIÓN ESTADÍSTICA

Para un valor $-p$ aproximado de cero, los datos dan evidencia suficiente para rechazar H_0 y aceptar H_a entonces $\mu_1 \neq \mu_2$.

CONCLUSIÓN EN EL CONTEXTO DEL PROBLEMA:

Que la media de las pendientes en la formación Cupido con ocurrencia de deslizamientos es diferente a la media de las pendientes de la misma formación en todo la Sierra de las Mitras. Es posible afirmar entonces que los deslizamientos ocurren en pendientes con media distinta a la media general de la formación Cupido.

FORMACION AURORA**DESCRIPCION DE LAS VARIABLES**

Aurora desli: Pendientes en la formación Aurora donde han ocurrido deslizamientos en %.

Aurora: Pendientes en la formación Aurora en la Sierra de las Mitras en %.

ANALISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS

Descripción	Estadísticos descriptivos	
	Aurora desli.	Aurora
Número de datos (N)	14	4222
Media	43.71	41.19
Mediana	32.50	40.00
Varianza	978.84	314.319
Desviación estándar	31.29	17.729
Mínimo	16	0
Máximo	103	109
Rango	87	109
Rango intercuartil	39	27
Asimetría	1.16	0.245
Curtosis	- 0.134	-0.444

El número de datos en Aurora desli es pequeño, la media se halla a la derecha de la mediana que unido al valor de la asimetría indican un sesgo a la derecha de los datos; mientras que en Aurora la media se encuentra ligeramente a la derecha de la mediana, los valores de asimetría y curtosis son bajos. Las varianzas muestral de Aurora desli. presentan una alta dispersión de los datos mayor que el de Aurora.

M-Estimators

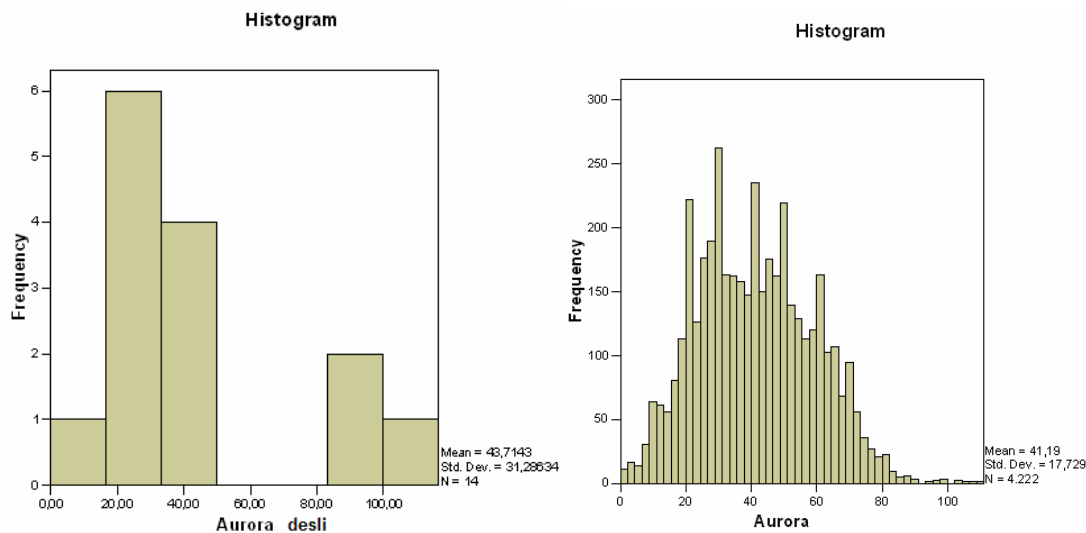
	Huber's	Tukey's	Hampel's	Andrews' Wave
Aurora desli.	33.67	28.45	33.04	28.44
Aurora	40.44	40.35	40.66	40.35

Los M – Estimators para Aurora desli. no son robustos debido a que están muy alejados de la mediana al igual que la media lo que indica que la distribución no es razonablemente normal. En Aurora si son robustos se puede suponer normalidad.

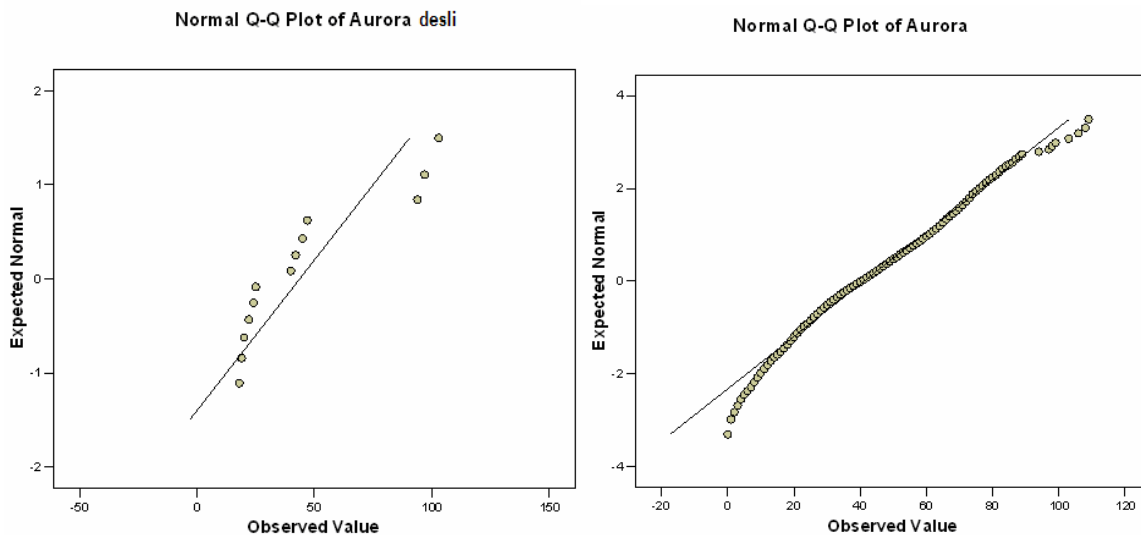
Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov(a)			Shapiro-Wilk		
	Statistic	Df	Sig.	Statistic	Df	Sig.
Aurora desli.	0.244	14	0.024	0.781	14	0.003
Aurora	0.054	4222	0.000	0.989	4222	0.000

Para Aurora desli. y Aurora la prueba es significativa, por tanto no existe buen ajuste de los datos a la curva de normalidad.



