



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MÉXICO**



---

**FACULTAD DE GEOGRAFÍA**

**ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS. CASO DE ESTUDIO:  
SECTOR CENTRO NORTE DE LA CIUDAD DE TOLUCA, ESTADO DE  
MÉXICO**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS**

**PRESENTA:**

**ROSAURA KARINA ESQUIVEL ARZATE**

**GENERACIÓN 2013-2018**

**ASESOR:**

**DR. EN C.T. ALEXIS ORDAZ HERNÁNDEZ**

**REVISORES:**

**MTRO. JULIO CÉSAR CARBAJAL MONROY**

**DR. HÉCTOR VICTOR CABADAS BÁEZ**

**Noviembre, 2018.**

## ÍNDICE

RESUMEN .....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES .....	11
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. Movimientos Gravitacionales .....	15
2.1.1. Fundamentos teóricos.....	15
2.1.2. Definición.....	15
2.1.3. Tipos de movimientos gravitacionales .....	16
2.1.4. Factores condicionantes y desencadenantes.....	22
2.1.5. Indicios de la inestabilidad de laderas.....	23
2.1.6. Daños derivados .....	24
2.2. Métodos más empleados en el análisis de susceptibilidad a los deslizamientos. ....	26
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	29
CAPÍTULO IV. DESCRIPCIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	40
4.1. Ubicación geográfica del área de estudio .....	40
4.2. Geología del sitio .....	41
4.3. Características geomorfológicas.....	47
4.4. Características edafológicas.....	50
4.5. Clima.....	51
4.6. Uso de suelo.....	52
CAPÍTULO V. RESULTADOS .....	54
5.1 Mapa de susceptibilidad a deslizamientos .....	54
CONCLUSIONES.....	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Impacto de los movimientos gravitacionales sobre la infraestructura en el área de estudio: a) Caída de bloques sobre el Paseo de los Matlazincas. b) Talud en la zona de la Teresona construido para ubicar una gasolinera, provocando serios agrietamientos en las construcciones adyacentes.	9
<b>Figura 2.1.</b> Deslizamientos rotacionales.	17
<b>Figura 2.2.</b> Deslizamientos traslacionales.	17
<b>Figura 2.3.</b> Diagramas representativos de flujos en diferentes materiales.	17
<b>Figura 2.4.</b> Tipos de desprendimientos.	18
<b>Figura 2.5.</b> Vuelcos.	18
<b>Figura 2.6.</b> Avalanchas rocosas.	19
<b>Figura 2.7.</b> Deslizamientos laterales.	19
<b>Figura 3.1.</b> Planilla de inventario de movimientos gravitacionales. Modificada a partir de la Agencia de Medio Ambiente de Cuba (2012).	30
<b>Figura 3.2.</b> Escenario de máxima susceptibilidad, donde coincide la dirección de echado de los estratos con la dirección de la pendiente del terreno (Foto tomada por L. González de Vallejo).	32
<b>Figura 3.3.</b> Modelo cartográfico utilizado para la elaboración del mapa de susceptibilidad a deslizamientos.	34
<b>Figura 3.4.</b> Puntos de levantamiento geológicos en el área de estudio.	36
<b>Figura 4.1.</b> Ubicación geográfica del área de estudio.	41
<b>Figura 4.2.</b> Mapa geológico escala 1:50 000 para el sitio de estudio y áreas aledañas. Modificado a partir de INEGI (1975). A: Unión de las cartas geológicas E14E37 y E14E38 y B: Mapa geológico del área de estudio	42
<b>Figura 4.3.</b> Mapa temático que representa la distribución de la geología del área de estudio. Escala original 1: 10 000.	43
<b>Figura 4.4.</b> Características la roca, <b>A)</b> : se observan cristales de plagioclasas, <b>B)</b> : se observa que la roca tiene una textura amigdaloides, <b>C)</b> : se observa una zona de transición al intemperismo.	44

<b>Figura 4.5.</b> Características de la roca. Se observa una roca ácida intemperizada, con cristales alterados.	45
<b>Figura 4.6.</b> Características de la roca, <b>A):</b> se observan procesos de intemperismo en la roca, <b>B):</b> alteración hidrotermal.	45
<b>Figura 4.7.</b> Características de la roca, a) material intemperizado, b) material intemperizado c) zona inferior plagioclasa y material rojizo de arrastre por agua.	46
<b>Figura 4.8.</b> Mapa temático “pendientes del terreno”.	48
<b>Figura 4.9.</b> Mapa temático que representa la orientación preferente de las laderas en el área.	49
<b>Figura 4.10.</b> Mapa que representa la coincidencia espacial entre la inclinación de las laderas y la dirección de buzamiento de los planos de fallas y de los estratos.	50
<b>Figura 4.11.</b> Mapa de suelos escala 1:50 000 para el sitio de estudio y áreas aledañas. Modificado a partir de INEGI (1976). A: Unión de las cartas edafológicas E14E37 y E14E38 y B: Mapa de suelos del área de estudio.	51
<b>Figura 4.12.</b> Mapa temático “Usos del suelo”.	53
<b>Figura 4.13.</b> Deslizamientos en forma de cuña ocurridos en el pasado, el cuerpo del deslizamiento estuvo delimitado por planos de fallas (línea discontinua amarilla) que según su dirección de buzamiento y ángulo de buzamiento se intersectan. (1)295°/71°, (2)025°/68°, (3)215°/75° y (4) 043°/68°.	53
<b>Figura 5.1.</b> Mapa de susceptibilidad a deslizamientos.	57
<b>Figura 5.2.</b> Presencia de bosques semidensos en la parte elevada del cerro, los cuales constituyen una protección natural para las laderas en el área de estudio.	54
<b>Figura 5.3.</b> Cerro cubierto por construcciones.	55
<b>Figura 5.4.</b> Desarrollo de suelos en zonas de susceptibilidad alta a los deslizamientos.	56
<b>Figura 5.5.</b> Deslizamiento sobre la calle camino viejo a Santiago Tlaxomulco (Barrio de San Miguel Apinahizco). (A): Se observan los daños sobre la infraestructura. (B) Encerrado en la línea discontinua amarilla en forma de círculo se visualizan los árboles inclinados, indicador de una ladera activa.	59
<b>Figura 5.6.</b> Deslizamiento activo.	60

<b>Figura 5.7.</b> Caída de Rocas en San Miguel Apinahuizco (Vialidad Paseo Matlazincas).	61
<b>Figura 5.8.</b> Muros de gaviones a pie de talud y cuneta de drenaje. Foto tomada de González de Vallejo (2002).	62
<b>Figura 5.9.</b> Deslizamientos ocurridos en los trabajos de movimientos de terreno para la construcción de una gasolinera en el Barrio La Teresona. <b>A:</b> Encerrado en el círculo amarillo aplicación de la medida estructural “Muros de gaviones” y <b>B:</b> Señalado por flechas rojas se muestran agrietamientos severos en las viviendas y negocios adyacentes.	63
<b>Figura 5.10.</b> Ejemplo de uso de mallas metálicas. Foto tomada M. Ferrer en González de Vallejo (2002).	63

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Clasificación de los movimientos gravitacionales.	20
<b>Tabla 2.2.</b> Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales de las ladera.	22
<b>Tabla 2.3.</b> Escalas de velocidades de movimiento de ladera. (CENAPRED, 2001)	24
<b>Tabla 3.1.</b> Litologías identificadas en el área de estudio y los pesos asignados para el proceso de ponderación. Modificado a partir de la propuesta de Mora y Vahrson (1991).	35
<b>Tabla 3.2.</b> Rangos de pendientes adoptados y los pesos asignados para el proceso de ponderación. Modificado a partir de la propuesta de SNET (2004).	37
<b>Tabla 3.3.</b> Valores de ponderación adoptados en función de la coincidencia espacial entre la dirección de las pendiente y las direcciones de buzamiento medidas en los afloramientos estudiados.	38
<b>Tabla 3.4.</b> Principales usos del suelo para el área objeto de investigación y los valores de ponderación asignados.	38
<b>Tabla 3.5.</b> Puntuación final obtenida para cada nivel de susceptibilidad a los deslizamientos.	39

## **RESUMEN**

En la presente investigación se realizó un análisis de susceptibilidad a deslizamientos en el sector centro norte de la ciudad de Toluca, Estado de México. En este caso de estudio se utilizó la metodología Mora-Vahrson con algunas Modificaciones. La metodología tomó en cuenta cuatro variables: geología, pendiente, orientación de laderas y uso de suelo. Se utilizó el programa *ArcGIS 10.5*, para el análisis de la información y la realización de los mapas. Los resultados obtenidos permitieron ubicar zonas susceptibles a los deslizamientos, especialmente se cartografiaron sitios de susceptibilidad alta y muy alta en un 35% de la superficie de estudio. A partir de esta se establecen un grupo de medidas de prevención-mitigación, que transitan desde medidas de ordenamiento urbanísticos, hasta sugerencias de estabilidad de las laderas susceptibles a los deslizamientos.

## **INTRODUCCIÓN**

En la República Mexicana existen múltiples escenarios donde confluyen un conjunto de factores geomorfológicos y tectónicos favorables para la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa. Si a estas condiciones naturales se le agregan los efectos del cambio climático, especialmente expresados a través de fenómenos meteorológicos extremos, por ejemplo, intervalos de lluvias extremas, se puede asegurar entonces la presencia de un contexto favorable para la ocurrencia de movimientos gravitacionales.

En esta tesis, se pretende realizar un estudio exhaustivo de los factores condicionantes de los movimientos gravitacionales específicamente de los deslizamientos, para el caso de estudio seleccionado. Cada factor tendrá una expresión cartográfica, lo que permitirá el análisis combinado de factores, para finalmente obtener un mapa de susceptibilidad a deslizamientos a escala 1: 10 000.

El caso de estudio seleccionado, se enfoca en el sector centro norte de la ciudad de Toluca, exactamente en los Barrios “La Teresona”, “San Miguel Apinahuizco”, “San Luis de Obispo” y “Zopilocalco Norte”. Geomorfológicamente delimitados en su perímetro norte por el Cerro la Teresona, con pendientes superiores al 25% y una elevación sobre el nivel medio del mar de 3000 mts aproximadamente, donde los procesos de expansión de la mancha urbana conllevaron a la ocupación paulatina de zonas inestables, de relieve abrupto, eliminando así cobertura vegetal del sitio.

### **Planteamiento del problema**

Actualmente se reportan grietas en la carpeta asfáltica de algunos viales, agrietamiento en muros de hogares y bloques de rocas de aproximadamente 2.5 mts de diámetro que en diferentes momentos han impactado la principal vía de comunicación (Figura 1), así como deslizamientos en forma de cuña. En este escenario, resulta de vital importancia la generación de cartografía que zonifique el área según los diferentes niveles de susceptibilidad frente a los deslizamientos. La cartografía derivada de este trabajo, permitiría tomar decisiones en materia de los sitios prioritarios en cuanto a la aplicación de medidas de prevención o mitigación frente a deslizamientos.



**Figura 1.** Impacto de los movimientos gravitacionales sobre la infraestructura en el área de estudio: a) Caída de bloques sobre el Paseo de los Matlazincas. b) Talud en la zona de la Teresona construido para ubicar una gasolinera, provocando serios agrietamientos en las construcciones adyacentes.

## **Justificación**

Este trabajo, trata sobre análisis de susceptibilidad a los deslizamientos. Se seleccionó como caso de estudio, al sector centro norte de la ciudad de Toluca y tiene la finalidad de analizar la predisposición del medio físico a la ocurrencia de deslizamientos. Actualmente se registran sistemáticamente, diferentes tipos de movimientos gravitacionales en el área de estudio, especialmente deslizamientos y caídas de roca.

El caso de estudio seleccionado, es un sitio “vital” para la ciudad de Toluca, se trata de una urbanización no planificada, de hecho, el Plan de Desarrollo Urbano clasifica está escenario geográfico como “no urbanizable”. Derivado de esto, hasta el presente se han reportado daños a la infraestructura, que pudieran de alguna forma mitigarse al contar con una cartografía de susceptibilidad a los deslizamientos, producto que se pretende obtener de esta investigación.



El análisis de susceptibilidad frente a los deslizamientos, es el primer paso para arribar al análisis de peligro y globalmente uno de los estudios iniciales en la gestión del riesgo. Por tanto, este trabajo persigue convertirse en una contribución sólida a la futura gestión de riesgos socio-naturales en la Ciudad de Toluca.

Para efectuar el trabajo se parte de la siguiente **hipótesis**: El análisis detallado de las condiciones físicas del área de estudio, especialmente las condiciones geológicas, geomorfológicas y de uso de la superficie, permitirán hacer un análisis de la susceptibilidad frente a deslizamientos, mismo que servirá en el futuro de base para una gestión de los riesgos socio-naturales para el espacio geográfico que ocupan los sectores de los barrios “La Teresona”, “San Miguel Apinahuizco”, “San Luis de Obispo” y “Zopilocalco Norte”.

Con el ánimo de atender esta problemática, se plantea como **objetivo general** para esta tesis: “Analizar la susceptibilidad frente a deslizamientos en los barrios “La Teresona”, “San Miguel Apinahuizco”, “San Luis de Obispo” y “Zopilocalco Norte” (Toluca) para que la cartografía que se obtenga de esta investigación sirva como base en las futuras directrices de la planificación territorial ordenada de este espacio geográfico”.

Los **objetivos específicos** propuestos son:

- Recopilar y analizar información para elaborar cartografía de la zona de estudio.
- Identificar y analizar los factores condicionantes de los deslizamientos para elaborar mapas temáticos.
- Elaborar mapas de susceptibilidad frente a deslizamientos en el caso de estudio, esto como paso previo a futuros análisis de peligrosidad y riesgos a deslizamientos.
- Analizar y validar en campo el mapa de susceptibilidad obtenido.

## **CAPÍTULO I. ANTECEDENTES**

La importancia del estudio de los procesos de remoción en masa radica en el interés de reducir la afectación de tales fenómenos en la sociedad, desde cualquier punto de vista en que se le observe (Alcántara, 2003). En este capítulo, se tratará de recopilar y discutir algunos trabajos vinculados a la temática, que se han desarrollado hasta el momento, iniciando por el Estado de México. Evidentemente, estos trabajos constituyen un punto de partida que proveen herramientas y coloca en contexto la situación de los deslizamientos.

De los trabajos más cercanos al área de estudio, se consultó a García (2008), quien desarrolló el trabajo titulado “Evaluación de Riesgo por Caída de Bloques en Santiago Miltepec, Toluca. Estado de México”, la cual a través de estudios geológicos y geomorfológicos evaluó el peligro que existe en la zona por caída de bloques y el riesgo que existe hacia la población.

Bernal (2013), realizó un trabajo acerca de Remoción en Masa en el Extremo Noroeste del Parque Estatal Otomí-Mexica, Estado de México. La investigación, tuvo como objetivo realizar un inventario para identificar las zonas que presentaban procesos activos de remoción en masa, considerando la tipología, cartografía y mecanismos, a través de un enfoque geomorfológico con el apoyo de geotecnologías como son: imágenes satélites, trabajo de campo y uso de SIG (Sistemas de Información Geográfica).

Castillo (2013) realizó su trabajo de tesis “Análisis Multivariante para la Zonificación de Peligro por Procesos de Ladera en el Municipio de Temascaltepec, con el objetivo de aplicar un modelo de estadística multivariada en un Sistema de Información Geográfica que permitiera zonificar el grado de peligro por procesos de remoción en masa.

También en el año Garduño (2013), desarrolló su tesis “Vulnerabilidad ante los movimientos de ladera en el pueblo Santa Cruz Ayotuxco, municipio de Huixquilucan, Estado de México”. El trabajo tenía como objetivo determinar las zonas más susceptibles a la ocurrencia de movimientos de ladera, haciendo uso de la metodología de Mora-Vahrson-Mora con algunas modificaciones.

Posteriormente, Pineda (2014) realizó una evaluación de los factores que determinan el origen de los procesos gravitacionales en el Municipio de Lerma. Para alcanzar este

objetivo, elaboró un mapa de procesos gravitacionales, mediante la aplicación de un análisis multicriterio, considerando la geología, altimetría, pendientes, edafología, clima, órdenes de drenaje, uso de suelo y la erosión.

Báez (2014), retomó el caso de estudio del Municipio de Temascaltepec, en este caso adoptando y potenciado la visión geomorfológica. La autora determinó la distribución espacial de los procesos de remoción en masa y determinó los sitios más propensos a su ocurrencia. Tomó en cuenta las variables de geología (meteorización, fallas y fracturas), edafología (cohesión-textura-movimiento y tipo de suelo), cobertura del suelo (uso de suelo, tipo de vegetación y tipo de arraigamiento), hidrología (densidad de disección) y la geomorfología (geoformas, pendientes y geometría de laderas).

