

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

COMPARACIÓN DE UN MÉTODO CUALITATIVO CON UNO
BIVARIADO PARA LA EVALUACIÓN DE PELIGRO POR
PROCESOS DE LADERA EN LA SIERRA DE GUADALUPE, EDO.
DE MÉXICO.

TESIS DE LICENCIATURA

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

MILAGROS CAMPOS VARGAS.

ASESORA: DRA. ALINE CONCHA DIMAS.

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F. 2006.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Para: María mi madre
Elizabeth por su ejemplo y enseñanzas
Ricardo por estar junto a mí y apoyarme siempre.*

AGRADECIMIENTOS A:

Mi directora

Aline Concha

Por ser una gran asesora y mí amiga ante todo.

Mis sinodales

Por su apoyo, confianza y paciencia.

**Raúl Aguirre Gómez
Olivia Salmerón García
Armando García de León
Lucía Guadalupe Matías**

Mis amigos, compañeros y familia del laboratorio de SIGyPR.

Efraín: un amigo incondicional para toda la vida, gracias por hacer todo más ligero siempre.

Jorge Prado: por ser mí conciencia diaria y un buen amigo que siempre me apoya.

Mayeli: por darme ánimos para seguir adelante todos los días.

René: por sus conocimientos que me fueron de gran ayuda.

Pili: por su ayuda, por escucharme y sonreírme siempre.

Josafat: Por su compañía y cariño que siempre me mostró.

Mis hermanos

Por creer en mí siempre

Guadalupe, Denisse, Pablo, Israel, Yolanda, Eduardo y Jaime.

Y a todos ustedes que de un modo u otro fueron parte de este trabajo, aunque no se dieran cuenta.

Irma Calderón, Iván Gutiérrez, Angélica Morelos, Alejandra Toscana, Gerardo Villagrana, Daniel Bringas, Fernando (Mo), Liliana Gutiérrez, Giovanni, Rafa y Ale (mis tres alegres compadres).

Instituto de Geografía y Geología, UNAM.

ÍNDICE

Resumen	2
Introducción	4
1 CONCEPTOS BÁSICOS DE INESTABILIDAD DE LADERAS Y PELIGRO	7
1.1 Inestabilidad de laderas.....	7
1.2 Causas que intervienen en la Inestabilidad de laderas	7
1.3 Clasificación y tipos de mecanismo en los que puede fallar una ladera.....	9
PELIGRO POR PROCESOS DE LADERA	13
2 DIFERENTES MÉTODOS PARA LA ZONIFICACIÓN DE PELIGRO POR PROCESOS DE LADERA.....	15
TÉCNICAS DE ANÁLISIS	15
2.1 Análisis cualitativos.....	16
2.2 Análisis cuantitativos	17
2.3 Datos de entrada para el análisis de peligro	19
3. DESCRIPCIÓN FISIAGRÁFICA Y GEOLÓGICA DE LA SIERRA DE GUADALUPE	22
3.1.1 Localización	22
3.1.2 Características topográficas	23
3.1.3 Suelos.....	24
3.1.4 Clima.....	25
3.1.5 Hidrografía	26
3.1.6 Vegetación.....	28
3.2.1 Geología local.....	32
3.2.2 Geología Estructural	35
4 INESTABILIDAD DE LADERAS EN LA SIERRA DE GUADALUPE	36
4.1 Procesos de ladera en México	36
4.2 Problemática en la Sierra de Guadalupe.....	38
5 PROCESAMIENTO Y APLICACIÓN DEL MÉTODO HEURÍSTICO Y MÉTODO BIVARIADO EN LA SIERRA DE GUADALUPE.....	43
5.1 Metodología del mapa cualitativo heurístico para la Sierra de Guadalupe	46
5.2 Metodología del mapa cuantitativo bivariado de la Sierra de Guadalupe	52
6 RESULTADOS	64
7 CONCLUSIONES.....	80
8.-BIBLIOGRAFÍA	83

Resumen.

En este trabajo se presenta una comparación entre dos mapas de peligro por procesos de ladera en la Sierra de Guadalupe, al norte de la Ciudad de México realizados con metodologías distintas.

El primer mapa de peligro fue elaborado en el año 2004 por el Servicio Geológico Metropolitano (SEGEOMET) en el proyecto *“Evaluación y Zonificación de los Peligros Geológicos por deslizamiento en las laderas de la Sierra de Guadalupe, Estado de México”*. La metodología consistió en un análisis cualitativo heurístico; en el cual se combinaron 5 mapas parámetro (geológico, altimétrico, pendientes, precipitación, densidad de fracturamiento y densidad de drenaje). los cuales fueron clasificados de acuerdo a su grado de incidencia (alta, media y baja) en la generación de procesos de ladera; la calificando fue asignada a cada una de las clases (rangos) de los mapas con base a los conocimientos y experiencia de los especialistas. Con los mapas parámetro ya clasificados realizaron una sobreposición de capas, en el Sistema de Información Geográfica ILWIS versión 3.2 (SIG) lo que dio como resultado final zonas que indican alto, medio y bajo peligro.

Es importante mencionar que al inicio del proyecto del SEGEOMET se llevo a cabo la interpretación de las fotografías aéreas de la zona y el análisis de imágenes de satélite, así como de un modelo sombreado, donde se evaluaron las condiciones morfológicas y tectónicas del terreno, así como el trabajo de campo para realizar un mapa preliminar de deslizamientos (Inventario de deslizamientos), que posteriormente fue utilizado en el análisis estadístico bivariado junto con los mapas de parámetros.

El segundo método para la elaboración del mapa de peligro consintió en un análisis estadístico bivariado, que formo parte del proyecto titulado *“Caracterización Geomecánica y Modelación Numérica de los Deslizamientos*

Críticos de la Sierra de Guadalupe” realizado por el instituto de Geología en el año 2005 y financiado por el Fondo de Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN). En el método bivariado se determinó la influencia de cada uno de los parámetros usados en el primer mapa sobre la ocurrencia de procesos de ladera, a partir del cálculo de valores de peso ($\text{weights index} = W_i$) de cada una de las clases de los mapas parámetro. Para la obtención de los valores de peso se aplicó la fórmula estadística presentada por Çevik y Topal en el 2003, donde el fundamento para asignar los valores de peso es a partir de la densidad de deslizamientos en cada una de las clases de los mapas de parámetros dividida con la densidad de deslizamientos en el área de estudio de cada uno de los mapas de parámetros. Para esto fue necesario el tratamiento de la información en formato *raster* de los mapas de parámetro y el inventario de deslizamientos, en el SIG ArcGis 9.0. para el cruce de información y la suma de los valores de peso, lo que dio como resultado la determinación de áreas con distintos valores de peligro que finalmente se jerarquizaron en tres clases de alto medio y bajo peligro.

Finalmente el mapa del SEGEOMET y el mapa generado en este trabajo fueron comparados, para conocer la diferencia entre ellos realizando un análisis de celda por celda, para localizar el cambio de las áreas con peligro en cada píxel. El resultado mostró que el 70.6 % del área no presenta coincidencia, en la definición de las zonas de peligro, entre ambos mapas. En el mapa fabricado por el método bivariado se presenta una mejor distribución de las tres áreas de peligro, ya que la coincidencia con el mapa de inventario es mayor que el mapa hecho por el método heurístico.

Introducción.

En las últimas cuatro décadas, una de las problemáticas más severas que presenta el área de la Sierra de Guadalupe, es la acelerada urbanización que de manera anárquica, se produce hacia las porciones más elevadas de la sierra. Esta acción sobre el medio ha provocado un escenario de peligro para la población, ya que su establecimiento ha sido sobre una constitución geológica que presenta un gran número de fallas y fracturas, así como un relieve de laderas escarpadas y fuerte pendiente, lo cual da a este terreno una gran potencialidad de presentar peligros geológicos como son los procesos de ladera, mismos que en condiciones de lluvias intensas, sismos o factores antrópicos (extracción de material, cortes en laderas para construcción de carreteras y deforestación) pueden acelerarlos o magnificarlos, provocando efectos de daño severo sobre la infraestructura y en ocasiones hasta pérdidas humanas. De acuerdo con Concha (2006), los ejemplos más representativos de áreas inestables dentro de la Sierra de Guadalupe se tienen en: a) la zona del flanco poniente del cerro el Chiquihuite, donde existe gran fracturamiento y se genera volteo de grandes bloques de rocas; b) deslizamientos de rocas de cerro Gordo y c) las laderas del cerro el Tenayo donde se generan la zona de caída de rocas. Sin embargo y a pesar de este escenario los trabajos referidos a este tipo de fenómenos naturales en la Sierra de Guadalupe, son pocos y la mayoría son de carácter cualitativo. Entre ellos se encuentran el de Lugo y Salinas (1996), donde el objetivo principal fue un estudio del relieve con enfoque morfogénico, aplicado a los peligros naturales; Frausto (1998) quien hace una caracterización de los derrumbes y deslizamientos y la expansión lateral del suelo provocados por la sismicidad en las inmediaciones del graben de Cuauhtepic y el más reciente presentado por el SEGEOMET (2004, descrito anteriormente). Existen Otros trabajos como el de Hernández y Rodríguez

(1999), tesis profesional que aplica un método determinístico de cálculo de Dovelas en un corte de ladera en el cerro Tlayacampa al oeste de la Sierra de Guadalupe, y que a pesar de ser el único método cuantitativo que se ha desarrollado, tiene una limitante, que solo sirve en zonas muy pequeñas, y el costo económico e infraestructura para aplicarlo a toda la sierra sería alto.

Si bien los estudios antes mencionados y en especial el del Servicio Geológico Metropolitano son una buena herramienta para entender y conocer el fenómeno, es necesario aplicar otras metodologías que incluyan análisis cuantitativos, a escalas medianas y grandes para una mejor determinación de áreas de peligro en toda la Sierra de Guadalupe.

En la actualidad existen diversas técnicas cuantitativas para zonificar áreas de peligro por procesos de ladera, entre éstas se encuentran los métodos estadísticos bivariado y multivariados; los cuales se tratan de análisis indirectos, basados en la relación que existe entre los factores desencadenantes y la ocurrencia de procesos de ladera, en el pasado y en el presente.

Ejemplos detallados de estas técnicas son desarrollados por Van Westen (2000), método del índice de deslizamientos; Süzen et al. (2003): método de susceptibilidad, método de valor de información, y método de modelación de evidencia de pesos, Çevic y Topal (2003): cálculo de valores de peso (W_i).

En este trabajo se aplica un análisis estadístico bivariado a partir de la conjugación de los mismos mapas de parámetros utilizados por el SEGOMET en el 2004 y el inventario de deslizamientos, para obtener un nuevo mapa de peligro, y señalar áreas con distinto grado de peligro incluyendo aquellas, donde no se han presentado deslizamientos pero en las que de acuerdo a la metodología existen condiciones similares y podrían presentarse dichos fenómenos naturales. La selección del método estadístico bivariado se hizo por

considerarse como el nivel más simple de los cuantitativos, pero superior al método cualitativo heurístico.

La tesis consta de siete capítulos. El primero trata de los conceptos básicos de inestabilidad de laderas, los factores desencadenantes, las clasificaciones y tipos de mecanismos de falla los y peligro por procesos de remoción en masa. El segundo capítulo, presenta las distintas técnicas de análisis que existen para determinar la zonificación de peligro. En el tercer capítulo se expone una aproximación física de la zona de estudio, en cuanto a su localización, clima, suelo vegetación y características geológicas. En el cuarto capítulo se exponen los antecedentes del estudio de la inestabilidad de laderas en México y muy especialmente en la Sierra de Guadalupe.

El quinto capítulo, muestra el desarrollo de la metodología cualitativa heurística y la cuantitativa bivariada, para la confección del mapa de peligros para la Sierra de Guadalupe. En el sexto el contenido se refiere al análisis de resultados de ambos mapas y finalmente en el séptimo se muestra las conclusiones.

1.-CONCEPTOS BÁSICOS DE INESTABILIDAD DE LADERAS Y PELIGRO..

1.1 Inestabilidad de laderas.

La estabilidad de una ladera se refiere a la seguridad de una masa de tierra contra falla o movimiento (Hernández y Rodríguez, 1999). Está determinada por parámetros geométricos (altura e inclinación), geológicos (litología, zonas de planos de debilidad y posición estratigráfica), hidrogeológicos (presencia de agua), y geotécnicos o relacionados con el comportamiento mecánico del terreno (resistencia y deformación). Sin embargo, la combinación de éstos parámetros, en condiciones específicas, como pueden ser planos de ladera muy inclinados, un grado avanzado de alteración del material, presencia de grandes volúmenes de agua o cortes en la laderas, etc. puede provocar la pérdida de estabilidad (inestabilidad), provocando el desprendimiento de material a lo largo de una o varias superficies de la ladera, haciendo posible el movimiento de la masa de suelo o roca pendiente abajo (González, et al., 2002).

1.2 Causas que intervienen en la Inestabilidad de laderas.

Los conceptos teóricos utilizados en este trabajo para definir las causas que intervienen en la Inestabilidad de laderas y la clasificación de mecanismos de falla, se basan en Alcántara (2000) y González, et al. (2002).

Las causas que intervienen en la inestabilidad de laderas se dividen en dos grupos, internas y externas. Las causas externas son aquéllas en donde se produce un incremento en la tensión o esfuerzos de los materiales, pero no en la resistencia, lo cual afecta y modifica sus condiciones naturales de equilibrio. Entre los cambios de tipo externo más importantes se incluyen la erosión e infiltración de agua, las vibraciones y las modificaciones antrópicas. La erosión e incisión de los ríos socava las paredes de las laderas afectando su geometría, la infiltración provoca el aumento de peso y la presión en los materiales, disminuyendo su

resistencia (Intensidad y duración de precipitaciones, deshielo). Las vibraciones (esfuerzos transitorios naturales) provocan aceleraciones en el terreno, favoreciendo la rotura y la licuefacción (estas pueden ser debidas a movimientos sísmicos naturales, o inducidos por el hombre con explosiones mineras o por obras públicas). Finalmente, las actividades humanas (esfuerzos artificiales) alteran el equilibrio de las laderas debido a cargas estáticas provocadas por construcciones de edificios, construcciones de taludes para vías de comunicación, de presas y explotaciones mineras. Así mismo, los cambios en el recubrimiento vegetal como la tala de bosques, e incendios forestales, generan alteraciones a las condiciones naturales del terreno, y permiten que la acción de los procesos erosivos sean más agresivos y con mayor facilidad el desgaste del terreno.

Las causas de tipo interno son aquéllas que disminuyen la resistencia de los materiales sin cambiar la tensión o los esfuerzos; condicionan las diferentes tipologías de los mecanismos de falla y modelos de ruptura. Dentro de las causas internas encontramos características intrínsecas relativas a las propiedades del material, a su resistencia y las características extrínsecas relacionadas con la morfología de la ladera y condiciones ambientales de ésta. Las primeras incluyen parámetros como litología, textura, consolidación y espesor de los materiales así como, parámetros estructurales relativos a planos de estratificación y de debilidad (diaclasas, fallas y fracturas). En las características extrínsecas podemos encontrar las morfológicas como la pendiente de la ladera y su disposición respecto a discontinuidades geológicas y la orientación, así como, factores de tipo ambiental (humedad del terreno), cambios estacionales de temperatura, tipos y cambios de vegetación.

Por lo tanto, para la evaluación de áreas con inestabilidad, independientemente del método usado, es importante incorporar, el mayor número de parámetros o factores que intervienen o causan los procesos de ladera, esto en función de la disponibilidad de la información o tiempo y capacidad económica para adquirirlos.

1.3 Clasificación y tipos de mecanismo en los que puede fallar una ladera.

La inestabilidad de laderas es representada por distintos procesos conocidos como de ladera, remoción en masa, movimientos del terreno y procesos gravitacionales. Sin embargo el término usado con mayor frecuencia para designar el desprendimiento y caída del material que se produce en los taludes es el de deslizamiento de tierra. Este término implica el movimiento de una masa formada por diferentes tipos de material que pueden ser: roca, suelo, rellenos artificiales o combinaciones de los mismos a través de una superficie de ruptura determinada. Sin embargo, dada la diversidad de mecanismo de falla (procesos), parece más adecuado utilizar el término movimientos de talud o procesos de ladera para englobar todos los tipos de fallas que puedan sufrir éstos (Instituto tecnológico Geominero de España, 1987). Bajo éste concepto, en este trabajo se utilizara el término de procesos de ladera y deslizamientos, como sinónimos, para nombrar los tipos de mecanismo.

Para distinguir los distintos movimientos que se presentan en los taludes se han realizado diversas clasificaciones, cada una es resultado de los enfoques con los que se han llevado a cabo las investigaciones de las distintas disciplinas. Estas clasificaciones se basan, de manera general, en los tipos de materiales involucrados, en los atributos morfológicos, tanto de la superficie de ruptura como del área de depósito; así como en la velocidad del movimiento, antigüedad, grado de actividad y contenido de humedad.

Algunas de las clasificaciones más extensas muestran diversos criterios y fines, los cuales son de gran utilidad para abordar el estudio de los deslizamientos o procesos de ladera y el conocimiento del comportamiento de los materiales que sufren estos procesos. La clasificación más aceptada y aplicada a nivel internacional para tipificar los tipos de procesos, se basa en el mecanismo del movimiento, por lo que de manera general, éstos se dividen en caídas o desprendimientos, vuelcos o desplomes, deslizamientos, expansiones laterales,

flujos y movimientos complejos. Por lo que González, *et al* (2002) sostienen que los aspectos mencionados anteriormente están considerados dentro de la clasificación del EPOCH (European Community Programme) donde se expone una diferenciación entre el tipo de movimiento y los materiales involucrados. La tabla 1.1 muestra una clasificación simplificada de los diferentes tipos de movimientos de ladera, en función de los mecanismos de ruptura y el tipo de material.

Tabla 1.1.- Clasificación general de los movimientos de ladera

Mecanismo de falla		Tipos de Movimiento	
Tipo	Roca	Derrubios	Suelo
Desprendimientos (fall)	Caída o desprendimientos de rocas (rockfall)	Caída o desprendimiento de derrubios (debris fall)	Caída o desprendimiento de suelo (soil fall)
Vuelco o desplome (topple)	Vuelco o desplome de rocas (rock topple)	Vuelco o desplome de derrubios (debris topple)	Vuelco o desplome de suelos (soil topple)
Deslizamiento rotacional simple (rotational slide)	Individual (simple) Múltiple (multiple) Sucesivo (succesive)	Individual (simple) Múltiple (multiple) Sucesivo (succesive)	Individual (simple) Multiple (multiple) Sucesivo (succesive)
Deslizamiento translacional (translational slide, non-rotational)	Deslizamiento de roca en bloque (block slide)	Deslizamiento de derrubios en bloque (block slide)	Deslizamiento translacional de suelo (slab alide)
Deslizamiento planar	Deslizamientos de rocas (rock slide)	Deslizamientos de derrubios (debris slide)	Coladas de barro (mudslide)
flujos (flow)	Flujo de rocas (rock flow)	Corrientes de derrubios (debris flow)	Flujos de tierra arena o suelo (soil flow)
Expansión lateral (lateral spreading)	Expansiones laterales en rocas (rock spreading)	Expansiones laterales en derrubios (debris spread)	Expansiones laterales en suelos (soil spreading)
Complejo (complex)	Ejemplo: Alud de rocas (rock avalanche)	Ejemplo: Flujo deslizante (flow slide)	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras

Tomada de Alcántara, 2000.

Desprendimientos o caídas.- Son los movimientos en caída libre de una masa (rocas, detritos y suelo). Se origina por el desprendimiento del material de una superficie con gran inclinación y desciende principalmente, a través del aire, por caída libre, a saltos o rodando (Figura 1.1). Estos movimientos son definidos con

base al material involucrado, por lo que se clasifican de manera general en caídas o desprendimiento de rocas, de detritos y de suelos.

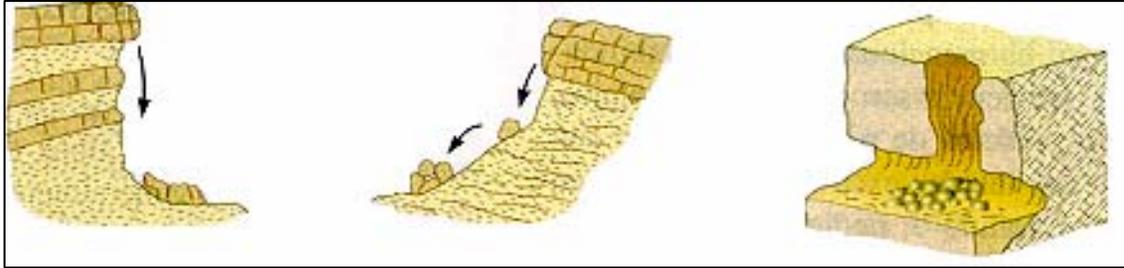


Figura 1.1. Desprendimiento y caída de rocas o suelo. (Modificado de González, et al. 2002).

Vuelco o desplome.- Consiste en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje o pivote (Figura 1.2) determinado por su centro de gravedad. Su movimiento es hacia delante o hacia l aparte externa y frecuentemente ocurre en una o más superficies, donde los materiales poseen un sistema de discontinuidades como grietas, diaclasas o superficies columna res, dependiendo de la pendiente será la velocidad del proceso.

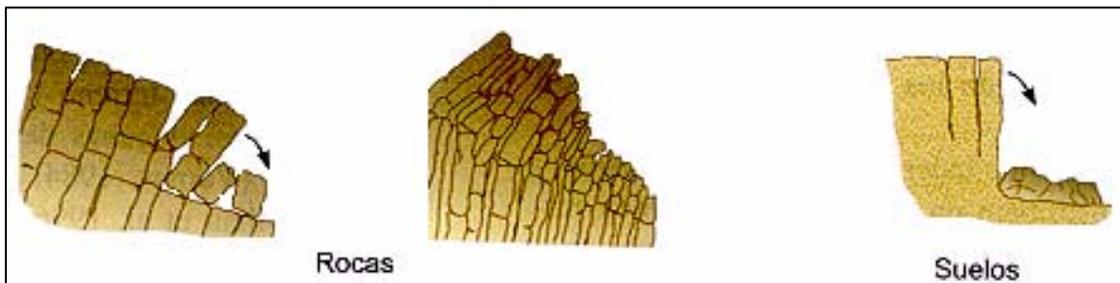
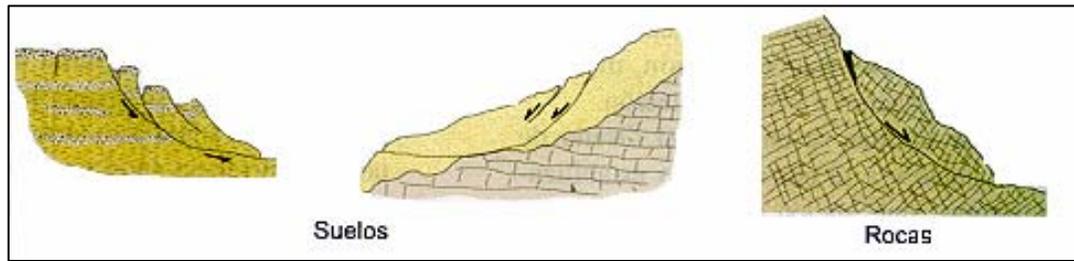


Figura 1.2. Vuelcos o desplomes. (Modificado de González, et al. 2002).

Deslizamientos.- Son desplazamientos ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, que puede detectarse fácilmente ya que, con frecuencia, se forman grietas transversales como primera señal de su ocurrencia, localizadas en las zonas que ocupará el escarpe principal. Existen tres tipos diferentes de éste proceso, siendo la superficie de ruptura la que los define; por lo que las superficies curvas, cóncavas o en forma de cuchara, se tratan de deslizamientos rotacionales

(Figura 1.3), en superficies semiplanas u onduladas, se asocian a deslizamientos



traslacionales y la ruptura plana a los deslizamientos planos (Figura 1.4).

Figura 1.3. Deslizamiento rotacional. (Modificado de González, et al. 2002).

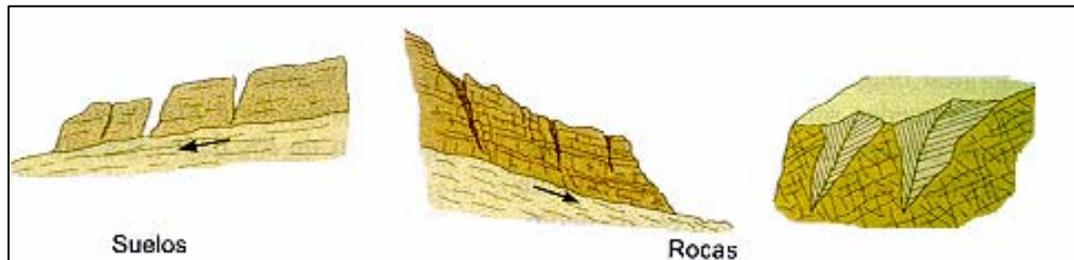


Figura 1.4. Deslizamiento traslacional. (Modificado de González, et al. 2002).

Flujos.- Los flujos son movimientos espacialmente continuos; su movimiento es muy parecido al de un fluido viscoso, razón por la que la distribución de velocidades no es homogénea. Los flujos envuelven todo los tipos de materiales disponibles y se clasifican con base a su contenido, por tanto, se dividen en flujos de rocas, flujos o corrientes de derrubios y flujos de arena y suelo (Figura 1.5).