En el histograma de las dos poblaciones se observa sesgo a la derecha.



En la curva Q-Q de Aurora desli. y Aurora la distribución tiene colas más ligeras que la normal.

En resumen, no existe evidencia fuerte de que la distribución de datos sea normal para Aurora desli, mientras que en el caso de Aurora el supuesto de normalidad se evidencia. Las varianzas muestrales son diferentes.

FORMACION LA PEÑA

DESCRIPCION DE LAS VARIABLES

La Peña desli: Pendientes en la formación La Peña donde han ocurrido deslizamientos en %.

La Peña: Pendientes en la formación La Peña en la Sierra de las Mitras en %.

ANALISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS

Descripción	Estadísticos descriptivos	
	La Peña desli	La Peña
Número de datos (N)	15	2197
Media	72.67	49.74
Mediana	82.00	51.00
Varianza	476.38	284.208
Desviación estándar	21.83	16.858
Mínimo	40	1
Máximo	103	112
Rango	63	111
Rango intercuartil	38	23
Asimetría	-0.306	- 0.235
Curtosis	-1.452	0.102

El número de datos de La Peña desli. es pequeño; su media se encuentra a la izquierda de la mediana, la asimetría es de -0.306, indica sesgo a la izquierda. En el caso de La Peña la media se encuentra hacia la izquierda de la mediana y los valores de asimetría y curtosis son bajos, se supone normalidad.

M-Estimators

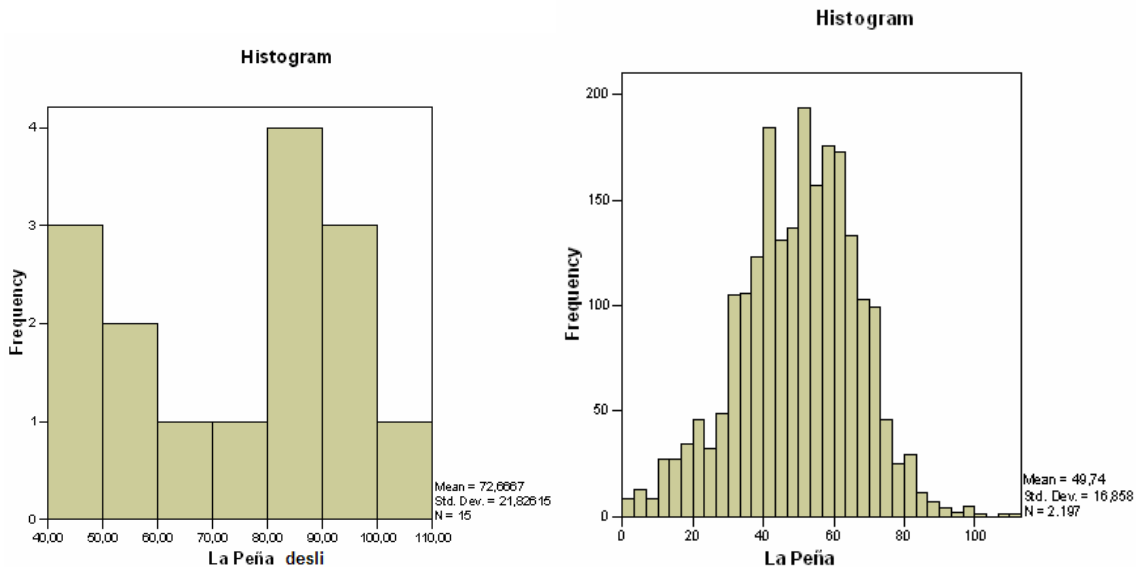
	Huber's	Tukey's	Hampel's	Andrews' Wave
La Peña desli.	74.81	74.47	73.91	74.45
La Peña	50.52	50.90	50.40	50.91

La prueba no es robusta para La Peña desli., pero sí para La Peña para esta población se puede suponer distribución normal de los datos.

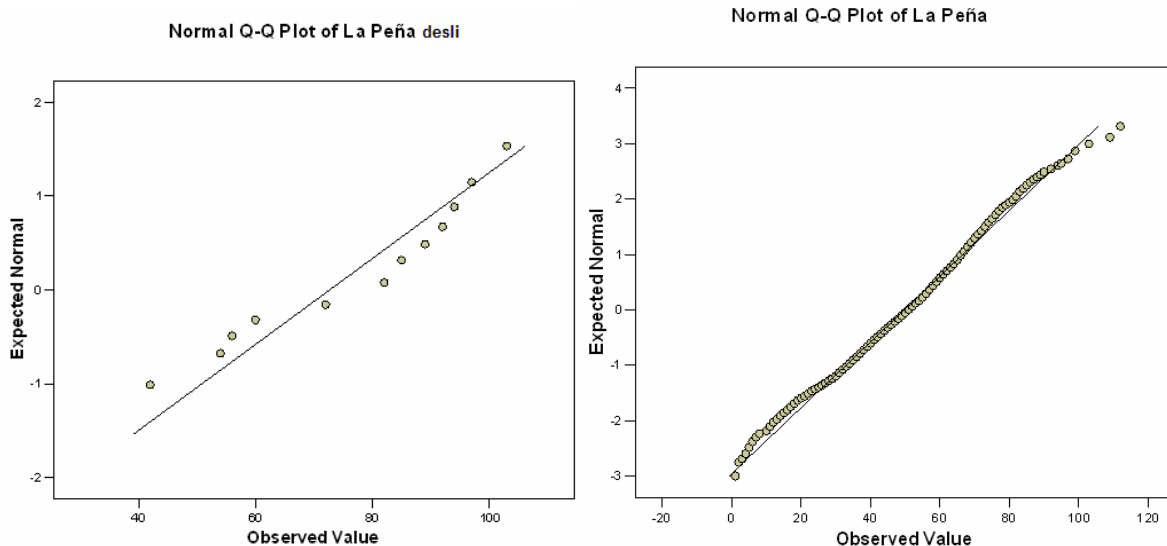
Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov(a)			Shapiro-Wilk		
	Statistic	Df	Sig.	Statistic	Df	Sig.
La Peña desli.	0.199	15	0.114	0.908	15	0.128
La Peña	0.045	2197	0.000	0.993	2197	0.000