Fuera del Estado de México, uno de los Estados donde mayor número de investigaciones relacionadas a los deslizamientos, su cartografía y determinación de los diferentes niveles de amenaza, es el Estado de Puebla. En este caso se pueden citar los trabajos de Capra et al. (2003). Legorreta et al. (2014) y Cruz (2015),

Por ejemplo Hernández (2008), en su trabajo titulado “Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa con base en análisis multivariado: la región de Zapotitlán de Méndez, Puebla”. Para desarrollar su trabajo, evaluó mediante el análisis estadístico de multivariable, la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa en la región del Valle de Zapotitlán de Méndez. Como herramientas empleó la observación, caracterización de los deslizamientos ocurridos en el área y la relación que guardan con la geología, geomorfología y las condiciones geotécnicas del terreno. Finalmente mostró los resultados en mapas de susceptibilidad a deslizamientos para la zona.

Por su parte, Muñiz y Hernández (2012), llevaron a cabo su trabajo que lleva por nombre “Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico” , Consideraron diez capas temáticas asociadas a factores condicionantes tales como: inestabilidad antecedente (mapa-inventario), litología, pendiente, radiación solar, cortes en talud, zonas inestables por caminos, asentamientos humanos, distancia a morfolineamientos, áreas de desmonte y concentración de escurrimientos superficiales.

Fuera de las fronteras mexicanas, también se han realizado importantes trabajos, que, aunque geológica y geomorfológicamente no están relacionados con el caso objeto de estudio; si sus antecedentes metodológicos pueden constituir referentes de consulta para esta investigación.

Hervas (2001) en el estudio del Barranco de Tirajana (Gran Canaria), realizó una evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso combinado de los SIG, la teledetección y el método de evaluación multicriterio. El autor cataloga de eficaz, el uso combinado de los métodos antes mencionados, para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos en zonas donde no se dispone de datos geotécnicos o hidrogeológicos.

Jiménez (2005) para obtener el título de Doctor en Ciencias y Tecnología del Medio Ambiente, realizó el análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de Rules, Granada. En este caso, obtuvo un inventario donde ubicó 252 movimientos de ladera, los que clasificó como deslizamientos, flujos de derrubios y en menor proporción desprendimientos y movimientos complejos. Posteriormente analizó los factores condicionantes para el análisis de susceptibilidad, con el empleo del método de la matriz, mediante el cruce de estos con el inventario.

Villacorta (2007) en tu trabajo de tesis de maestría titulado “Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca del río Llaminchán (Cajamarca), Perú” donde mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica, logró el cartografiado de zonas susceptibles a los movimientos de laderas. Para lograrlo tuvo en cuenta el inventario de movimientos de ladera, de la topografía, de la litología y de la hidrogeología.

Campos (2014) realizó la investigación “Evaluación de la Susceptibilidad de Remociones en Masa en la Quebrada de los Chanchos, Región Metropolitana, Chile” mediante la aplicación de metodologías establecidas por Lara (2007) y Muñoz (2013) a diferentes escalas. Obteniendo como resultado mapas de susceptibilidad del área de estudio, para las metodologías de Lara (2007) en escala 1:20000 y 1:5000, y para el caso de la aplicación de la metodología de Muñoz (2013) a escala 1:5000.

Los trabajos anteriores, abordan diferentes zonas de estudio, que mediante metodologías distintas, han logrado obtener una localización y zonificación de zonas susceptibles a movimientos gravitacionales.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Movimientos Gravitacionales**

#### **2.1.1. Fundamentos teóricos**

Parte de la terminología empleada en Geomorfología se deriva de la literatura en inglés, razón por la cual la traducción de algunos términos al español o castellano crea en algunas ocasiones confusión. En el caso particular de los procesos de remoción en masa (mass movement processes), el grado de confusión se incrementa aún más, debido a la falta de consenso que existe entre la comunidad científica sobre el uso de la terminología relacionada con este tipo de procesos (Alcántara, 2000).

Los procesos de remoción en masa involucran el movimiento de los materiales formadores de las laderas bajo la influencia de la gravedad y sin la asistencia primordial de algún agente de transporte fluido (Brunsden, 1979). Términos como "procesos gravitacionales", "procesos de ladera" y "movimientos de ladera" son empleados correcta y ampliamente como sinónimo de los procesos de remoción. Sin embargo, existen muchos argumentos en cuanto a los tipos de procesos que deben incluirse dentro de este término, por lo que cada autor o cada escuela optan por una clasificación propia. La combinación de la variedad de movimientos de ladera existentes en la naturaleza, por un lado, y la gran cantidad de expertos en la materia, por otro, brinda sin lugar a dudas, pocas opciones en la elaboración de una clasificación universal (Alcántara, 2000).

#### **2.1.2. Definición**

Existen diferentes términos para denominar los movimientos gravitacionales, algunos autores como Bloom (1982), Cruden (1991), Huser (1993), De Pedraza (1996) Keller y Blodget (2004), Tarbuck y Lutgens (2005), realizaron sus aportes.

El término colectivo para todos los movimientos gravitacionales o cuesta abajo de los detritos rocosos meteorizados es "remoción en masa" (Bloom, 1982). Mientras que Cruden (1991) define el término movimientos gravitacionales como el movimiento de una masa de roca, tierra o derrubios hacia abajo de una ladera.

Hauser (1993) define los procesos de remoción en masa como como procesos de transporte de material, de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores.

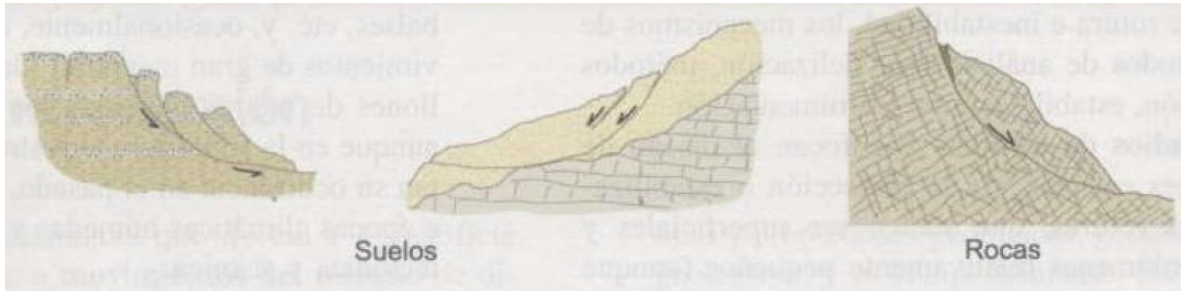
Según De Pedraza (1996) los procesos de remoción en masa también son conocidos como movimientos de ladera, deslizamientos en masa, así como procesos gravitacionales. Este tipo de proceso natural, este autor, lo define como el desplazamiento de materiales en las vertientes, sin intervenir ningún soporte activo o medio para movilizarlos, es decir, impulsados por su propio peso; corresponde, por tanto, a una auto-traslación bajo la acción directa de la gravedad que, en estas circunstancias, deberá considerarse un agente específico más.

Por su parte, Keller y Blodget (2004) en un sentido más restringido, plantean que los movimientos en masa se refieren a un rápido movimiento de ladera de rocas o suelo en forma de una masa más o menos coherente. Finalmente, autores como Tarbuck y Lutgens (2005), definen a estos procesos como el movimiento pendiente abajo de roca, regolito y suelo, bajo la influencia directa de la gravedad.

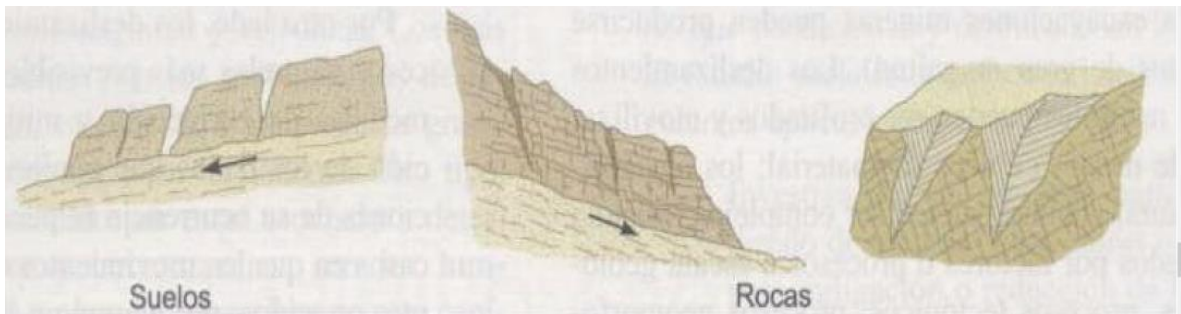
### **2.1.3. Tipos de movimientos gravitacionales**

Distintos autores han propuesto clasificaciones para los movimientos gravitacionales con criterios diferentes. Por ejemplo González de Vallejo (2002) lo hace de acuerdo al tipo de movimiento, Keller y Blodget (2004) según el mecanismo y tipo de movimiento de masa. En la tabla 2.1, se puede apreciar los enfoques empleados por Keller y Blodget (2004), Gutiérrez (2008) y CENAPRED (2001).

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelo o roca que se deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies; la masa generalmente se desplaza en equilibrio al pie de la ladera, esta puede seguir en movimiento a lo largo de cientos de metros y alcanzar velocidades muy elevadas, dando lugar a un flujo; los deslizamientos también pueden ocasionar avalanchas rocosas. Existen dos tipos de deslizamientos, tipo rotacionales y tipo traslacionales (Figuras 2.1 y 2.2) (González de Vallejo, 2002).

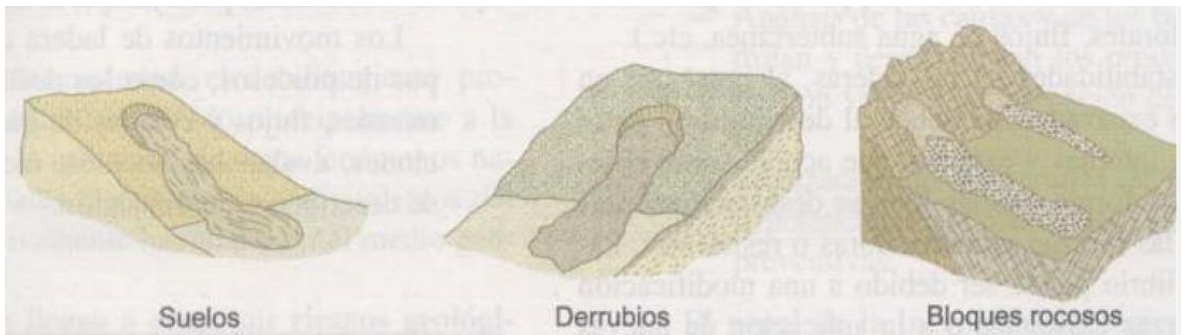


**Figura 2.1.** Deslizamientos rotacionales.



**Figura 2.2.** Deslizamientos traslacionales.

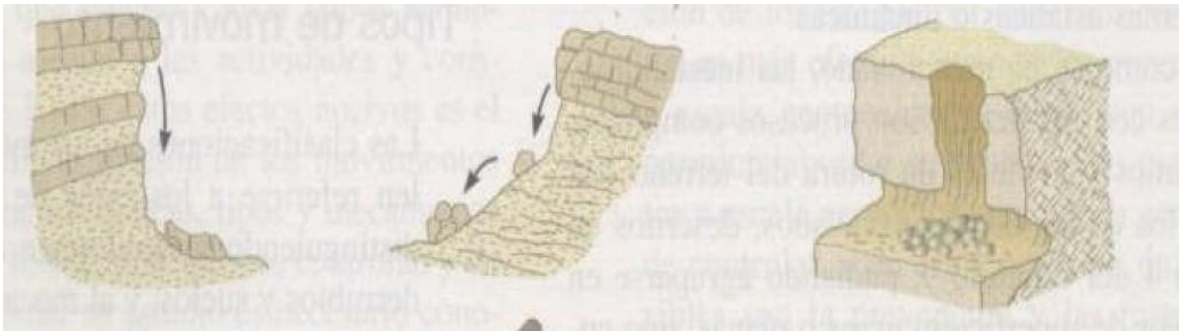
Por su parte, González de Vallejo (2002), define los flujos como movimientos de masa de suelo (flujos de barro o tierra), derrubios (coladas de derrubios) o bloques rocosos (coladas de fragmentos rocosos) con abundante presencia de agua, donde el material esta disgregado y se comporta como un fluido, sufriendo una deformacion continua, sin presentar superficies de rotura definidas (Figura 2.3).



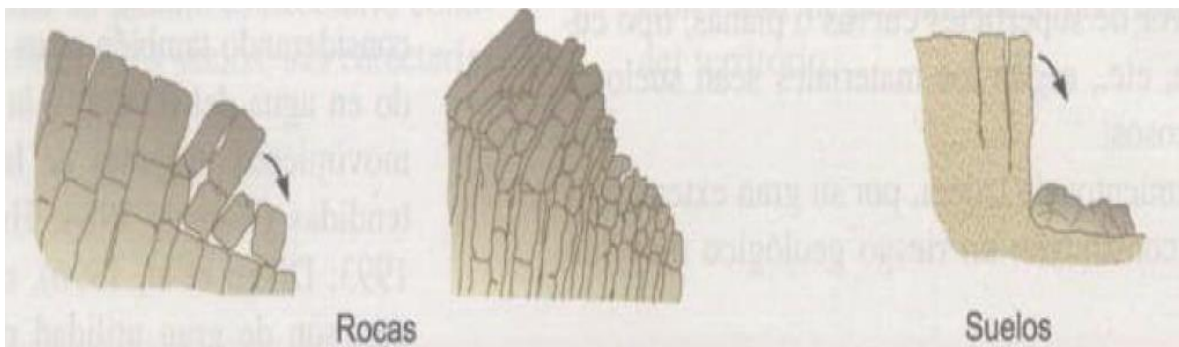
**Figura 2.3.** Diagramas representativos de flujos en diferentes materiales.



Mientras que el desprendimiento, este mismo autor, lo define como caídas libres muy rápidas de bloques o masas rocosas independizadas por los planos de discontinuidad preexistentes (tectónica, superficial de estratificación, grietas de tracción, etc.) (Figura 2.4). Los vuelcos de estratos o fragmentos de masa se pueden incluir dentro de los desprendimientos (Figura 2.5).



**Figura 2.4.** Tipos de desprendimientos.



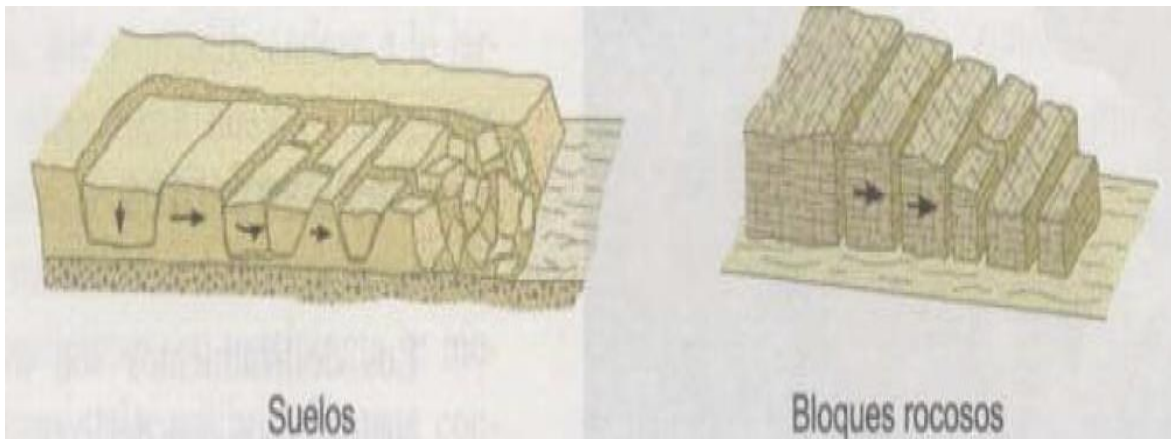
**Figura 2.5.** Vuelcos.

Otro de los procesos gravitacionales, son las avalanchas rocosas. Estos procesos son considerados como desprendimientos o movimientos complejos en algunas clasificaciones, son muy rápidos, con caídas de masas de rocas o derrubios que se desprenden de laderas escarpadas y pueden ir acompañadas de hielo y nieve (Figura 2.6) (González de Vallejo, 2002).