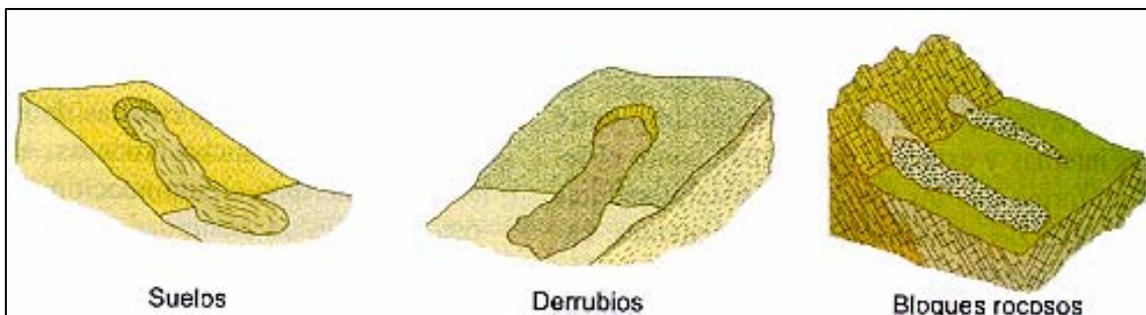


Figura 1.5. Deslizamiento traslacional. (Modificado de González, et al. 2002).

Expansión lateral.- Estos movimientos son el resultado de la fracturación y expansión del suelo o masas de roca compacta, debido a la licuefacción o fluidización del material subyacente. Ocurre cuando materiales gruesos, como fragmentos de rocas, grava, etc., están inmersos en una matriz de material más fina o con contenido de arcillas. Se clasifican en expansiones naturales en rocas, en derrubios y suelo (Figura 1.6).

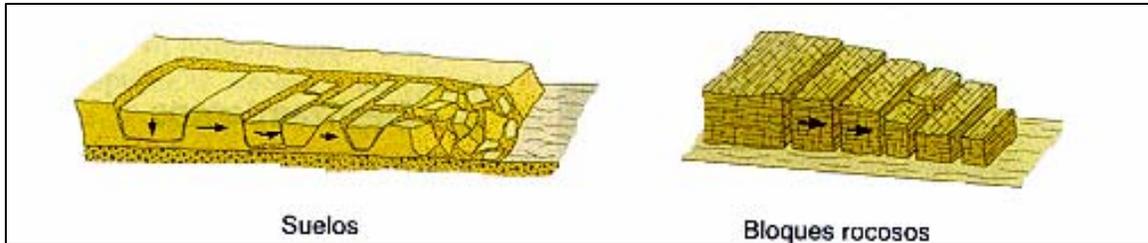


Figura 1.6. Deslizamiento traslacional. (Modificado de González, et al. 2002).

Movimientos complejos.- Ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo. Entre los más importantes destacan los aludes o avalancha de roca o los flujos deslizantes (Figura 1.7).

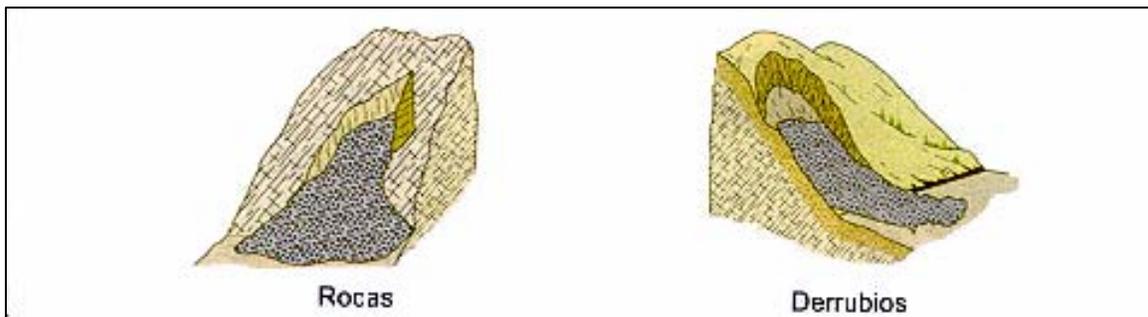


Figura 1.7. Procesos complejos. (Modificado de González, et al. 2002).

1.4 Peligro por procesos de ladera.

Para los propósitos de este estudio los términos que se utilizaron para el manejo del análisis de peligro son presentados a continuación.

Peligro: se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno (natural o generado por el hombre) potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto período de tiempo y en un sitio dado (CENAPRED, 2004).

De acuerdo al Sistema Nacional de Protección Civil (CENAPRED,2001), los fenómenos que pueden afectar un área geográfica son: geológicos (sismos, erupciones volcánicas, deslizamientos, agrietamiento y hundimientos), hidrometeorológicos (tormentas, inundaciones, huracanes y sequías), químicos (desechos industriales, transporte y manejo de sustancias químicas), sanitarios-ambientales (epidemias y plagas) y socio-organizativos (actividades humanas relacionadas con transporte, marítimo, fluvial, accidentes industriales, guerras, etc.).

Análisis de peligro: se trata de una técnica de naturaleza predictiva, en la cual se identifica y determina tanto, la ocurrencia como la frecuencia de fenómenos que pueden representar un peligro potencial, definido a partir de las condiciones espaciales y temporales de su ocurrencia (Ogura y Soares, 2001).

Mapas de peligro: representación de los análisis de peligro de modo gráfico en los cuales se muestran la distribución de las características de los fenómenos perturbadores (naturales o generados por el hombre) con base en conocimientos científicos y en datos estadísticos y probabilísticos, que conducen a la determinación del nivel cuantitativo de peligro que existe en un lugar específico (CENAPRED, 2004).

Zonificación de peligro por inestabilidad de laderas: consiste en la identificación de la posible ocurrencia de deslizamientos en una región determinada (Suárez, 1998). La información obtenida es representada en forma de mapas, donde se definen áreas homogéneas, clasificadas en rangos de peligro real o potencial causadas por deslizamientos (Varnes, 1984).

En el presente trabajo el mapa de peligro resultante, únicamente muestra áreas con rangos de potencialidad (alta, media y baja) a ocurrencia de una ruptura (deslizamientos) en las laderas de la Sierra de Guadalupe.

2.- DIFERENTES MÉTODOS PARA LA ZONIFICACIÓN DE PELIGRO POR PROCESOS DE LADERA.

2.1 Técnicas de análisis.

Existen diversos métodos y técnicas de recolección, almacenamiento, análisis e integración de datos, que permiten identificar áreas potencialmente inestables y la elaboración de mapas de peligro por procesos de ladera (Figura 2.1). En general se habla de dos grupos principales de métodos para la evaluación: a) directos o cualitativos, y b) indirectos o cuantitativos (Soeters y Van Westen, 1996).

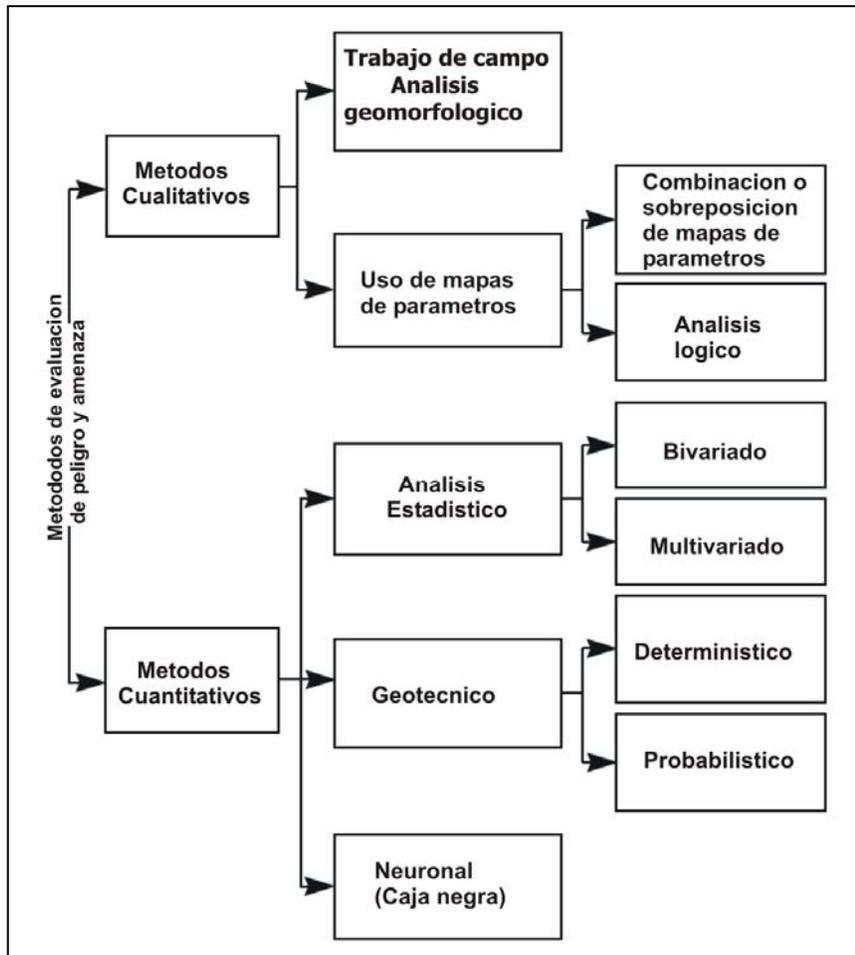


Figura 2.1.- Propuesta de métodos para la evaluación de peligro y amenaza por procesos de ladera. Fuente: Aleotti y Chowdhury, 1999.

2.2. Análisis cualitativos.

El análisis cualitativo desarrolla una metodología donde la experiencia del investigador es aplicada en aproximaciones geológicas y geomorfológicas. En este método los especialistas evalúan directamente la relación entre los deslizamientos con las condiciones del terreno y los factores desencadenantes.

Dentro de este primer grupo se encuentran dos técnicas metodológicas,

2.2.1. Inventario de procesos de ladera.

Es el método más directo para la zonificación de la sus peligro con base en la ocurrencia de movimientos de masa en un área. Se puede realizar por fotointerpretación de fotos aéreas, trabajo de campo o con base en datos históricos del área de estudio. El producto final debe ser la distribución espacial de los movimientos, representados por áreas afectadas o puntos. Proporcionan información por un período corto de tiempo y no dan ninguna idea de los cambios temporales en la distribución de los procesos de ladera. Se pueden clasificar en análisis de actividad, si se dispone de fuentes de información multitemporales. Estos inventarios son la base de cualquier estudio de zonificación de peligro, aunque su aplicación a escala regional es limitada.

2.3.2. Aproximación heurística

El análisis heurístico se clasifica en las siguientes técnicas:

Análisis geomorfológico. Se lleva a cabo con base en la opinión de un experto y es conocido como método directo, donde el peligro se determina directamente en el campo por las observaciones y conocimientos del experto; combinando un inventario de procesos de ladera con su marco geomorfológico como el principal factor de entrada en la evaluación. Este método la certeza o error de los datos obtenidos depende del grado de conocimiento que se tenga tanto del tema como

de la zona de estudio. Tiende a ser usado en escalas grandes (menores a 1:50,000) y se vuelve impracticable en estudios de zonificación a escalas pequeñas (mayores a 1:100,000), por la complejidad de la toma de las decisiones.

- **Análisis de Combinación Cualitativa de Mapas.** Usa el conocimiento del experto para asignar pesos subjetivos (calificación de influencia de alta, media y baja) a las clases de una serie de mapas-parámetro (factores), y las condiciones del terreno que determinan el peligro son obtenidas por la suma de los valores de calificación. Esta técnica ha sido muy popular, pero la desventaja es la determinación exacta del peso para cada mapa parámetro, que requiere un conocimiento detallado de los factores en la zona de estudio.

2.4. Análisis cuantitativos.

El segundo grupo metodológico se trata de la aproximación indirecta. Está basada en el mapeo de un gran número de parámetros considerados como desencadenantes en la ocurrencia del fenómeno de inestabilidad de laderas, que posteriormente son analizados estadísticamente, para relacionar las condiciones del terreno y la ocurrencia de los deslizamientos. Los distintos métodos cuantitativos son descritos a continuación.

2.4.1. Estadísticos.

La combinación de factores que generan los movimientos de masa en el pasado se hace estadísticamente, y a partir de ellos se generan predicciones cuantitativas donde el inventario de movimientos de masa es la base del estudio. Su aplicabilidad se encuentra en estudios de escala intermedia (1:25,000-1:50,000) y tiene la ventaja de su alta reproducción y objetividad, lo que permite verificar los resultados (Cevik y Topal, 2003).

Estadístico bivariado. El análisis se centra en la obtención de la asignación de valores de peso a partir del conocimiento de la densidad de ocurrencia de

deslizamientos dentro de cada mapa de parámetro y dentro de cada clase de parámetro. En este método se expone la incidencia de los factores físicos (variables-parámetro) que intervienen en la ocurrencia de los procesos de ladera en una zona determinada. Entre las técnicas usadas para el cálculo de los pesos están: método de susceptibilidad a movimientos de masa, método de valor de información, y método de evidencia de peso (Cevik y Topal., 2003).

Análisis estadístico multivariado. Se fundamenta en la presencia o número de factores de inestabilidad en cada unidad morfométrica. La matriz resultante es analizada por regresión múltiple o análisis discriminante. No se basa en la experiencia del experto y se pueden esperar buen resultado en zonas homogéneas o con pocos movimientos de masa, debido principalmente a la detallada información requerida y a la necesidad de complejos cálculos estadísticos. Los análisis pueden hacerse por regresión múltiple y análisis discriminante, La implementación de los Sistemas de Información Geográfica ha facilitado el uso de esta técnica (Soeters y Van Westen, 1996).

2.4.2. Aproximación determinística (Modelos de Caja Blanca).

Son métodos indirectos, que emplean modelos físicos de estabilidad de laderas para evaluar la susceptibilidad y/o la amenaza. Son aplicables sólo cuando las condiciones geológicas y geomorfológicas son homogéneas (un corte de ladera) y los tipos de movimientos de masa son simples. La ventaja de esta técnica es que está basada en análisis cuantitativos. El principal problema es su alto grado de simplificación. Generalmente requieren el uso de modelos hidrológicos. No obstante de la cantidad de información detallada que requieren, su uso se ha incrementado, debido a la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica, que permiten la manipulación de gran cantidad de datos y rapidez en los cálculos, facilitando su aplicación a escalas regionales (Soeters y Van Westen, 1996).

2.4.3. Análisis probabilísticos o de frecuencias de movimientos de masa (Modelos de Caja Negra).

Consisten en determinar la probabilidad o recurrencia de los movimientos en un lugar y en un periodo de tiempo dado. El cálculo se realiza con la ayuda de la modelación de los factores presentes en la formación de los movimientos de masa ocurridos en el pasado con características similares. También se conocen como técnicas de evaluación absoluta (Aleotti y Chowdhury, 1999).

2.4.4. Metodología de taludes naturales (Modelos de caja gris).

Se enmarca dentro del campo natural de la macrogeotecnia y constituye un conjunto metodológico que permite la determinación y cálculo de parámetros geomecánicos y de estabilidad, a partir de información detallada. Permite el cálculo directo del factor de seguridad y su correspondiente probabilidad de falla. Se aplica a diferentes escalas, siempre y cuando la información requerida este disponible También se conocen como técnicas por monitoreo o métodos de evaluación de inestabilidad de taludes (Aleotti y Chowdhuy, 1999). Existe diversidad de métodos para el cálculo del factor de seguridad, como el método de tajadas, de talud infinito, del bloque deslizante y el de elementos finitos.

2.5. Datos de entrada para el análisis de peligro.

La inestabilidad de las laderas está relacionada con una gran variedad de factores del medio físico e interacciones con el hombre, por lo tanto para la generación de un mapa de peligro a movimientos de ladera se necesita el conocimiento de estos y su interacción con el terreno. La selección de los datos de entrada es de gran importancia, ya que entre más parámetros sean considerados, más seguros serán los resultados.

De acuerdo con Soeters y Van Westen (1996) los datos pueden ser divididos en cinco grupos básicos: geomorfología, topografía, geología, uso de suelo e hidrología, cada uno de ellos con subdivisiones y subtemas (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Datos de entrada para el análisis de susceptibilidad de laderas.

Datos de Entrada	Datos Relacionales
Geomorfología	
Unidades del terreno	Unidades del terreno
Movimientos de masa (recientes)	Tipo y grado de actividad, profundidad, dimensiones
Movimientos de masa (antiguos)	Tipo, profundidad y dimensiones
Topografía	
Modelo Digital del terreno (MDT)	Diferencia de alturas
Pendientes	Intervalos de ángulos
Dirección de laderas	Intervalos de dirección de laderas
Longitud de las laderas	Intervalos de longitud de laderas
Concavidades /Convexidades	Concavidad/Convexidad
Geología	
Litología	Litología, resistencia del material, espaciamiento, discontinuidad
Materiales Superficiales	Tipo de material, profundidad, distribución, granulometría, coeficientes
Datos de Entrada	Datos Relacionales
Geología Estructural	Tipo de falla, longitud, buzamiento, orientación
Uso de suelo	
Infraestructura (antigua/ reciente)	Tipos de vías, urbanización
Uso de suelo (antiguo/reciente)	Tipo de uso de suelo, densidad de vegetación
Hidrología	
Drenajes	Tipo, orden, longitud
Precipitación	Registros Históricos de precipitación
Temperatura	Registros Históricos de temperatura
Nivel Freático	Profundidad

Modificado de Soeters y Van Westen, 1996.

Para modelar las interacciones complejas entre las causas y o factores antes mencionadas, y evaluar las condiciones del terreno y ocurrencia de proceso de ladera, las nuevas herramientas como los sistemas de información geográfica y el uso de sensores remotos se muestran como una herramienta útil, ya que

permiten y agilizan el tratamiento de la información. En estudios de peligro permiten predecir con más confiabilidad las áreas, y hacen más fácil el almacenamiento, actualización y manipulación de la información referente a los diferentes factores del terreno que intervienen en la generación de peligro (Suárez, 1998).

Un aspecto muy importante cuando se planifica un estudio bajo una plataforma SIG (sobre todo cuando se intentan desarrollar modelos predictivos de susceptibilidad de áreas afectadas por procesos de ladera), la selección de la información que servirá como parámetro tiene un papel fundamental. Si bien no existe una regla específica que indique cuántos deben ser utilizados, existen reglas generales donde el número de parámetros a utilizar tiende a ajustarse a la realidad del área de estudio, en cuanto a la disponibilidad de los datos y del equipo adecuado con que se cuente para la recolección y procesamiento de la misma. La tendencia es, sin embargo, a utilizar la combinación de parámetros intrínsecos y extrínsecos. Entre otros, pueden mencionarse cobertura vegetal, lineamientos, elevación, pendiente, índice de humedad, orientación o aspecto de la ladera, suelos y geología. Estos parámetros pueden ser estimados a partir de tres fuentes básicas: mapas temáticos, imágenes de satélite y modelos digitales de elevación (Gómez, et al., 2003). Dentro de la presente investigación los Sistemas de Información Geográfica constituyen una herramienta esencial, ya que los dos métodos que se utilizan para la zonificación de áreas con peligro por procesos de ladera son de carácter predictivo por lo que se hizo necesario el tratamiento de información en formato *raster*¹, con la posibilidad de presentar la información en forma de mapas vinculados a tablas, siendo de gran ayuda en la toma de decisiones. Por otro, lado facilitaron la corrección y actualización de los datos de forma inmediata. Para el manejo de información en el método heurístico cualitativo, se utilizó el ILWIS 3.2 y para el método estadístico bivariado el ArcGis 9.0.

¹ El uso de formato *raster* permite discretizar el área de trabajo en celdas o píxeles que representan una porción de área de tamaño finito y el cálculo área la de los valores de peso a nivel píxel, basándose en las densidades del deslizamiento para cada clase de parámetro.

La Sierra de Guadalupe tiene una forma semi-circular, con un diámetro de 12 a 13 km. mismo que abarca una parte del DF en las inmediaciones de la delegación Gustavo A. Madero y los municipios de Coacalco, Ecatepec, Tlalnepantla y Tultitlán en el Estado de México (Figura 3.1). Limita con la planicie lacustre casi en su totalidad, excepto por el occidente, donde una serie de elevaciones volcánicas residuales se extienden hacia la Sierra de Monte Alto.

3.1.2 Características topográficas.

En cuanto a la topografía, la sierra de Guadalupe se caracteriza por alturas que van de los 2,240 a los 3,000 msnm y pendientes que superan los 35 grados de inclinación. El parteaguas lo forman las cimas principales de los cerros: Pico Tres Padres (3, 000 m), El Picacho (2, 910 m), Pico Moctezuma (2, 900), El Jaral (2, 650 m), además de otros que se disponen en la base, como el Cerro María Auxiliadora (2, 530 m), Cerro Gordo (2 430), Chiquihuite (2, 720 m), Tenayo y otros (Figura 3.1). Por último, hacia el occidente se presenta una serie de elevaciones desmembradas del cuerpo principal (Loma blanca, Las peñas y Tlayacampa) (INEGI, carta topográfica Cuautitlán, 2002).

Las laderas de este conjunto montañoso presentan un grado de alteración sustancial; en especial hacia el núcleo de la sierra donde éstos han perdido su forma original, debido a la erosión remontate hacia el parteaguas que corta los valles, desarrollando numerosos barrancos y circos de erosión, mismos que evidencian el rápido retroceso actual de las laderas. Algunos de estos valles montañosos han pasado a un proceso de erosión lateral y de acumulación; el de mayor dimensión sigue una dirección NE y se sitúa entre los cerros Tenayo y Chiquihuite, con dimensiones de 4.5 por 1.5 km/km² y la profundidad de corte de 100 a 300 m., valores elevados si se considera que el desnivel entre la cimas y la planicie lacustre es de 400-700 m (Lugo, 1990). En general, se trata de un relieve montañoso con una marcada acción erosiva, expresada en valles, barrancos y circos de erosión, consecuencia de las características morfogenéticas (vulcano-tectónico) y geográficas del área de estudio (Figura 3.2).

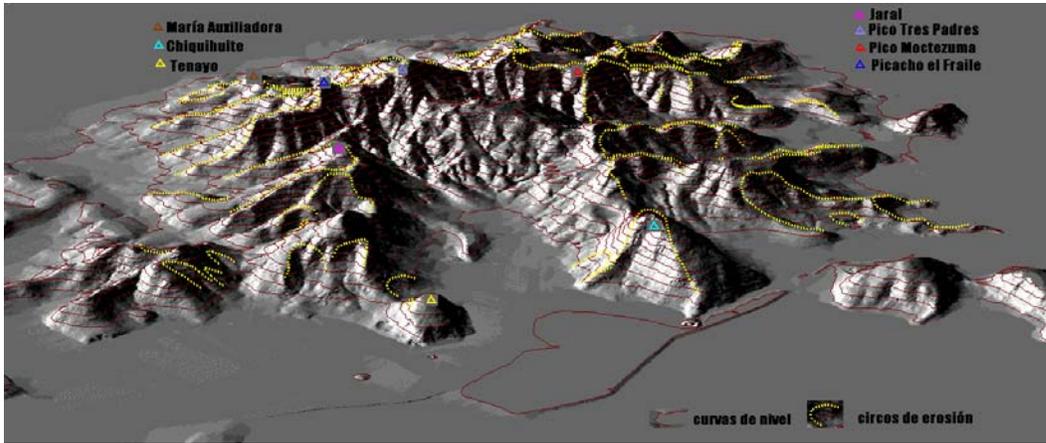


Figura 3.2. Topografía de la Sierra de Guadalupe.

3.1.3.- Suelos.

De acuerdo con la carta edafológica para la República Mexicana escala 1:250 000, realizada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, en el año de 1995, la Sierra de Guadalupe tiene dos grupos principales de suelos, el Feozem Alpico ubicado en el piedemonte y laderas bajas, y en menor proporción los Litosoles, localizados hacia las porciones más elevadas (Figura 3.3).

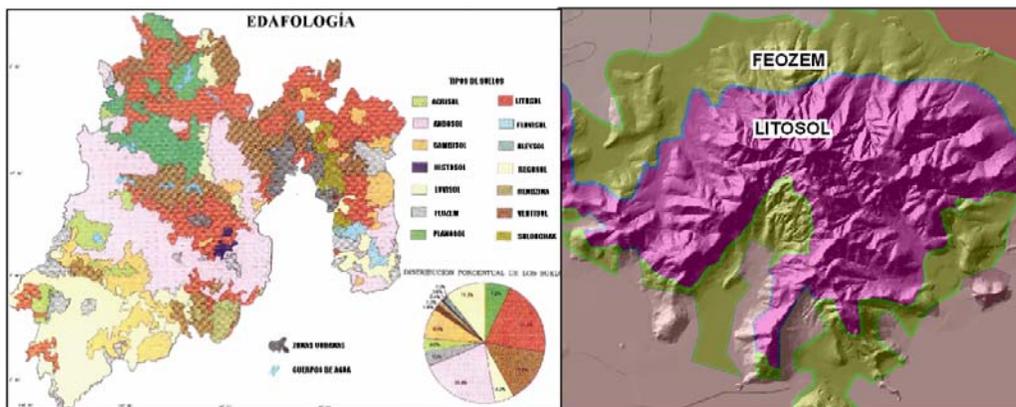


Figura 3.3. Mapa de suelos para el Estado de México y Sierra de Guadalupe. Fuente: del Atlas del Estado de México, Toluca, 1993.

El grupo de los Feozem son suelos con superficie oscura, de consistencia suave y ricos en materia orgánica y nutrientes (INEGI, 1990). Estos suelos se desarrollaron sobre material piroclástico de pómez y ceniza. Los suelos Litosoles se

caracterizan por la presencia de un horizonte muy delgado con una profundidad menor a 10 cm, o ausencia del mismo. El sustrato puede ser rocoso y duro. Este tipo de suelo se encuentra en superficies escarpadas, donde las condiciones del relieve, sobre todo, la pendiente no ha permitido el desarrollo de suelo.

3.1.4 Clima.

Referente al clima, se tomó como base la zonificación climática utilizada para el Valle de México (García, 1982), la cual hace referencia a los siguientes tipos de climas dentro del área de estudio (Figura 3.4).

Hacia la porción noreste-sureste el clima es de tipo $C(w_0)(w)b(i')g$, templado, subhúmedo, con estación seca en invierno y con una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, la temperatura del mes más frío varía entre -3 °C y 18 °C y la temperatura del mes más caliente es de 22 °C. El régimen de lluvia es de verano, principalmente en los meses de junio a septiembre, con registros anuales de 710 y 820 mm, el mes más seco, presenta valores menores de 40 mm (García, 1998. Carta de Climas, escala 1: 1, 000, 000).