En ambos casos de prueba de normalidad es significativo por lo que el ajuste a la curva es pobre.



El histograma de La Peña desli. no da mayor información, en tanto que el de La Peña total muestra una aparente distribución normal con picos muy altos en algunas categorías.



La curva Q-Q de La Peña desli. muestra que la distribución de los datos tiene un sesgo positivo. Mientras que La Peña revela distribución normal de datos.

En resumen, podemos concluir que existe pobre evidencia para afirmar que la distribución de datos en La Peña desli. y La Peña sean normales. Asimismo las varianzas son diferentes.

En los dos casos anteriores una de las poblaciones tiene una muestra muy pequeña menor que 30 (Aurora desli. y La Peña desli.) y la otra muy grande (Aurora y La Peña) en esta última el supuesto de normalidad esta respaldado por el teorema de límite central. Además la varianzas son diferentes, entretanto, para las muestras

pequeñas existe alguna evidencia de normalidad, por lo que, es posible aplicar el estadístico de prueba (t), para los tres casos.

PRUEBAS DE HIPÓTESIS PARA LAS FORMACIONES AURORA Y LA PEÑA

Estadístico de prueba:

$$t_{EP} = \frac{\bar{x} - \bar{y} - \Delta_0}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n} + \frac{s_2^2}{m}}}$$

Grados de libertad= min(n-1, m-1)

Hipótesis:

μ_1 = Pendientes en la formación Aurora con ocurrencia de deslizamientos, en %

Pendientes en la formación La Peña con ocurrencia de deslizamientos, en %

μ_2 = Pendientes en la formación Aurora en la Sierra de las Mitras, en %

Pendientes en la formación La Peña en la Sierra de las Mitras, en %

$$H_o : \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Variables	RESULTADOS		
	Prueba (t)	Grados de libertad (v)	Valor – p
Aurora desli. – Aurora	0.3012	13	0.768
La Peña desli. – La Peña	4.0606	14	0.002

CONCLUSIONES ESTADISTICAS

- En la formación Aurora, para un valor-p de 0.768 se acepta H_o y se rechaza H_a de medias diferentes.
- En la formación La Peña, para un valor-p de 0.002 se rechaza H_o y se acepta H_a .

CONCLUSIONES EN EL CONTEXTO DEL PROBLEMA

Que la media de las pendientes en las formación Aurora con ocurrencia de deslizamientos es igual a la media de las pendientes de la misma formación en la Sierra de las Mitras; asimismo la media de las pendientes en la formación La Peña con ocurrencia de deslizamientos es diferente a la media de las pendientes de la misma formación en la Sierra de las Mitras. Es posible afirmar que los deslizamientos ocurren en pendientes con media igual a las medias generales de las formaciones

Aurora; mientras que en la formación La peña los deslizamientos ocurren en pendientes con media diferente a la media de la formación en la Sierra de las Mitras.

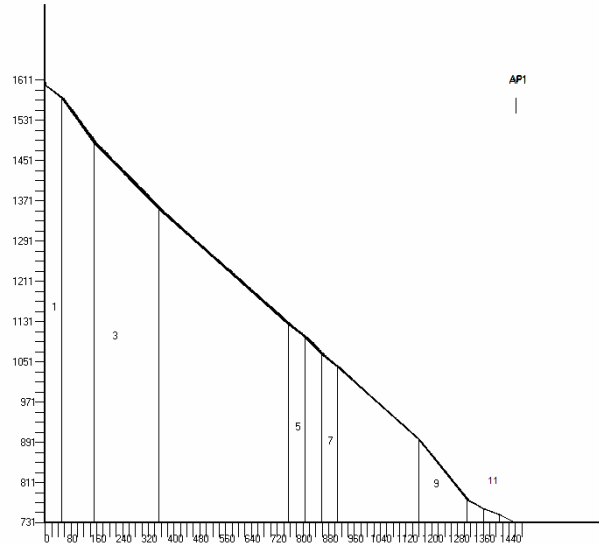
CONCLUSION FINAL

Los deslizamientos ocurren en pendientes con media igual a la media de las pendientes de la Sierra de las Mitras solo en la formación Aurora. Mientras que en las formaciones Cupido y La Peña ocurren en pendientes diferentes a la media. Finalmente, es posible afirmar que los deslizamientos ocurrirán en pendientes diferentes a la media de la población en las formaciones Cupido y La Peña, mientras que en la formación Aurora es posible esperar que estos eventos sucedan alrededor de la media.