**Figura 2.6.** Avalanchas rocosas.

Finalmente los desplazamientos laterales, que en algunas clasificaciones los reconocen como extensión lateral o *lateral spreading*, hacen referencia al movimiento de bloques rocosos o masas de suelo muy coherente y cementado sobre un material muy blando y deformable. Los bloques se desplazan muy lentamente a favor de pendientes muy bajas. Los movimientos son debidos a la perdida de resistencia del material subyace, que fluye o se deforma bajo el peso de bloques rígidos (Figura 2.7) (González de Vallejo, 2002).



**Figura 2.7.** Deslizamientos laterales.

**Tabla2.1** Clasificación de los movimientos gravitacionales.

<b>Tipos más comunes de deslizamientos del terreno y otros movimientos de ladera.</b>		
Keller y Blodget (2004)		
<b>Mecanismo</b>	<b>Tipo de movimiento de masa</b>	<b>Características</b>
Caída	Caída de roca	Caen rocas individuales por el aire y pueden acumularse como talud.
Deslizamiento	Deslizamiento	Bloques cohesivos de material blando de la tierra se desprenden en una superficie curva; también denominada desprendimiento rotacional.
	Deslizamiento de suelo	Suelo y otros materiales de la tierra erosionados se desprenden en una superficie inclinada del lecho de roca o sedimento cohesivo; también denominado desprendimiento de detritos o de tierra
	Desprendimiento de roca	Grandes bloques de lecho de roca se desprenden en una superficie plana, como los planos de estratificación o foliación (metamórfica).
Flujo	Avalancha	Flujo granular de diferentes combinaciones de nieve, hielo, detritos orgánicos, rocas sueltas o suelo que se mueve con mucha rapidez pendiente abajo.
	Arrastre	Movimiento muy lento ladera debajo de rocas y suelo.
	Flujo de tierra	Masa de suelo y roca erosionada húmeda, parcialmente cohesiva e internamente deformada.
	Flujos de detritos	Mezcla fluida de rocas, arena, lodo y agua que es intermedia entre un deslizamiento de tierra y un flujo de agua; incluye flujos de lodo y lahars.
	Complejo	Una combinación de dos o más tipos de deslizamiento, flujo y ocasionalmente caídas; se forma cuando un tipo de desprendimiento cambia a otro al moverse pendiente a bajo.
Tipos de movimientos de masa. (Gutiérrez, 2008)		
Tipo	Concepto	

Desprendimientos, caídas de rocas (fallas, rockfalls)	Masa generalmente de rocas que se desprende de un talud abrupto (cantil, desmonte) mediante una superficie de corte normalmente pequeña.
Vuelcos (topples)	Consiste en una rotación hacia fuera de la ladera de una masa de roca o suelo, en torno a un punto o eje por debajo del centro de gravedad de la masa desplazada. Los vuelcos son roturas que se desarrollan sobre materiales con estructuras verticales, formada por planos de discontinuidad de la roca.
Deslizamientos	Es un movimiento de ladera de una masa de suelo o roca que tiene lugar fundamentalmente sobre superficies de rotura o sobre estrechas zonas de intensa deformación por cizallamiento.
Extensiones laterales (lateral spreading)	Deslizamiento lateral de una roca o masa de suelo sobre un material infrayacente más blando, en el que la superficie de cizallamiento basal no suele estar bien definida.
Flujos	Constituyen un tipo de movimiento en masa fluidificada por el agua o aire. Implica una mayor deformación interna que un deslizamiento.
Movimientos de masa complejos	Se manifiestan por las diferentes partes de la masa movilizada o por las distintas etapas de desarrollo de los movimientos.
<b>Clasificación de los tipos de procesos de ladera existentes (CENAPRED, 2014)</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Concepto</b>
Los caídos o derrumbes	Son movimientos repentinos de suelos y fragmentos aislados de rocas que se originan en pendientes abruptas y acantilados, por lo que el movimiento es prácticamente de caída libre, rodando y rebotando.
Flujos	Movimientos de suelos y/o fragmentos de rocas ladera abajo, en donde sus partículas, granos o fragmentos tienen movimientos relativos dentro de la masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser de muy lentos a muy rápidos, así como secos o húmedos. Entre los más importantes se pueden distinguir los siguientes: Flujos de lodo, flujos o avalancha de detritos y lahares.
Deslizamientos	Movimientos de una masa de materiales terrosos pendiente abajo, delimitada por una o varias superficies, planas o concavas, sobre las que se desliza el material inestable: - Rotacionales – Traslacionales
Expansiones o desplazamientos laterales	Movimientos de masas terreas que ocurren en pendientes muy suaves, que dan como resultado desplazamientos casi horizontales. Con frecuencia son causados por licuación, fenómeno en el que los materiales sueltos y saturados, predominantemente arenosos y limosos, adquieren el comportamiento de un fluido como consecuencia de las vibraciones causadas por un sismo.

Movimientos complejos	Los movimientos complejos son resultado de la transformación del movimiento inicial en otro tipo de movimiento al ir desplazándose ladera abajo. Las avalanchas de rocas y los flujos deslizantes son de los más comunes y pueden ocasionar cuantiosas pérdidas.
-----------------------	--

#### 2.1.4. Factores condicionantes y desencadenantes

Los factores condicionantes y desencadenantes indican el comportamiento y las propiedades de los materiales. Los factores condicionantes (o <<pasivos>>) dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los desencadenantes (o <<activos>>) pueden ser considerados como factores externos que provocan o desencadenan las inestabilidades y son responsables, por lo general, de la magnitud y velocidad de los movimientos. Indican el comportamiento y las propiedades de los materiales (Tabla 2.2) (González de Vallejo, 2002).

**Tabla 2.2.** Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales de las ladera.

Factores		Influencias y efectos
Condicionantes	Relieve (pendientes, geometría)	Distribución del peso del terreno
	Litología (composición y textura)	Densidad, resistencia, comportamiento hidrogeológico
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad, comportamiento discontinuo y anisótropo, zonas de debilidad.
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrológico, generación de presiones intersticiales
	Deforestación	Modificaciones en el balance hídrico, erosión.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.

Desencadenantes	Precipitaciones y aportes de agua	Variación de las presiones intersticiales y del peso del terreno, saturación en suelos, erosión.
	Cambio en las condiciones hidrológicas	
	Aplicación de cargas estáticas o dinámicas	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera, incremento de presiones intersticiales
	Cambios morfológicos y de geometría en las laderas	Variación de las fuerzas debido al peso, cambio del estado tensional
	Erosión y socavación de pie	Cambios geométricos en la ladera, cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera.
	Asociaciones climáticas (procesos de deshielo, heladas, sequías)	Cambio en el contenido de agua del terreno, generación de grietas y planos de debilidad, disminución de las propiedades resistentes.

### 2.1.5. Indicios de la inestabilidad de laderas.

Los procesos de inestabilidad de laderas se manifiestan por una serie de indicios que permiten identificar áreas que pueden, o han sido afectadas por la inestabilidad de laderas, entre ellos pueden destacarse los siguientes (CENAPRED, 2001):

- Manantiales, filtraciones o suelo saturados en áreas que generalmente no están húmedas.
- Desarrollo de grietas o abultamientos en el terreno, ya sea natural o artificial.
- El movimiento de suelo que dejan al descubierto las cimentaciones de las estructuras.
- Estructuras secundarias o añadidas (terrazas, marquezas, etc.) que se han movido y/o inclinado con relación a la estructura principal.
- Inclinación y/o agrietamiento de pisos y cimentaciones de concreto.
- La ruptura de tubos de agua y otras estructuras subterráneas.

- Inclinación de postes telefónicos y/o eléctricos, árboles, muros de contención o cercas.
- Cercas o postes desalineados.
- Carreteras que se hundan súbitamente.
- Cuando el nivel del agua de un arroyo se incrementa rápidamente, posiblemente acompañado por incrementos en la turbidez del agua.
- Cuando los niveles del agua en los arroyos descienden súbitamente, a pesar de que está lloviendo recientemente.
- Puertas y ventanas que no cierran con facilidad y espacios visibles entre los marcos de las mismas.

### 2.1.6. Daños derivados

La velocidad con la que se mueven las laderas varía mucho dependiendo del tipo de movimiento (caído, deslizamiento o flujo), de la inclinación del terreno y de la cantidad de agua. Los caídos y los flujos pueden ser repentinos. Sin embargo, los flujos son más importantes ya que generalmente involucran una variedad de materiales de diferentes génesis y pueden cubrir áreas extensas. Los flujos están conformados por materiales terrosos saturados. Mientras más agua tiene, mayor es su velocidad. De la misma manera, mientras más inclinada es la ladera, mayor será la movilidad de los materiales inestables. Es necesario conocer la velocidad de los movimientos porque esto permite saber cuál es el posible impacto en las zonas habitadas o donde exista alguna obra de infraestructura. Para identificar el grado de peligro de un problema de inestabilidad de laderas, se debe partir del hecho de que mientras mayor sea la velocidad del movimiento, mayor será su potencial destructivo (Tabla 2.3) (CENAPRED, 2001).

**Tabla 2.3.** Escalas de velocidades de movimiento de ladera. (CENAPRED, 2001).

Velocidad	Descripción de velocidad	Naturaleza de impacto
3 m/min – 5 m/min	Extremadamente rápido	Catástrofe de gran violencia
0.3 m/min – 3m/min	Muy rápido	Perdida de algunas vidas, gran destrucción.
1.5 m/año – 13 m/mes	Rápido	Posible escarpe y evacuación, estructuras, posesiones y equipos destruidos.

1.5 m/año – 1.6 m/año	Moderado	Estructuras poco sensibles pueden sobrevivir.
1.5 m/año – 1.6 m/año	Lento	Carreteras y estructuras poco sensibles pueden sobrevivir a través de trabajo de mantenimiento constante.
0.06 m/año – 0.016 m/año	Muy lento	Algunas estructuras permanentes no son dañadas y sufren agrietamientos por el movimiento, pueden ser reparadas.
	Extremadamente lento	No hay daño a las estructuras construidas con criterios de ingeniería formales.



## **2.2. Métodos más empleados en el análisis de susceptibilidad a los deslizamientos.**

La susceptibilidad, generalmente, expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno. La susceptibilidad es una propiedad del terreno que indica qué tan favorables o desfavorables son las condiciones de éste, para que puedan ocurrir deslizamientos (Suárez, 2009).

Por otra parte, el mapa de susceptibilidad clasifica la estabilidad relativa de un área, en categorías que van de estable a inestable, muestra donde hay o no condiciones para que puedan ocurrir deslizamientos. La probabilidad de ocurrencia de un factor detonante como la lluvia o un sismo no se considera en un análisis de susceptibilidad (Suárez, 2009).

La susceptibilidad se expresa normalmente en forma cartográfica. Los mapas de susceptibilidad representan áreas con diferente predisposición a la formación de futuros deslizamientos (Ayala-Carcedo y Corominas, 2003).

Quedando claro el concepto de “Susceptibilidad” eje central de estas tesis, entonces estamos en posibilidades de reconocer los métodos más empleados para conseguir este tipo específico de cartografía.

Existen diversas metodologías que han ayudado a conocer diferentes aspectos y criterios con los cuales se determinan y estudian los procesos gravitacionales. Segura et al. (2011) determinaron la susceptibilidad al deslizamiento a través del método de Mora y Vahrson, mediante la evaluación y combinación de factores de susceptibilidad y disparo, resultado que fue comparado con un mapa de inventario de deslizamientos, sustituyendo el relieve relativo por un mapa de pendientes e incorporando un mapa inventario de deslizamientos en la evaluación del parámetro de susceptibilidad litológica.

En 2013, Scarleth Mujica y Henry Pacheco en su trabajo que lleva por nombre “Metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca del río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela”, consideraron las variables de susceptibilidad como geología, pendiente, geomorfología, vegetación y conflicto de uso del espacio, y las variables desencadenantes de precipitación y sísmica, se plantea el procedimiento de Evaluación Multicriterio, con elementos de la

metodología Mora-Vahrson, para clasificar la amenaza por deslizamientos, así como el uso del instrumento matriz de Jerarquización analítica e indagaciones teóricas, para la asignación del peso ponderado de variables y el cruce de mapas esto con el apoyo de un Sistema de Información Geográfica.

Chaverri (2016) realizó una Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica. En este caso utilizó cinco variables o factores de susceptibilidad: pendiente, litología, humedad del suelo y factores detonantes que son las lluvias intensas y la sismicidad.

Como se observó en los trabajos anteriormente citados y en muchos otros consultados por la autora de esta tesis, el método de Mora y Vahrson, es uno de los más empleados internacionalmente y específicamente en América Latina. Así mismo, este método, se fortalece (en algunos casos) con el análisis multicriterio, el cual tiene como punto de partida la estandarización en una escala común de clasificación para todos los parámetros o factores incluidos en el proceso.

Aunque en el caso de áreas de trabajo muy pequeñas, donde el especialista tiene conocimiento detallado de la incidencia de cada factor condicionante, a través de la observancia de los procesos ocurridos en el pasado, en estos casos, está en condiciones de adjudicar niveles de importancia a cada parámetro (o variable) que interviene en el análisis de susceptibilidad.

Finalmente una de las técnicas también muy extendidas en su uso, es la Evaluación MultiCriterio (EMC), basada en el Método de las Jerarquías Analíticas (MJA) propuesto por Saaty (1990). Al criterio de algunos autores, es considerada como un método indirecto rápido, razonable y consistente que permite una pronta respuesta a requerimientos propios de todo mapeo de susceptibilidad y vulnerabilidad de un área a deslizamientos (Roa, 2006, Hervás de Diego y Barredo, 2011 y Lionel y Bilberto, 2006).

En los párrafos anteriores se exponen algunos métodos de índole cartográfica, que permiten expresar la susceptibilidad de un área específica frente a los deslizamientos, siendo el objetivo de esta tesis. Sin embargo, existen otros métodos de campo para el análisis de una ladera o talud en particular, en ocasiones denominadas “investigaciones *in situ*”, de acuerdo

al autor González de Vallejo (2002) las investigaciones *in situ* para taludes tienen como objetivo reconocer geológica y geotécnicamente el terreno afectado por la excavación, con los fines de obtener parámetros necesarios para analizar su estabilidad, diseñar los taludes, excavar los materiales, calcular las medidas de estabilización y proyectar obras de drenaje entre otros.

Para el análisis de la estabilidad y el diseño de taludes, en condiciones de campo se han desarrollado los “**métodos de análisis de estabilidad**”, muy aplicados en los estudios de un talud en particular, precedido de un estudio geotécnico y del análisis de la geometría del talud o ladera objeto de análisis.

Según González de Vallejo (2002), los **métodos de análisis de estabilidad** de basan en un planteamiento físico-matemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad. Se pueden agrupar en:

**-Métodos determinísticos:** conocidas o supuestas las condiciones en que se encuentra un talud, estos métodos indican si un talud es o no estable. Consisten en seleccionar los valores adecuados de los parámetros físicos y resistentes que controlan el comportamiento del material para, a partir de ellos y de las leyes de comportamiento adecuadas, definir el estado de estabilidad o el factor de seguridad del talud.

Existen dos grupos: métodos de **equilibrio límite** y métodos **tenso-deformacionales**.

**-Métodos probabilísticos:** Consideran la probabilidad de rotura de un talud bajo unas condiciones determinadas. Es necesario conocer las funciones de distribución de los diferentes valores considerados como variables aleatorias en los análisis (lo que supone su mayor dificultad por la gran cantidad de datos necesarios, dadas las incertidumbres sobre las propiedades de los materiales), realizándose a partir de ellas los cálculos de factor de seguridad mediante procesos iterativos. Se obtienen las funciones de densidad de probabilidad y distribución de probabilidad del factor de seguridad, y curvas de estabilidad del talud con el factor de seguridad asociado a una determinada probabilidad de ocurrencia.

### **CAPÍTULO III. METODOLOGÍA**

Con el propósito de cumplir con los objetivos de esta tesis, se llevaron a cabo las siguientes fases:

#### **Fase 1: Recopilar y analizar información con incidencia en los deslizamientos.**

Se consultaron distintas plataformas de información como los Planes de Desarrollo Municipal de Toluca, Planes Municipales de Desarrollo Urbano de Toluca, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Google Earth, bibliotecas, periódicos, etc., que sirvieron para tener una idea más clara de las características físicas y las condiciones en las que se encuentra el territorio.

El trabajo realizado en este apartado reveló carencias de información muy importantes, como es la no existencia de una cartografía geológica detallada del área de trabajo, lo que justificó el levantamiento geológico, para al menos, definir las litologías de mayor aflorabilidad. En fases posteriores de esta metodología se explica con mayor detalle el objetivo del levantamiento geológico realizado.