En las laderas ubicadas al noroeste de la sierra, el clima es $C(w_1)(w)b(i')g$ templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12 y 22 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18° C, temperatura del mes más cálido bajo 22 °C, y precipitaciones en verano de 600 a 700 mm anuales.

Estos tipos de climas presentan una marcada variación estacional, siendo los meses más cálidos marzo, abril, mayo y junio, disminuyendo hacia los meses de julio a septiembre y los fríos de noviembre a febrero. El período de precipitación es de mayo a octubre, particularmente en los meses de julio y septiembre, que es cuando se presentan las lluvias intensas. Sin embargo, en las últimas décadas las condiciones climáticas han cambiado debido a la acelerada deforestación de la zona, afectando la humedad del terreno, provocando que los materiales pierdan cohesión haciéndolos más vulnerables a los procesos erosivos, tales como los deslizamientos de tierra.

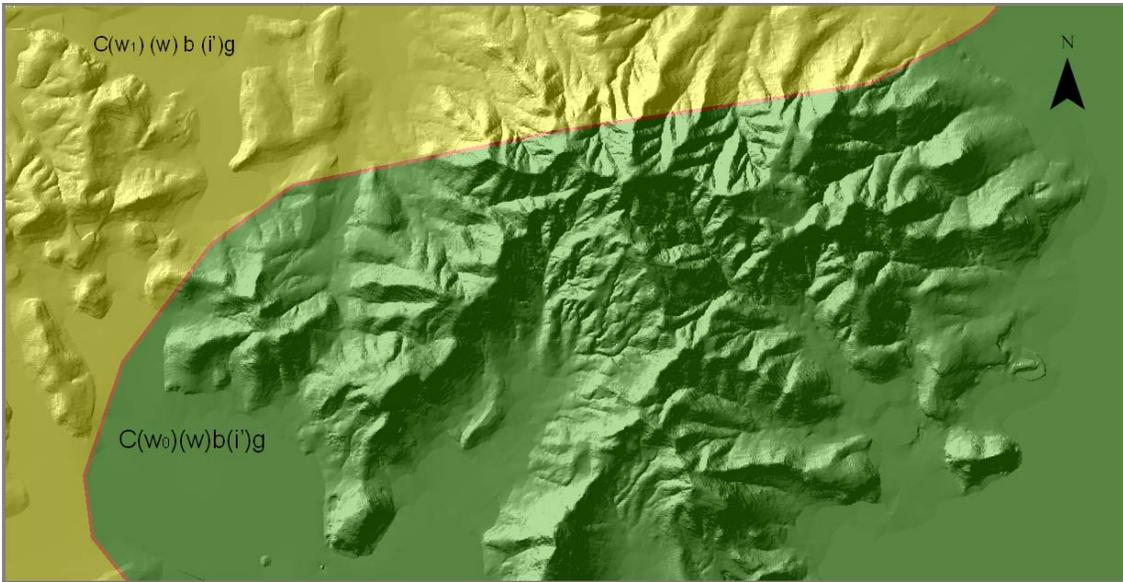


Figura 3.4. Climas de la Sierra de Guadalupe de Carta de Climas. Fuente: García, 1998.

3.1.5 Hidrografía.

La subdivisión hidrográfica utilizada por la Comisión Nacional del Agua para la Cuenca del Valle de México muestra que el área de trabajo pertenece a la región geohidrológica del Panuco, donde la cuenca principal es la del río Moctezuma (Figura 3.5).



Figura 3.5. Cuencas Hidrológicas. Fuente: Comisión Nacional del Agua, 1998.

De manera local los cursos principales de la Sierra de Guadalupe son: Remedios, Tlalnepantla y San Javier, que si bien, no pasan exactamente dentro de sus laderas se encuentran rodeándolas; sin embargo, en épocas de lluvias se forman un gran número de pequeñas corrientes fluviales que socava las laderas y aceleran la generación de valles.

La configuración morfológica de la red fluvial que se observa dentro de la zona de estudio es de dos tipos, la primera pertenece a un patrón de drenaje de tipo radial, el cual está formado por los arroyos intermitentes pluviales, y se forma debido a la morfología a manera de domo que presenta la sierra.

El segundo patrón de drenaje es el dendrítico lo conforman corrientes tributarias de las corrientes de primer orden y segundo orden; se generan principalmente, en las cabeceras de los valles (Figura 3.6), su control morfológico se debe en mayor medida al alto grado de fracturamiento de la roca. En ambos casos, la cobertura de valles está sumamente desarrollada, lo que permite caracterizar al terreno de la Sierra como erosivo fluvial.

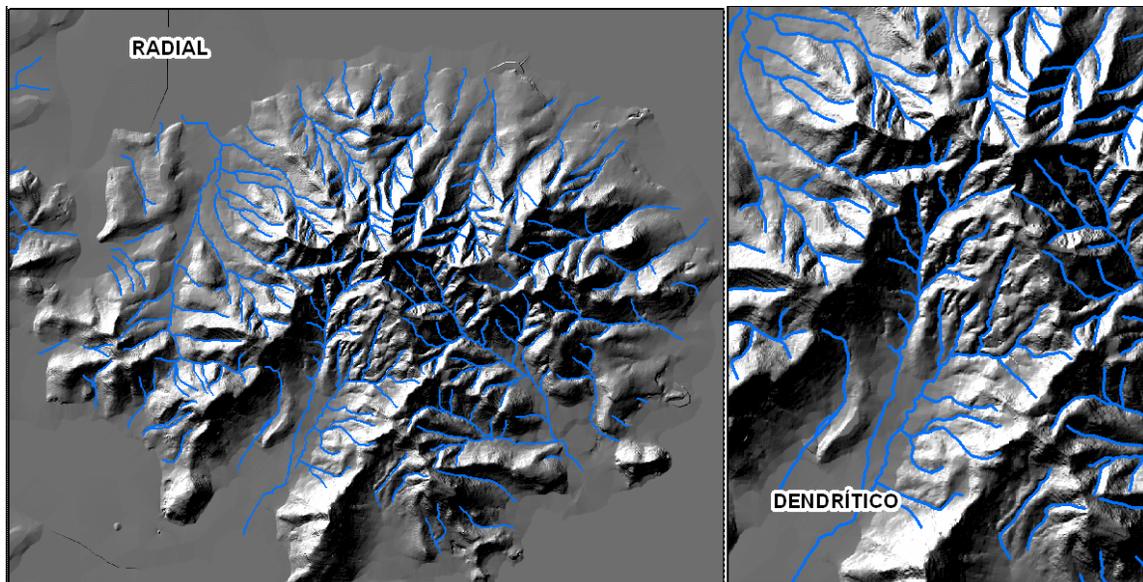


Figura 3. 6. Configuración del drenaje en la Sierra de Guadalupe: Fuente: SEGEOMET, 2004.

3.1.6 Vegetación.

Debido al tipo de clima, variedad de suelos, relieve y actividades humanas, la vegetación que se desarrolla en la Sierra de Guadalupe está representada principalmente por matorral xerófilo y pastizal secundario, asimismo, en las zonas montañosas está presente el bosque de encino y cultivado (Gobierno del Estado de México, 1993) (Figura 3.7).

Dentro del matorral xerófilo (matorral cracicaule, con vegetación secundaria) se pueden encontrar especies de la familia de las cactáceas como los nopales y los cardones, (Gobierno del Estado de México, 1993). De las especies arbóreas son comunes el pirul y el mezquite. Es importante señalar que en la Sierra quedan algunos relictos de matorral de “palo dulce” una especie que, está desapareciendo rápidamente por la presión del crecimiento urbano.

Los pastizales secundarios están determinados por las actividades de perturbación como la desaparición del bosque primario, incendios forestales, pastoreo y aclareo de terreno. Su cobertura es al ras del suelo, con un sólo estrato herbáceo, formado por plantas rastreras. Destacan distintas especies conocidas como zacatón o zacate.

En el bosque de encino las especies dominantes pertenecen a las especies de *Quercus*. El estrato arbustivo está constituido por especies de la familia *Asteraceae* y del género *Comarostaphylis*, que resulta ser el más importante en este estrato. Esta es una de las comunidades vegetales que ha sido más afectada por las actividades humanas, debido a la tala, incendios e invasión de los asentamientos humanos. Tales actividades pueden devenir en un proceso de erosión del suelo por la eliminación de la cubierta vegetal (Gobierno del Estado de México, 1999-2005 a) y b). El bosque cultivado es producto de las actividades de reforestación en la zona. Para ello se han utilizado especies tales como: pino, cedro y eucaliptos (Gobierno del Estado de México, 1999 a).

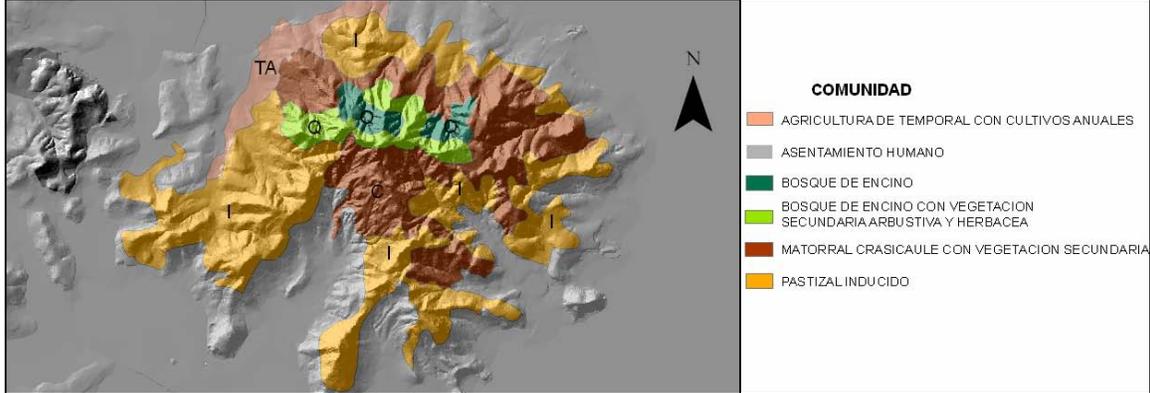


Figura 3.7.- Comunidades de vegetación de la Sierra de Guadalupe. Fuente: Instituto Nacional de Ecología, 2000

Finalmente, el uso de suelo de la Sierra de Guadalupe en los últimos 30 años ha pasado de ser forestal a urbano e industrial, siendo la tendencia general la disminución de la superficie destinada a actividades agrícolas y forestales y el incremento de la superficie ocupada por zonas habitacionales y comerciales (Gobierno del Estado de México, 1999-2005 a y b).

3.2.- GEOLOGÍA.

3.2.1 Geología regional.

La Sierra de Guadalupe forma parte de la Cuenca del Valle de México la cual se origina a partir del emplazamiento de la provincia geológica Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), descrita por Lugo (1984) como una serie de planicies escalonadas, desmembradas por volcanes aislados, pequeños grupos de volcanes y grandes cadenas montañosas. Desde el punto de vista fisiográfico se trata de una alineación montañosa de origen volcánico con orientación Este-Oeste que abarca desde Veracruz hasta Tepic (Demant y Robin 1975) (Figura 3.8).

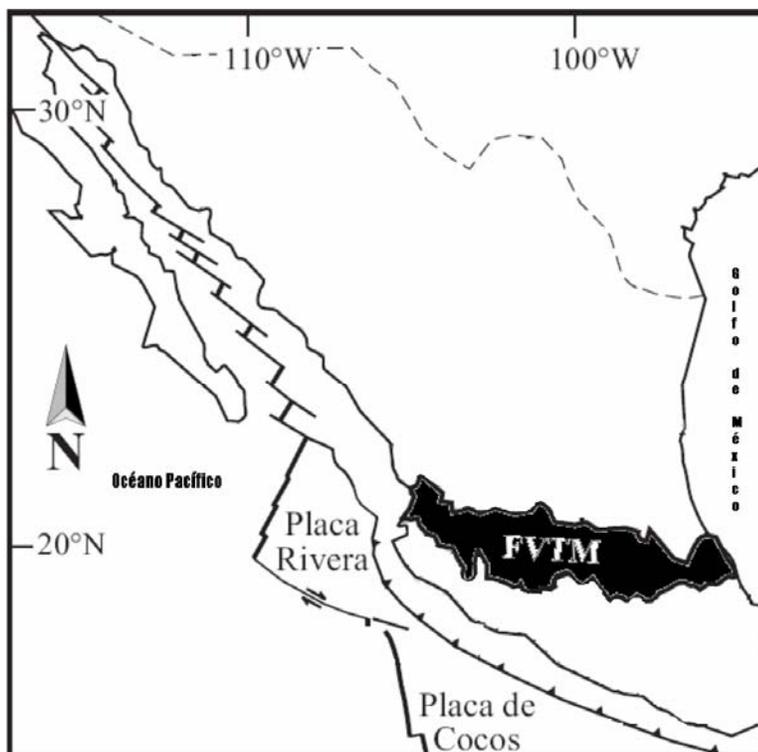


Figura 3.8.- Localización y extensión de la Faja Volcánica Transversal Mexicana. Fuente: Modificado de Alaniz y Samaniego, 2005.

La Faja Volcánica Transmexicana se compone principalmente por rocas ácidas, intermedias y básicas; así como, depósitos piroclásticos, aluviales y lacustres. Su origen inicia en el Oligo-Mioceno (Terciario) y se prolonga hasta el Cuaternario (Demant y Robin 1975); generalmente se considera como resultado de la subducción de las Placas de Cocos y Rivera, debajo de la placa Norteamericana a lo largo de la trinchera Mesoamericana en el Océano Pacífico (García, et al., 2002).

El material piroclástico y corrientes de lava que emanaron de estas estructuras volcánicas en la FVTM inundaron valles, sepultando el antiguo relieve mesozoico y formando cuencas y lagos, como la del valle de México (Mooser 1975), ubicada en la porción centro-oriental del FVTM (Figura 3.9).

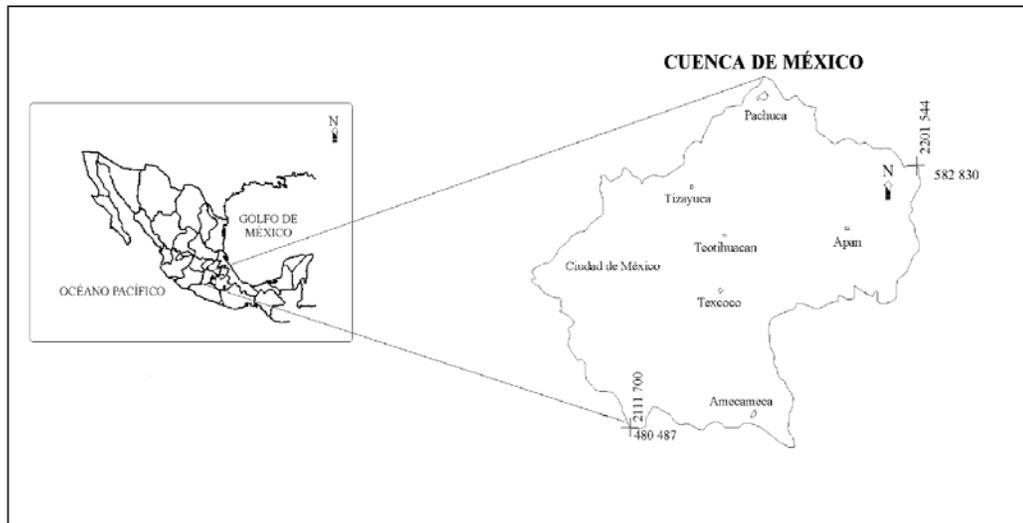


Figura 3.9. Localización de la Cuenca de México. (Modificado de Tapia y López 2001)

Desde el punto de vista morfológico la Cuenca de México consiste en una planicie esencialmente lacustre, localizada a una altitud aproximada de 2, 240 msnm, rodeada por elevaciones montañosas volcánicas de diversas altitudes (la máxima a 5,454 msnm, en el Popocatepetl) y desmembradas en su interior por montañas aisladas y agrupadas en pequeños conjuntos (Lugo, 1990) (Figura 3.10).

De acuerdo con Mooser (1957) la cuenca es el resultado de diferentes fases volcánicas que modificaron el relieve mesozoico siendo siete las más importantes. La primera fase inicia después de la emersión de las formaciones marinas en el eoceno (grupo Tezontlapan), la segunda (grupo Xochitepec) durante el Oligoceno Medio compuesta por lavas intermedias y ácidas, la tercera y cuarta fase (Sierra inferior y sierra superior) desarrolladas en el Oligoceno Tardío y Mioceno principalmente, compuesto por dacitas, la quinta (grupo Guadalupe), inicia a fines del Mioceno y originó efusiones andesíticas y dacíticas, y finalmente la sexta y principios de la séptima (grupo transicional) fases que comprenden el Cuaternario. Finalmente la séptima fase (Grupo Chichinautzin) en el Cuaternario Tardío, hace unos 700 000 años lo que culminó con el cierre de la cuenca caracterizándola como una cuenca endorréica donde se desarrolló un sistema de grandes lagos que propició el relleno de ésta con materiales aluviales (Mooser, 1956).

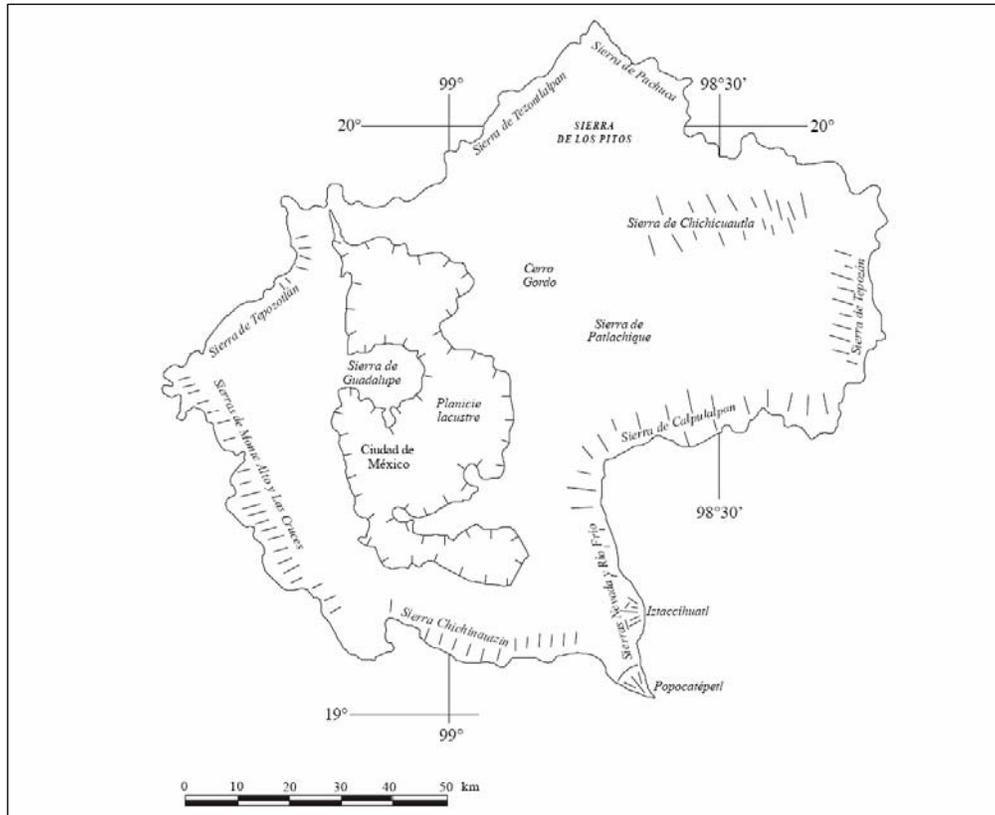


Figura 3.10.- Esquema General de la Cuenca de México. (Tomado de Zamorano et al., 2001).

3.2.2 Geología local.

La estructura de la Sierra de Guadalupe se forma por un conjunto de estratovolcanes sobrepuestos unos a otros, los cuales forman la base. Posteriormente, fueron cubiertos por volcanes menores, estos actualmente forman el relieve de la Sierra. Desde el punto de vista geomorfológico consisten, de estructuras dómicas compuestas de andesitas y dacitas, que presentan una distribución circular cuyo centro de actividad se encuentra al norte de la fosa de Cuauhtepc (Lugo y Salinas, 1996).

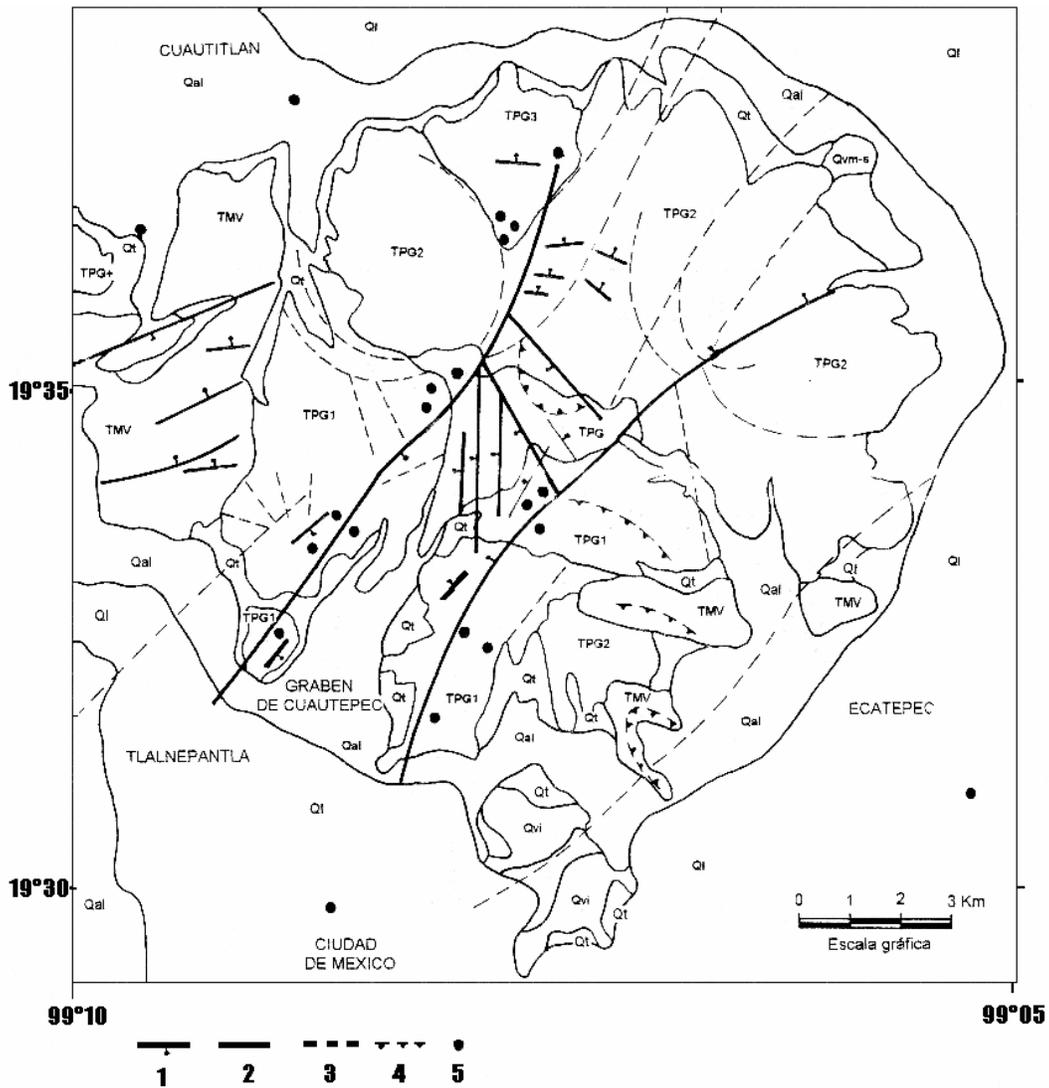
La Sierra de Guadalupe es considerada como una de las estructuras más antiguas de la Cuenca de México, Mooser (1975) le atribuyó una edad del Mioceno temprano. En 1992, con base en un mejor conocimiento del subsuelo de la cuenca, el mismo autor la considera del Plioceno, señalando finalmente una

edad oligocénico-miocénica para la porción de Barrientos, y pliocénica al oriente de ésta. En el mapa geológico presentado por Frausto (1998) se muestra la división de edades geológicas que van de Poniente a Oriente pasando de Oligoceno a Mioceno y a Plioceno Superior (Figura 3.11).

De acuerdo con Hernández y Rodríguez (1999) la Sierra se forma esencialmente por dos tipos de actividad volcánica; una en la cual los eventos explosivos fueron de gran intensidad y representan las etapas iniciales de los edificios mayores. Los volcanes principales son de tipo compuesto, originados por poderosas erupciones explosivas, que culminaron con actividad extrusiva y efusiva. Ejemplo de ello son los volcanes Guerrero, Zacatenco, Jaral, María Auxiliadora, Los Díaz, Tres Padres y Moctezuma (Lugo y Salinas, 1996). El otro tipo se forma por derrames de lava (procesos efusivos) escasos y de corta extensión. La presencia de estructuras volcánicas dómicas posiblemente provino, entre otros factores, por la acidez y la alta viscosidad del magma originado.

Lugo y Salinas (1996) mencionan que la actividad volcánica de la Sierra de Guadalupe debió haber iniciado en la zona occidente, con la formación de la fosa Barrientos, donde se encuentran las elevaciones más erosionadas y las que Mooser et al (1992), consideran del Mioceno tardío. A estos eventos le siguió la formación Cuauhtepac en el Plioceno Temprano, y posteriormente la fosa con el mismo nombre, ésta surgió junto con una asociación de volcanes compuestos, que se derivaron de poderosas erupciones explosivas culminando con actividad extrusiva y efusiva; ejemplo de ello son los volcanes Guerrero, Zacatenco, Jaral, María auxiliadora, Tres Padres y Moctezuma. Posteriormente surgió el núcleo cubriendo las primeras estructuras volcánicas. Finalmente fueron emplazados los domos volcánicos de Cerro Gordo, Chiquihuite, Tenayo, y Tepeyac, ubicados en la periferia de la sierra

Por último Lugo y Salinas (1996), describen una erupción aparentemente final en la Sierra de Guadalupe en el pleistoceno tardío, con un poco de escoria, único en la zona, ubicado en el poblado de Guadalupe Victoria.