ANEXO 2: SIMULACIÓN CAÍDA DE ROCAS

Colorado Rockfall Simulation Program – CRSP

PERFIL 1: ROCA DE 10m. ϕ



CRSP Input File Input File Specifications

Units of Measure: Metric

Total Number of Cells: 12
 Analysis Point 1 X-Coordinate: 1461
 Analysis Point 2 X-Coordinate: 0
 Analysis Point 3 X-Coordinate: 0
 Initial Y-Top Starting Zone Coordinate: 1601
 Initial Y-Base Starting Zone Coordinate: 1600

Cell Data

Cell No.	S.R.	Tang. C.	Norm. C.	Begin X	Begin Y	End X	End Y
1	2.18	.95	.30	0	1601	50	1576
2	3.57	.93	.28	50	1576	151	1486
3	2.85	.93	.28	151	1486	353	1354
4	2.14	.85	.27	353	1354	756	1125
5	1.82	.83	.25	756	1125	806	1100
6	2.85	.84	.24	806	1100	857	1066
7	2.18	.80	.20	857	1066	907	1041
8	2.85	.75	.15	907	1041	1159	897
9	3.64	.73	.16	1159	897	1310	777
10	1.46	.65	.14	1310	777	1360	759
11	1.33	.65	.14	1360	759	1411	747
12	1.46	.60	.11	1411	747	1461	731

CRSP Simulation Specifications

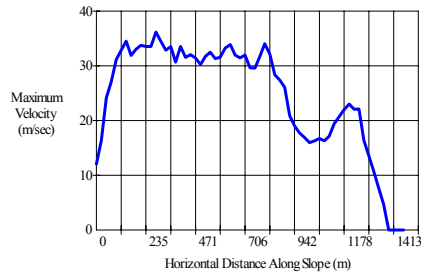
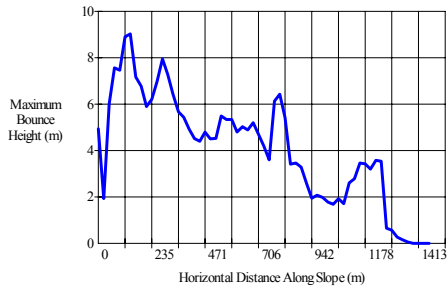
Total Number of Rocks Simulated: 100
 Starting Velocity in X-Direction: 0.3 m/sec
 Starting Velocity in Y-Direction: -0.3 m/sec
 Starting Cell Number: 1

Ending Cell Number: 12
 Rock Density: 2646 kg/m³
 Rock Shape: Spherical
 Diameter: 10 m

CRSP Analysis Point 1 Data

Analysis Point 1: X = 1461, Y = 731
 NO ROCKS PAST ANALYSIS POINT 1

Graphs



CRSP Data Collected at End of Each Cell

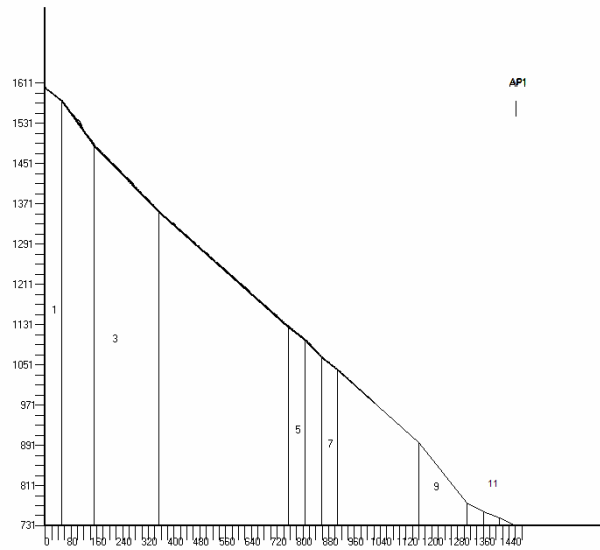
Velocity Units: m/sec Bounce Height Units: m

Cell #	Max. Vel.	Avg. Vel.	S.D. Vel.	Max. Bounce Ht.	Avg. Bounce Ht.
1	16	13	1.47	2	0
2	34	23	4.70	9	2
3	30	21	4.09	6	2
4	29	21	3.36	4	1
5	28	20	2.90	3	1
6	28	20	3.49	5	1
7	23	16	2.66	2	0
8	15	10	1.66	2	0
9	19	13	2.51	3	0
10	11	8	0.98	0	0
11	4	4	0.00	0	-1
12	No rocks past end of cell				

CRSP Rocks Stopped Data

X Interval	Rocks Stopped
0 To 10 m	25
1370 To 1380 m	3
1380 To 1390 m	19
1390 To 1400 m	32
1400 To 1410 m	18
1410 To 1420 m	3

PERFIL 1: ROCA DE 5m. ϕ



CRSP Input File

Input File Specifications

Units of Measure: Metric
 Total Number of Cells: 12
 Analysis Point 1 X-Coordinate: 1461
 Analysis Point 2 X-Coordinate: 0
 Analysis Point 3 X-Coordinate: 0
 Initial Y-Top Starting Zone Coordinate: 1601
 Initial Y-Base Starting Zone Coordinate: 1600

Cell Data

Cell No.	S.R.	Tang. C.	Norm. C.	Begin X	Begin Y	End X	End Y
1	2.18	.95	.30	0	1601	50	1576
2	3.57	.93	.28	50	1576	151	1486
3	2.85	.93	.28	151	1486	353	1354
4	2.14	.85	.27	353	1354	756	1125
5	1.82	.83	.25	756	1125	806	1100
6	2.85	.84	.24	806	1100	857	1066
7	2.18	.80	.20	857	1066	907	1041
8	2.85	.75	.15	907	1041	1159	897
9	3.64	.73	.16	1159	897	1310	777
10	1.46	.65	.14	1310	777	1360	759
11	1.33	.65	.14	1360	759	1411	747
12	1.46	.60	.11	1411	747	1461	731