También, en esta fase se realizó el inventario de movimientos gravitacionales ocurridos en el pasado, especialmente aquellos que aún muestran alguna evidencia de su existencia. En la figura 3.1, se muestra la planilla de inventario empleada. El inventario juega un rol esencial, pues permite confirmar los niveles de importancia de cada parámetro (litología, geomorfología y uso del suelo) durante la ponderación y álgebra de mapas. Es importante destacar, que aunque para este trabajo se siguieron las sugerencias de Mora y Vahrson (1994), siempre es importante confirmar para el área de estudio en particular, la influencia (nivel de importancia) de cada uno de los parámetros.

Una segunda aportación del inventario, está relacionada con el proceso de validación. En este caso se pretende comprobar la coincidencia espacial entre los deslizamientos y demás movimientos de laderas, ocurridos en el pasado con la propuesta de mapa de susceptibilidad por deslizamientos que se aspira a obtener.

**PLANILLA DE INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS DE TERRENO**

**1. Localización**

1.1 Nombre del que registra: \_\_\_\_\_

1.2 Fecha de registro: \_\_\_\_\_ 1.3 Estado: \_\_\_\_\_

1.4 Municipio: \_\_\_\_\_ 1.5 Localidad del evento: \_\_\_\_\_

Coordenadas del evento: 1.7 X: \_\_\_\_\_ 1.8 Y: \_\_\_\_\_

Coordenadas geográficas: \_\_\_\_\_

1.9 Escala del mapa donde se tomaron las coordenadas: \_\_\_\_\_

Fecha del evento: 1.10 Año: \_\_\_\_\_ 1.11 Mes: \_\_\_\_\_ 1.12 Día: \_\_\_\_\_

Hora del evento: 1.13 Hora: \_\_\_\_\_ 1.14 Minutos: \_\_\_\_\_ 1.15 Segundos: \_\_\_\_\_

1.16 Duración del evento (especificar la unidad de medida): \_\_\_\_\_

**2. Clasificación:**

Tipo de material: 2.1 Roca: \_\_\_\_\_ 2.2 Detrito: \_\_\_\_\_ 2.3 Suelo: \_\_\_\_\_

Descripción del afloramiento Tipo de roca (s): \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_. Dirección de Buzamiento: \_\_\_\_\_ Buzamiento (inclinación de los estratos): \_\_\_\_\_

Presencia de Fallas: \_\_\_\_\_ Grado de agrietamiento: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_. Inclinación de la ladera: \_\_\_\_\_

Tipo de evento (ver gráfico): 2.4 Caída: \_\_\_\_\_ 2.5 Volcamiento: \_\_\_\_\_ 2.6 Deslizamiento: \_\_\_\_\_

2.7 Propagación: \_\_\_\_\_ 2.8 Flujo: \_\_\_\_\_

Estado del evento: 2.9 Activo: \_\_\_\_\_ 2.10 Suspendido: \_\_\_\_\_

2.11 Reactivado: \_\_\_\_\_ 2.12 Inactivo: \_\_\_\_\_

Causa del evento: 2.13 Precipitación: \_\_\_\_\_ 2.14 Terremoto: \_\_\_\_\_ 2.15 Otra: \_\_\_\_\_

2.16 Nombre del evento relacionado (ej. nombre del ciclón): \_\_\_\_\_

**3. Daños ocasionados**

**Daños materiales:**

3.1 Casas o edificios: \_\_\_\_\_ 3.2 Industrias: \_\_\_\_\_ 3.3 Carreteras y caminos: \_\_\_\_\_

3.4 Otras construcciones: \_\_\_\_\_ 3.5 Red hidráulica: \_\_\_\_\_ 3.6 Red eléctrica: \_\_\_\_\_

3.7 Campos agrícolas: \_\_\_\_\_ 3.8 Presas o embalses: \_\_\_\_\_

3.9 Valor total de los daños estimados (en pesos): \_\_\_\_\_

**Daños humanos**

3.10 Fallecidos: \_\_\_\_\_ 3.11 Heridos: \_\_\_\_\_ 3.12 Afectados: \_\_\_\_\_

3.13 Personas que perdieron su casa: \_\_\_\_\_

3.14 Número total de personas afectadas: \_\_\_\_\_

**4. Otros datos de interés:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Figura 3.1.** Planilla de inventario de movimientos gravitacionales. Modificada a partir de la Agencia de Medio Ambiente de Cuba (2012).

## **Fase 2: Elaboración de la cartografía específica que refleje los factores condicionantes de los deslizamientos (Mapas Temáticos) y su integración.**

Para la elaboración de la cartografía, se empleará la metodología Mora-Vahrson (Mora y Vahrson 1994) con algunas modificaciones que posteriormente se explicarán.

La metodología puede resumirse de la siguiente forma (Mora & Vahrson, 1994): Se aplica mediante la combinación de parámetros, los cuales se obtienen de la observación y medición de indicadores morfodinámicos y su distribución espacial. Dichos parámetros reflejan los factores que conducen a la inestabilidad de la ladera, tales como litología, el contenido de humedad del suelo y el grado de pendiente de la ladera; con estos parámetros se determina un grado de susceptibilidad por elementos pasivos.

La metodología de Mora-Vahrson, también contempla el análisis de los factores que pueden desestabilizar las laderas, que inicialmente hayan mostrado cierto grado de susceptibilidad por factores pasivos. En este caso la sismicidad y las lluvias intensas (Factores de disparo o activos), son los principales y más empleados en la literatura especializada, causantes de la perturbación del equilibrio de los materiales en las laderas.

De esta forma Mora & Vahrson (1994), sugieren determinar el grado de susceptibilidad a los deslizamientos, mediante el producto de los elementos pasivos y de la acción de los factores de disparo (Fórmula 1).

$$S = P * D \quad \text{[Fórmula 1]}$$

Dónde:

S: grado de susceptibilidad a deslizamientos

P: valor producto de la combinación de los parámetros pasivos

D: valor del factor de disparo de los parámetros activos

Los elementos pasivos se componen de los siguientes parámetros (Fórmula 2):

$$P = P_l * P_h * P_p \quad \text{[Fórmula 2]}$$

Dónde:

P<sub>l</sub>: valor del parámetro de susceptibilidad litológica

$P_h$ : valor del parámetro de humedad del terreno

$P_p$ : valor del parámetro pendiente

Para el caso específico de esta tesis, y de acuerdo a los objetivos, el análisis se concentrará en los elementos pasivos. Sustentado esta decisión en los aportes de Suarez (2009), donde este autor apunta que "... El mapa de susceptibilidad muestra donde hay o no, condiciones para que puedan ocurrir deslizamientos. La probabilidad de ocurrencia de un factor detonante como la lluvia o un sismo no se considera en un análisis de susceptibilidad..."

De acuerdo a lo anterior, será considerada la susceptibilidad litológica (Criterio Litológico,  $C_l$ ), tal como lo sugiere la metodología de Mora-Vahrson.

Posteriormente, el elemento pasivo "valor del parámetro pendiente" se fortalecerá sustituyéndolo por "criterio geomorfológico,  $C_g$ " obtenido del producto de los indicadores "pendiente" tal como lo contempla Mora-Vahrson e incorporando el "aspecto de la pendiente".

El aspecto de la pendiente o dirección de las pendientes del terreno, como en algunos casos también es reconocido, recobra importancia cuando su cartografía es confrontada espacialmente con la tendencia de la yacencia de los estratos o flujos de lavas ( $S_0$ ), incluso con la dirección de echado de las fallas (Figura 3.2).



**Figura 3.2.** Escenario de máxima susceptibilidad, donde coincide la dirección de echado de los estratos con la dirección de la pendiente del terreno (Foto tomada por L. González de Vallejo).

Finalmente el parámetro de humedad del terreno, no se tendrá en cuenta, este criterio está muy vinculado a las precipitaciones (factor de disparo) y se adoptó dejarlo para trabajos posteriores, más enfocados al análisis de Peligro, donde se tenga en cuenta el periodo de retorno (T) de los eventos de lluvias causantes de los deslizamientos, en este caso no es objetivo a cumplir. Sin embargo, se decidió incorporar al método de Mora-Vahrson, el criterio “uso y ocupación de la superficie”, este criterio permitirá definir niveles de susceptibilidad a los deslizamientos en función del uso y ocupación de la superficie: construcciones, bosques, vialidad, etc.

A partir de las modificaciones descritas, el grado de susceptibilidad es determinado según la fórmula 3.

$$S = C_L * C_G * C_{U-T} \quad \text{[Fórmula 3]}$$

Dónde:

S: grado de susceptibilidad a deslizamientos

C<sub>L</sub>: valor del parámetro de susceptibilidad litológica

C<sub>G</sub>: valor del parámetro de susceptibilidad geomorfológica [Fórmula 4]

C<sub>U-T</sub>: valor del parámetro de susceptibilidad por uso de la tierra

$$C_G = P_P * P_A \quad \text{[Fórmula 4]}$$

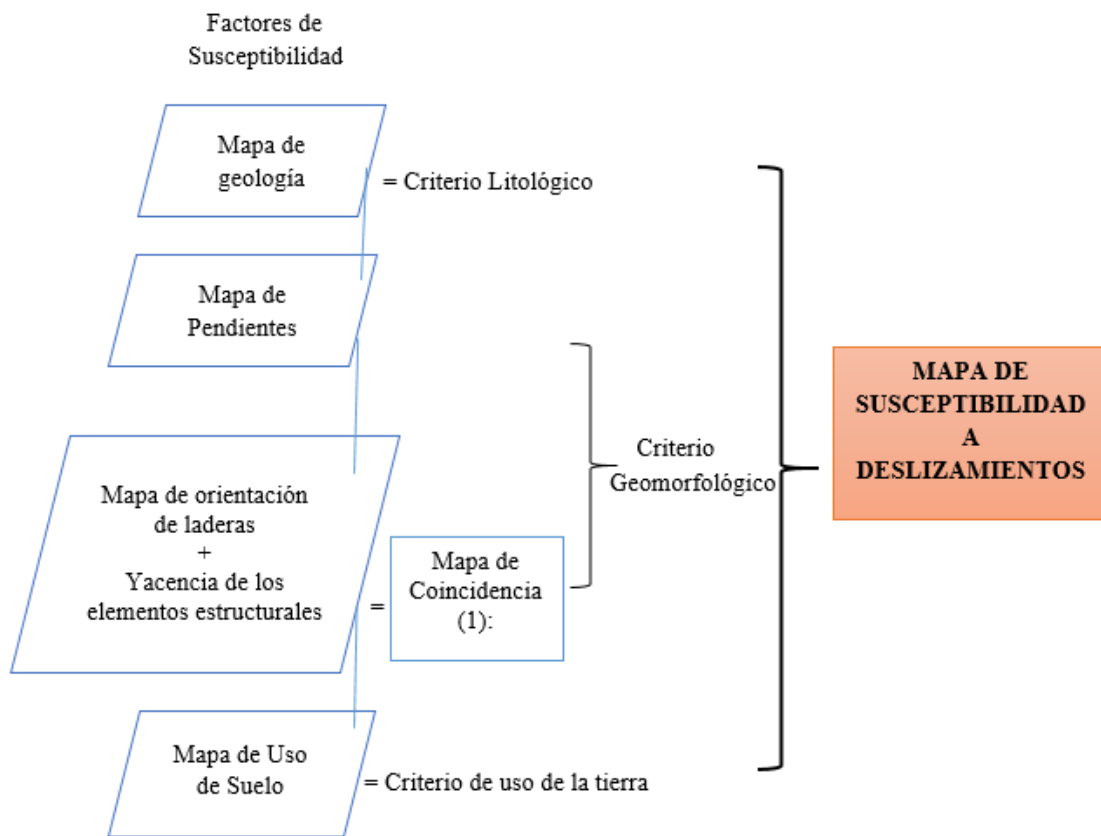
P<sub>P</sub>: valor del parámetro pendiente

P<sub>A</sub>: valor del parámetro aspecto de la pendiente, confrontada espacialmente con la tendencia de la yacencia de los estratos, y de esta forma obtener un mapa de coincidencia de la yacencia de los elementos estructurales con la orientación de laderas.

De esta forma la cartografía de susceptibilidad por deslizamientos se realizará mediante el álgebra de mapas descrito en las fórmulas 3 y 4. Pero el álgebra de mapas es uno de los pasos finales, metodológicamente es necesario de forma previa, capturar y editar la información implícita en los factores condicionantes.



De acuerdo al método que se pretende emplear (Mora y Vahrson, 1994) y las modificaciones realizadas, sería necesario obtener al menos los siguientes mapas temáticos: mapa de geología, mapa de pendientes, mapa de aspecto de las pendientes, mapa de coincidencia de la yacencia de los elementos estructurales con la orientación de laderas y mapa del uso de la tierra. En la figura 3.3, se muestra el posible modelo a seguir.



**Mapa de coincidencia (1):** mapa de coincidencia de la yacencia de los elementos estructurales con la orientación de laderas.

**Figura 3.3.** Modelo cartográfico utilizado para la elaboración del mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

A continuación se describen aspectos técnicos para la realización de cada mapa temático, las diferentes categorías en que se subdivide cada uno y sus niveles de influencia (ponderación).

a) Mapa Geológico

El mapa geológico, permite conocer la distribución de los tipos de materiales (Suelo y/o Roca), que se encuentran dentro del área de estudio. Este conocimiento permite, mediante analogías y referencias en la literatura técnica, conocer los rangos de resistencias de los materiales presentes. Asimismo, mediante el inventario realizado en la “Fase 1” se puede distinguir cuales rocas o suelos, han sido susceptibles en el pasado a sufrir movimientos de laderas.

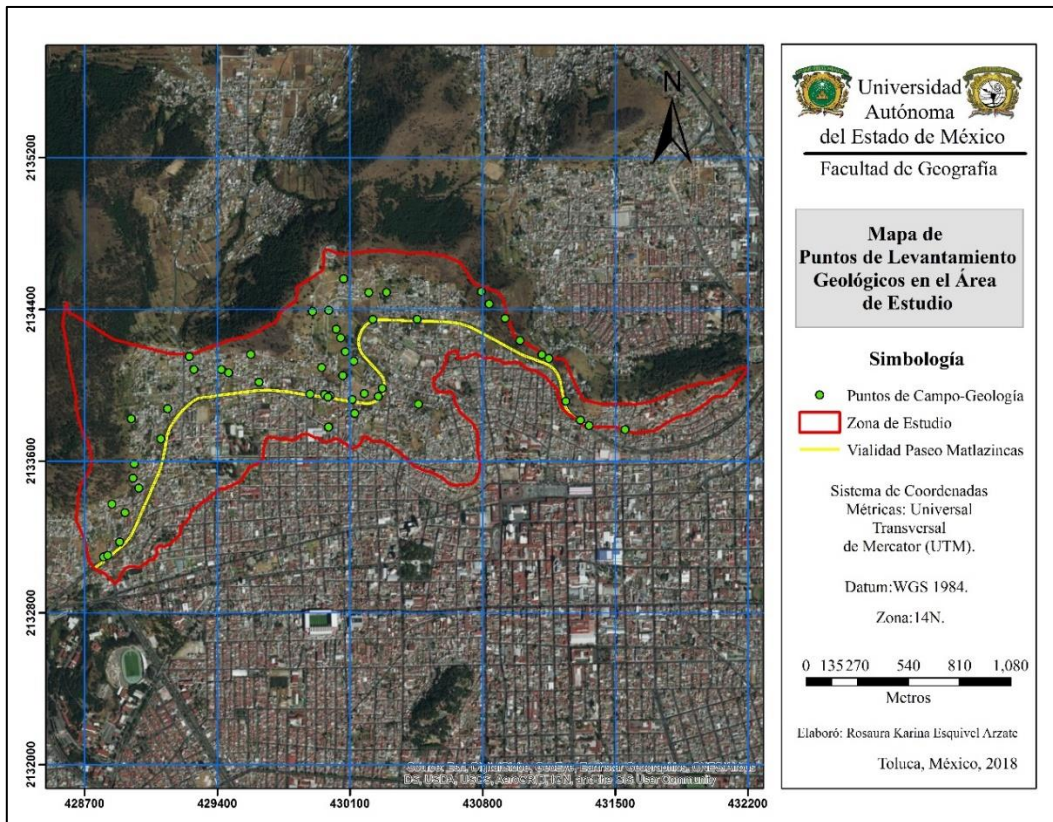
Otro elemento, que aportó el levantamiento geológico, se vincula a rasgos estructurales. Por ejemplo la yacencia de las rocas,  $S_0$  (ángulo de buzamiento y dirección de buzamiento), de igual forma para los planos de falla revelados en el área de estudio.

La cartografía geológica, se obtuvo mediante trabajos de campo, donde se visitaron 51 puntos del área de estudio, lográndose aproximadamente 1 punto de reconocimiento geológico por cada 1.5 km<sup>2</sup> (Figura 3.4), lo que equivale aproximadamente a una escala de 1: 10 000, lo que mejoraría sustancialmente el nivel de estudio geológico que hasta el momento se tenía (1: 50 000). En la tabla 3.1 se muestran los pesos asignados a cada material.