Mapa geológico-estructural de la zona en estudio: Unidades geológicas. TMV vulcanitas ácidas del Mioceno; TPG, basalto Cuauhtepc del Mioceno; TPG+, 3, 2, 1, andesitas, dacitas y riolitas del Plioceno; Qvi, vulcanitas intermedias y básicas del Cuaternario inferior; Qt, tobas y depósitos de flancos del Cuaternario; Qvm-s, vulcanitas básicas e intermedias del Cuaternario medio al Superior; Qal, depósitos aluviales del Cuaternario superior, y Ql, depósitos lacustres del Cuaternario superior. Símbolos estructurales y sísmicos: 1. Falla normal, mostrando la dirección del bloque hundido; 2. Falla transcurrente, mostrando la dirección relativa de desplazamiento; 3. Límite de las unidades geológicas; 4. Lineamientos inferidos; 5. Calderas.

Figura 3.11.- Mapa geológico de la Sierra de Guadalupe. Fuente: Frausto, 1998 .

3.2.3 Geología estructural.

La Sierra de Guadalupe se localiza en un espacio donde las condiciones estructurales consisten de tres partes dispuestas de poniente a oriente.

- a) La Caldera de Atizapán de Zaragoza.
- b) La Sierra de Barrientos
- c) La Sierra de Guadalupe

Al poniente se localizo la caldera de Atizapán, la cual consiste de un antiguo volcán colapsado, el cual se encuentra afectado por la margen oeste de la fosa Mixhuca, que se extiende al SSE por debajo de la Ciudad de México. Al oriente la Sierra de Barrientos; está compuesta de rocas volcánicas ácidas, principalmente domos, la cual está afectada por la fosa de Barrientos, considerada como una estructura del Mioceno Superior con una dirección ENE. Esta fosa en su extensión poniente, corta la Caldera de Atizapán por ser más antigua; y al oriente se extiende por debajo de la Sierra de Guadalupe que por ser ésta última más joven (Plioceno Superior), no sufre afectación alguna. Algunos elementos micénicos afloran de nuevo al sur oriente-oriente, constituyendo el cerro Tepeyac y otras pequeñas elevaciones al Norte (Mooser, et. al. 1992).

Dentro de la Sierra de Guadalupe, se encuentra una serie de fallas normales que la seccionan, algunas son de composición lateral izquierda (Frausto ,1998) las cuales forman estructura de pilar y fosa siendo la más importante la de Cuauhtepec (Figura 3.11) formada en el Plioceno temprano durante el emplazamiento de los domos de Tenayuca y Chiquihuite, pero que cesó su hundimiento antes de la formación Pico del Águila (Mooser, et. al. 1992).

Los sistemas de fallas y fracturas descritas, deben su origen a fuerzas verticales; ya que la Sierra de Guadalupe, a primera vista (forma circular), se forma en un foco volcánico en el cual hubo consecutivamente emisiones de lavas y brechas asociadas a hundimientos.

4.- INESTABILIDAD DE LADERAS EN LA SIERRA DE GUADALUPE.

4.1 Procesos de ladera en México.

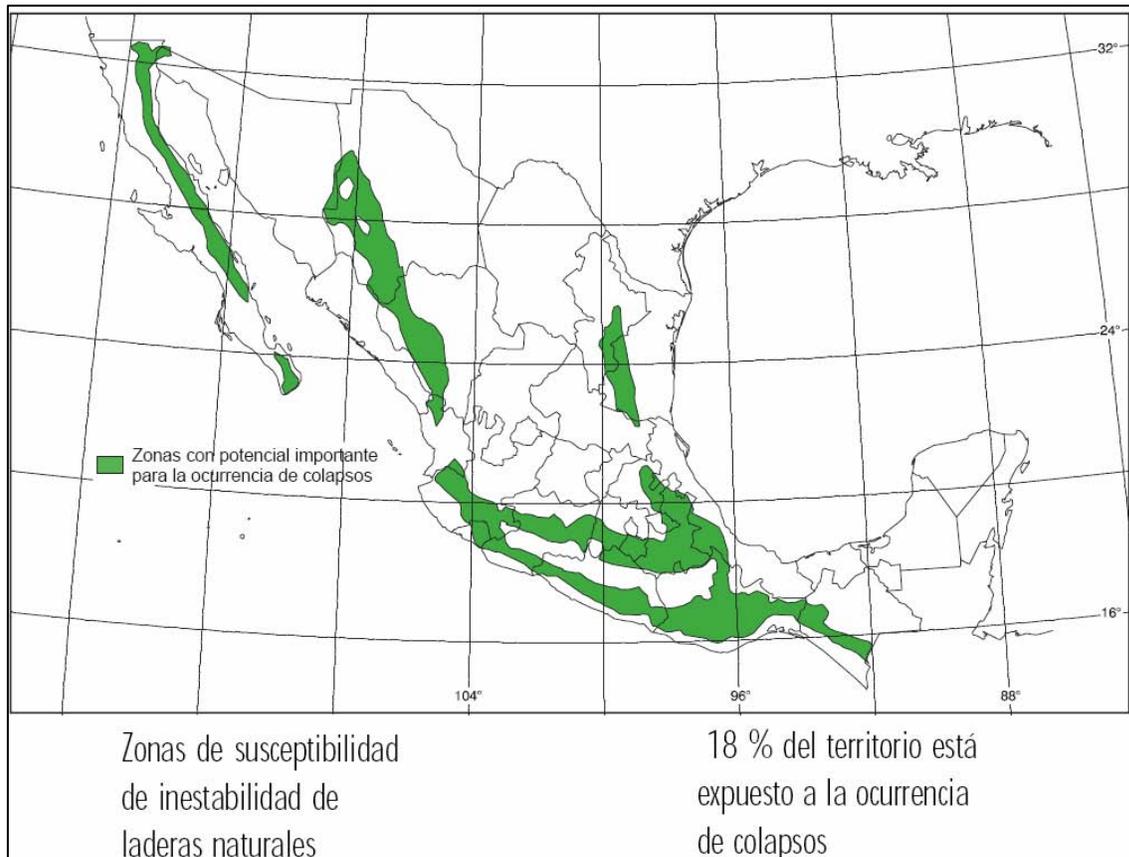
Si bien la actividad de movimiento del material en las laderas es un proceso natural de erosión, en las últimas décadas este fenómeno ha ido en aumento convirtiéndose en una de las causas principales de riesgo natural en determinadas regiones, con efectos en la infraestructura, vivienda, vialidades, etc. (Soto, et al., 2002).

El conocimiento de estos fenómenos en México es muy importante, ya que se trata de una zona con gran actividad sísmica, minera; así como un relieve compuesto por sistemas montañosos de gran altitud donde se lleva a cabo construcción de caminos, viviendas en zonas de fuerte pendiente o sobre materiales inestables y por último, presenta periodos de lluvias largos (tres meses aproximadamente) que generan o intensifican los movimientos (Oropeza, et al., 1998). Y al contrario de una regeneración del medio las condiciones en las laderas se agravan cada vez más por la deforestación, erosión, intemperismo y por la alteración de las condiciones de drenaje y equilibrios originales. Actualmente las consecuencias por procesos de ladera se ven incrementadas por la presencia de asentamientos humanos irregulares.

Un ejemplo reciente de este tipo de fenómenos se refiere a los derrumbes ocurridos por las intensas precipitaciones de los meses de septiembre y octubre de 1999 en los estados de Puebla, Hidalgo y Veracruz. Solo en la Sierra Norte de Puebla, las consecuencias fueron particularmente catastróficas ya que un gran número de deslizamientos, caídas de rocas y flujos de lodo, que ocasionaron daños materiales por más de 2, 000 millones de pesos y 44, 000 damnificados; y en la colonia La Aurora la pérdida de 120 vidas, además de otras víctimas en colonias aledañas (Campos y Palafox, 2002). Este tipo de casos hace evidente que los fenómenos por procesos de ladera, pueden ser potencialmente desastrosos.

En la Figura 4.1 se muestran una zonificación de áreas con alta potencialidad a presentar inestabilidad de laderas en la República Mexicana (CENAPRED, 2001).

Figura 4.1 Zonificación de áreas inestables en la República Mexicana. Fuente. CENAPRED 2001.



Los estudios sobre procesos de ladera en México permiten la determinación y delimitación cartográfica de las áreas con este tipo de riesgo dentro de los planes de ordenamiento territorial, con objeto de utilizar los documentos resultantes como herramientas fundamentales en la toma de decisiones al planificar el uso del suelo. Además sirve para tomar las medidas preventivas y de mitigación que se requieran. Otro aspecto que justifica este tipo de estudios es que existen pocos y, en la mayoría de los casos, se efectúan posteriores a la ocurrencia de un desastre y casi siempre son de carácter local (Oropeza, et al., 1998).

4.2. Problemática en la Sierra de Guadalupe.

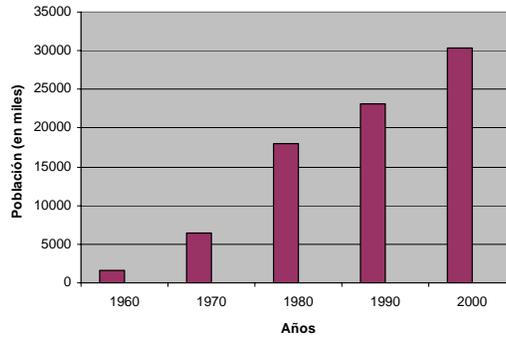
Durante la segunda mitad del siglo XX el Valle de México experimentó un proceso sin precedente de crecimiento, tanto de la población como de la ocupación de su territorio, obedeciendo a la política seguida desde los años cincuentas que estimuló el desarrollo industrial propiciando condiciones de trabajo y por consecuencia el establecimiento de nuevos pobladores, en un momento en que las tasas de reproducción de la población alcanzaba máximos históricos. Algunas de las zonas que fueron influenciadas por este fenómeno de expansión fueron los municipios del estado de México limítrofes al Distrito Federal (Naucalpan, Tlanepantla, Tultitlán, Coacalco junto con la delegación Gustavo A. Madero), que comenzaron a recibir fuertes inversiones industriales, y por lo tanto el incremento del número de habitantes por el trabajo que ofrecían dicha actividad económica, generando la urbanización en terrenos irregulares y de forma desordenada.

En la actualidad el crecimiento poblacional y urbano de los municipios antes mencionados ha sido de manera exponencial (Tabla 4.1 y Gráfica 4.1); y la concentración de viviendas de forma desordenada y sin planeación, hacia las laderas altas de la Sierra de Guadalupe, en zonas que pueden presentar peligro por inestabilidad de laderas.

Tabla 4.1. Población total de 1960-2000 de los municipios que se localizan en la Sierra de Guadalupe.

MUNICIPIO	Total de la población 1960	Total de la población 1970	Total de la población 1980	Total de la población 1990	Total de la población 2000
Coacalco de Berriozábal	3984	13197	97353	152082	252555
Ecatepec de Morelos	40815	216408	784507	1218135	1622697
Tlanepantla de Baz	105447	366935	778173	702807	721415
Tultitlán	15479	52317	136829	246464	432141
Total	165725	648857	1796862	2319488	3028808

Fuente: Concha, 2006.



Gráfica 4.1. Población total los cuatro municipios correspondientes a la Sierra de Guadalupe. Fuente: Concha, 2006.

Varios deslizamientos se han registrado en la historia reciente dentro del territorio de la delegación Gustavo A. Madero. En el año 2000 en la zona de Cuauhtepec, en la época de lluvias cayeron varios bloques (Concha, 2006), y en el 2004 el SEGEOMET, identificó y describió 192 sitios con procesos de ladera y en estado potencial, correspondientes a los municipios del Estado de México. Los distintos tipos de mecanismos y el área afectada se muestran en la tabla 4.2

Tabla 4.2 Sitios con deslizamientos a nivel municipal.

Municipio	Mecanismo de deslizamiento	Área (m ²)	Número de sitios identificados
Tlalnepantla Oeste	Desprendimiento	40722.58	1
	Rodamiento	269898.90	4
	Deslizamiento	44777.36	2
	Volteo	122023.68	7
	Volteo y desprendimiento	28106.00	1
	Volteo, desprendimiento y deslizamiento	94581.60	3
	Volteo y rodamiento	363.60	7
	Flujo	11041.47	4
Tlalnepantla (Este)	Rodamiento	254533.51	8
	Deslizamiento	29100.24	1
	Volteo	349982.00	16
	Volteo y rodamiento	345.479.00	8
	Flujo	11366.59	2
Tultitlán	Rodamiento	372933.30	7
	Deslizamiento	35703.34	1
	Volteo	919102.80	15
	Volteo y rodamiento	425039.91	3
	Deslizamiento y rodamiento	133377.86	1
	Flujo	8797.60	2
Coacalco	Desprendimiento	54979.29	1
	Rodamiento	449931.60	11
	Deslizamiento	134257.81	2
	Volteo	275442.02	8
	Volteo, desprendimiento, deslizamiento	46755.98	1
	Volteo y rodamiento	50359.96	2
Ecatepec	Desprendimiento	104998.21	3
	Rodamiento	565500.35	23
	Deslizamiento	42684.16	2
	volteo	800378.06	36
	volteo, desprendimiento, deslizamiento	176187.23	3
	volteo y rodamiento	172648.95	4
	flujo	1563.73	3
Total		6027485.169	192

Fuente: SEGEOMET 2004.

Algunos ejemplos de cómo afecta a los municipios de la Sierra de Guadalupe este tipo de fenómenos, son:

La zona este del Cerro Chiquihuite, en el municipio de Tlalnepantla; donde se presenta fuerte fracturamiento hacia el sur y oriente de las laderas, generando “volteo” y caída de grandes bloques de roca (Figura 4.2).

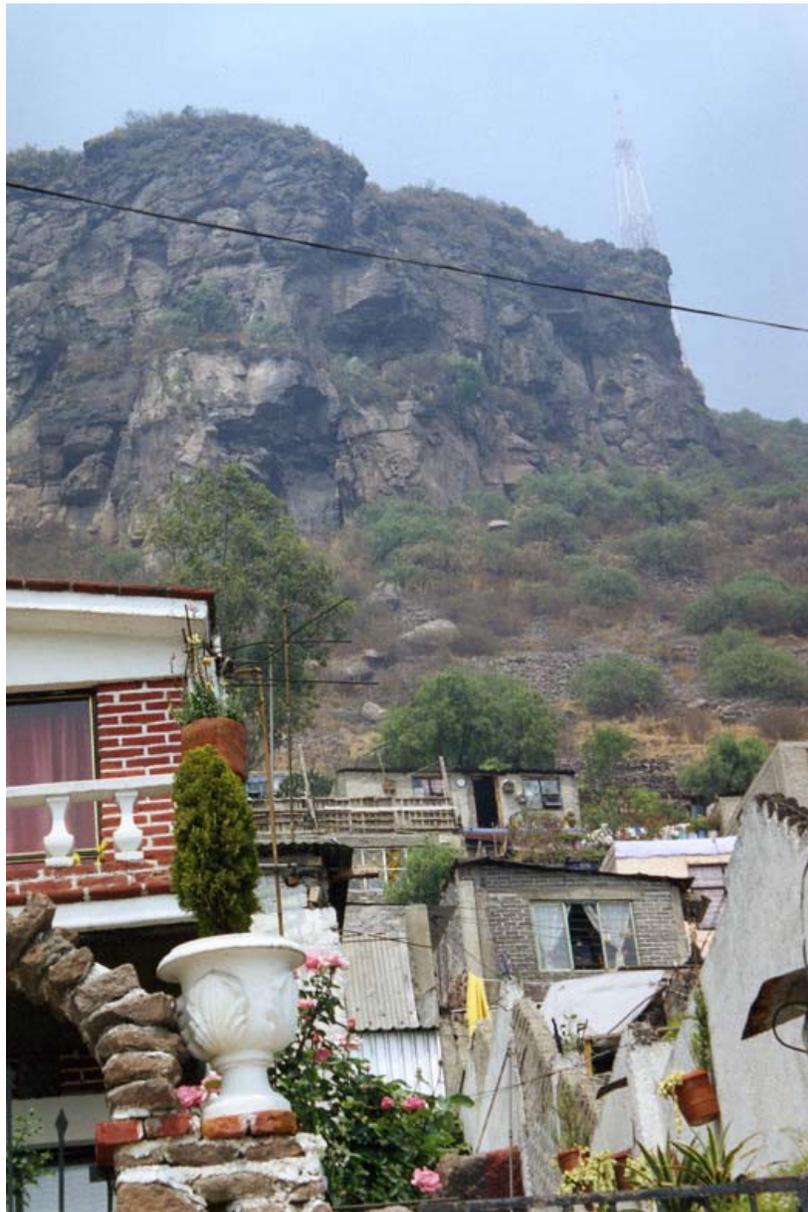


Figura 4.2. Vista del flanco poniente de Chiquihuite. Fuente: Concha, 2006.

La zona de la cantera vieja del cerro el Tenayo, en el municipio de Tlalnepantla, donde existe fuerte fracturamiento lo que provoca caída de bloques y rocas (Figura 4.3).



Figura 4.3. Cantera vieja del cerro el Tenayo. Fuente: Concha, 2006.

En el municipio de Ecatepec en las laderas del Cerro Gordo, donde los tipos de mecanismos más frecuentes son deslizamientos y caídas de rocas (Figura 4.4).



Figura 4.4.- Vista del Cerro Gordo. Fuente: Concha, 2006.

Con base a las condiciones que se presentan en éstas zonas y para mejorar el conocimiento de los procesos de ladera 2005 en la Sierra de Guadalupe se propuso el proyecto “Caracterización Geomecánica y Modelación Numérica de los Deslizamientos Críticos de la Sierra de Guadalupe” financiado por el FOPREDEN (Fondo de Prevención de Desastres Naturales) del cual forma parte este trabajo, donde se realiza un nuevo mapa de susceptibilidad de peligro por procesos de ladera, pero ahora desde un punto cuantitativo en el que se pretende mostrara una mejor jerarquización de las áreas de peligro, y diera una mejor perspectiva a las autoridades del Estado de México de cómo abordar esta problemática.

5.- PROCESAMIENTO Y APLICACIÓN DEL MÉTODO HEURÍSTICO Y MÉTODO BIVARIADO, EN LA SIERRA DE GUADALUPE.

En este capítulo se describen las dos metodologías utilizadas para la zonificación de peligro por procesos de ladera en la Sierra de Guadalupe. La primera consistió en un método cualitativo heurístico realizado por el SEGEOMET en el año de 2004. Dentro del SIG ILWIS 3.2 ellos realizaron una combinación de mapas de parámetros (altimétrico, pendientes, precipitación, densidad de drenaje y densidad de lineamientos) a los cuales les asignaron una calificación o valor de peligro basándose en su experiencia y conocimiento, tanto de los parámetros, como de la zona de estudio. En general, los pasos seguidos en este método se muestran en la figura 5.1.

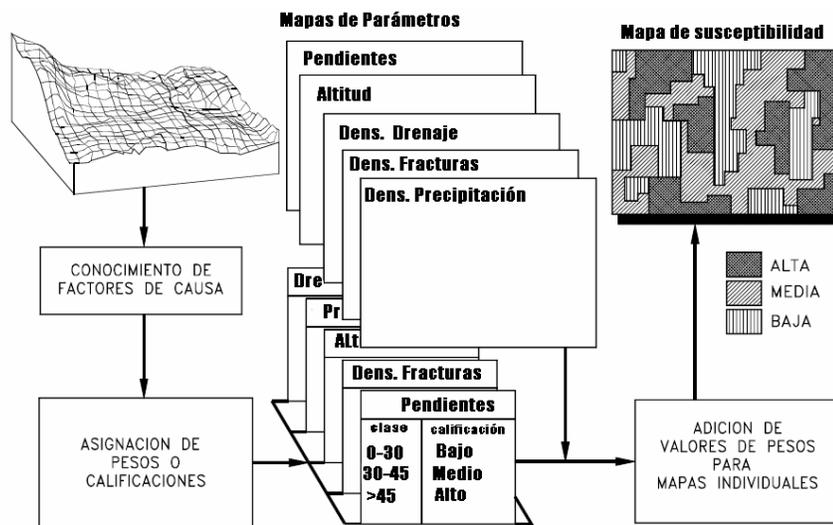


Figura 5.1. Método heurístico. Fuente: Van Westen, 1999.

De acuerdo con Van Westen y colaboradores (1999), el problema de esta metodología radica en de la asignación de los pesos a cada clase de parámetro, ya que esto se hace de forma cualitativa confiando únicamente en los conocimientos y experiencia del investigador, sobre el tema y la zona de trabajo. Sin embargo el método heurístico de combinación de mapas es una herramienta útil en estudios de escalas regionales de reconocimiento, ya que aminora la

formulación de reglas y designaciones necesarias de un estudio donde se deba hacer un inventario de deslizamientos, el cual puede consumir mucho tiempo. Por esa razón, se recomienda hacer una extrapolación cualitativa de las conclusiones obtenidas en el método heurístico.

La segunda metodología se trata de un análisis estadístico bivariado, en el cual el peligro se calcula a partir de la asignación de valores de peso a cada clase (por ejemplo unidad litológica, rango altimétrico, etc.) de los mapas parámetro (por ejemplo altimetría, pendientes, etc.). El valor de peso se define a partir de la densidad de deslizamiento por clase entre la densidad de deslizamientos en toda el área (Çevik y Topal, 2003). Los pasos a seguir en este método se muestran en la figura 5.2.

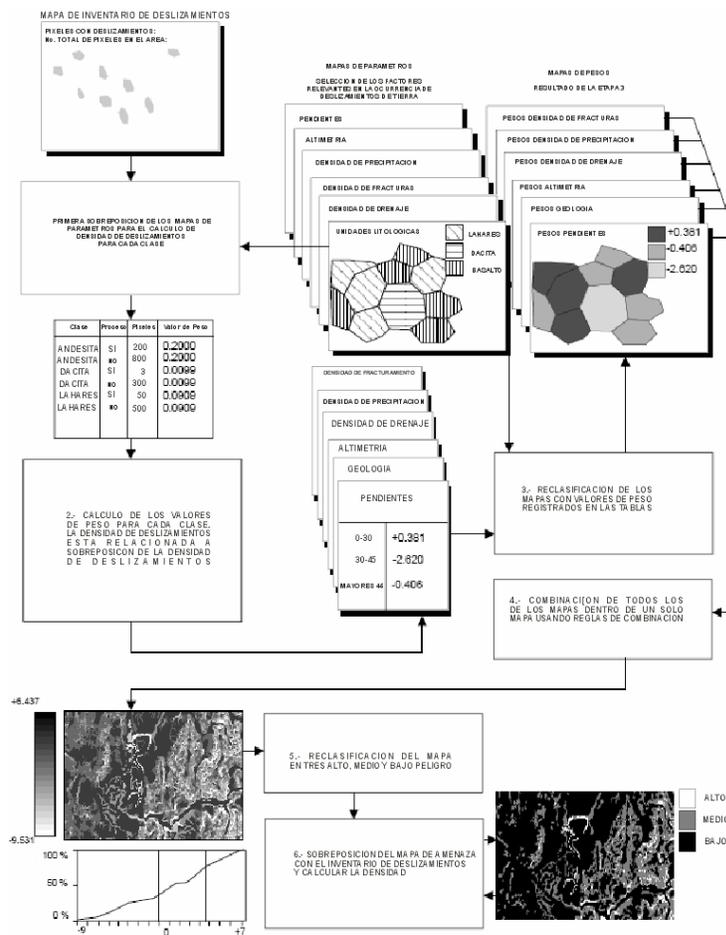


Figura 5.2. Método estadístico bivariado. Fuente: Van Westen, 1999.

La ventaja principal del método bivariado es que la determinación de valores de peso se hace a partir de un análisis de frecuencia estadística resultado de la coincidencia entre cada mapa de factor y la ocurrencia de deslizamientos en el pasado.

El método bivariado tiene algunos inconvenientes. Uno de éstos es la tendencia de simplificar los factores que condicionan los deslizamientos, tomando sólo aquellos que relativamente pueden ser identificados fácilmente en un área, tal como; el ángulo de la pendiente o la litología. Otro problema se relaciona con la generalización, pues se asume que los deslizamientos suceden bajo la misma combinación de factores a través del área del estudio (ausencia de deslizamientos en una clase de parámetro). El tercer problema está relacionado con el hecho de que cada tipo de deslizamiento tendrá su propio conjunto de factores causales que se deben analizar individualmente (Van Westen, 2000).

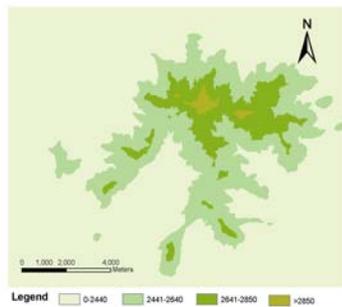
Sin embargo, y a pesar de estas limitaciones, se decidió tomar este método de análisis como una mejora a la definición del peligro por las siguientes razones:

- a) Es un análisis cuantitativo que está en el siguiente orden de complejidad al heurístico.
- b) Proporciona información de susceptibilidad de deslizamientos con base en un análisis de frecuencia de datos.
- c) La información de los mapas de parámetros y la subdivisión de las clases con las que se contaba era muy general, lo que limitaba la aplicación de un método más complejo y con necesidad de mayor definición en los datos, como en el método estadístico multivariado.
- d) Integrar y aprovechar la información que proporcionó el inventario de deslizamientos, el cual no fue incluido en el análisis heurístico.

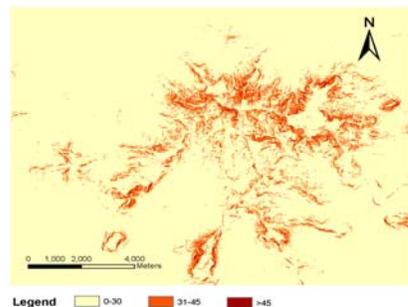
5.1. Metodología del mapa cualitativo heurístico para la Sierra de Guadalupe.