CRSP Simulation Specifications

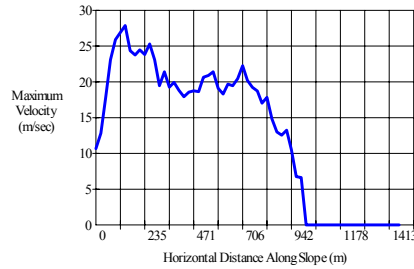
Total Number of Rocks Simulated: 100
 Starting Velocity in X-Direction: 0.3 m/sec
 Starting Velocity in Y-Direction: -0.3 m/sec
 Starting Cell Number: 1
 Ending Cell Number: 12
 Rock Density: 2646 kg/m³
 Rock Shape: Spherical
 Diameter: 5 m

CRSP Analysis Point 1 Data

Analysis Point 1: X = 1461, Y = 731

NO ROCKS PAST ANALYSIS POINT 1

Graphs



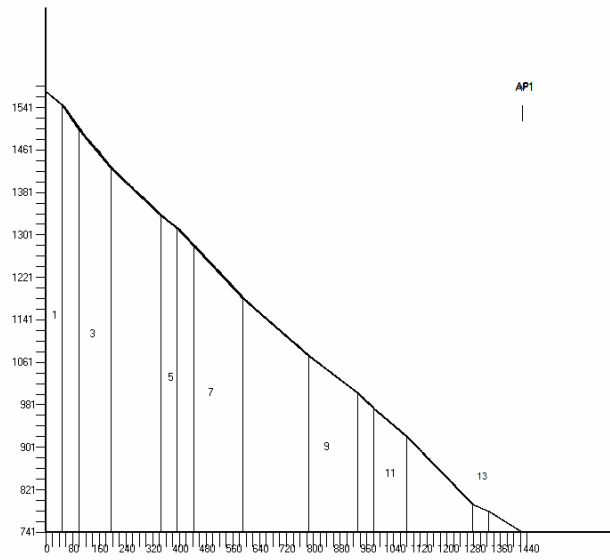
CRSP Data Collected at End of Each Cell

Velocity Units: m/sec Bounce Height Units: m

Cell #	Max. Vel.	Avg. Vel.	S.D. Vel.	Max. Bounce Ht.	Avg. Bounce Ht.
1	11	7	1.93	1	0
2	27	14	4.48	5	2
3	16	10	2.29	3	1
4	15	10	3.34	4	1
5	14	10	2.04	1	0
6	16	9	3.19	2	0
7	11	8	1.83	1	0
8	No rocks	past end of cell			
9	No rocks	past end of cell			
10	No rocks	past end of cell			
11	No rocks	past end of cell			
12	No rocks	past end of cell			

CRSP Rocks Stopped Data

X Interval	Rocks Stopped
0 To 10 m	81
10 To 20 m	1
20 To 30 m	1
850 To 860 m	1
870 To 880 m	1
900 To 910 m	1
910 To 920 m	1
920 To 930 m	2
930 To 940 m	3
940 To 950 m	1
950 To 960 m	2
980 To 990 m	1
990 To 1000 m	1
1000 To 1010 m	1
1010 To 1020 m	1
1030 To 1040 m	1

PERFIL 2: ROCA DE 10m. Φ **CRSP Input File****Input File Specifications**

Units of Measure: Metric
 Total Number of Cells: 14
 Analysis Point 1 X-Coordinate: 1425
 Analysis Point 2 X-Coordinate:
 Analysis Point 3 X-Coordinate:
 Initial Y-Top Starting Zone Coordinate: 1575
 Initial Y-Base Starting Zone Coordinate: 1571

Cell Data

Cell No.	S.R.	Tang. C.	Norm. C.	Begin X	Begin Y	End X	End Y
1	2.61	.95	.25	0	1571	49	1545
2	3.92	.93	.25	49	1545	98	1499
3	2.94	.93	.22	98	1499	196	1425
4	2.61	.91	.23	196	1425	344	1337
5	1.96	.92	.21	344	1337	393	1313
6	2.61	.90	.20	393	1313	442	1280
7	2.94	.91	.21	442	1280	589	1181
8	2.29	.88	.19	589	1181	786	1073
9	2.29	.85	.17	786	1073	933	1003
10	2.61	.86	.17	933	1003	982	973
11	2.29	.78	.18	982	973	1081	920
12	2.94	.80	.15	1081	920	1277	793
13	.98	.72	.14	1277	793	1326	780
14	1.92	.68	.13	1326	780	1425	741

CRSP Simulation Specifications

Total Number of Rocks Simulated: 100
 Starting Velocity in X-Direction: 0.3 m/sec
 Starting Velocity in Y-Direction: -0.3 m/sec
 Starting Cell Number: 1
 Ending Cell Number: 14

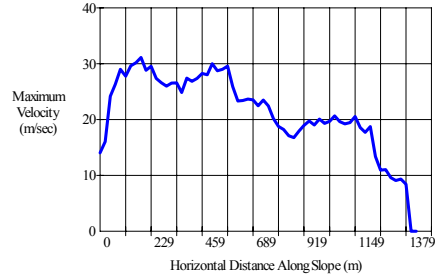
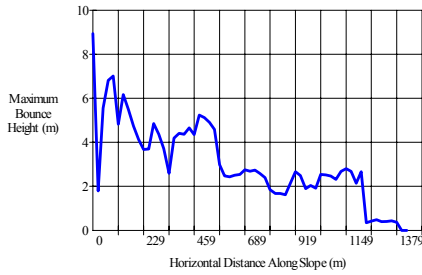
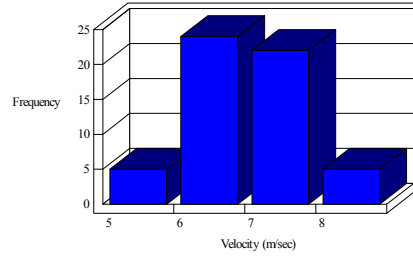
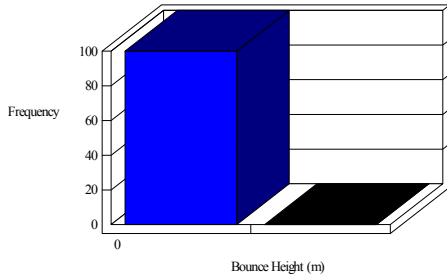
Rock Density: 2646 kg/m³
 Rock Shape: Spherical
 Diameter: 10 m