**Tabla 3.1.** Litologías identificadas en el área de estudio y los pesos asignados para el proceso de ponderación.

Modificado a partir de la propuesta de Mora y Vahrson (1991).

GEOLOGÍA	
TIPO	PONDERACIÓN
Andesita	1
Material Piroclastico de Andesita	4
Suelo	5



**Figura 3.4.** Puntos de levantamiento geológicos en el área de estudio.

b) Mapa de pendientes

Servirá para determinar las zonas que están expuestas a los deslizamientos, conforme al grado de pendiente, se elaborará con el programa ArcGis, mediante el modelo digital de elevación (**MDE**) y utilizando la herramienta **Slope**. En este caso específico se empleó el MDE “Alos Palsar”, descargado del sitio <https://www.asf.alaska.edu/>, las características de MDE empleado son las siguientes:

Fecha: 2011-01-24

Granule: ALPSRP266380370

Path: 187

Frame: 370

Resolución: 12.5 metros

Los rangos de pendientes y los pesos de ponderación asignados, se tomaron a partir de la propuesta de SNET (2004) (Tabla 3.2). En este caso el criterio adoptado, fue en un primer momento la experiencia aportada por los trabajos anteriores, específicamente mediante la propuesta de SNET. El segundo elemento que validó el criterio propuesto en la tabla 3.2, fue el análisis del inventario, donde se correlacionó los deslizamientos ocurridos (cantidad) con las pendientes del terreno.

**Tabla 3.2.** Rangos de pendientes adoptados y los pesos asignados para el proceso de ponderación.

Modificado a partir de la propuesta de SNET (2004).

PENDIENTES	
RANGO	PONDERACIÓN
0°-10°	1
10°-17°	2
17°-27°	3
27°-39°	4
>39	5

- c) Mapa de coincidencia de la yacencia de los elementos estructurales con la orientación de laderas

Para obtener este mapa primero se realizó un mapa de orientación de laderas mediante el modelo digital elevación (MDE) con el programa ArcGis, utilizando la herramienta **Apect** y posteriormente se reclasificó en 8 rangos de orientación de 45° cada uno. Sobre este mapa se superpuso, el total de mediciones de elementos estructurales medidos en campo con la brújula, es decir, los  $S_0$  y direcciones de buzamiento de las fallas cartografiadas. Los sitios donde espacialmente coincidieron las direcciones de las pendientes con las direcciones de los elementos estructurales medidos con la brújula, se le asignaron el máximo nivel de susceptibilidad. Mientras que en los casos donde no existía la mencionada coincidencia, se le otorgó el valor más bajo de ponderación (Tabla 3.3).

**Tabla 3.3.** Valores de ponderación adoptados en función de la coincidencia espacial entre la dirección de las pendiente y las direcciones de buzamiento medidas en los afloramientos estudiados.

COINCIDENCIA ENTRE EL ASPECTO DE LA PENDIENTE Y LAS DIRECCIONES DE BUZAMIENTO DE FALLAS Y ESTRATOS	PONDERACIÓN
No	1
Si	5

d) Mapa de Uso de Suelo

Representa el uso del suelo que hay en el área de estudio, da a conocer sus características, además permite saber que sitios son más propensos a los deslizamientos de acuerdo a su uso. Se elaboró tomando de referencia la imagen del **Basemap World Imagery** del programa ArcGis, donde se digitalizaron los diferentes tipos de usos, dándole **Start Editing** (editar) al shape del área de estudio para después con la función **Cut Polygon Features** poder digitalizar.

Una vez, obtenidos los diferentes polígonos, se le asignaron pesos, en función de su nivel de influencia frente a los deslizamientos. Para lograr asignarle pesos, en un primer momento se consultaron algunos trabajos que abordaron explícitamente la problemática (Ambalagan, 1992; Ali Jawaid, 2000 y Mendoza y Domínguez, 2005), lo que sirvió para ordenar jerárquicamente los usos en función de su repercusión. Posteriormente, y como segundo criterio para asignar los pesos, se analizó la frecuencia de los eventos (deslizamientos) a partir del inventario realizado y se confrontó con los usos de la superficie. Los elementos anteriores permitieron elaborar una propuesta consistente para el área objeto de esta investigación (Tabla 3.4).

**Tabla 3.4.** Principales usos del suelo para el área objeto de investigación y los valores de ponderación asignados.

USO DE SUELO	
TIPO	PONDERACIÓN
Bosque Denso	2
Bosque Semidenso	3
Pastizal	4
Habitacional	5
Vialidad	5

Para concluir la Fase 4, se procedió a integrar los diferentes mapas temáticos, en el orden algebraico de las fórmulas 3 y 4, lo que se realizó utilizando la función **raster calculator** del programa ArcGis, para así obtener el mapa de susceptibilidad, mismo que fue reclasificado en 5 rangos (Tabla 3.5) con la herramienta **reclassify** del mismo programa. Como se muestra en la **tabla 3.5**, la puntuación final se agrupa en 5 rangos, el criterio para establecer el ancho de cada rango, fue mediante la experiencia de campo, se buscó en todo momento la congruencia de la cartografía obtenida en el proceso de reclasificación, con la realidad física del escenario geográfico.

**Tabla 3.5.** Puntuación final obtenida para cada nivel de susceptibilidad a los deslizamientos.

MAPA FINAL	
RANGOS	PONDERACIÓN
2-3	1
3-4	2
4-5	3
5-30	4
30-100	5

**Fase 3: Evaluar y validar en campo el mapa de susceptibilidad a deslizamientos obtenido.**

Una vez obtenido el mapa de susceptibilidad a deslizamientos se comparó con el mapa de inventario antes elaborado, y posteriormente, se realizaron varias visitas a campo para comprobar las zonas más susceptibles en la zona de estudio, se observaron las condiciones de esas zonas, la infraestructura (sí están bien cimentadas, sí presentan grietas en los muros o en el piso), vialidades, para a partir de ello proponer medidas de prevención y mitigación ante la ocurrencia de un deslizamiento.

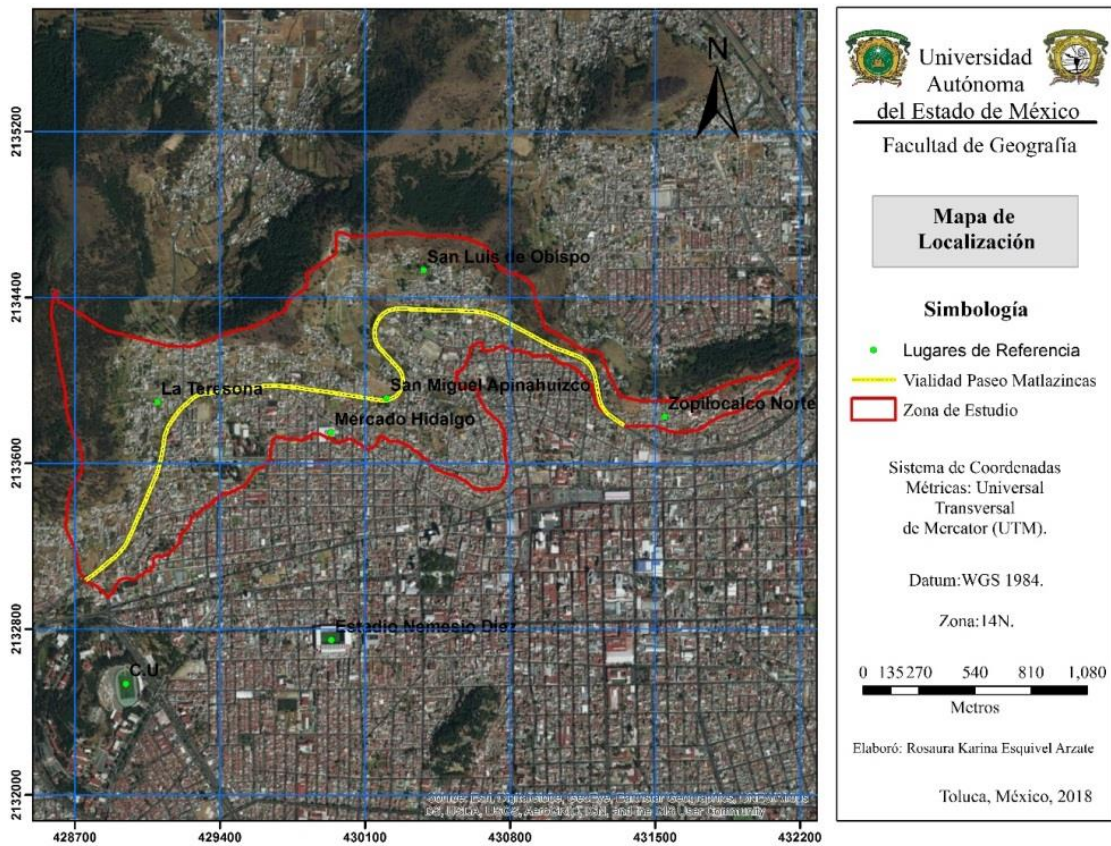
## **CAPÍTULO IV. DESCRIPCIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **4.1. Ubicación geográfica del área de estudio**

El municipio de Toluca se encuentra localizado en la porción centro-poniente del Estado de México; la ciudad de Toluca de Lerdo es la cabecera municipal y capital. La altitud promedio es de 2, 660 metros sobre el nivel del mar. Toluca cuenta con una superficie de 42, 952.14 hectáreas y colinda al norte con los municipios de Almoloya de Juárez, Temoaya y Otzolotepec, al Sur con Calimaya, Metepec y Tenango del Valle, al Este con Lerma, San Mateo Atenco y Metepec y al Oeste con Zinacantepec y Almoloya de Juárez (H. Ayuntamiento de Toluca, 2016-2018).

Precisamente la zona de estudio se encuentra localizada en el municipio de Toluca de Lerdo, y cuenta con una superficie de 2.248363 km<sup>2</sup>. El área específica objeto de investigación cubre 3.94 km del Paseo Matlazincas, el principal vial del sitio, tomando como referencia este eje, el área se delimitó a partir de las superficies cumbres máximas situadas al norte de la citada vía y tomando de referencia los parteaguas, mientras que por el sur se tomó como límite la curva de nivel 2690 ya que es donde terminan las curvas de nivel más juntas, tomando como criterio que entre más juntas estén donde hay más pendiente y por el contrario donde están más separadas es donde el relieve esta menos pronunciado,(Figura 4.1).





**Figura 4.1.** Ubicación geográfica del área de estudio.

## 4.2. Geología del sitio

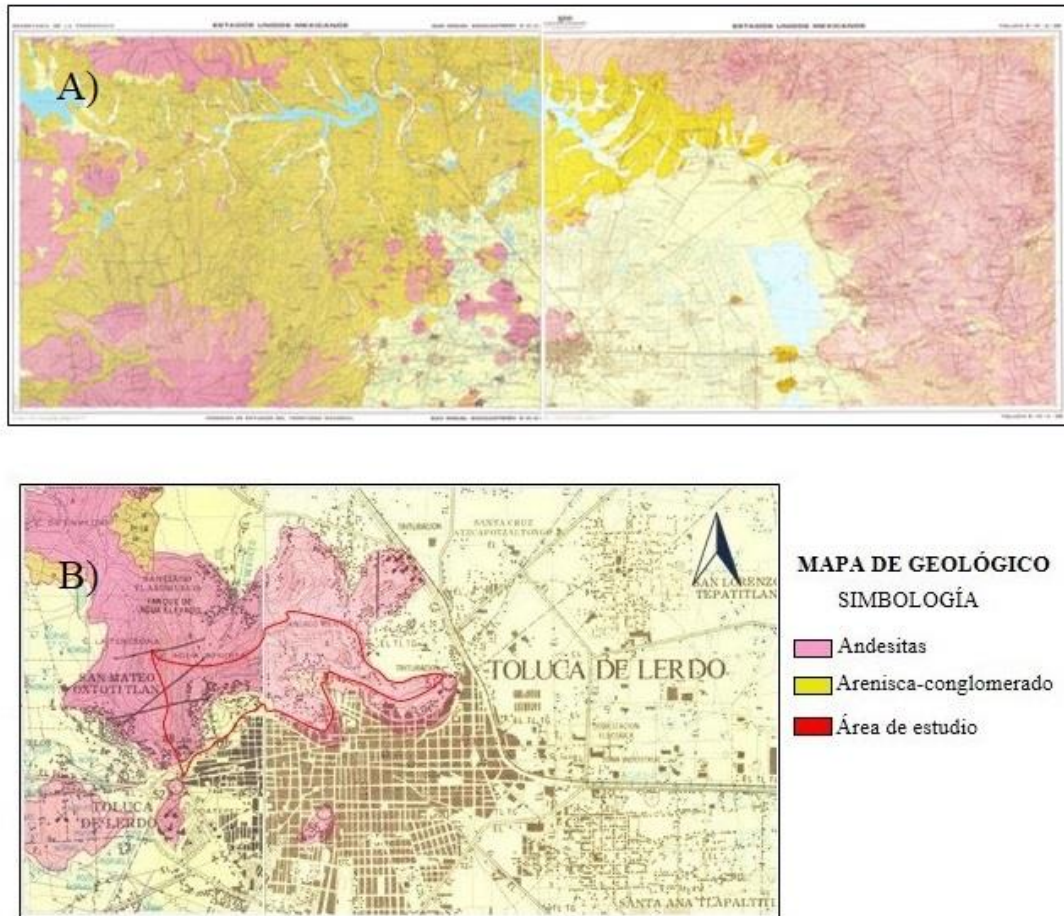
El tipo de roca presente en el área de estudio es de tipo ígnea, específicamente andesíticas. Esta información a partir de las cartas geológicas E14E37 (San Miguel Zinacantepec) y E14E38 (Toluca), escala 1:50 000 (INEGI, 1975) (Figura 4.2). Pero evidentemente esta última cartografía geológica por su escala de poco detalle, no cumple con las exigencias de los objetivos de esta investigación, simplemente muestra los rasgos generales de las litologías predominantes. A partir de esto fue necesario la elaboración de cartografía geológica, al menos a escala 1: 10 000.

En este sentido, se realizaron trabajos de campo, mediante la descripción de 51 puntos, comprobándose que la litología predominante consiste en rocas andesitas, las cuales abarcan aproximadamente el 70% del área de estudio, mientras que el material piroclástico de composición andesítica cubre aproximadamente el 10% y se encuentra en la parte

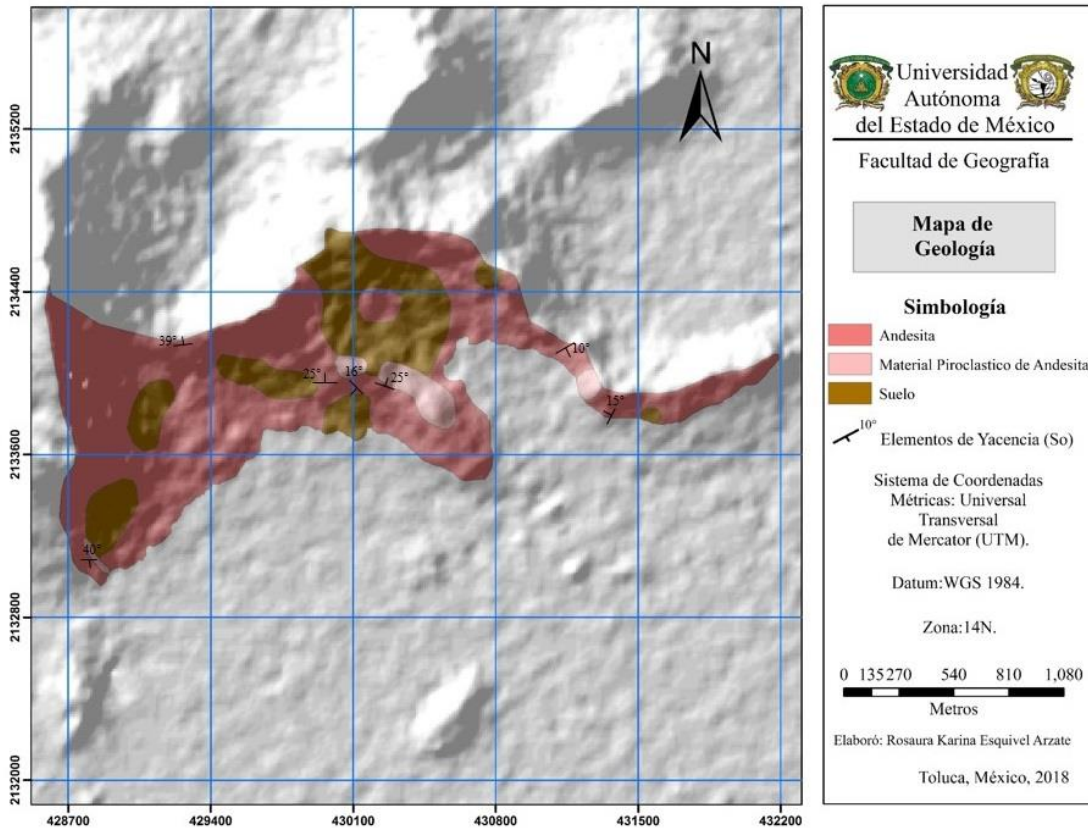


central. Además se lograron cartografiar sitios con buen desarrollo de la capa de suelos, los cuales ocupan el 20 % de la superficie aproximadamente (Figura 4.3). En la tabla 3. 1 se ofrecen los niveles de influencia de cada una de las litologías.