A continuación se describe un resumen de los pasos seguidos para la confección de los mapas, el cual está descrito de manera específica en el informe final elaborado por el SEGEOMET sobre “Evaluación y zonificación de los peligros geológicos por deslizamiento en las laderas de la Sierra de Guadalupe, Estado de México” basado en el cálculo y modelación dentro del Sistema Información Geográfica ILWIS ver. 3.2.

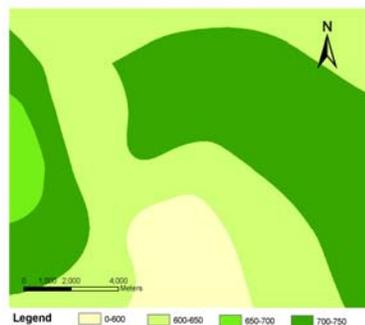
El mapa se generó a partir de un análisis local, cuya área fue delimitada con base en trabajo de gabinete (fotointerpretación y revisión bibliográfica) y datos levantados en campo. Para dicho análisis el SEGEOMET generó los siguientes mapas *raster* o mapas parámetro: a) altimétrico, b) pendientes, c) precipitación, d) densidad de drenaje, e) densidad de fracturas (Tabla 5.1 y Figura 5.3). Cabe resaltar que estos parámetros y las clases en las que se dividieron los rangos fueron definidos por el SEGEOMET sin ningún criterio metodológico en su selección.



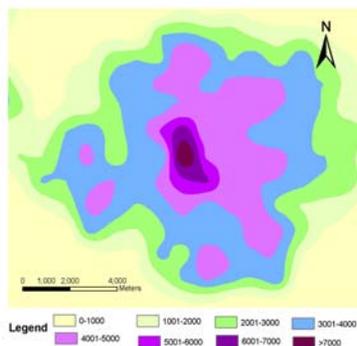
a) Mapa altimétrico



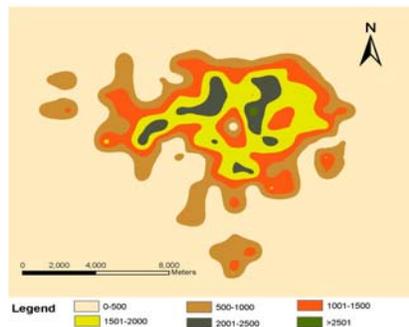
b) Mapa de pendientes



c) Mapa de precipitación



d) Mapa de densidad de drenaje



d) Mapa de de precipitación

Figura 5.3. Mapas de parámetros. Fuente: SEGEOMET, 2004

Tabla 5.1. Confección de los mapas parámetro utilizados por el SEGEOMET 2004 para el mapa de peligros.

Parámetro	Clases	Observaciones
Densidad de Fracturamiento	km/km ² 0 a 500 m/kmm ² , 501 a 1000, 1001 a 1500, 1501 a 2000, 2001 a 2500 y mayores a 2500	Generado a partir de las fracturas, fotointerpretadas de las fotografías aéreas, escala 1:75 000, imagen de satélite y modelo de relieve sombreado de la zona de estudio. Los rasgos lineales fueron medidos en superficies de un km ² y el resultado fue un archivo de puntos el cual fue interpolado con el método Kriggin, obteniendo finalmente el mapa de densidad
Altimétrico	Metros 0 a 2440 2441 a 2540 2641 a 2850 mayores de 2850	Generado a partir del MDT. La información base fueron las curvas de nivel 1:150, 000 con espaciamiento cada 10 metros. Los rangos originales fueron de 8 clases, remuestreados en 4 para el análisis y modelamiento.
Precipitación	Milímetros 0 a 600 600 a 650, 650 a 700, 700 a 750, 750 a 800 mayores de 800	Generado a partir de los datos de lluvia de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio. La obtención del mapa fue a partir de un archivo de puntos con valores de precipitación con referencia espacial, estos datos fueron interpolados utilizando el método de Kriging obteniendo el mapa final de rangos.

Parámetro	Clases	Observaciones
Pendientes	grados 0 a 30 31 a 45 mayores de 45)	Generado a partir del MDT. Del mapa original con cinco rangos solo se tomaron 3
Densidad de Drenaje	km/km2 0 a 1000 2000 a 3000, 3000 a 4000, 4000 a 5000, 5000 a 6000, 6000 a 7000, mayores a 7000.	Generado a partir de los datos vectoriales de ríos (INEGI), complementados con información inferida de la carta topográfica, se realizó el cálculo de la cantidad de corrientes por km2 dando como resultado un mapa de puntos que posteriormente fue interpolado por el método de Krigin, generando el mapa de rangos de densidad de drenaje.

Una vez que se obtuvieron los mapas base (altimétrico, pendientes, precipitación, densidad de drenaje y densidad de fracturas), en formato raster se realizó un cruce de mapas (SEGEOMET, 2004) y el resultado fue una serie de tablas de datos, las cuales mostraban la combinación de las clases cada dos parámetros; dichas tablas fueron analizadas por los expertos, y a cada combinación de clases le asignaron una categoría de alta, media o de baja influencia en el fenómeno de deslizamientos, como se muestra en la tabla 5.2.

5.2. Valores asignados por los expertos a cada combinación de las clases de parámetro.

Pendientes en grados	Fracturamiento	Calificación de peligro
De 0 a 30	De 0 a 500	Bajo
De 0 a 31	De 501 a 1000	Bajo
De 0 a 32	De 1001 a 1500	Bajo
De 0 a 33	De 1501 a 2000	Bajo
De 0 a 34	De 2001 a 2500	Bajo
De 0 a 35	Mayores de 2501	Bajo
De 31 a 45	De 0 a 500	Bajo
De 31 a 45	De 0 a 501	Bajo
Mayores de 45	De 0 a 500	Bajo
De 31 a 45	De 1001 a 1500	Medio
De 31 a 45	De 1501 a 2000	Medio
Mayores de 45	De 500 a 1000	Medio
De 31 a 45	De 2001 a 2500	Alto
De 31 a 45	Mayores de 2501	Alto
Mayores de 45	De 1001 a 1500	Alto

En este trabajo sólo se muestra un ejemplo de cada tabla, debido a que en el reporte generado por SEGEOMET no se anexan todas, ya que se consideras archivos previos al mapa de susceptibilidad.

Con la información de las tablas de calificación de influencia se elaboraron nueve mapas previos (un mapa por tabla) generados dentro del SIG (ILWIS, 3.2) utilizando álgebra booleana, para construir enunciados, como el que se presenta a continuación, en el cual se asigna la calificación de alto medio y bajo peligro de acuerdo a las variables obtenidas de cada una de las tablas:

P_DREN_BAJO:=IFF((P_DREN="De 0° a 30° * De 0 a 1000 m.")OR(P_DREN="De 0° a 30° * De 1000 a 2000 m.")OR(P_DREN="De 0° a 30° * De 2000 a 3000 m.")OR(P_DREN="De 0° a 30° * De 3000 a 4000 m.")OR(P_DREN="De 0° a 30° * De 4000 a 5000 m.")OR(P_DREN="De 0° a 30° * De 5000 a 6000 m.")OR(P_DREN="De 0° a 30° * De 6000 a 7000 m.")OR(P_DREN="De 0° a 30° * Mayores a 7000 m.")OR(P_DREN="De 31° a 45° * De 0 a 1000 m.")OR(P_DREN="De 31° a 45° * De 1000 a 2000 m.")OR(P_DREN="De 31° a 45° * De 2000 a 3000 m.")OR(P_DREN="De 31° a 45° * De 3000 a 4000 m."),"BAJO",?)

La manera de interpretar el enunciado es la siguiente: Si tenemos una pendiente de 0° a 30° y una densidad de drenaje de 0 a 1000 m, entonces, se le clasificaba como un peligro bajo, y así con las siguientes combinaciones.

Partiendo de la información obtenida en el paso anterior, se realizó nuevamente cruce más de mapas para obtener una tabla que mostrara todas las combinaciones posibles de las categorías altas, medias y bajas (Tabla 5.3).

Altimetría y Pendiente	Precipitación y densidad de fracturas	Densidad de fracturas y Densidad de drenaje	Clasificación de Peligro
Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Bajo	Bajo	Medio	Bajo
Bajo	Bajo	Alto	Bajo
Medio	Bajo	Bajo	Bajo
Medio	Bajo	Medio	Medio
Medio	Bajo	Alto	Medio
Medio	Bajo	Bajo	Medio
Alto	Bajo	Medio	Medio
Alto	Alto	Bajo	Bajo

Tabla 5.3. Tipos de categorías obtenidas del algebra booleana

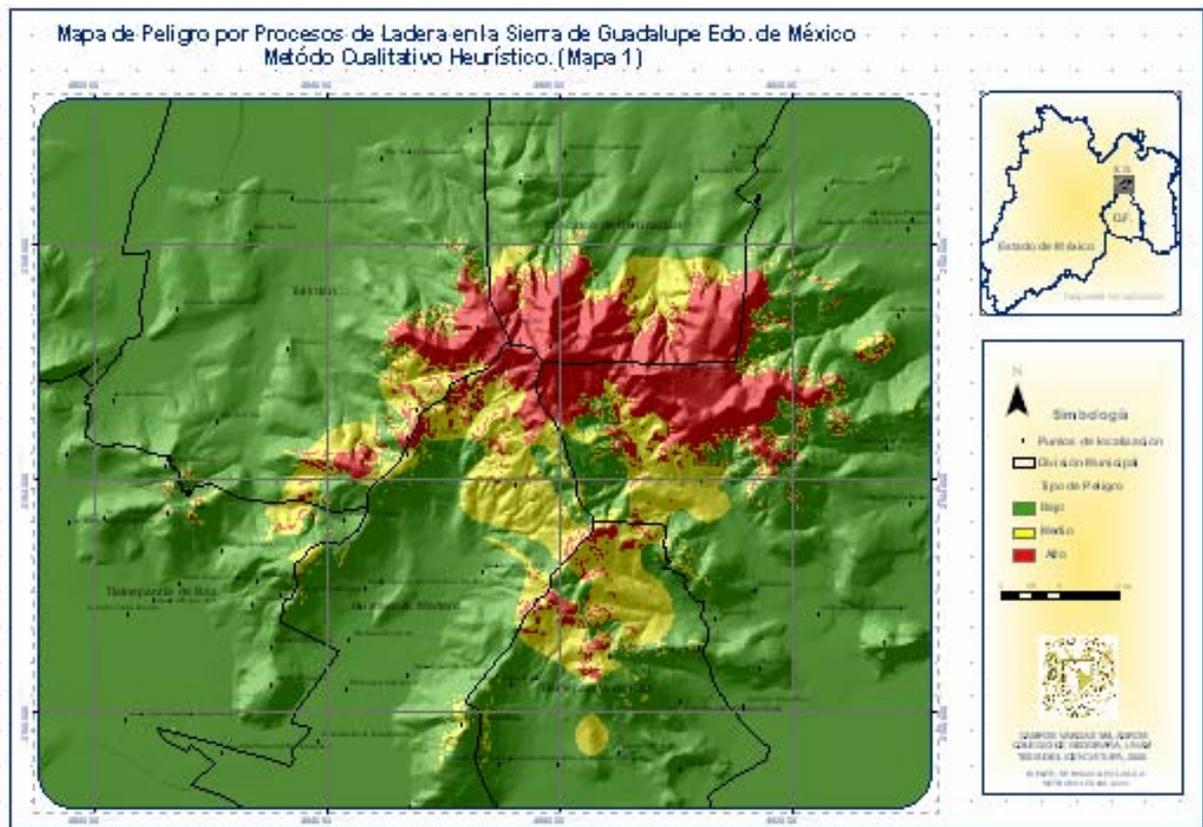
Altimetría y Pendiente	Precipitación y densidad de fracturas	Densidad de fracturas y Densidad de drenaje	Clasificación de Peligro
bajo	Alto	Medio	Bajo
bajo	Alto	Alto	Medio
bajo	Alto	Bajo	Medio
Medio	Alto	Medio	Alto
Medio	Alto	Alto	Alto
Medio	Alto	Bajo	Alto
Alto	Alto	Medio	Alto
Alto	Alto	Alto	Alto
Alto	Alto	Bajo	Medio
Bajo	Medio	Medio	Alto
Medio	Medio	Medio	Alto
Alto	Medio	Medio	Alto

Fuente: SEGEOMET 2004.

Con los datos resultantes de la tabla final lo que se hizo fue utilizar nuevamente álgebra booleana para obtener el mapa definitivo de peligro. Un ejemplo de los anunciados que utilizaron se muestra a continuación:

ALTO:=IFF((MAPA2=" MEDIO * ALTO * MEDIO")OR(MAPA2=" MEDIO * ALTO * ALTO")OR(MAPA2=" ALTO * ALTO * BAJO")OR(MAPA2=" ALTO * ALTO * MEDIO")OR(MAPA2=" ALTO * ALTO * ALTO")OR(MAPA2=" MEDIO * MEDIO * MEDIO")OR(MAPA2=" ALTO * MEDIO * MEDIO"),"ALTO",?)

La base del resultado fue la conjugación de los valores altimétricos, pendientes, precipitación, densidad de fracturas y densidad de drenaje, complementado con la información levantada en campo para determinar el nivel de peligro Alto, Medio y Bajo peligro (Mapa 1)



5.2.- Metodología del mapa cuantitativo bivariado de la Sierra de Guadalupe.

Para la zonificación de peligro por este método se utilizó el Sistema de Información Geográfica ArcGis/ArcInfo versión 9.0, en el cual la información fue manejada en formato *raster*, desarrollando un análisis estadístico bivariado de índice de valores de peso (W_i , Ecuación 1).

Ecuación 1. Cálculo de valores de peso

$$\ln W_i = \ln \left(\frac{\text{Densclas}}{\text{Densmap}} \right) = \ln \left(\frac{\frac{\text{Area}(S_i)}{\text{Area}(N_i)}}{\frac{\sum \text{Area}(S_i)}{\sum \text{Area}(N_i)}} \right)$$

Fuente: de Suzen y Doyuran, 2003.

W_i = es el peso asignado a un parámetro específico (ejemplo: un tipo de roca o una clase de pendiente).

Densclas = La densidad de deslizamientos para la clase del parámetro considerado.

Densmap = La densidad de deslizamientos para el área de estudio.

Área (S_i) = Área con presencia de deslizamientos, en la clase del parámetro considerado (área ocupada por los deslizamientos).

Área (N_i) = área total, dentro de la zona de estudio, para el parámetro considerado.

En este método se realiza el cálculo de valores de pesos positivos y negativos (W_{i+} , W_{i-}) para cada una de las diferentes clases de los mapas parámetro (rango de altitud de 0 a 2440 dentro del mapa de altimetría), con base en la densidad de deslizamientos de cada una de las clase de los mapas parámetro entre la densidad de deslizamientos en toda el área. Los valores W_{i+} representan mayor presencia de deslizamientos en cada clase de parámetro y el valor W_{i-} es igual a una menor presencia de deslizamientos en cada clase de parámetro.

Lo que indica que si el valor peso es positivo (W_i+) la presencia del factor es favorable para la ocurrencia de deslizamientos, y si el valor es negativo (W_i-) el factor no es favorable para la ocurrencia de un deslizamiento.

Los mapas parámetro utilizados para el desarrollo de esta metodología fueron: altimétrico, pendientes, densidad de drenaje, precipitación y densidad de fracturamiento junto con el inventario de deslizamientos (Figura 5.4) que se incluyen por primera vez en la zonificación de peligro utilizando el método bivariado. Para cada parámetro o factor se tomaron como base las mismas categorías que en el método heurístico, con el objetivo de ver el efecto del uso de este método en la definición de peligro, y comparar los resultados obtenidos por los diferentes métodos en una misma zona y con los mismos datos.

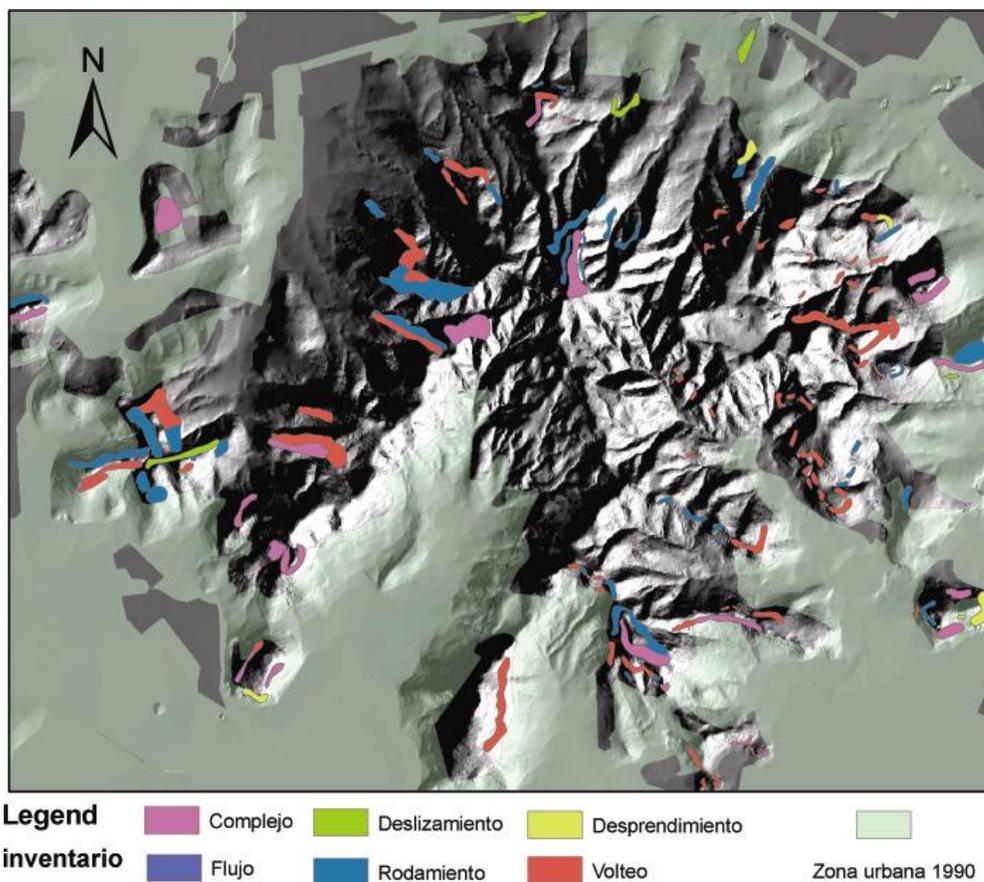


Figura 5.4 Mapa de inventario de deslizamientos. Fuente SEGEOMET, 2004

La realización del mapa de peligros, con el método bivariado, se dividió en las siguientes fases:

FASE I.

- Homogenización de la cartografía

Para la aplicación del método bivariado, se utilizó el análisis estadístico de celdas (*píxel*) y el de álgebra de mapas dentro del SIG, en ambos casos la técnica de sobreposición de capas de información se lleva a cabo, por lo tanto la referencia espacial y el número de celdas entre los mapas parámetros y el inventario de deslizamientos debe coincidir de forma exacta, por tal motivo la base cartográfica fue estandarizada en cuanto a: proyección, cubrimiento del área, escala de trabajo y tamaño de *píxel*.

El procedimiento de estandarización consistió en lo siguiente:

Definición y proyección de los mapas a un sistema de coordenadas WGS utilizando el datum, 1984.

Delimitación de área de trabajo por el corte de los mapas temáticos de acuerdo a una extensión de coordenadas UTM: 2170512.38 al norte, 2158332.38 al sur, 479034.9 al oeste y 494384.9 al este.

Rasterización de la cartografía base (mapas temáticos y MDT) con la salida del píxel de 10 X 10 metros

FASE II.

- Obtención de la densidad de procesos de ladera por clase de parámetro (Densclas en la ecuación 1) y obtención de la densidad de deslizamientos en toda el área de estudio (Densmap en la ecuación 1).

Para obtener la densidad de deslizamientos por clase fue necesario extraer las áreas de coincidencia entre el mapa inventario y las clases de los mapas parámetros, llevando a cabo lo siguiente:

1.- Sustitución de los rangos de las clases por dígitos, para su manejo como valores numéricos y no como cadena de caracteres (Figura 5.5) ya que la función que se utiliza para obtener el valor de los píxeles con deslizamientos en cada clase de parámetro se guía por un archivo de texto de valores.

Old values	New values
0 a 2440	0
2441 a 2640	1
2641 a 2850	2
Mayores a 2850	3
NoData	NoData

Figura 5.5.- Sustitución de los rangos a valores numéricos

2.- Algebra de mapas para realizar una intersección entre cada mapa de parámetro y el inventario de deslizamientos utilizando el campo con valores numéricos asignados en el paso anterior. El resultado fue un mapa *raster* que indica las zonas donde coincide los deslizamiento con cada una de las clases de los mapa parámetro y la cantidad de *píxeles* que le corresponde a cada una de ellas. Por ejemplo el área con deslizamientos y las clases del parámetro altimetría (Figura 5.6 y 5.7).

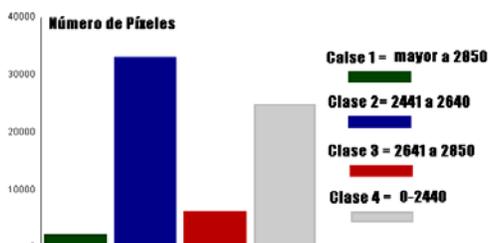


Figura 5.6. Numero de *píxeles* con deslizamientos por clase (parámetro altimetría)

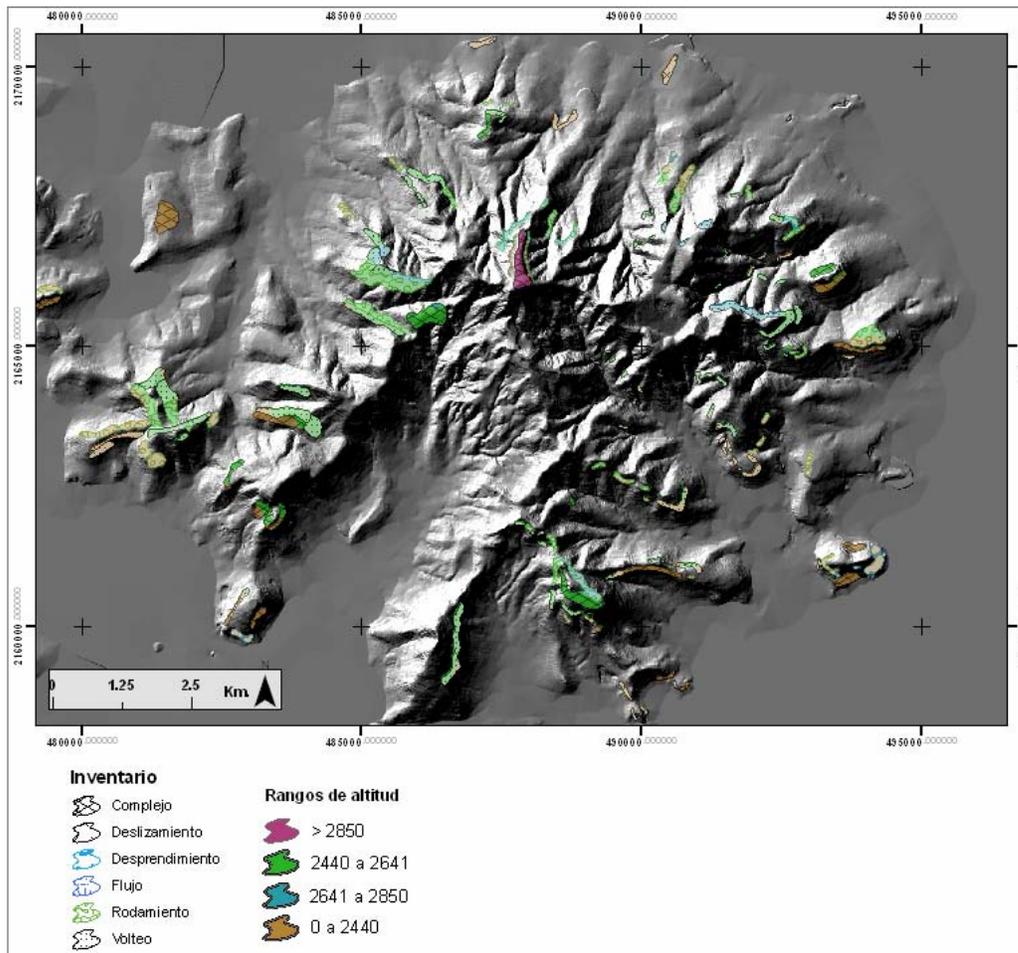


Figura 5.7. Ejemplo de extracción de polígonos de deslizamientos con la altimetría.

3.-Cálculo de Densclas y Densmap.

El valor de píxeles con deslizamientos encontrado en cada una de las clase (Npíx (Si)) se dividió entre el numero total de píxeles de la clase (Npíx (Ni)), y el valor resultante es el de Densclas (Tabla 5.4)

$$\text{Densclas} = (\text{Npíx (Si)}) / (\text{Npíx (Ni)})$$

Para obtener el segundo valor de la ecuación (Densmap) se sumó el número total de píxeles con deslizamientos en toda el área ($\sum \text{área (Si)}$) y el resultado se dividido entre el número total de píxeles en el área de estudio ($\sum \text{área (Ni)}$). Lo que dio como resultado un valor que es fijo para cada mapa de parámetro (Tabla 5.4).

$$\text{Densmap} = (\sum \text{área (Si)}) / (\sum \text{área (Ni)})$$

Tabla 5.4. Ejemplo de obtención de densmap y densclas para altimetría.

(Si) Categoria	Npix(Si) (no. pix. des/cat)	Npix(Ni) ((no. pix. tot. cat)	SNpix(Si) num. tot. pix. des	SNpix(Ni) (toda el area)	desclass (d/e)	densmap (f/g)
>2850	2236	1399394	66337	1869630	0.00159783	0.03548135
2441-2640	32931	342891	66337	1869630	0.09603927	0.03548135
2641-2850	6233	117336	66337	1869630	0.05312095	0.03548135
0-2440	24937	10009	66337	1869630	2.49145769	0.03548135

Una estandarización de los valores de densidad de deslizamientos se obtuvo relacionando las densidades parciales (densclas), para cada parámetro clase con la densidad general para el área de estudio (densmap).