CRSP Analysis Point 1 Data

Analysis Point 1: X = 1425, Y = 741

Total Rocks Passing Analysis Point: 56

Graphs



Cumulative Probability	Velocity (m/sec)	Energy (J)	Bounce Ht. (m)
50%	6.52	39708371	0.06
75%	7.02	45114699	4.69
90%	7.48	49977352	8.86
95%	7.75	52896705	11.36
98%	8.06	56173171	14.17

Velocity (m/sec)	Bounce Height (m)	Kinetic Energy (J)
Maximum: 8.22	Maximum: .34	Maximum: 59057613
Average: 6.52	Average: .12	Average: 39708371
Minimum: 4.79	G. Mean: .06	Std. Dev.: 8007003
Std. Dev.: .75	Std. Dev.: 6.86	

Remarks:

CRSP Data Collected at End of Each Cell

Velocity Units: m/sec Bounce Height Units: m

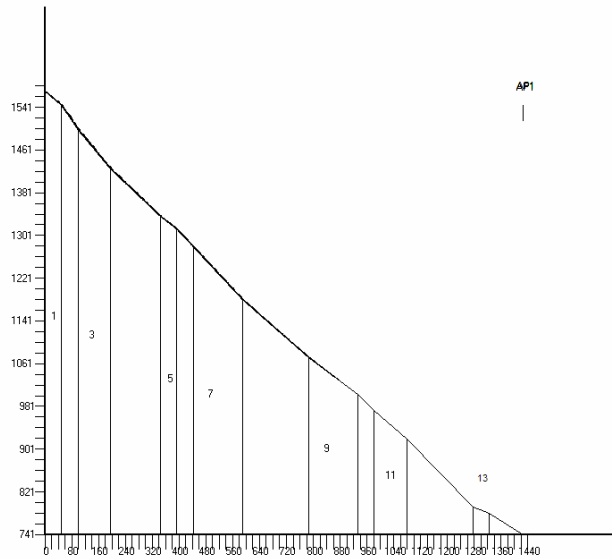
Cell #	Max. Vel.	Avg. Vel.	S.D. Vel.	Max. Bounce Ht.	Avg. Bounce Ht.
1	15	12	1.54	2	0
2	27	19	4.07	7	2
3	31	19	4.02	5	1
4	24	17	3.00	3	1
5	21	16	2.83	2	0

6	25	18	3.01	4	1
7	28	16	3.58	4	1
8	21	15	2.55	3	0
9	15	11	1.55	1	0
10	17	13	1.96	2	0
11	16	12	1.88	2	0
12	17	11	2.16	2	0
13	9	6	1.20	0	0
14	8	7	0.75	0	0

CRSP Rocks Stopped Data

X Interval	Rocks Stopped
0 To 10 m	39
1300 To 1310 m	2
1310 To 1320 m	1
1320 To 1330 m	2

PERFIL 2: ROCA DE 5m. ϕ



CRSP Input File

Input File Specifications

Units of Measure:	Metric
Total Number of Cells:	14
Analysis Point 1 X-Coordinate:	1425
Analysis Point 2 X-Coordinate:	
Analysis Point 3 X-Coordinate:	
Initial Y-Top Starting Zone Coordinate:	1575
Initial Y-Base Starting Zone Coordinate:	1571

Cell Data

Cell No.	S.R.	Tang. C.	Norm. C.	Begin X	Begin Y	End X	End Y
1	2.61	.95	.25	0	1571	49	1545
2	3.92	.93	.25	49	1545	98	1499

3	2.94	.93	.22	98	1499	196	1425
4	2.61	.91	.23	196	1425	344	1337
5	1.96	.92	.21	344	1337	393	1313
6	2.61	.90	.20	393	1313	442	1280
7	2.94	.91	.21	442	1280	589	1181
8	2.29	.88	.19	589	1181	786	1073
9	2.29	.85	.17	786	1073	933	1003
10	2.61	.86	.17	933	1003	982	973
11	2.29	.78	.18	982	973	1081	920
12	2.94	.80	.15	1081	920	1277	793
13	.98	.72	.14	1277	793	1326	780
14	1.92	.68	.13	1326	780	1425	741

CRSP Simulation Specifications

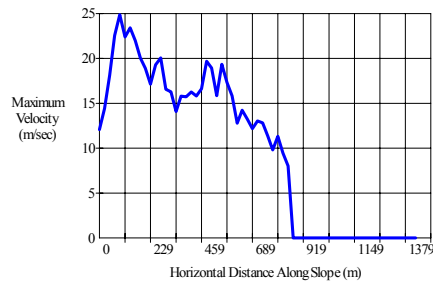
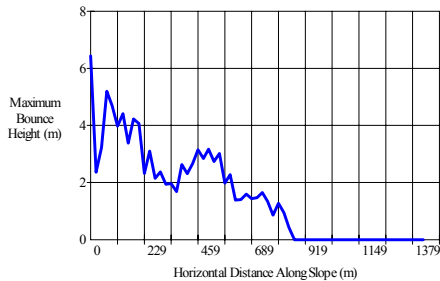
Total Number of Rocks Simulated: 100
 Starting Velocity in X-Direction: 0.3 m/sec
 Starting Velocity in Y-Direction: -0.3 m/sec
 Starting Cell Number: 1
 Ending Cell Number: 14
 Rock Density: 2646 kg/m³
 Rock Shape: Spherical
 Diameter: 5 m