La geología del área de estudio está relacionada a materiales del cuaternario y con parte de los eventos de formación del nevado de Toluca. (García-Palomo et al; 2002).

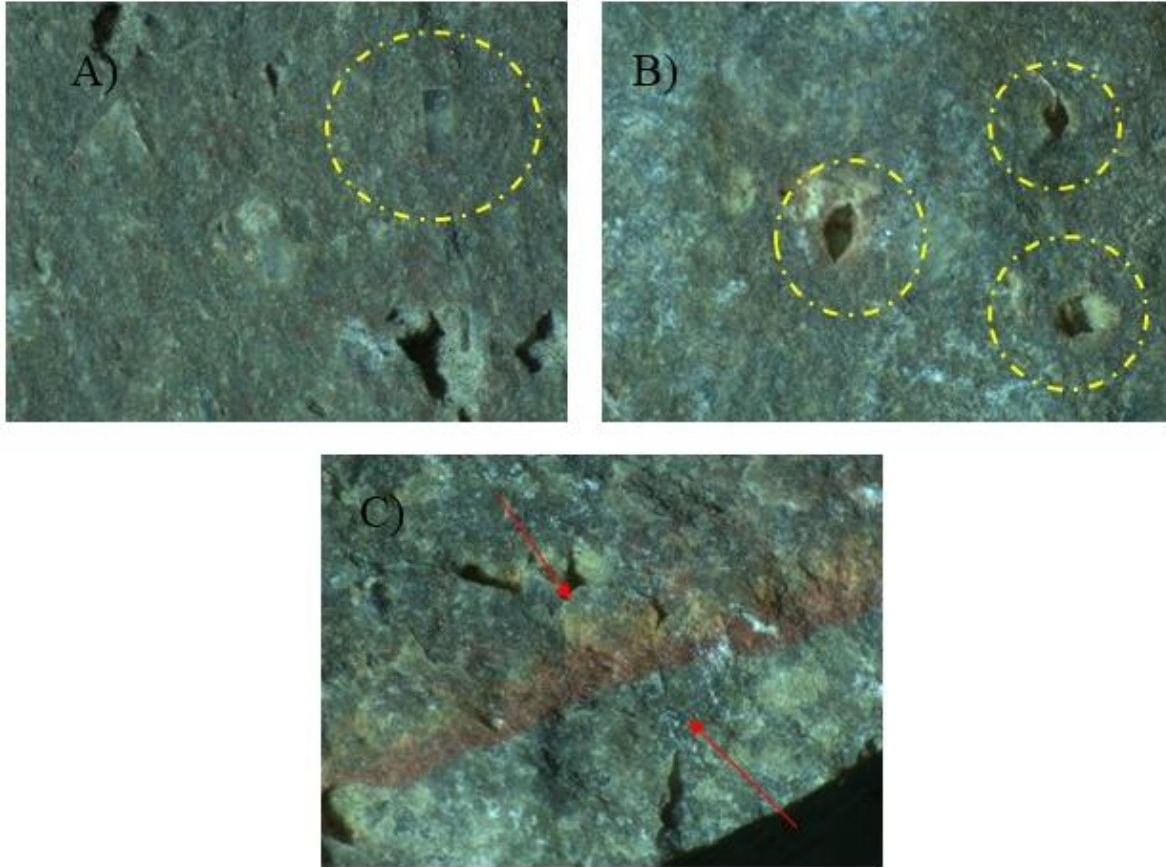


**Figura 4.2.** Mapa geológico escala 1:50 000 para el sitio de estudio y áreas aledañas. Modificado a partir de INEGI (1975). A: Unión de las cartas geológicas E14E37 y E14E38 y B: Mapa geológico del área de estudio.



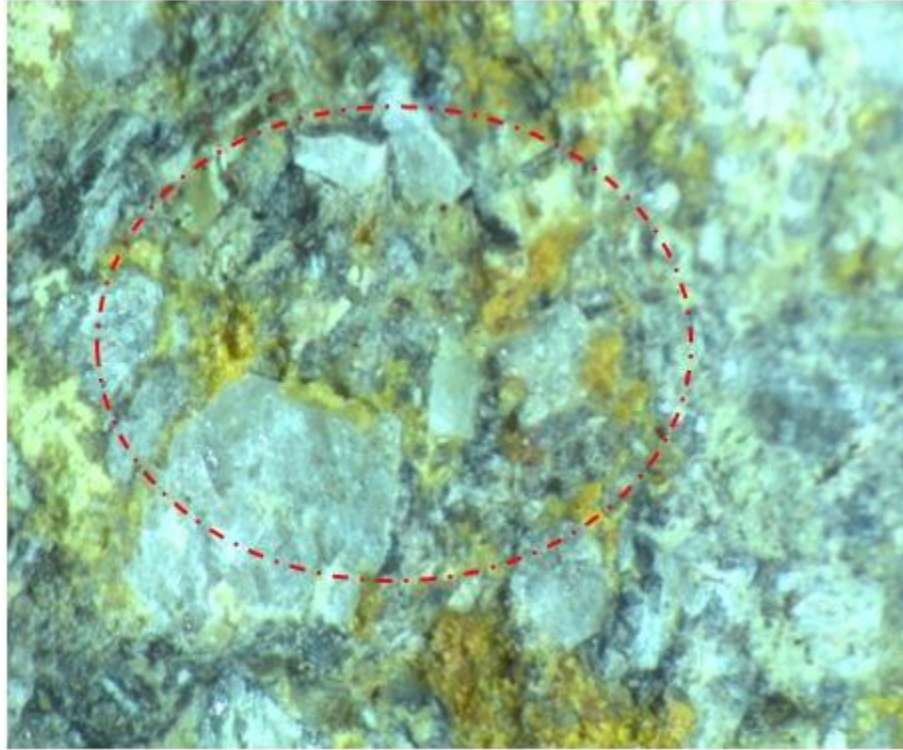
**Figura 4.3.** Mapa temático que representa la distribución de la geología del área de estudio. Escala original 1: 10 000.

Debido al nivel de importancia en cuanto a presencia en el sitio del tipo litológico “Andesita”, se decidió entonces durante el trabajo de campo tomar algunas muestras para su descripción a detalle. De esta forma se observaron 4 muestras en el microscopio estereoscópico (Figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7). De lo anterior, se lograron identificar cristales de plagioclasas, rasgos de textura amigdaloides e indicios de diferentes niveles de intemperismo.

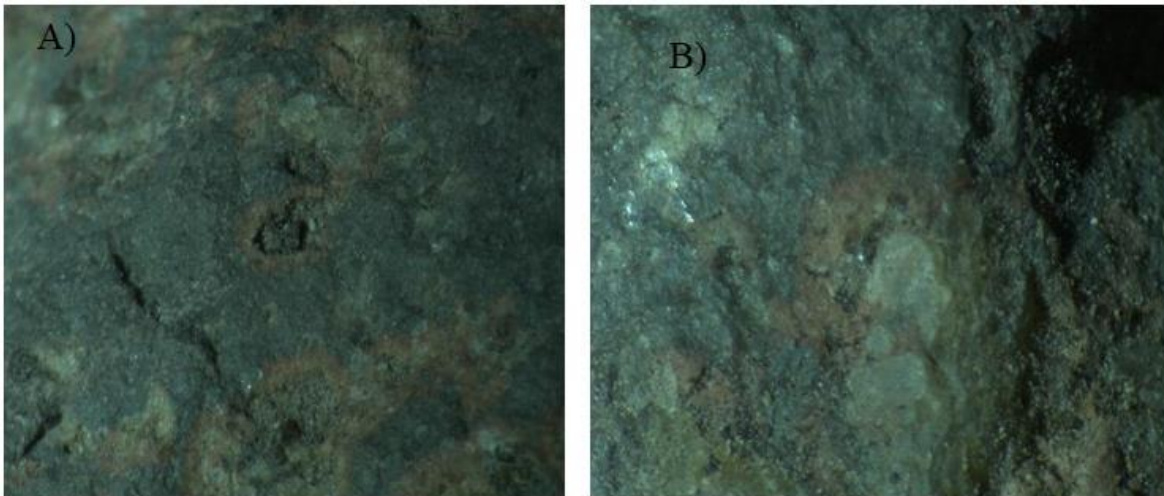


**Figura 4.4.** Características la roca, **A)** se observan cristales de plagioclasas, **B)** se observa que la roca tiene una textura amigdaloides, **C)** se observa una zona de transición al intemperismo.

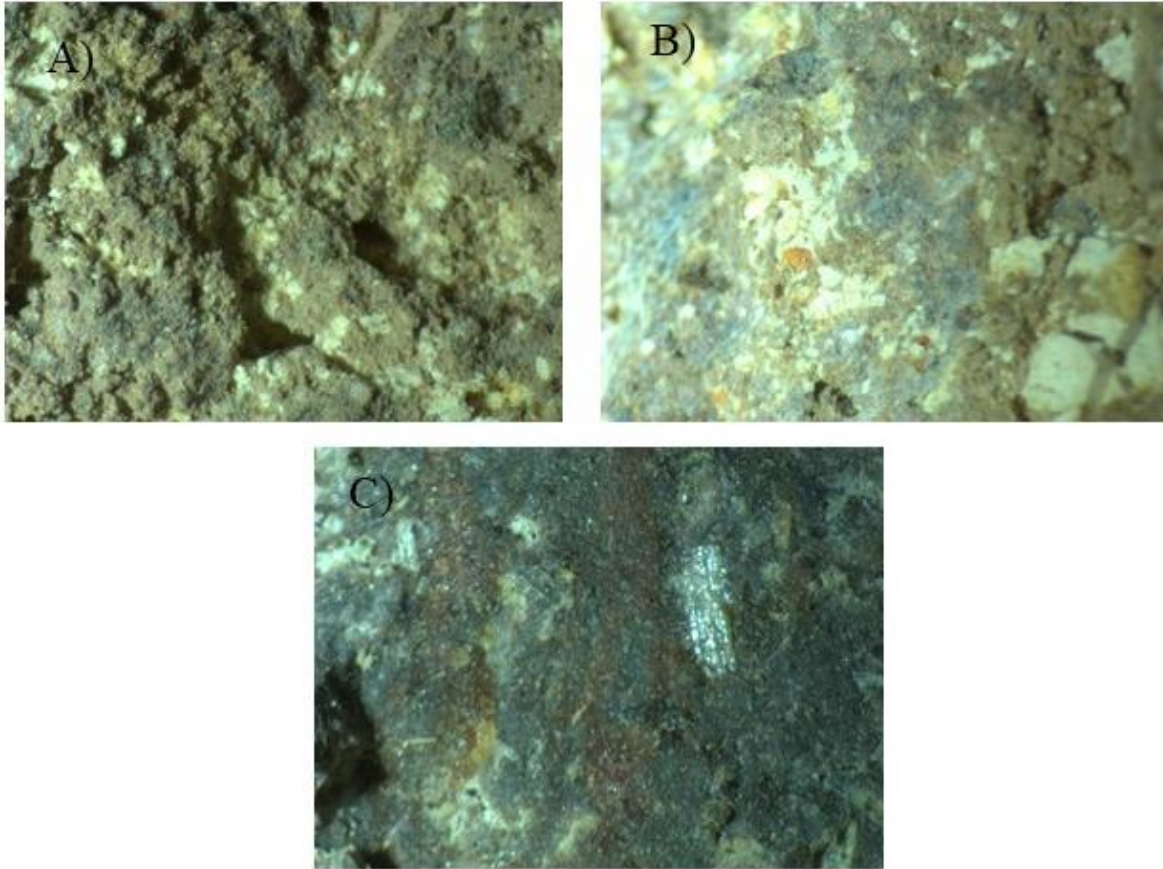




**Figura 4.5.** Características de la roca. Se observa una roca ácida intemperizada, con cristales alterados.



**Figura 4.6.** Características de la roca, **A)**: se observan procesos de intemperismo en la roca, **B)**: alteración hidrotermal.



**Figura 4.7.** Características de la roca, a) material intemperizado, b) material intemperizado c) zona inferior plagioclasa y material rojizo de arrastre por agua.

### **4.3. Características geomorfológicas.**

De acuerdo a los objetivos de la tesis y a la metodología se contempló dentro del criterio geomorfológico realizar un mapa de pendientes, orientación de laderas, mapa de coincidencia de la yacencia de los elementos estructurales con la orientación de laderas.

#### **Mapa de pendientes:**

El grado de inclinación de las pendientes, es uno de los factores de mayor importancia, especialmente para el área de estudio, la cual geomorfológicamente se emplaza en un escenario de relieve muy irregular. En el presente mapa (Figura 4.8) se muestran las diferentes pendientes con las que cuenta el área de estudio:

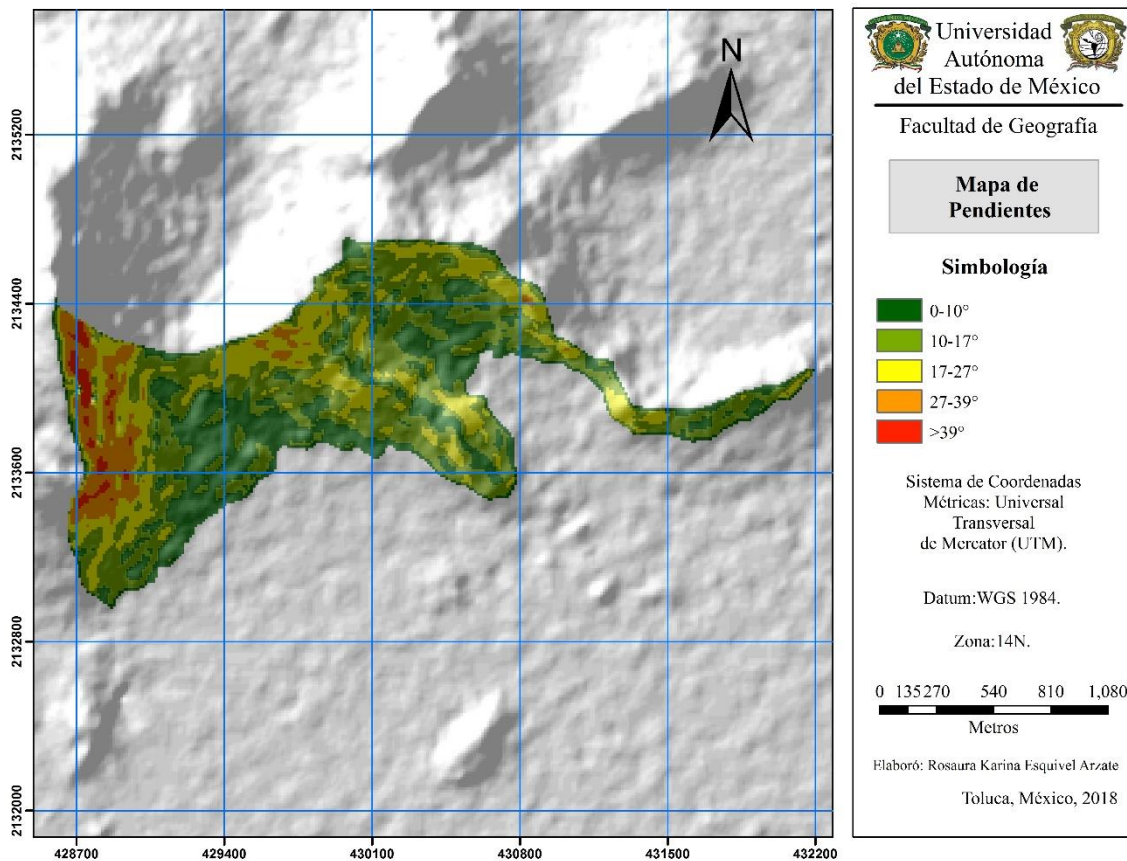
Pendientes de  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$ : se encuentran en el NE, SE, SW y NW del área de estudio, cubriendo aproximadamente 35% del área total.