FASE III.

- Cálculo de valores de peso Utilizando la Ecuación 1.
 1. La información de densidad de deslizamientos para cada clase de los mapas parámetro es dividida por la densidad de deslizamientos para la totalidad del área (densclass/densmap) y al resultado de esta división se le aplica un logaritmo natural, el cual es usado para dar un peso negativo cuando la densidad de deslizamientos es baja, y positivo cuando es alta, obteniendo así los valores de peso finales para cada clase de parámetro.
 2. El resultado de este proceso es una tabla con los distintos valores de peso calculados (W_i , Tabla 5.5), información con la cual se genera un mapa-parámetro en formato raster, donde cada clase tenga un valor de W_i asignado como un campo más de información.

Tabla 5.5. Mapas de parámetros con valores de peso.

Mapa de Parámetros	Clases	Deslizamientos % en área	Wi
Altimétrico	>2850	0.05	-3.10035799
	2441-2640	2.71	0.99574987
	2641-2850	1.50	0.40356416
	0-2440	70.22	4.25161597
Pendientes en grados	0-30	0.77	-0.26230195
	31-45	3.72	1.3125382
	>45	5.13	1.63459147
Den/Fracturas km/km2	0-500	0.34	-1.08955492
	501-1000	1.40	0.33456194
	1001-1500	1.72	0.54339409
	1501-2000	1.55	0.43951276
	2001-2500	2.83	1.04122245
	>2501	0.00	(3.2793 VALOR AJUSTADO)
Den/Fracturas km/km2	2000-3000	1.20	0.18429683
Den/Drenaje km/km2	5000-6000	1.35	0.30367369
	4000-5000	1.20	0.18380654
	3000-4000	1.84	0.60942561
	>7000	0.00	(1.4137 VALOR AJUSTADO)
	6000-7000	2.14	0.76212173
Precipitación en mm	1000-2000	0.56	-0.57908721
	0-1000	0.29	-1.22467357
	600-650	0.45	-0.80753403
	650-700	0.66	-0.42157376
	700-750	1.17	0.15394969
	750-800	1.46	0.3764442
	Lahares	0.34	-1.070671
Unidades litológicas	Dacita	3.53	1.261804464
	Riolita	3.16	1.149658152
	Piroclastos	1.34	0.290920339
	Andesita	2.42	0.884206868
	Indefinido	0.78	-0.24407438
	Aluvial	0.03	-3.55056006

FASE IV.

- Cálculo de valores de peso para clases sin información de deslizamientos.

En los mapas densidad de drenaje y densidad de lineamientos se presento que el número de píxeles con deslizamientos era de cero, por lo que el valor de W_i se hace indefinido de acuerdo a la ecuación 1. Por lo que se tuvo que hacer una extrapolación para asignar el valor de peso correspondiente. Para ello se graficaron los valores de W_i vs. la clase y se observó la tendencia general de los datos, la figura 5.8 muestra el ajuste para el parámetro densidad de drenaje en el que la clase 8 ($> 7000\text{m}^2/\text{km}^2$) no tuvo presencia de deslizamientos. Graficando los valores de W_i vs clase, se hizo un ajuste polinomial de tercer orden (cúbica) a la tendencia de w_i , y la ecuación resultante se usó para el cálculo de un W_i en las clase indefinida.

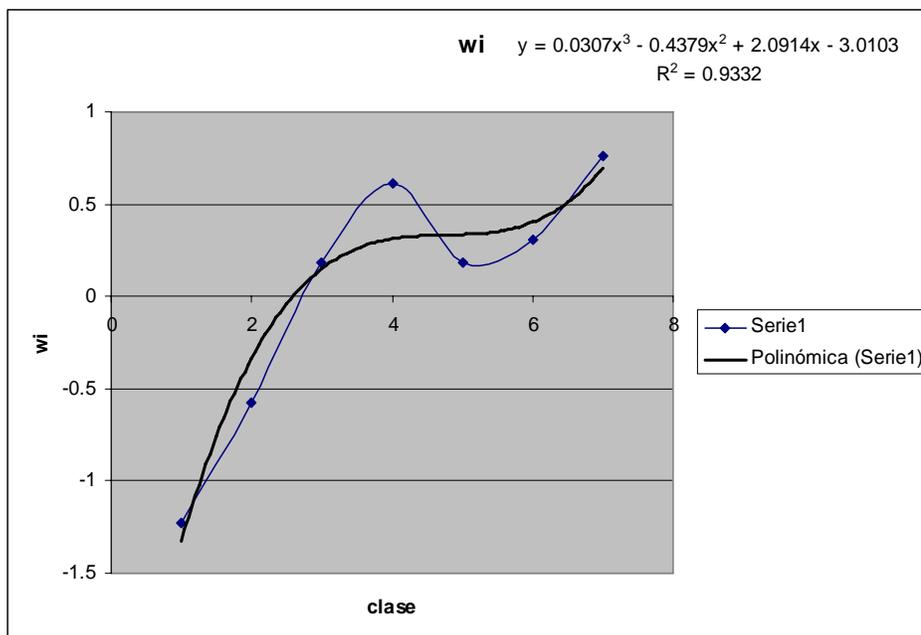


Figura 5.8. Gráfica de tendencia de los pesos W_i para las clases en densidad de drenaje. La ecuación representa el polinomio ajustado.

FASE V.

- Confección del mapa final a partir de valores de peso.

A partir de los valores generados en las tablas y adicionados como campos en los mapas de parámetro se realizó un álgebra de mapas a nivel de celda por celda (Figura 5.9), este proceso se llevó a cabo con la suma de los valores de peso contenidos en el campo W_i de cada uno de los mapas de parámetros (Ecuación 2);

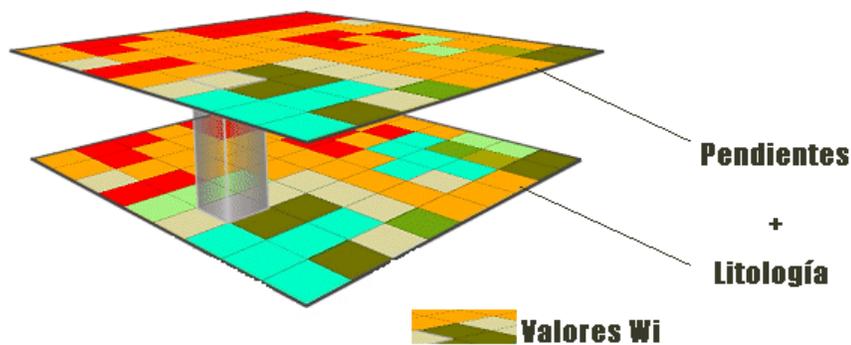


Figura 5.9. Ejemplo de la suma de los valores de peso celda por celda.

El resultado fue un mapa *raster* final en el que el valor por cada celda es la suma de todos los valores de peso de cada uno de los mapas de parámetros que es el valor, total en la ecuación 2. (W_t).

Ecuación 2. Suma de los valores de peso de cada uno de los mapas de parámetro.

$$W_t = \sum_{parametros} W_i$$

El mapa resultante mostraba los valores W_t en un rango de cinco clases (Figura 5.10); sin embargo, para la comparación con el método heurístico se tuvo que hacer una división en tres clases; partición que se hizo con base en un número igual de píxeles en función al número total de elementos (cuantiles), definiendo el mismo número de categorías que se presentan en el mapa heurístico (alto, medio y bajo peligro) (Mapa 2).

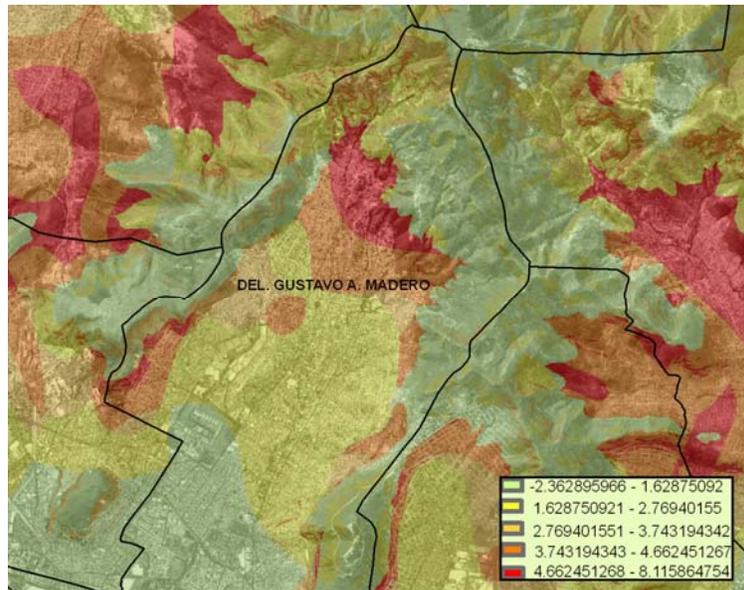


Figura 5.10.- Resultado de las suma de los valores W_i de cada mapa de parámetro.

FASE VI.

- Mapa Comparativo

Una vez clasificado el mapa heurístico y el bivariado en las tres categorías de alto, medio y bajo peligro, se realizó nuevamente álgebra de mapas, donde se comparaban estos dos resultados, con la finalidad de conocer, celda por celda, todas aquellas áreas donde hubo algún cambio, en la definición de la categoría de peligro. En el proceso de comparación, el programa ocupa la lógica de falso-verdadero, por lo que el resultado fue un mapa *raster* de valores 1 y 2, donde el valor de 1 representa los *píxeles* sin cambio y el valor 2 representa las celdas donde hubo cambio. El porcentaje del número de *píxeles* donde hubo cambio respecto al número total de *píxeles* en el área de estudio, representa nuestra medida de comparación.

5.3.- Mapa complementario con la variable litológica.

En el mapa realizado a partir del método heurístico, el parámetro litológico no fue tomado en cuenta y por lo tanto en la realización del mapa con el método

bivariado no se consideró. Sin embargo, de acuerdo con Concha (2006), las condiciones geológicas del área de estudio son un factor de gran importancia en la generación y el tipo de mecanismo de falla que se presentan dentro de la Sierra de Guadalupe ya que de acuerdo a las observaciones realizadas en el campo, la mayoría de los procesos reportados por el SEGEOMET (caída de rocas, deslizamiento en cuñas y volteo), se presentan de forma preferente en pendientes naturales muy inclinadas, sobre frentes de lava o en aquéllas laderas originadas por tectonismo a lo largo de la Fosa de Cuatepec, llegando a la conclusión de considerar a las unidades litológicas como un parámetro determinante en el estudio de inestabilidad de laderas. Por tal motivo, en esta investigación se tomo la decisión de incluir el mapa de unidades litológicas generado también por el SEGEOMET (2004) (Figura 5.11), en la realización del mapa de peligro.

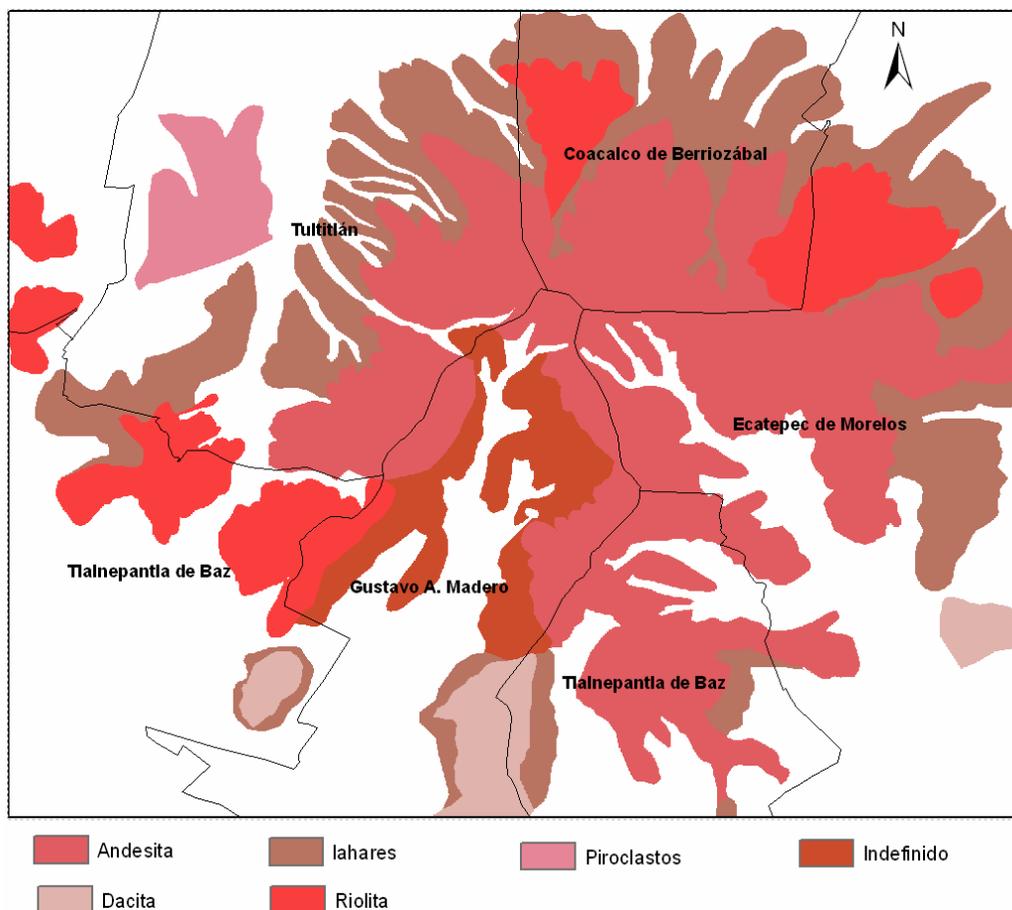


Figura 5.11. Mapa de unidades litológicas de la Sierra de Guadalupe. (Tomado de SEGEOMET 2004).

Para realizar el mapa de peligro por procesos de ladera, que incluyera la información litológica, se siguieron los mismos pasos que se utilizaron en la generación del mapa peligro para hacer la comparación, (Mapa 2). Este último mapa tuvo como finalidad mejorar la información en cuanto al grado de peligro.

6.- RESULTADOS.

6.1.- Zonificación de peligro por el método heurístico realizado por el Servicio Geológico Metropolitano (Mapa 1).

Peligro bajo.- Esta clase se localiza de manera casi uniforme a partir de la cota 2250 a los 2550 msnm (Figura 6.1). Desde el punto de vista morfológico el área corresponde a la planicie lacustre que rodea la Sierra, así como al piedemonte y laderas de los cerros Chiquihuite, Tlayacampan, Las Peñas, Loma Blanca Tenayo y Cerro Gordo, estos últimos incluidos en su totalidad dentro de este rango de peligro. A partir de la observación y comparación con cada uno de los mapas de parámetros el área que cubre este grado de peligro coincide con los valores bajos de densidad de drenaje, lineamientos, precipitación y, en mayor grado, a la altimetría. En cuanto a la pendiente se observó que no tuvo gran influencia en el cálculo de peligro bajo, ya que dentro de esta zona se encuentran pendientes desde 30 grados a mayores de 45.

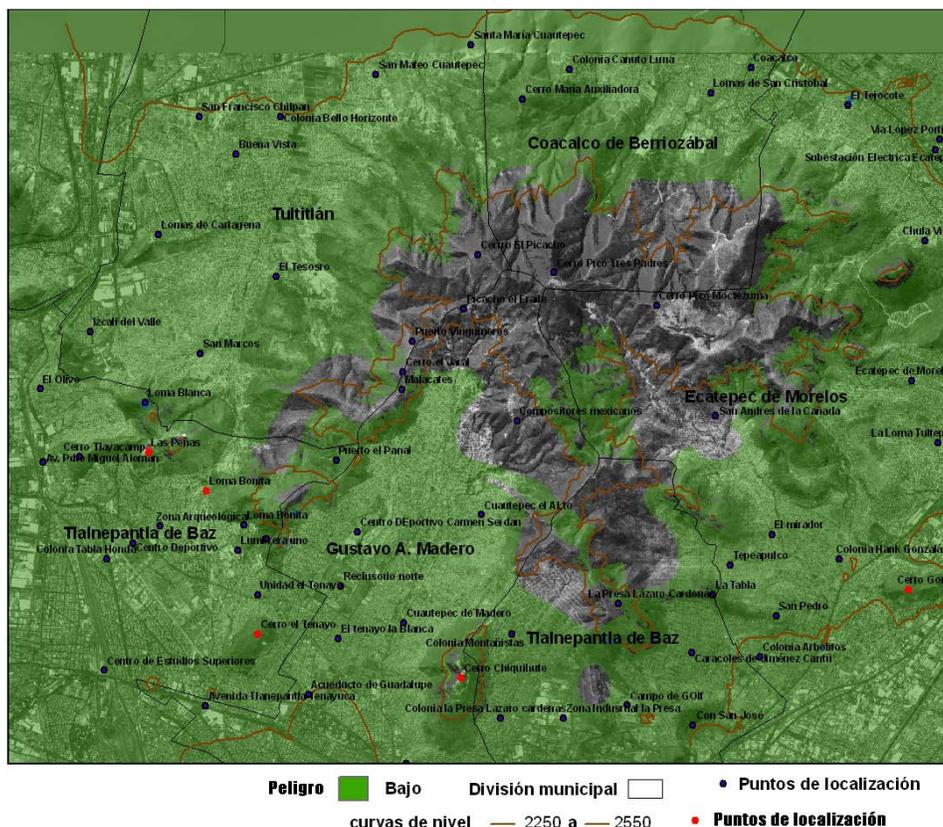


Figura 6.1. Zona de peligro bajo calculado a partir del método heurístico.

Es importante mencionar que, a pesar de que esta zona esta marcada con bajo peligro, es en la que se encuentra el mayor número de deslizamientos, reportados por el SEGEOMET (Figura 6.2).

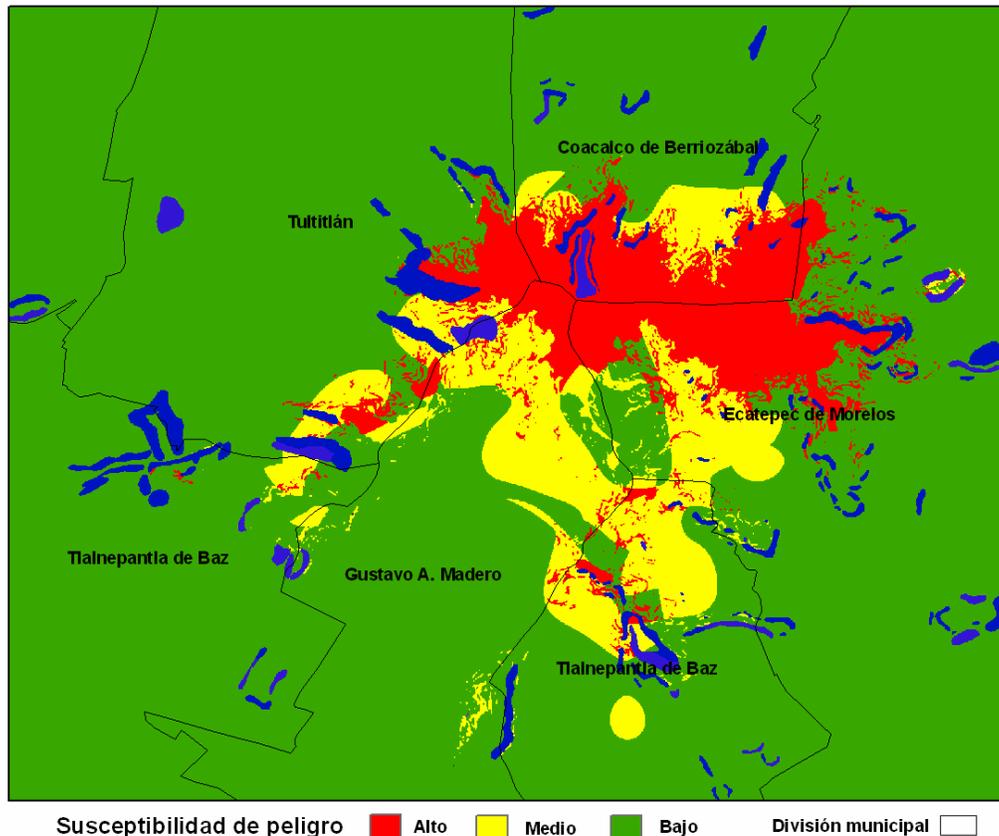


Figura 6.2. Mapa de Peligro a partir del método cualitativo, con el inventario de deslizamientos.

Debido a que la superficie ocupada por este nivel de peligro es muy grande la mayoría de los municipios que se localizan alrededor de la sierra, así como también una porción ocupada por la delegación Gustavo A. Madero, en el D.F, se ven afectados.

Peligro Medio.- Su distribución se observa hacia la zona montañosa en laderas que presentan altitudes mayores a los 2400 metros hasta llegar a los 2800 (Figura 6.3), en esta zonas la pendiente corresponde a rangos de 0 a > 45 grados.

Esta zona define una banda orientada NW-SE que pasa por Picacho el Fraile-Compositores Mexicanos-La Presa Lázaro Cárdenas-Club de Golf Copal. Hacia el este se ubica en San Andrés de la Cañada, en las partes bajas de Pico

Moctezuma. En la parte norte de la Sierra se distribuye en Lomas de San Cristóbal, que corresponde a las laderas bajas al Norte de Pico Moctezuma. En el oeste de la Sierra, comprende la zona de Loma Bonita y la salida sur de la zona Ecológica, a la altura de la Malacates.

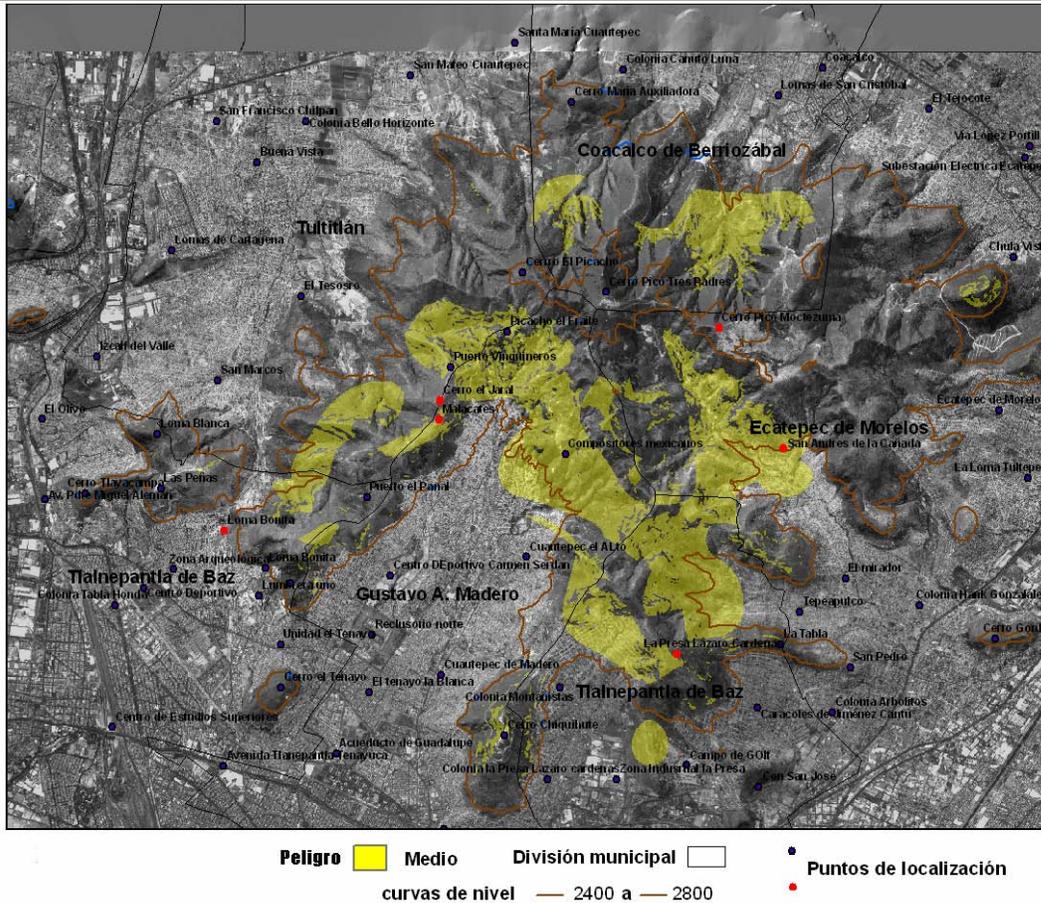


Figura 6.3. Zona de peligro medio calculado a partir del método heurístico.

Al analizar la distribución de algunos mapas-parámetro se observó, que el mapa de densidad de fracturamiento que esta en el rango de 1001 a 2500 km/km² y las pendientes menores a 45 grados, están definiendo predominantemente este grado de peligro, ya que la configuración de dicha área es muy similar al patrón de densidad de fracturamientos y a la distribución de altas pendientes que éstos presentan en los mapas-parámetro (Figura 6.4).