CRSP Analysis Point 1 Data

Analysis Point 1: X = 1425, Y = 741

NO ROCKS PAST ANALYSIS POINT 1

Graphs



CRSP Data Collected at End of Each Cell

Velocity Units: m/sec Bounce Height Units: m

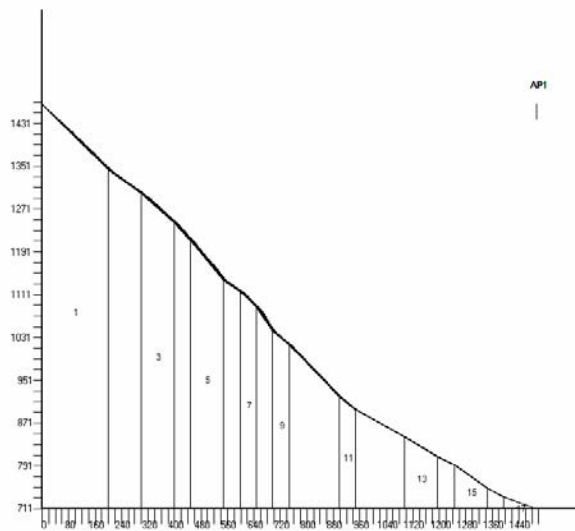
Cell #	Max. Vel.	Avg. Vel.	S.D. Vel.	Max. Bounce Ht.	Avg. Bounce Ht.
1	10	7	2.14	1	0
2	20	14	4.86	5	2
3	14	12	2.46	4	1
4	12	8	2.19	2	0
5	10	7	1.78	1	0
6	13	9	2.51	2	0
7	17	10	3.83	2	1
8	10	8	0	1	0
9	No rocks	past end of cell			
10	No rocks	past end of cell			

- 11 No rocks past end of cell
- 12 No rocks past end of cell
- 13 No rocks past end of cell
- 14 No rocks past end of cell

CRSP Rocks Stopped Data

X Interval	Rocks Stopped
0 To 10 m	82
10 To 20 m	3
20 To 30 m	3
30 To 40 m	1
480 To 490 m	1
520 To 530 m	1
580 To 590 m	1
610 To 620 m	1
680 To 690 m	1
720 To 730 m	1
770 To 780 m	1
820 To 830 m	1
860 To 870 m	2
880 To 890 m	1

PERFIL 3: ROCA DE 10m. Φ



CRSP Input File

Input File Specifications

Units of Measure:	Metric
Total Number of Cells:	17
Analysis Point 1 X-Coordinate:	1494
Analysis Point 2 X-Coordinate:	
Analysis Point 3 X-Coordinate:	
Initial Y-Top Starting Zone Coordinate:	1470
Initial Y-Base Starting Zone Coordinate:	1466

Cell Data

Cell No.	S.R.	Tang. C.	Norm. C.	Begin X	Begin Y	End X	End Y
1	2.77	.95	.28	0	1466	199	1345
2	1.85	.95	.28	199	1345	299	1300
3	2.51	.93	.27	299	1300	398	1246
4	3.08	.90	.27	398	1246	448	1212
5	2.53	.87	.25	448	1212	548	1138
6	1.85	.87	.26	548	1138	598	1117
7	2.46	.85	.20	598	1117	648	1087
8	3.14	.88	.21	648	1087	697	1043
9	2.16	.83	.23	697	1043	747	1017
10	2.46	.84	.19	747	1017	897	921
11	2.16	.78	.19	897	921	946	896
12	1.23	.79	.18	946	896	1096	845
13	1.57	.75	.21	1096	845	1195	808
14	1.23	.74	.17	1195	808	1245	793
15	1.54	.73	.16	1245	793	1345	749
16	1.23	.72	.13	1345	749	1395	733
17	.92	.70	.13	1395	733	1494	711

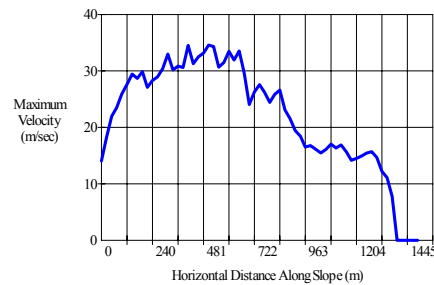
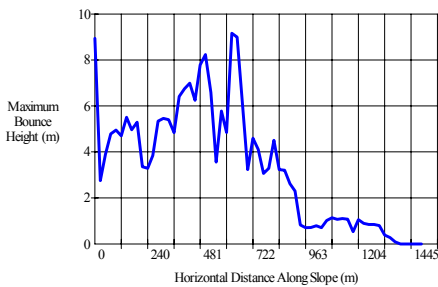
CRSP Simulation Specifications

Total Number of Rocks Simulated: 100
 Starting Velocity in X-Direction: 0.3 m/sec
 Starting Velocity in Y-Direction: -0.3 m/sec
 Starting Cell Number: 1
 Ending Cell Number: 17
 Rock Density: 2646 kg/m³
 Rock Shape: Spherical
 Diameter: 10 m

CRSP Analysis Point 1 Data

Analysis Point 1: X = 1494, Y = 711
 NO ROCKS PAST ANALYSIS POINT 1

Gaphs



CRSP Data Collected at End of Each Cell

Velocity Units: m/sec Bounce Height Units: m

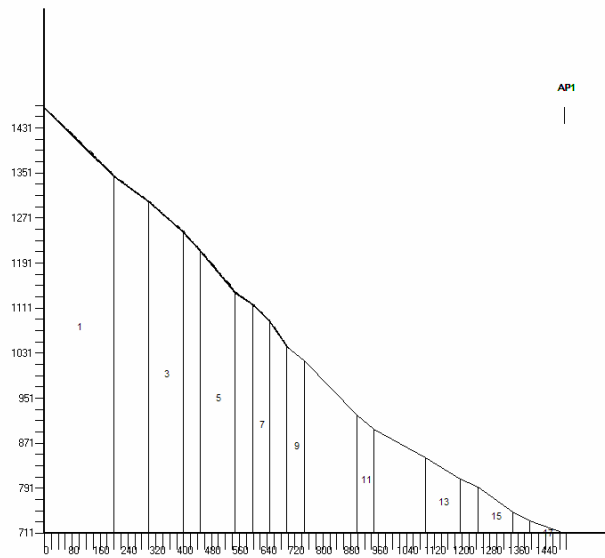
Cell #	Max. Vel.	Avg. Vel.	S.D. Vel.	Max. Bounce Ht.	Avg. Bounce Ht.
1	29	20	3.68	5	1
2	25	19	2.27	4	1
3	25	19	2.68	4	1