Pendientes de  $10^{\circ}$ - $17^{\circ}$ : se encuentran distribuido en el NE, SE, SW y NW, abarcando aproximadamente 35%.

Pendientes de  $17^{\circ}$ - $27^{\circ}$ : se encuentran en el NE, SE, SW y NW del área de estudio cubriendo aproximadamente 15%.

Pendientes  $27^{\circ}$ - $39^{\circ}$ : están localizadas en el NE, SE, SW y NW y abarcan aproximadamente 10%.

Al NW y SW se encuentran las pendientes mayores a  $39^{\circ}$ , las cuales cubren aproximadamente el 5%.

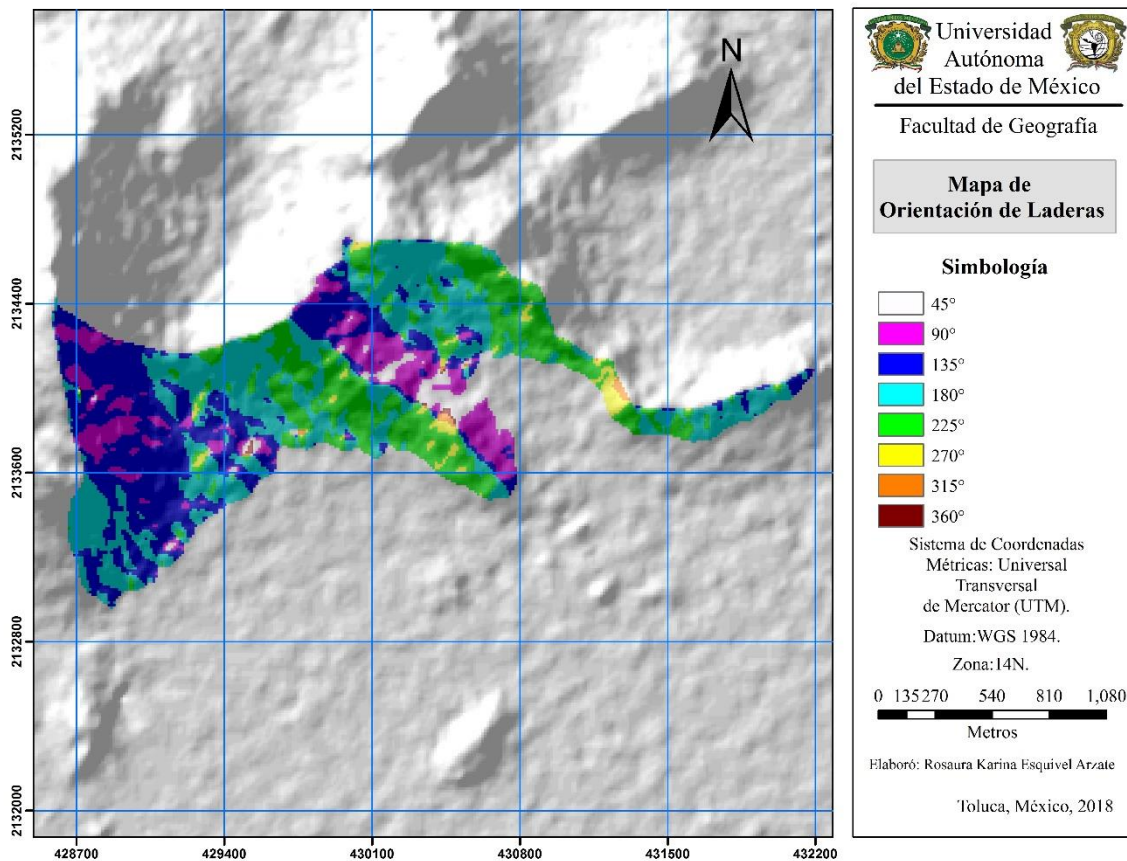


**Figura 4.8.** Mapa temático “pendientes del terreno”.

### Mapa de orientación de laderas:

El presente mapa de orientación de las laderas se encuentra subdividido en 8 rangos: 0°-45°, 45°-90°, 90°-135°, 135°-180°, 180°-225°, 225°-270°, 270°-315° y 315°-360° (Figura 4.9). Del análisis de este mapa temático, se puede inferir que las laderas en el área de trabajo, están inclinadas preferentemente entre los 90° y 225°.





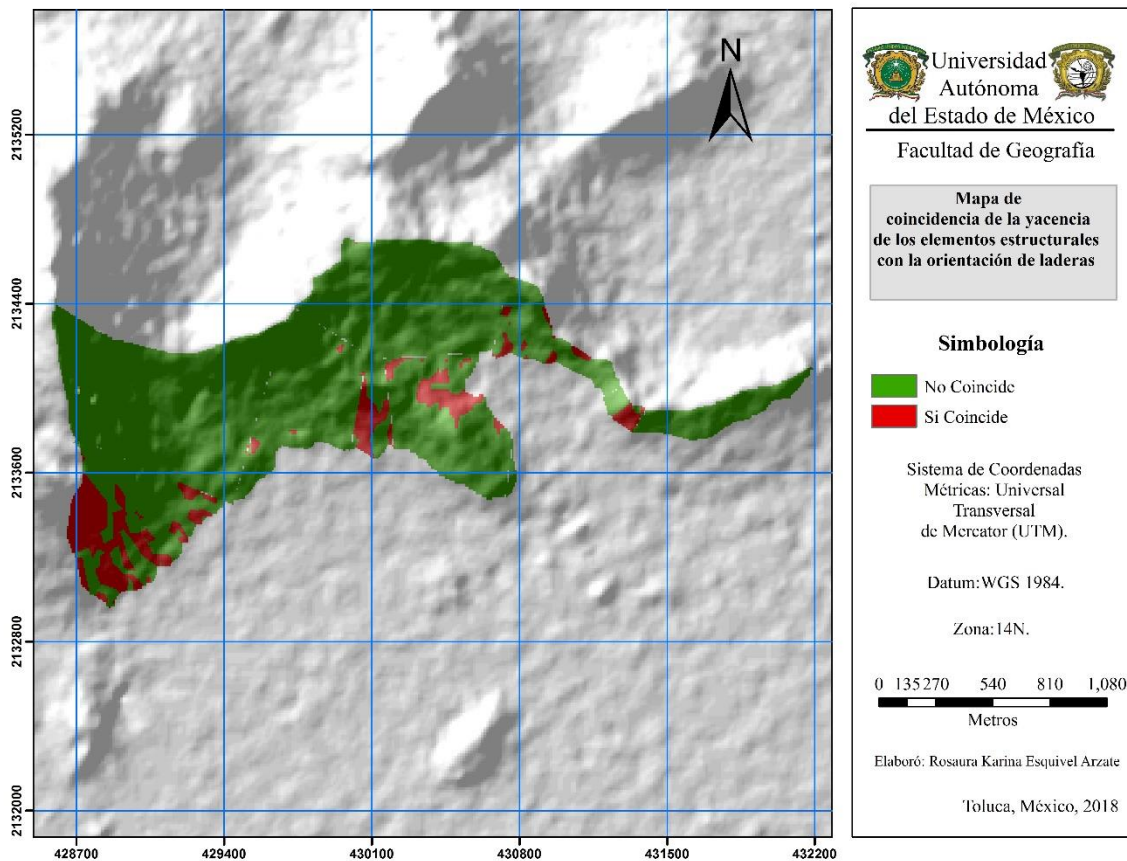
**Figura 4.9.** Mapa temático que representa la orientación preferente de las laderas en el área.

**Mapa de coincidencia de la yacencia de los elementos estructurales con la orientación de laderas:**

En este mapa se muestra la posible coincidencia entre la orientación de la pendiente y los datos estructurales tomados en campo (dirección de buzamiento). Las zonas donde no se reveló la citada coincidencia representan aproximadamente un 80% del área de estudio.

Mientras que los sitios donde se comprobó coincidencia entre la inclinación de la ladera y la dirección de buzamiento de los planos de fallas y la yacencia de las capas abarcan aproximadamente el 20% de la superficie. Esta última condición es la de mayor susceptibilidad, según este criterio (Figura 4.10).

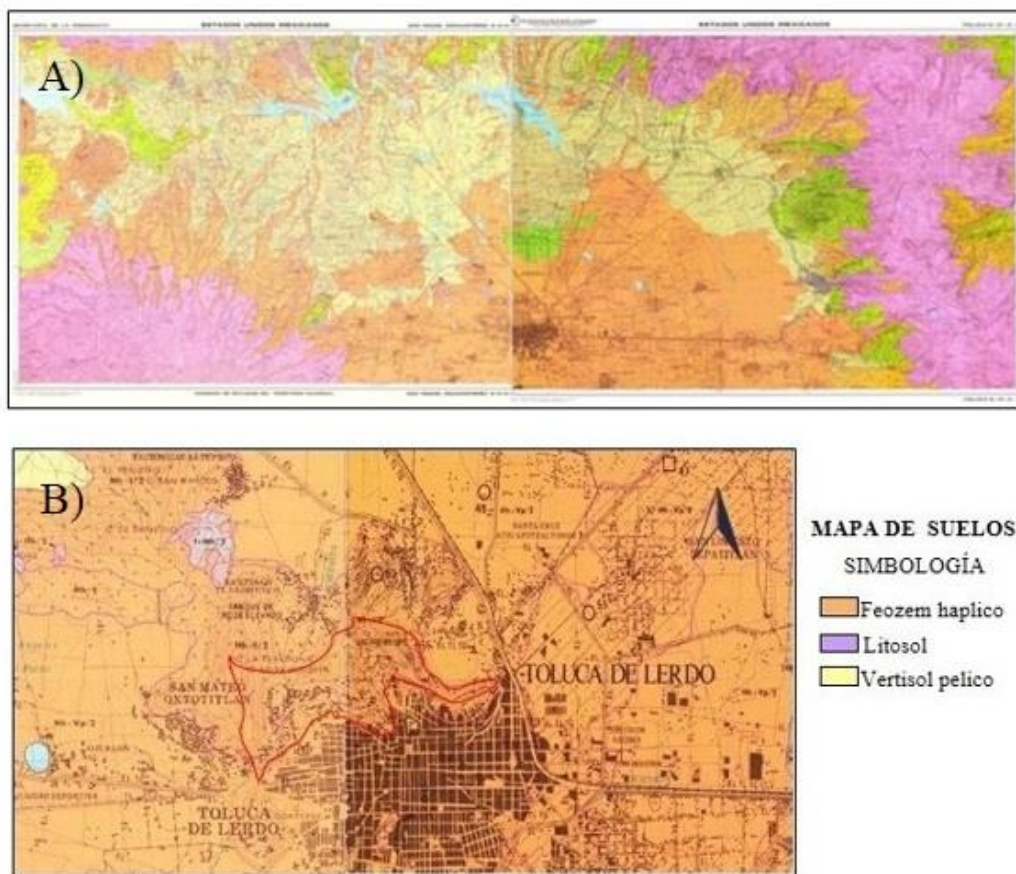




**Figura 4.10.** Mapa que representa la coincidencia espacial entre la inclinación de las laderas y la dirección de buzamiento de los planos de fallas y de los estratos.

#### 4.4. Características edafológicas.

De acuerdo a las cartas edafológicas E14E37 (San Miguel Zinacantepec) y E14E38 (Toluca) escala 1:50 000 (INEGI, 1976), en el área de estudio se tiene un tipo de suelo Feozem Háplico (Figura 4.11). Estos suelos se caracterizan por ser suelos que se pueden presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Es el cuarto tipo de suelo más abundante en el país. Se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes.



**Figura 4.11.** Mapa de suelos escala 1:50 000 para el sitio de estudio y áreas aledañas. Modificado a partir de INEGI (1976). A: Unión de las cartas edafológicas E14E37 y E14E38 y B: Mapa de suelos del área de estudio.

#### 4.5. Clima

El clima que predomina en el municipio de Toluca es el templado subhúmedo, con una temperatura promedio anual de 18°C. (H. Ayuntamiento de Toluca, 2016-2018). La temporada de lluvias en el municipio se presenta entre los meses de abril y hasta principios de octubre, con una precipitación media anual que varía entre 800 y 900 mm. El periodo del año en que se presenta el mayor registro de precipitación pluvial es el comprendido de junio a agosto, destacando julio con 246 mm, seguido de agosto con 233 mm y disminuyendo paulatinamente el registro en diciembre a 16mm (H. Ayuntamiento de Toluca, 2013-2015).

#### **4.6. Uso de suelo**

Los usos de suelo son los tipos de utilización que se le da a una superficie terrestre, para este caso de estudio en específico se identificaron cuatro tipos:

- ✓ El bosque denso, está situado en la parte NW del área de estudio cubriendo aproximadamente el 5% de la superficie total.
- ✓ El bosque semidenso, se encuentra en el NE, NW y SW, ocupa aproximadamente 13% del total de la superficie.
- ✓ El uso habitacional es el que cubre la mayor parte, con un aproximado de 60% al NE, SE, SW y NW del área de estudio.
- ✓ El pastizal, concentrado preferentemente en la zona central y norte del área de trabajo y abarca aproximadamente 20% de la zona.

La vialidad principal dentro del área de estudio la constituye el “Paseo Matlazincas”, abarca aproximadamente el 2% (Figura 4.12). A lo largo de este vial se pueden visualizar escarpes de 90° de inclinación muy susceptibles a la ocurrencia de diferentes movimientos, como caídas de rocas o deslizamientos en forma de cuña (Figura 4.13).



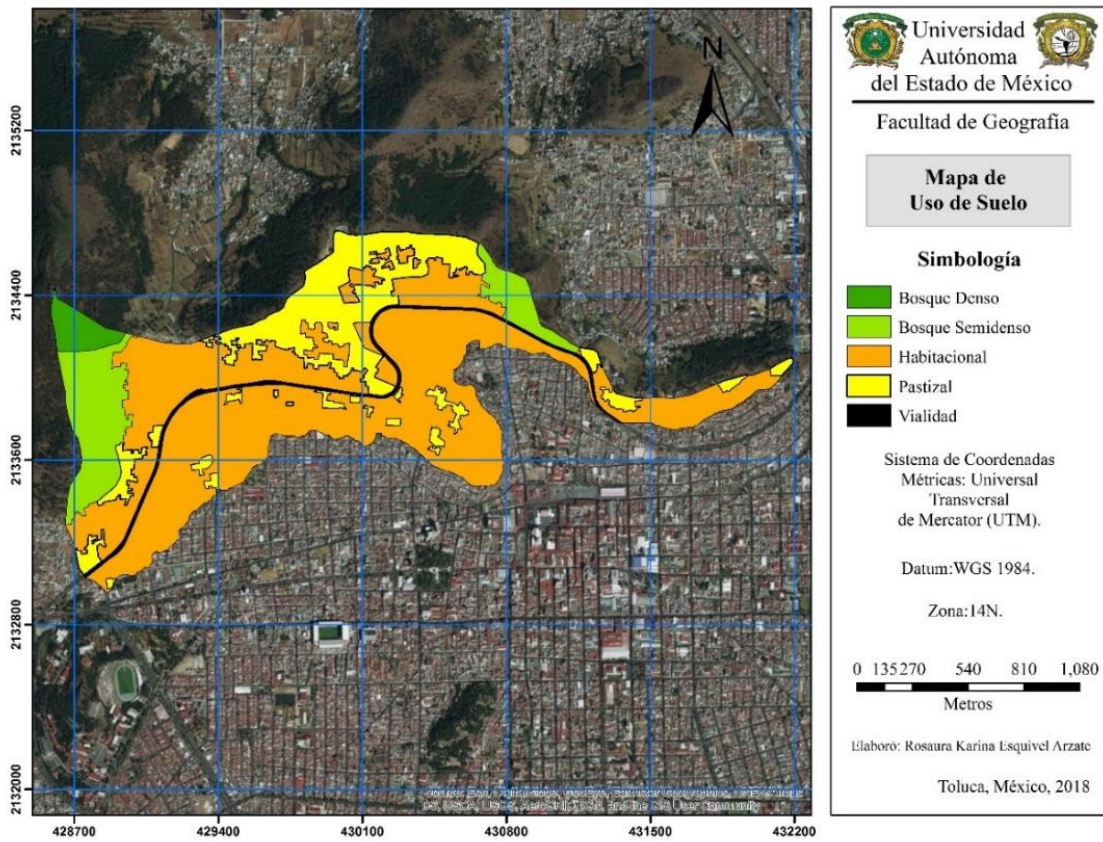


Figura 4.12. Mapa temático “Usos del suelo”



Figura 4.13. Deslizamientos en forma de cuña ocurridos en el pasado, el cuerpo del deslizamiento estuvo delimitado por planos de fallas (línea discontinúa amarilla) que según su dirección de buzamiento y ángulo de buzamiento se intersectan. (1)295°/71°, (2)025°/68°, (3)215°/75° y (4) 043°/68°.