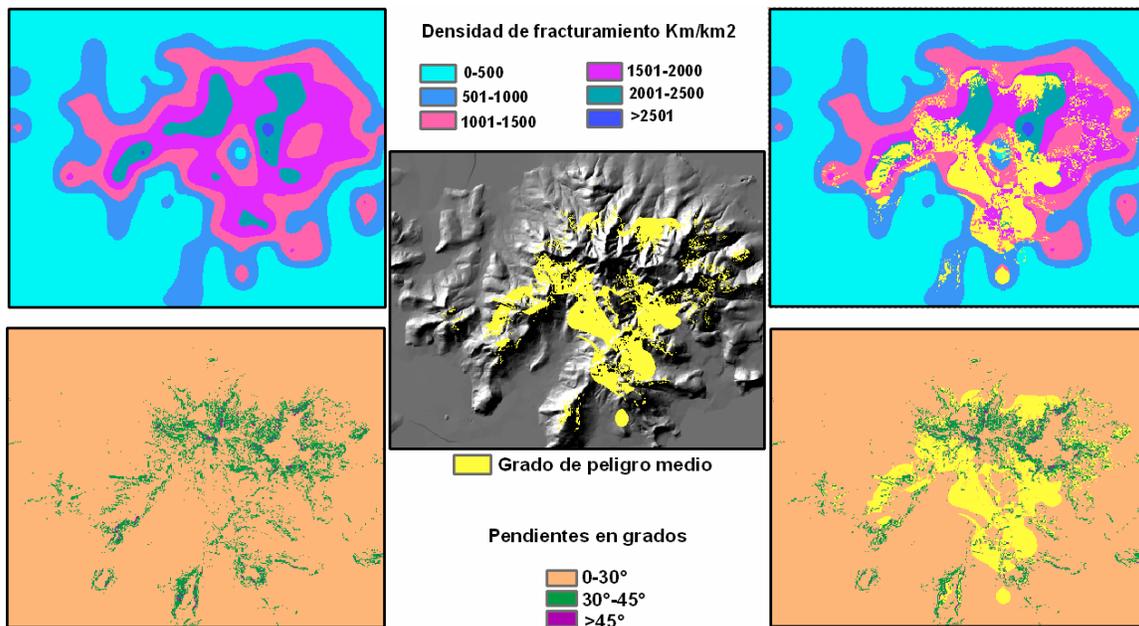


Figura 6.4. Zona de peligro medio comparado con rangos de fracturamiento y pendientes.

De acuerdo con la distribución de peligro medio, los municipios afectados por éste son: Coacalco, Tultitlán y Tlalnepantla en el Estado de México y la delegación Gustavo A. Madero en el D.F.

Peligro Alto.- Finalmente por arriba de los 2650 msnm se observan las áreas con mayor grado de peligro (Figura 6.5). Esta categoría se ubica en las cimas o laderas altas de los volcanes Pico Tres Padres, Picacho y Moctezuma, así como también en las laderas este del cerro Chiquihuite y otras zonas de menor afectación (Cerro Jaral). De acuerdo al análisis de esta clase con los diferentes mapas parámetro se observó que en este caso la altitud juega el papel principal en la configuración de la zona de peligro alto, obedeciendo principalmente a los valores máximos de altitud. Un aspecto importante en esta zona es que a pesar de ser el valor más alto de peligro la presencia de deslizamientos es mínima.

Como la zona de peligro alto se localiza en su mayoría en las porciones de mayor altitud, sólo algunos municipios como Tultitlán, Coacalco, Ecatepec y una pequeña porción de la delegación Gustavo A. Madero, se verían afectados.

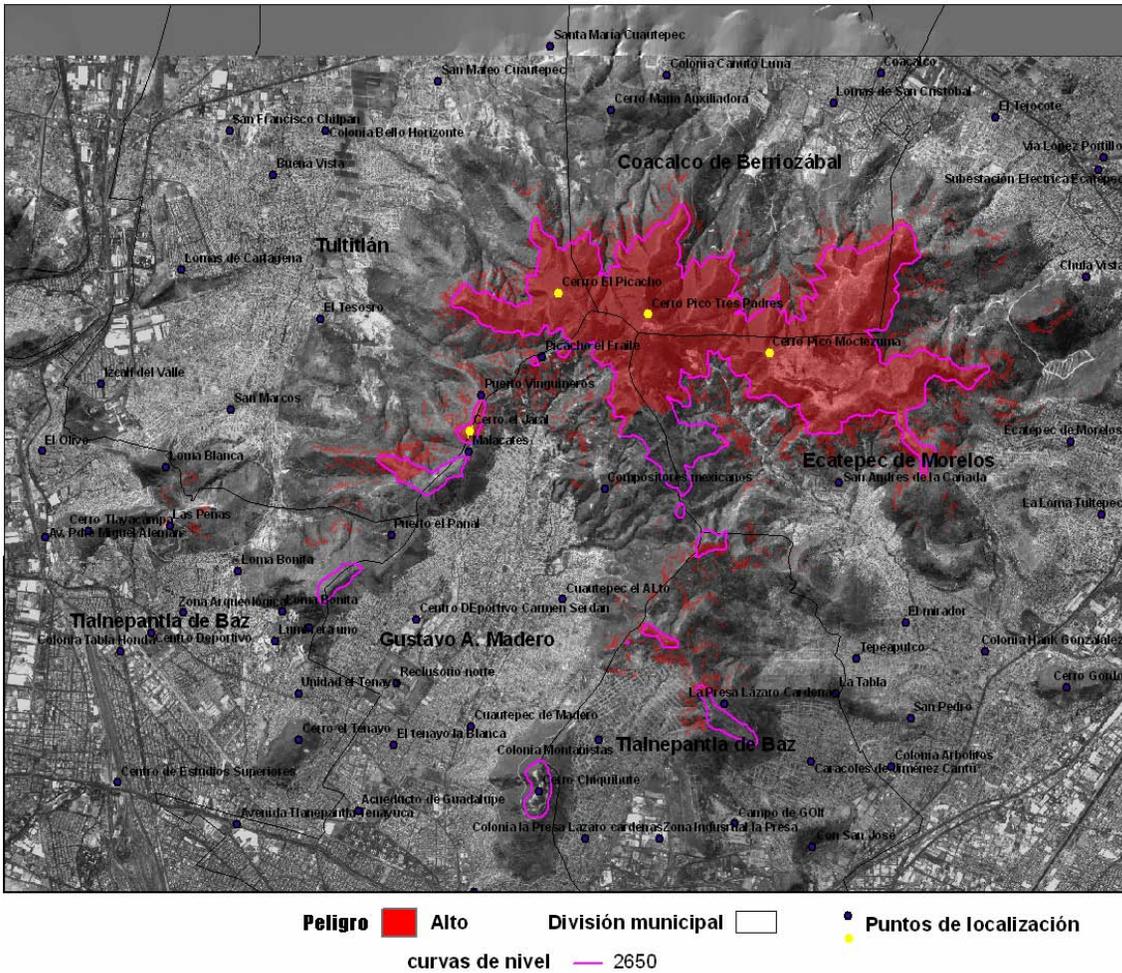


Figura 6.5. Zona de peligro alto determinado por el método heurístico.

Se observa entonces que las tres clases de peligro de este mapa están definidas por uno o dos parámetros en la mayoría de los casos, a pesar de que en la lógica utilizada para la generación de tablas se incluyeran todos. La asignación de la influencia de cada parámetro en la generación de deslizamientos, finalmente el mayor peso se presentó sólo en uno o dos parámetros de los cinco utilizados. Por lo que, se concluye que los niveles de peligro definidos de forma cualitativa, son muy generales y poco representativos en este mapa.

6.2.- Zonificación de peligro por el método estadístico bivariado (mapa 2).

En la realización de esta cartografía se usaron los mismos parámetros y las mismas clases asignadas en el método heurístico; sin embargo, la distribución de

las zonas de peligro encontrados son muy diferentes. En el mapa 2 se muestran los resultados obtenidos con este método.

Peligro bajo.- su distribución esta divide en tres zonas, la primera corresponde a una porción de la planicie circundante a la sierra y las otras dos a cimas y laderas de valle correspondientes a los cerros Picacho, Pico Tres Padres, María Auxiliadora, Moctezuma, Chiquihuite y Tenayo (Figura 6.6).

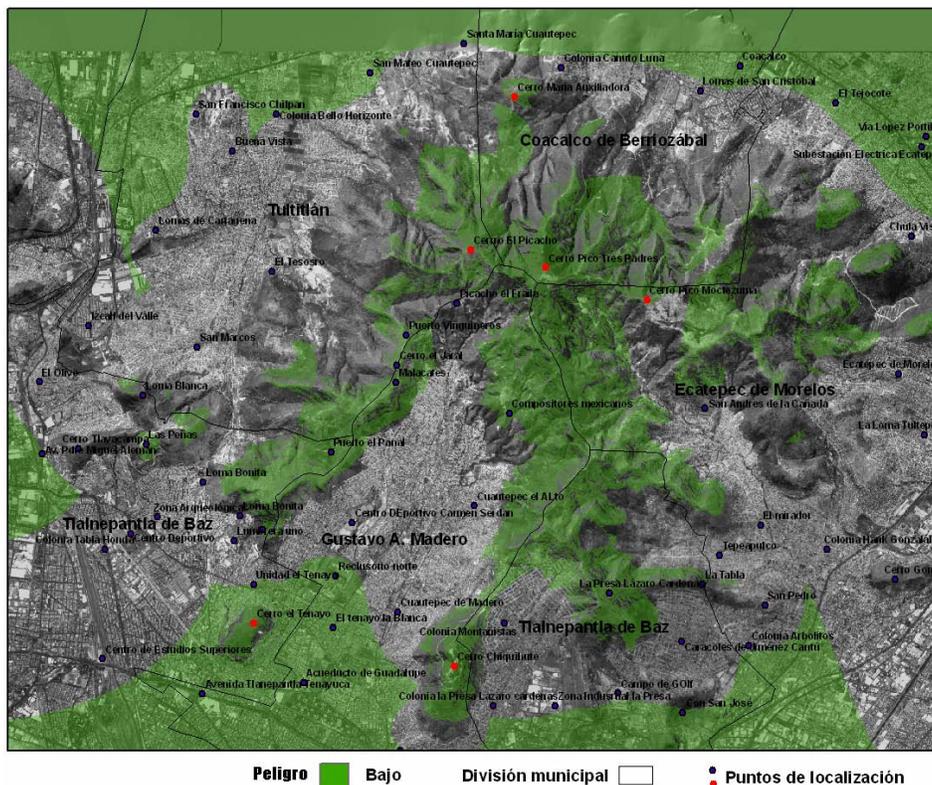


Figura 6.6. Zona de peligro bajo determinado por el método bivariado.

La distribución de esta clase de peligro para la zona plana, corresponde a los valores más bajos de peso W_i . Se trata de superficies con inclinaciones del orden de 10 grados por lo que se hace difícil la ocurrencia procesos de ladera y por lo tanto, una baja frecuencia y valores de peso bajos. Hacia el interior de la sierra este valor se calcula a partir de la suma de *píxeles* con valores bajos, a excepción de los rangos de pendientes y densidad de fracturamiento en las cuales, los valores de peso relativamente son altos (1.6 y 1.4 respectivamente). Sin embargo, como el valor de peligro se define a partir de la combinación de los valores de todas las capas en cuanto se suman estos valores altos con los de densidad de

fracturamiento, altimetría y precipitación que son muy bajos se contrarrestan e inclusive mantiene bajo el valor final del peso Wt. Demostrando que no hay factor que realmente determine la distribución final del peligro y que todos tienen su contribución favorable o desfavorable en el valor final del peso. La porción que cubre las zonas de peligro bajo ocupa una parte de todos los municipios del Estado de México, así como la zona norte de la delegación Gustavo A. Madero.

Peligro Medio- Su distribución se divide en dos zonas principales, la primera corresponde a una parte de la planicie y piedemonte circundante a la sierra (Fig. 6.7) la cual tiende a formar un anillo exterior que forma la transición entre el peligro bajo y alto. La segunda distribución se observa hacia la parte interior de la sierra correspondiendo con rangos de pendientes de 30-45 sobre cabeceras de valles o circos de erosión (SEGEOMET, 2004). La clasificación de este peligro se relaciona con la suma de los valores medios de los *píxeles* donde el rango del valor de peso oscila entre 0.8 y 2.6 para cada clase de parámetro. El nivel de afectación de este rango de peligro abarca una parte de todos los municipios que integran a la Sierra de Guadalupe.

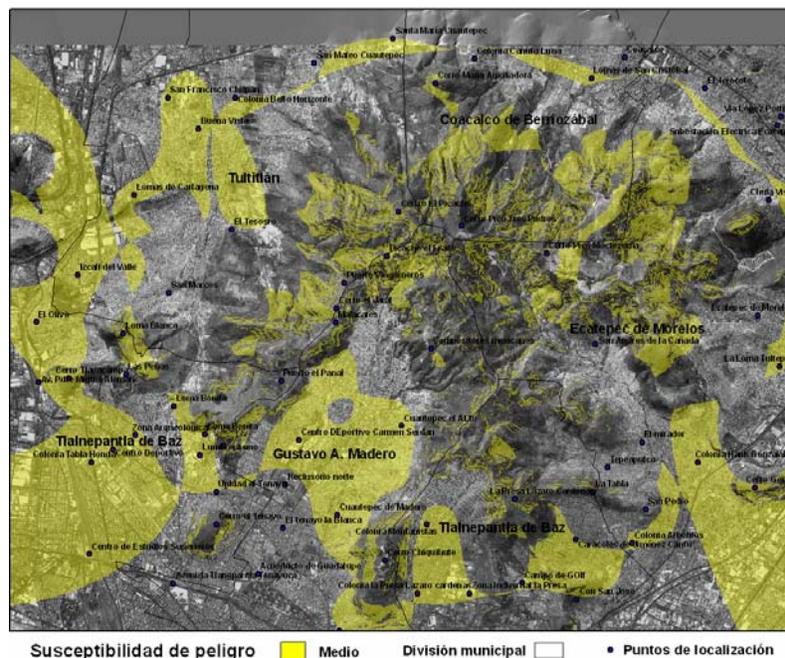
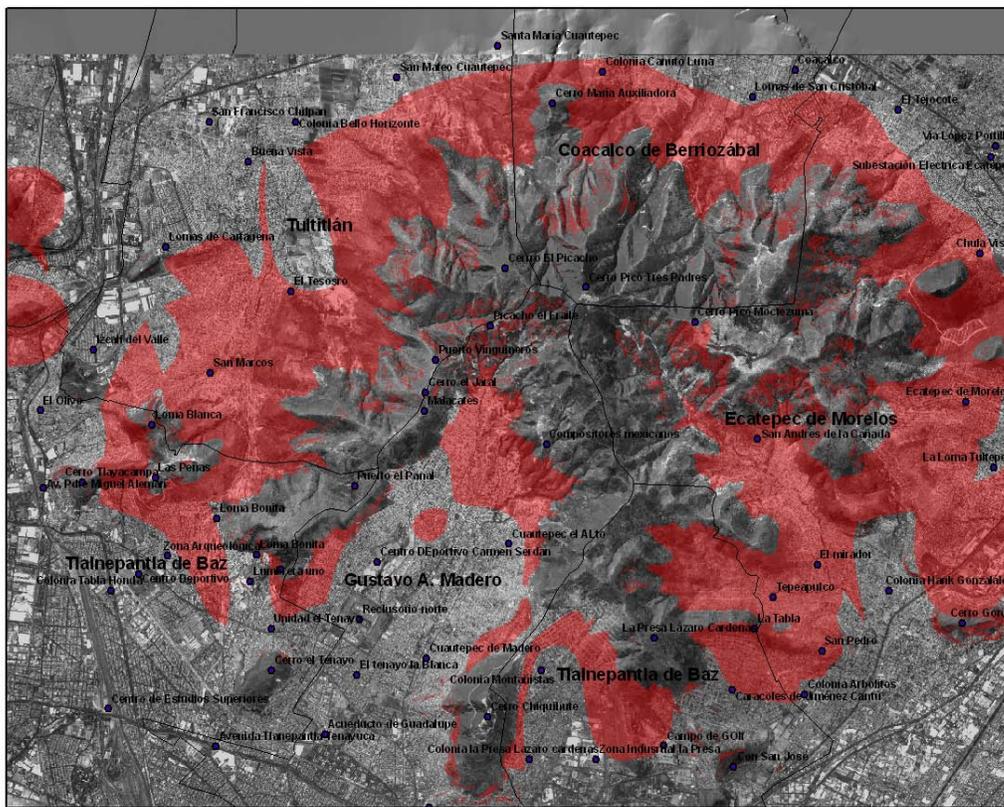


Figura 6.7. Zona de peligro medio de terminado por el método bivariado.

Peligro alto- Se distribuye alrededor de las laderas altas y medias de los valles y en algunas porciones del piedemonte. Forma un anillo casi cerrado alrededor de la

Sierra, con excepción de la zona correspondiente a la fosa de Cuauhtepec (Figura 6.8), donde la sierra es interrumpida por la planicie del graben, del mismo nombre.



Susceptibilidad de peligro ■ Alto División municipal ● Puntos de localización Figura 7.8. Zona de peligro alto determinada por el método bivariado.

Comparando este mapa con las capas temáticas de valores de peso, el rango de peligro alto está definido por la distribución de la clase de densidad de drenaje en los rangos de 1000 a 4000 km/km², los cuales no necesariamente tienen los pesos más altos pero sí un área muy extensa y, por lo tanto, una mayor ocurrencia de deslizamientos (Figura 7.9). Finalmente, la suma de *píxeles* con valores medios y altos (entre 0 y 2.5) incluyendo todas las clases de los mapas de parámetro definen el cálculo final de peligro alto. La afectación de las áreas con alta potencialidad a presentar deslizamientos de tierra se puede observar en los municipios de Coahuila, Ecatepec, Tultitlán, Tlalnequía y una parte de la delegación Gustavo A. Madero.

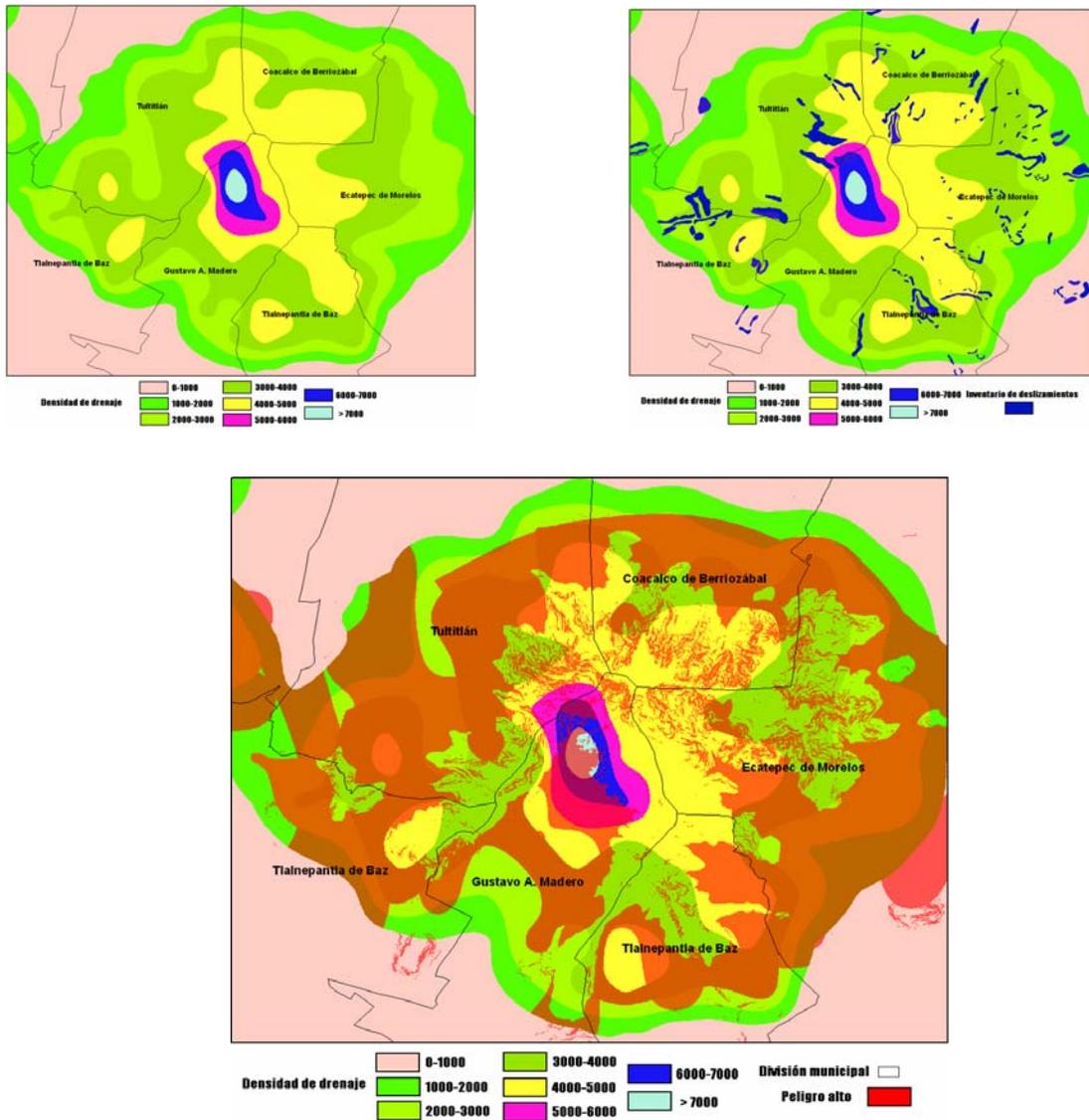


Figura 6.9. Comparación del mapa de densidad de drenaje con el inventario de deslizamientos.

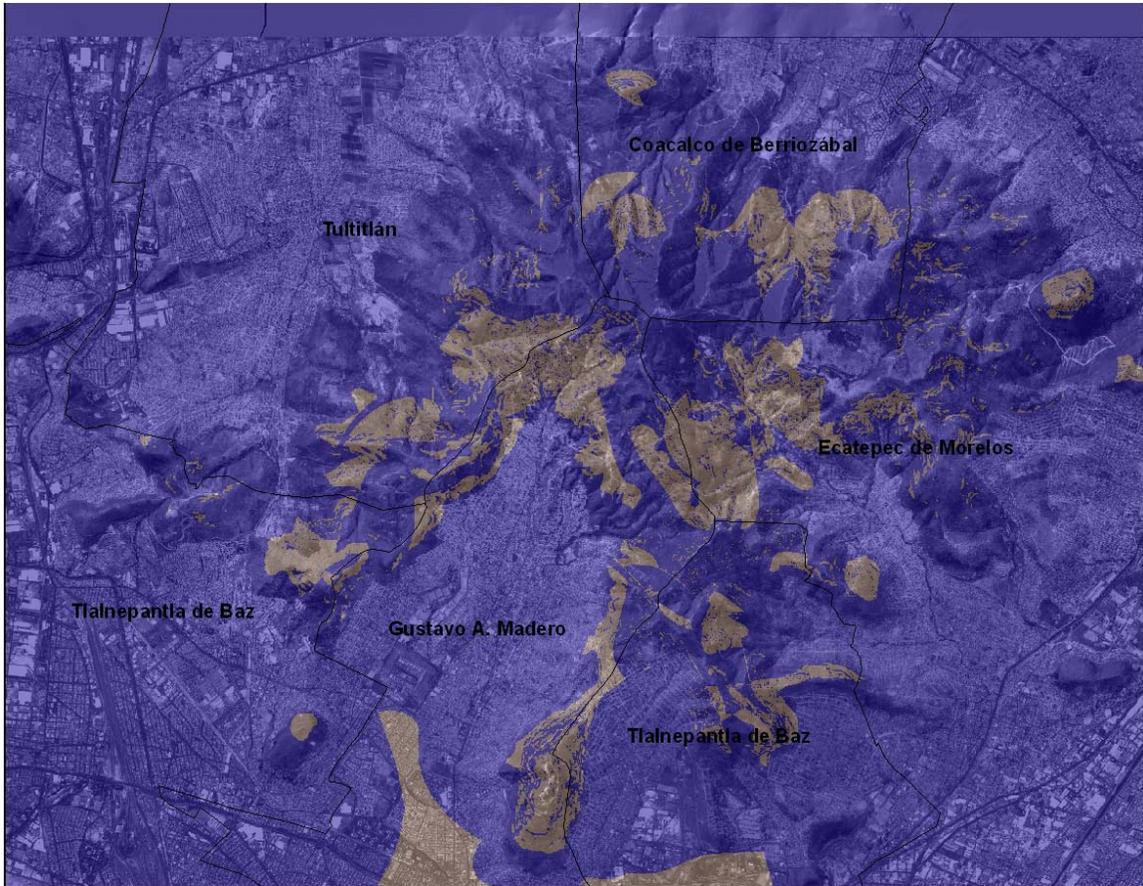
6.3.- Comparación de los mapas de susceptibilidad.

El resultado de los dos métodos arrojó resultados distintos en la distribución y definición de las áreas del mismo rango de peligro. El mapa hecho a partir del método heurístico presenta una distribución de forma ascendente comenzando de peligro bajo en las zonas planas, piedemonte y laderas, siguiendo la zona de peligro medio en laderas altas y finalmente el peligro alto delimitado hacia el núcleo de la sierra. Esta distribución no muestra ninguna correlación con el mapa de inventario de deslizamientos, si no áreas definidas por los valores altos de todos los mapas de parámetros, en particular los valores de la altimetría.

Por el contrario, el mapa bivariado muestra una distribución menos uniforme donde la zona de peligro bajo y medio que no sólo pertenece a la zona lacustre o de pendientes bajas, sino, también al núcleo de la Sierra donde no se han reportado deslizamientos, comprobando la teoría del método bivariado. La zona de peligro alto se localiza en los alrededores de la Sierra de Guadalupe, en forma de anillo en las laderas donde los deslizamientos son más frecuentes y donde existen características similares a aquéllas donde los deslizamientos han estado activos. Por lo que, se considera que el mapa bivariado es una buena aproximación a la realidad ya que su distribución esta en concordancia con la distribución de los deslizamientos.

Para conocer de modo más específico las áreas que cambiaron entre un mapa y otro, se generó un mapa que muestra la diferencia de información entre las dos coberturas, a partir un análisis de celda por celda (Figura 6.10).

El cambio de una distribución central o de núcleo en el mapa heurístico, a una distribución de peligros anular circundante a la Sierra, hace que las zonas de cambio se distribuyan mayoritariamente alrededor y en las partes más altas. El cambio se representó como el porcentaje de *píxeles* con cambio de información entre los dos mapas. La metodología bivariada y la heurística definen el peligro con una diferencia del 70.6 % del área de trabajo entre las diferentes clases.



Mapa de zonas con variedad en las zonas de peligro, del método heurístico con el bivariado.