4	28	21	3.50	6	2
5	33	22	3.54	7	2
6	26	19	2.67	3	0
7	26	18	2.95	4	1
8	29	20	3.63	6	2
9	23	17	2.53	3	1
10	21	16	2.34	3	1
11	18	14	1.84	2	0
12	14	12	.74	1	0
13	15	13	.90	1	0
14	12	11	.70	1	0
15	14	12	1.02	1	0
16	10	8	.77	0	0
17	No rocks past end of cell				

CRSP Rocks Stopped Data

X Interval	Rocks Stopped
0 To 10 m	15
1410 To 1420 m	26
1420 To 1430 m	43
1430 To 1440 m	15
1440 To 1450 m	1

PERFIL 3: ROCA DE 4.5m. Φ



CRSP Input File

Input File Specifications

Units of Measure: Metric
 Total Number of Cells: 17
 Analysis Point 1 X-Coordinate: 1494
 Analysis Point 2 X-Coordinate:
 Analysis Point 3 X-Coordinate:
 Initial Y-Top Starting Zone Coordinate: 1470
 Initial Y-Base Starting Zone Coordinate: 1466

Cell Data

Cell No.	S.R.	Tang. C.	Norm. C.	Begin X	Begin Y	End X	End Y
1	2.77	.95	.28	0	1466	199	1345
2	1.85	.95	.28	199	1345	299	1300
3	2.51	.93	.27	299	1300	398	1246
4	3.08	.90	.27	398	1246	448	1212
5	2.53	.87	.25	448	1212	548	1138
6	1.85	.87	.26	548	1138	598	1117
7	2.46	.85	.20	598	1117	648	1087
8	3.14	.88	.21	648	1087	697	1043
9	2.16	.83	.23	697	1043	747	1017
10	2.46	.84	.19	747	1017	897	921
11	2.16	.78	.19	897	921	946	896
12	1.23	.79	.18	946	896	1096	845
13	1.57	.75	.21	1096	845	1195	808
14	1.23	.74	.17	1195	808	1245	793
15	1.54	.73	.16	1245	793	1345	749
16	1.23	.72	.13	1345	749	1395	733
17	.92	.70	.13	1395	733	1494	711

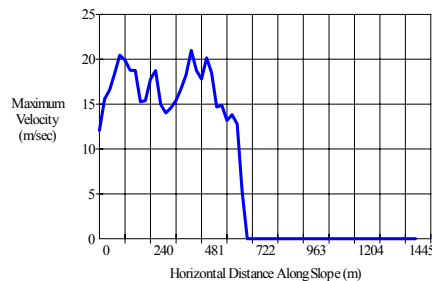
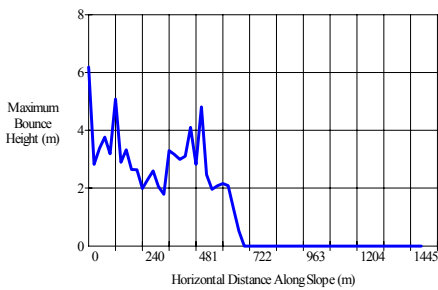
CRSP Simulation Specifications: Used

Total Number of Rocks Simulated: 100
 Starting Velocity in X-Direction: 0.3 m/sec
 Starting Velocity in Y-Direction: -0.3 m/sec
 Starting Cell Number: 1
 Ending Cell Number: 17
 Rock Density: 2646 kg/m³
 Rock Shape: Spherical
 Diameter: 4.5 m

CRSP Analysis Point 1 Data -

Analysis Point 1: X = 1494, Y = 711
 NO ROCKS PAST ANALYSIS POINT 1

Graphs



CRSP Data Collected at End of Each Cell

Velocity Units: m/sec Bounce Height Units: m

Cell #	Max. Vel.	Avg. Vel.	S.D. Vel.	Max. Bounce Ht.	Avg. Bounce Ht.
1	15	8	3.46	1	0
2	11	7	2.98	2	0
3	7	7	0	2	1
4	18	13	0	2	0

5	18	13	0	2	0
6	9	7	0	1	0
7	8	6	0	2	0
8	3	3	0	1	0
9	No rocks	past end of cell			
10	No rocks	past end of cell			
11	No rocks	past end of cell			
12	No rocks	past end of cell			
13	No rocks	past end of cell			
14	No rocks	past end of cell			
15	No rocks	past end of cell			
16	No rocks	past end of cell			
17	No rocks	past end of cell			

CRSP Rocks Stopped Data

X Interval	Rocks Stopped
0 To 10 m	74
10 To 20 m	2
20 To 30 m	4
40 To 50 m	1
50 To 60 m	1
70 To 80 m	1
90 To 100 m	2
100 To 110 m	1
120 To 130 m	1
140 To 150 m	1
150 To 160 m	1
210 To 220 m	1
240 To 250 m	1
260 To 270 m	2
310 To 320 m	1
330 To 340 m	2
610 To 620 m	1
630 To 640 m	1
640 To 650 m	1
700 To 710 m	1

Centro de Información-Biblioteca



30002006631998