■ Zonas sin cambio ■ Zonas con cambio

Figura 7.10.- Áreas con cambio obtenidas a partir del cruce de mapas del método heurístico con el bivariado.

6.4.- Mapa con la introducción de las unidades litológicas

En este último mapa se observa una distribución anular de los tres niveles que va del peligro bajo, a medio y de medio a alto en el exterior, y de alto, a medio regresando a bajo, hacia dentro del núcleo de la Sierra (Figura 6.11). La zona de peligro alto se hizo más extensa obedeciendo a la presencia de ciertas unidades litológicas fuente de deslizamientos (frentes de lava con fracturamiento) y adaptándose más a la morfología, como es el caso de las zonas de depósito de material (piedemonte, mesetas, valles y planicies) donde el rango de peligro es de medio a bajo. Finalmente Las zonas de peligro de este último mapa coinciden con lo observado en campo por Concha (2006), ya que los deslizamientos están

controlados en mayor medida por la presencia de frentes de lavas volcánicas o domos con altas pendientes (Cerro Gordo o Tenayo) o por zonas afalladas alrededor de la fosa de Cuauhtepac.

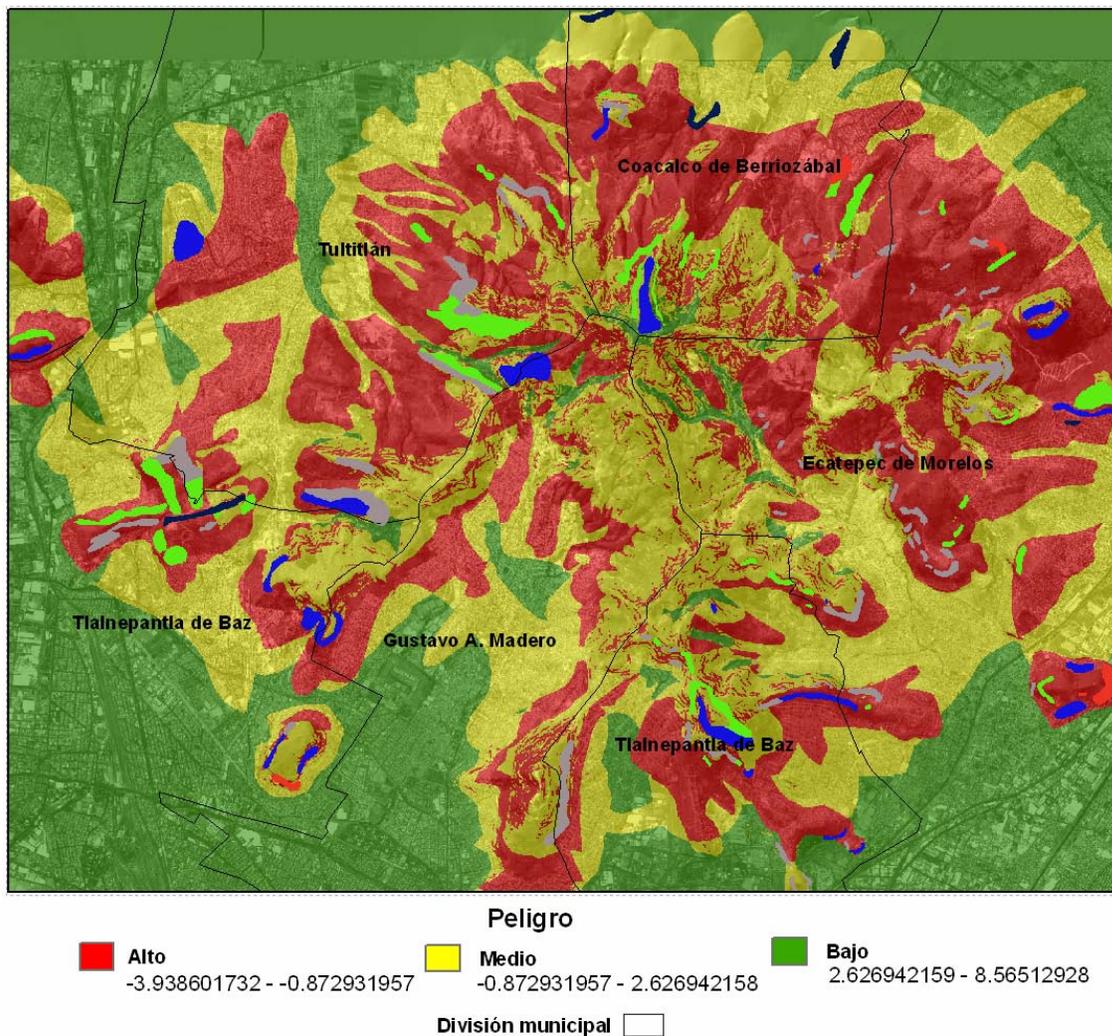


Figura 6.11.- Mapa de susceptibilidad con unidades litológicas

6.5 Zonas afectadas.

Por considerar que este mapa es más realista, con base en la coincidencia entre las áreas con mayor rango de peligro y la ocurrencia de procesos de ladera en el pasado (Mapa 3), se usó como base para identificar las zonas de peligro por colonia, información que se muestra en la siguiente tabla (Se identificaron 125 colonias dentro de la zona de alto peligro):

Tabla 6.1. Colonias ubicadas en la zona de peligro alto. Fuente Concha, 2006.

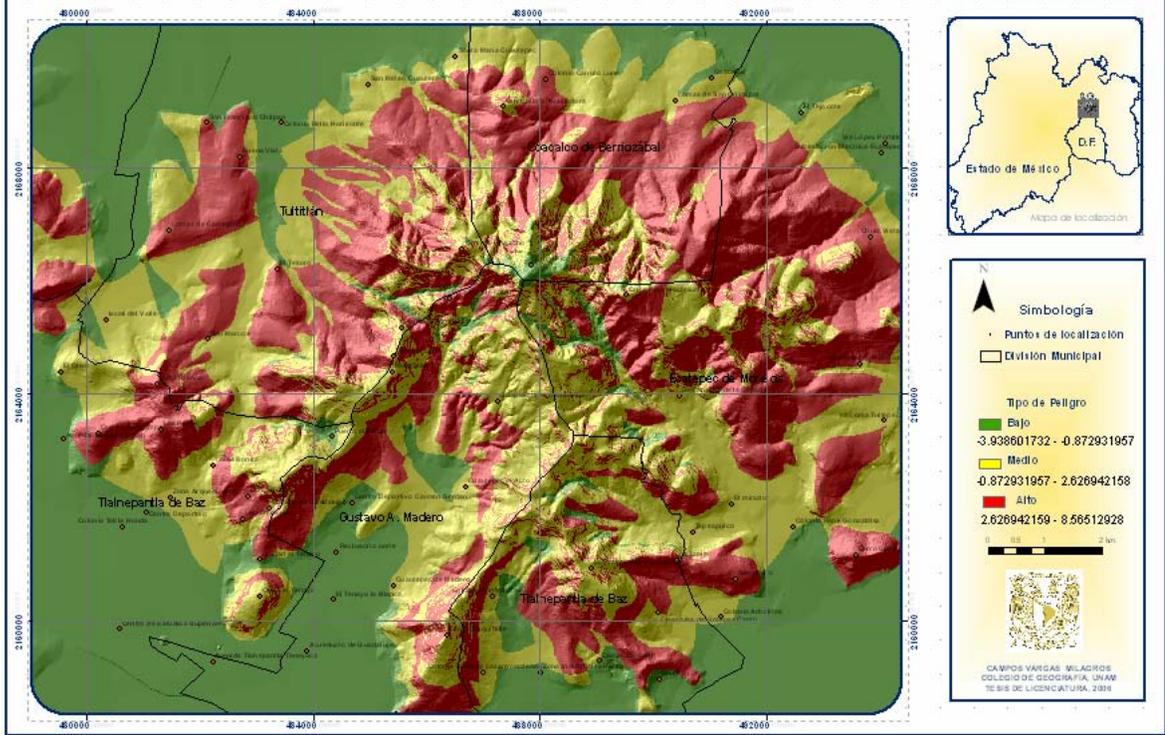
Num.	Nombre de la colonia	Plano Guía Roji
1	Ampliación Benito Juárez	98-99
2	Benito Juárez	98-99
3	Castillo Grande	98-99
4	Barrio la Candelaria Ticomán	98-99
5	Barrio Sn. Juan Ticomán	98-99
6	Lázaro Cárdenas	98-99
7	Amp. Jorge Jiménez Cantú	98-99
8	Lomas Lindavista, El Copal (club de golf)	99
9	Fracc. La Granja	99
10	Sn José Residencial Ecuestre	99
11	La Petrolera	82-100
12	Piedra Grande	82-100
13	Benito Juárez	82-100
14	Tabla del Pozo	82-100
15	El Gallito	82-83
16	Área Santa Cruz	82-83
17	Zapotecas	82-83
18	Tepejomulco	82-83
19	Bella Vista	82-83
20	Buena Vista	82
21	Buena Vista	82
22	Amp. Coanalco	82
23	La Teja de bordos	82
24	Los Bordos	82
25	La Palma	82
26	San Andrés de la Cañada	82
27	La Esperanza	82
28	La presa	82
29	Amp. Almacigo	82
30	La Virgen	82
31	Tacuanepantla	82
32	El Parque	82
33	El pedregal	82
34	Margarita Maza de Juárez	82
35	Nopalera, El Rosal	82
36	Lomas verdes	82
37	Álamos	81
38	La Lomita	81
39	La Agüita	81
40	El Mirador	81
41	Lomas de Tepeolulco	81
42	La Casilda	81-80
43	Vista Hermosa	81-80
44	Tlalpexco	81-80
45	Amp. Arboledas de Cuauhtepac el Alto	81-80
46	Vista Hermosa	81-80

Num.	Nombre de la colonia	Plano Guía Roji
47	Talpexco	81-80
48	La Forestal III, II, I	81-80
49	Amp. Malacates	81-80
50	Malacates	80
51	Compositores Mexicanos	80
52	Luís Donald Colosio	80
53	Prados de Cuauhtepc	80
54	Chalma de Guadalupe	80
55	El Tenayo Centro	80
56	Fracc. Izcalli Acatitlán	79
57	Cuauhtemoc	79
58	U.H. El Tenayo	79
59	Ex-ejido Sta. Cecilia	79
60	Independencia	79
61	Gustavo Prada	79
62	Tlayapa	79
63	El Puerto	98
64	Ex-ejido Sn. Lucas Patoni	98
65	Amp. Tenayo	98
66	Sn. Lucas Patoni	98
67	Sta. Maria Tlayacampa	79
68	Franja Municipal	79
69	Reforma Urbana	79
70	Tlayacampa	
70	Rinconada San Marcos	79
71	Sn. Pedro Barrientos	79
72	Los Rosales	79
73	El Rosal	79
74	Amp. Buenavista	79
75	Amp. Sn. Marcos	79
76	Lomas de San Carlos	83-65
77	Xochitenco	83-65
78	Mexicalco	83-65
79	Villas Tulpetlac	83-65
80	Mexihuiloya	83-65
81	Amp. Tulpetlac	83-65
82	El Ostor, Zona comunal	83-65
83	Lomas de San Carlos	83-65
84	Viveros Tulpetlac	83-65
85	Colinas de Ecatepec	65
86	Tierra Blanca	64
87	Vista Hermosa	64
88	La Joya	64
89	El Tecojote	64
90	3a. Sección Lomas de Coacalco	63-64
91	Bosques de Coacalco	63-64
92	Pino y Maple	63-64
93	Real de la Loma	63-64
94	Conjunto Jalatlaco	63-64
95	Conjunto Coacalco	63-64

Num.	Nombre de la colonia	Plano Guía Roji
96	El Laurel	63-64
97	República Mexicana	63-64
98	Sn José Ejidal	63-64
99	El ranchito	63-64
100	Periodistas de Loma Bonita	63-64
101	Fracc. arte y publicidad Jorge Briceño	63-64
102	Loma Bonita	63-64
103	Villas el Gigante	63-64
104	Conjunto Residencial El Obelisco	63-64
105	Ex-rancho San Felipe	63-64
106	Residencial La Cima	63-64
107	Conjunto Urbano Real del Bosque	62
108	Lomas Verdes Solidaridad	62
109	Libertad	62
110	Ampliación Las Torres	62
111	Las Torres	62
112	Buenvista	61
113	Cd. Labor	61
114	Jardines de la cañada	61
115	Lomas Cartagena	61
116	U.H. Lomas del parque I, II, III	61
117	Fracc. Tulipanes II	61
118	Amp. Sardaña	61
119	La joya	61
120	Arbolada	61
121	Hacienda del Parque	61
122	Villas de Perinorte	61
123	La Presita	61
124	Infonavit Sur Niños Héroe	61
125	Ejecutivo La Presa	61

Finalmente, al comparar los dos mapas se observó que el resultado obtenido a partir del método estadístico bivariado con unidades litológicas refina las áreas de peligro, comprobado con la correlación que muestra con la distribución de deslizamientos mapeados por el SEGEOMET en el 2004. Sin embargo un mayor grado de precisión puede ser obtenido para definir el peligro por procesos de ladera en la Sierra de Guadalupe si se hace una recolección a mayor detalle de los datos ocupados para la fabricación de los mapas parámetro, un ejemplo sería que en el mapa de precipitación se utilizaran datos de estaciones meteorológicas por municipio o que la definición de clases se hiciera a partir de bases teóricas establecidas para ese tipo de estudios.

Mapa de Peligro por Procesos de Ladera en la Sierra de Guadalupe Edo. de México
 Método Estadístico Bivariado con Unidades Litológicas. (Mapa 3)



7.- CONCLUSIONES.

a) La zonificación de peligro para la Sierra de Guadalupe utilizando el método heurístico, es una buena aproximación para valuar el grado de peligro. Sin embargo, los resultados presentan demasiada incertidumbre, ya que las categorías asignadas a las clases de los mapas parámetro están en función de criterios cualitativos y subjetivos. Un ejemplo claro de esta situación, se refleja en la división de los rangos, donde el peligro alto, obedece a los valores máximos de las clases de altimetría, así como el valor medio a la densidad de fracturamiento y el bajo nuevamente a la altimetría. Este comportamiento que demuestra que esta clasificación es en función a un solo parámetro y no al grueso de los demás, ni a la frecuencia de deslizamientos mostrada en el mapa de inventario.

b) El resultado de los niveles de peligro obtenidos a través del análisis estadístico bivariado, muestra una distribución basada en la suma de los valores de peso W_i . Tal es el caso de la zona con alto peligro, que si bien no es la suma de todos los pesos altos, si es la combinación de valores altos y medios, que dan como resultado la detección de zonas con mayor potencialidad a presentar peligro por procesos de ladera, lo que significa que cada valor de clase es tomado en cuenta al momento de calcular el peso final de peligro. Si recordamos que, dicho valor ésta en función de la densidad de deslizamientos en cada mapa de parámetro, entonces existe una correlación aceptable con respecto a la presencia y frecuencia observada en el inventario de deslizamientos. Esto nos permite identificar áreas con condiciones semejantes donde se han dado los deslizamientos, y permite predecir con mayor sustento donde pueden presentar ocurrir.

c) La comparación del método heurístico y el bivariado muestra una diferencia del 70.6 % del área cartografiada lo que significa que la zonificación de peligro por procesos de ladera en la Sierra de Guadalupe puede ser muy diferente cuando esta determinada por metodologías distintas.

d) Respecto al último mapa de susceptibilidad, se observa que al incluir la variable litológica se obtiene una mejor representación de la potencialidad de ocurrencia de peligro por procesos de ladera, dado que hay un cambio litológico y morfológico de la zona del valle (plana) a las laderas donde más se presenta el fenómeno y hacia las partes altas o núcleo de la Sierra, donde la ocurrencia de deslizamientos disminuye. En términos de peligro, esto se representa en una transición de bajo a medio y alto, para volver a medio y bajo peligro, respectivamente.

e) Los métodos que se exponen en este trabajo muestran ventajas y limitaciones. En cuanto al cualitativo heurístico es una buena herramienta cuando se tienen que cartografiar áreas muy grandes, donde sólo se cuenta con la información de los factores o mapas de parámetros. Sin embargo, al asignar los valores de peso a cada uno de estos mapas la información puede resultar muy incierta, ya que esta asignación se basa únicamente en la experiencia del investigador. El método bivariado asigna los valores de peso en función a un análisis de frecuencia estadístico, basado en la existencia de procesos de ladera en el pasado, lo que permite que los resultados sean más acertado que en el método heurístico, con respecto a la presencia de deslizamientos en el pasado; la desventaja de este método es que no analiza cada uno de los distintos mecanismos por separado, sino que los engloba en un mismo grupo considerando que cada uno de ellos falla por las mismas condiciones o los mismos parámetros.

Recomendaciones

Al utilizar el método bivariado para la zonificación de peligro en la Sierra de Guadalupe, es necesario contar con un mayor número de parámetros como cubierta vegetal, uso de suelo, suelos, distancia a fallas, ó refinar los existentes; es decir, contar con más datos de precipitación, fracturamiento y densidad de drenaje.

En un mapa bivariado es muy importante el número de clases y los rangos asignados a éstas, ya que de esto depende la definición de los valores de peso, entre más específica sea la información, más detallada será la clasificación de peligro, por lo cual se deben refinar los mapas existentes y aplicar reglas metodológicas en la definición de las clases para cada mapa de parámetro. Al ser un mapa más realista creemos que en las zonas de alto peligro se deben de evitar construcciones y en el caso de que éstas existan evaluar las condiciones del sitio para prevenir y mitigar accidentes por deslizamientos.

Con la información presentada en este trabajo las autoridades del Estado de México, podrían tomar medidas preventivas en las colonias que se encuentran en peligro alto y realizar planeación en aquellas que aún no están habitadas.

Bibliografía.

Alaniz, A., Samaniego, N. 2005. El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la faja volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana, tomo LVII, Núm. 1., 65-82 pp. Centro de Ciencias, UNAM Cd. México.

Alcantara, A., 2000 Landslide ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, No. 41, 9-25 pp. UNAM Cd. de México.

Aleotti P, Chowdhury R. 1999. Landslide Hazard Assessment: summary review and new perspectives. Bull Eng. Geol. Env. Springer Verlag. 58: 21- 84 p.

Campos, C., Palafox M. 2002. Inestabilidad de Laderas Sierra Norte y Nororiental del Estado de Puebla. Serie el Cielo Sobre Nosotros. Elementos No. Puebla México. 47, 51-55 pp.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2001. Programa Especial de Prevención y Mitigación del Riesgo de Desastres 2001-2006, "*Una población más segura ante fenómenos perturbadores*" Secretaría de Gobernación. México. Primera edición 115 pp.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2004. "Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de peligros y Riesgos". Serie: Atlas Nacional de Riesgos, #1. Secretaría de Gobernación. 386 pp.

Çevik, E., Topal, T., 2003. GIS-based landslide susceptibility mapping for problematic segment of the natural gas pipeline. Hendek, Turkey. Environmental Geology 44:949-962 p.

Concha, D., 2006. Caracterización Geomecánica y Modelación Numérica de los Deslizamientos críticos de la Sierra de Guadalupe, Edo. de México. Instituto de Geología, UNAM Cd. de México. 100 pp.

Demant, A., Robin, C., 1975. Las Fases del vulcanismo en México; una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico. Revista del Instituto de Geología. Núm. 75, Vol. 1. 66-79 pp. UNAM, Cd. de México.

Frausto, O., 1998. Derrumbes, deslizamientos y expansión lateral del suelo provocados por la sismicidad en el graben de Cuauhtepac: región sur de La Sierra de Guadalupe, en la Ciudad de México. Boletín del Instituto de Geografía. Investigaciones Geograficas, núm. 38, 15-29 pp. UNAM, Cd. de México.

García, E., 1982. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, UNAM, Cd. De México. 252 p.

García, P., Macías, L., Arce, L., Capra, L., Garduño, H., 2002. Geology of Nevado de Toluca Volcano and Surrounding areas, Central México. Geological Society of American Map and Chart Series MCHO89, pp. 26. UNAM Cd. de México.

Gobierno del Estado de México, Secretaría de Finanzas y Planeación (a), III GECEM., 1993 ATLAS GENERAL DEL ESTADO DE MEXICO, Volumen III. México, 235 p.

Gobierno del Estado de México (GEM), Secretaría de Ecología (b), 1999-2005 *DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DEL MUNICIPIO DE CUAUTITLÁN IZCALLI*. Dirección General de Diagnóstico Ambiental. Edo. de México, 35 p.

Gobierno del Estado de México (GEM), Secretaría de Ecología (a), 1999-2005 *DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DEL MUNICIPIO DE CUAUTITLÁN IZCALLI*. Dirección General de Diagnóstico Ambiental. Edo. de México, 36 p.

Gómez, H., Guerra, F., González, J., 2003. Los Sistemas de Información Geográfica (SIGS) en la detección de áreas inestables. *Geoenseñanza*, vol. 8 No. 01. Universidad de los Andes. San Cristóbal, Venezuela 13:33-48 pp.

González de V., Ferrer M., Ortuño, L., Oteo C., 2002. *Ingeniería Geológica*, 715 pp. Pearson Educación, Madrid España.

Hernández, S., Rodríguez C., 1999. Estabilidad de un corte realizado en el cerro Tlayacampa, ubicado en la Sierra de Guadalupe. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, 145 pp. UNAM Cd. de México.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (b) (INEGI), 1990 Guías para la interpretación cartográfica: Edafología. Cd. de México. 22 p.

Instituto Tecnológico Geominero de España, 1987. *Manual de Ingeniería de Taludes*. Madrid España 24 pp.

Lugo H.,J., 1984. Geomorfología del Sur de la Cuenca de México. Serie Varia, Inst. de Geografía, UNAM, Num. 8, 86 pp.

Lugo H., J., 1990, Mapa geomorfológico del occidente de la Cuenca de México. *Boletín del Instituto de Geografía*, núm. 21, Cd. De México, 1-19 pp.

Lugo H., J. y M., Salinas A., 1996, Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (Al norte de la Ciudad de México) y su relación con los peligros naturales, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 12 núm.1. Instituto de Geología, Cd. De México, pp. 240-251.

Mooser, F., 1956. La Cuenca de México. Consideraciones Geológicas y arqueológicas. Instituto Nacional de antropología e Historia (INAH), No. 2, 1 folleto ilustrado, 9-31 pp.

Mooser, F., 1957. Los ciclos del vulcanismo que formaron la Cuenca de México. XX Congreso Geológico Internacional. Simposio sobre vulcanología del Cenozoico, vol. 2, 337-347 pp. México.

Mooser, F., 1975. Historia Geológica de la Cuenca de México, en: Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal. México, D.F., Departamento del Distrito Federal. T.1. 9-38 pp.

Mooser, F., Montiel, A. y Zuñiga, A., 1992. Nuevo Mapa Geológico del Sur-Poniente del Valle de México, Simposio sobre Vulcanología del Cenozoico, Vol. 21, 5-16 pp. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.A.C.

Ogura, A., Soares, E., 2001. Procesos y Riesgos Geológicos. Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental, cap. 8. Instituto de Investigaciones Tecnológicas de Sao Paulo-IPT. 114-137 pp.

Oropeza, O., Zamorano O., Ortiz, P., 1998. Peligros Geomorfológicos en México: remoción en masa. En Los Desastres en México, una perspectiva multidisciplinaria. Garza y Rodríguez (Coord.). Universidad Iberoamericana-UNAM Cd. de México, Cap. VI: 149-440.

Servicio Geológico Metropolitano (SEGEOMET), 2004. Evaluación y Zonificación de los Peligros Geológicos por Deslizamientos en las Laderas de la Sierra de Guadalupe, Edo. de México. Reporte Interno. Instituto de Geología, UNAM. Cd. de México.

Soeters, R. and Westen, C.J. van:, 1996, 'Slope instability recognition, analysis and zonation', in A.K. Turner and R.L. Schuster (eds), Landslides Investigation and Mitigation, Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington, cap. 8, 19 -177 pp.

Soto, j., Gómez, J., González, A., Redondo, J., Díaz de Terán, J., Cendrero, A. y Alcalde, J., 2002. Evolución de los deslizamientos de la ladera mediante su caracterización con CS-137. Rev. C&G, 16:1-14 pp.

Suarez, J., 1998. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga Colombia. 548 p.

Süzen, M.L. y Doyuran, V., 2003. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate vs. bivariate. Environmental Geology. 45: 665-697.

Tapia, G., López, B., 2000. Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: Unidades morfogénicas a escala 1: 100,

000. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 19, núm.1, 50-65 pp. UNAM, México.

Van Westen, J., Seijmonsbergen, C., Mantovani, F. Comparing Landslide Hazard Maps (1999). Kilmner Academic Publisher. Natural Hazards 20: 137-158 pp.

Van Westen, J., 2000. The Modeling of Landslide Hazards Using GIS. International Institute for Aerospace Surveys and Earth Sciences (ITC), Enschede, the Netherlands. 21: 241-255 pp.

Varnes, D., 1984. Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice. Natural Hazards, 3, UNESCO (Int. Assoc. Eng. Geol.) Comm. On Landslide and the other mass movements on slopes, pp. 63.

Zamorano, O., Tanarro, G., Lugo, H., Rubio S., 2001. Evolución geológica y geomorfología del complejo dómico Los Pitos, norte de la Cuenca de México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 19, núm. 1, 66-79 pp. UNAM, Cd. de México.

Cartografía consultada

Comisión Nacional del Agua (CNA), 1998. "Regiones hidrológicas administrativas". Escala 1:1 000 000. México.

García, E. – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 1998. Carta de Climas (Clasificación de Koppen, modificado por García)". Escala 1:1 000 000. México.

Hoja Cuautitlán (E14A29), escala 1:50,000, Instituto Nacional De Estadística Geografía e Informática, 2002.

Instituto Nacional de Ecología (INE), 2000, "Carta Forestal Nacional". Escala 1: 250 000 Dirección de diagnóstico ambiental. México.

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP)- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 1995. Carta Edafológica de México, escala 1: 250, 000. Gobierno Federal de la República Mexicana.