## CAPÍTULO V. RESULTADOS

### 5.1 Mapa de susceptibilidad a deslizamientos

El mapa de susceptibilidad a deslizamiento para el caso de estudio objeto de trabajo en esta tesis, muestra cinco niveles de susceptibilidad: muy baja, baja, media, alta y muy alta (Figura 5.1).

*Susceptibilidad muy baja:* se encuentra al NE y NW del área de estudio, abarcando el 15% aproximadamente. Esta zona se caracteriza por un uso de suelo de bosque semidenso y denso. Desde el punto de vista litológico existe presencia de andesitas.

En este caso independientemente de las pendientes del terreno, que no sobrepasan los 39°, se considera la zona como estable, dado esto por el carácter resistente de las rocas. Según datos consultados en la literatura, las andesitas alcanzan valores de resistencia a la tracción de hasta 70 Kp/cm<sup>2</sup> (Gonzales de Vallejo, 2002). Además el uso del suelo (Bosque denso y semidenso), contribuye a la estabilidad de las laderas, debido a la barrera natural que proporciona frente a los procesos erosivos y meteorización (Figura 5.2).



**Figura 5.2.** Presencia de bosques semidensos en la parte elevada del cerro, los cuales constituyen una protección natural para las laderas en el área de estudio.



*Susceptibilidad baja:* se encuentra localizada NE y NW del área de estudio, ocupando el 15% aproximadamente. La superficie está ocupada principalmente por pastizales. La geología presente está caracterizada por rocas andesitas, mientras que las pendientes oscilan entre los 27° y 39°.

En este caso en particular, según el análisis realizado por la autora, el elemento de mayor peso para considerarse como “Susceptibilidad baja” es la presencia de rocas andesíticas, que al mismo tiempo su dirección de buzamiento están en sentido contrario a la orientación de las laderas, aportando este indicador un bajo nivel de susceptibilidad a los deslizamientos.

*Susceptibilidad media:* se encuentra ubicada en diferentes sitios del área de estudio, especialmente al NE, NW, SE y SW. Abarca el 35% aproximadamente de la superficie total. El principal uso del suelo es habitacional, con pendientes entre 17°-27°, y la litología prevaleciente son las andesitas.

En este caso la diferencia fundamental, y debido a lo cual aumenta el nivel de susceptibilidad, respecto a las dos categorías anteriores, es la aparición del uso habitacional para la superficie (Figura 5.3). Este uso es muy invasivo ya que incrementa el peso de la ladera, generalmente se realizan taludes excesivamente pronunciados y excavaciones para las construcciones, además que va acompañado de una fuerte deforestación.



**Figura 5.3.** Cerro cubierto por construcciones.

*Susceptibilidad alta:* de igual forma a la anterior, se encuentra ubicada en diferentes sitios del área de estudio, especialmente al NE, NW, SE y SW. Cubre el 25% aproximadamente de la superficie total del área investigada. Los principales usos de la superficie, para este nivel de susceptibilidad, fueron el habitacional, pastizal y de forma menos representativa el bosque semidenso. Desde el punto de vista litológico predominan los suelos, el material piroclástico de andesitas. El relieve se caracteriza por pendientes superiores a los 39°.

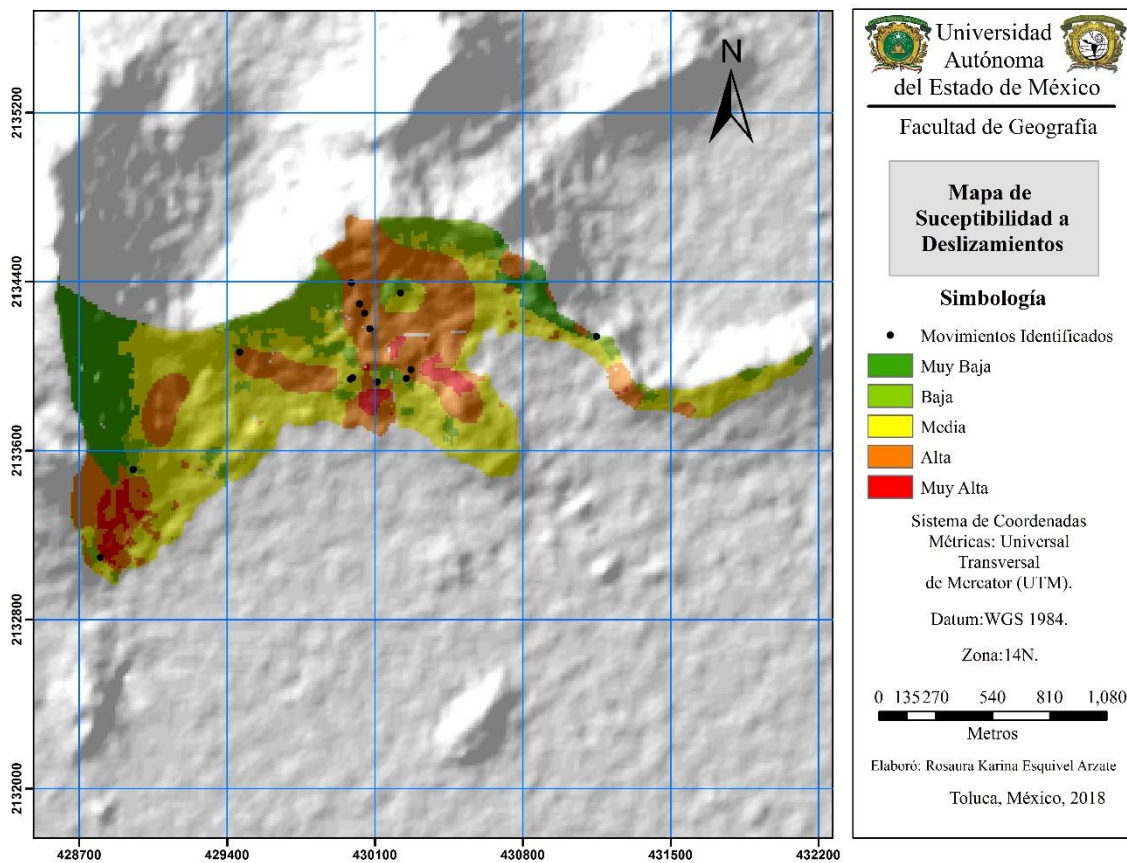
El elemento decisivo en este nivel de susceptibilidad, es el buen desarrollo de perfiles de suelos (Figura 5.4). Dentro de todos los materiales presentes en el área, los suelos son los materiales de más baja densidad, generalmente los suelos presentan densidades que oscilan entre los 1.00 y 2.30 g/cm<sup>3</sup> muy por debajo de la densidad de las rocas andesíticas (>2.30 g/cm<sup>3</sup>).



**Figura 5.4.** Desarrollo de suelos en zonas de susceptibilidad alta a los deslizamientos.

*Susceptibilidad muy alta:* está localizada NE y SW del área de estudio, abarcando el 10% aproximadamente de la superficie total. En la figura 5.1, se definen especialmente tres zonas dentro del área donde se pueden visualizar el nivel muy alto de susceptibilidad. Los usos comprobados de la superficie son pastizal y habitacional. Mientras que los materiales geológicos cartografiados fueron suelos y material piroclástico. Desde el punto de vista geomorfológico se presentan pendientes entre los 27°-39°.

En esta categoría coexisten espacialmente las condiciones más extremas, por ejemplo la presencia de materiales de baja resistencia como los suelos y el material piroclástico, ambos materiales ofrecen muy poca estabilidad a las laderas. Las características geomorfológicas indican pendientes por encima de los  $27^\circ$  y a su vez existe coincidencia entre la orientación de las fallas, y la dirección de buzamiento de algunos estratos de material piroclástico, con la dirección de las laderas (aspecto).



**Figura 5.1.** Mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

Con el propósito de validar el resultado cartográfico obtenido, se superpuso sobre el mapa de susceptibilidad a los deslizamientos, los 14 movimientos inventariados previamente. La visualización de esta superposición muestra un 70% de coincidencia entre movimientos de laderas ocurridos en el pasado, especialmente en las zonas de Media, Alta y Muy alta susceptibilidad a los deslizamientos. Este elemento de validación demuestra la calidad del producto cartográfico obtenido en esta investigación.



Sin embargo es importante aclarar que del total de movimientos de laderas (movimientos gravitacionales) inventariados, no todos técnicamente clasifican como deslizamientos, también se detectaron caídas de rocas (desprendimientos).

Si bien esta tesis se enfoca a los deslizamientos, y de hecho, resultó interesante evidenciar como en diferentes fases del desarrollo de este tipo específico de movimiento gravitacional, coexiste de forma activa las “caídas de rocas”. Un ejemplo, de esta última idea, lo constituyen los deslizamientos en forma de cuña, un tipo específico de deslizamiento (figura 4.13). En este caso específico de deslizamientos, deben ponerse de manifiesto condiciones estructurales específicas en el macizo geológico, por ejemplo la existencia de al menos dos fallas y que además geoméricamente sus planos se intersecten. Pero en el área de trabajo se comprobó que además de la condición descrita, el posible cuerpo deslizante, posee una condición de alto nivel de agrietamiento, lo que favorece la caída paulatina de fragmentos de diferentes dimensiones, elemento que ofrece al área de estudio niveles altos de riesgos (por comprobar).

Pero no solo se observan deslizamientos en formas de cuña, también deslizamientos rotacionales, por ejemplo, en la calle camino viejo a Santiago Tlaxomulco. Esta última localizada en el Barrio de San Miguel Apinahuizco, donde se observa como la intervención del hombre ha contribuido al desarrollo de deslizamientos, se puede ver la inclinación los árboles, el tronco se encuentra inclinado en dirección hacia la pendiente, este es un indicador de un deslizamiento activo (Figura 5.5).



**Figura 5.5.** Deslizamiento sobre la calle camino viejo a Santiago Tlaxomulco (Barrio de San Miguel Apinahizco). (A): Se observan los daños sobre la infraestructura. (B) Encerrado en la línea discontinua amarilla en forma de círculo se visualizan los árboles inclinados, indicador de una ladera activa.

Otro deslizamiento activo, que actualmente obstruye la banqueta, se presenta en la vialidad Paseo Matlazincas (Barrio de San Miguel Apinahuizco) (Figura 5.6).



**Figura 5.6.** Deslizamiento activo.



Como se explicó anteriormente, en el área es de suma importancia las caídas de rocas. Si bien la metodología aplicada en el procesamiento cartográfico, corresponde al análisis de deslizamiento, se sugiere incorporar a trabajos posteriores otros elementos (factores condicionantes) que permitan la cartografía específica de “susceptibilidad por caída de rocas”. A juicio de la autora de esta tesis, se considera que el elemento decisivo o factor condicionante que faltaría, sería la densidad de grietas en el macizo geológico. La sugerencia sería exactamente, categorizar el área por niveles de agrietamiento. Lo anterior, sería bajo la hipótesis que un fragmento de roca, susceptible a caer, siempre está delimitado por todas sus caras por una fractura.

En este sentido en el área objeto de estudio y específicamente en el barrio de San Miguel Apinahuizco, donde la inclinación de la ladera es de aproximadamente  $70^\circ$ , y las andesitas presentan un alto grado de agrietamiento, se observaron caídas de roca de hasta 0.5 m de diámetro (e incluso más) a un costado de la vialidad “Paseo Matlazincas” (Figura 5.7).



**Figura 5.7.** Caída de Rocas en San Miguel Apinahuizco (Vialidad Paseo Matlazincas).

Finalmente, y aunque no es objetivo de esta investigación, se cree conveniente realizar algunas sugerencias de medidas de prevención y mitigación frente a los deslizamientos y también frente a las caídas de rocas. Lo anterior derivado del conocimiento detallado del área adquirido por la autora de esta tesis durante los trabajos de campo.

De esta forma se recomienda, evaluar la implementación de algunas de las medidas que a continuación se describirán, especialmente en las zonas de categorías “Alta” y “Muy alta” susceptibilidad a los deslizamientos.

Por ejemplo, frente a los deslizamientos, se sugieren medidas estructurales como:

- Construcción de muros de contención
- Construcción de muros de gaviones a pie de talud y cuneta de drenaje (Figura 5.8).



**Figura 5.8.** Muros de gaviones a pie de talud y cuneta de drenaje. Foto tomada de González de Vallejo (2002).

Justamente, ya este tipo de medidas se ha tenido que aplicar para mitigar daños severos ocasionados durante la preparación del terreno, para la construcción de una gasolinera en el área de estudio (Figura 5.9).



**Figura 5.9.** Deslizamientos ocurridos en los trabajos de movimientos de terreno para la construcción de una gasolinera en el Barrio La Teresona. **A:** Encerrado en el círculo amarillo aplicación de la medida estructural “Muros de gaviones” y **B:** Señalado por flechas rojas se muestran agrietamientos severos en las viviendas y negocios adyacentes.

Por otra parte, se sugiere la implementación de mallas metálicas, para la prevención de la caída de rocas, especialmente en los taludes más pronunciados del área (mayores a  $45^\circ$ ) (Figura 5.10).



**Figura 5.10.** Ejemplo de uso de mallas metálicas. Foto tomada M. Ferrer en González de Vallejo (2002).

También la aplicación de **Medidas No Estructurales**, pueden ofrecer muy buenos resultados, en la prevención de daños, ya sea por deslizamientos o por caída de rocas. La primera medida no estructural que se propondría en este caso, es hacer cumplir las regulaciones urbanísticas en el área, lo que derivaría en la prohibición estricta de nuevas construcciones, y como consecuencia la contención de los elementos en riesgos.

Otras medidas no estructurales:

- No derribar arboles ni remover vegetación.
- Prohibir la realización de cortes (taludes) en las laderas sin un previo análisis de estabilidad de taludes que garantice un factor de seguridad adecuado. La literatura especializada propone coeficientes de seguridad superiores a 1.5 para taludes permanentes e incluso coeficientes superiores a 2.0 en sitios donde coexistan una cantidad considerable de elementos en riesgo, como una alta densidad vehicular, edificios familiares, u otras donde se concentre población o elementos económicos de alto valor.

## CONCLUSIONES

- En el área de estudio es evidente que existen factores que condicionan los movimientos gravitacionales, en este caso el que más influencia tiene es la pendiente, tomando en consideración que entre mayor sean las pendientes es más alta la probabilidad de que ocurra un movimiento, por lo tanto seguirá siendo una zona donde ocurran procesos de caída de roca y deslizamientos.
- La metodología Mora-Vahrson permite identificar sitios de susceptibilidad a deslizamientos, de una forma factible mediante sistemas de información geográfica, este método contempla factores condicionantes (pasivos) y desencadenantes (activos), para la finalidad de esta tesis se contemplaron solo los condicionantes, además de sustituir la variable de humedad del suelo por el uso de suelo y fortalecer el parámetro de la pendiente por un “criterio geomorfológico” en el cual se contemplan las pendientes, y el aspecto de la pendiente misma que fue confrontada con la tendencia de los estratos.
- La aplicación de la metodología Mora-Vahrson, muestra que el 35% del área de estudio presenta una susceptibilidad media frente a deslizamientos, el 25% una susceptibilidad Alta; mientras que el 10% tiene una susceptibilidad Muy Alta.
- Se demostró que los materiales piroclásticos y los suelos, son los de mayor presencia en las zonas de alta y muy alta susceptibilidad a los deslizamientos, especialmente cuando coexisten con pendientes superiores a los 27°.
- El resultado de este trabajo puede ser utilizado como insumo para trabajos posteriores enfocados a peligro. Además puede ser empleado en la toma de decisiones vinculadas a Protección Civil.
- Aunque en este trabajo se enfocó a deslizamientos en el área de estudio también se observaron caídas de roca.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia del medio Ambiente, Grupo Nacional de Evaluación del riesgo. (2012). Guía metodológica para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgos por deslizamientos del terreno a nivel municipal. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, 4, pp. 1-31.zx
- Alcántara Ayala, I., Borja Baeza, R. C., y Marcos López, J. (2003). Valoración Económica del Servicio de Ecosistemas (prevención de desastres). México: Instituto Nacional de Ecología.
- Alcántara, I. (2000). "Landslides" ¿Deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, Clasificación y Terminología, México. 19 pp.
- Ali Jawaid S. M. (2000). "Risk assessment of landslide using Fuzzi Theory", 8th International Symposium on Landslides Cardiff, pp. 31-36.
- Ambalagan R. (1992). "Terrain evaluation and landslide hazard zonation for environmental regeneration and land use planning in mountainous terrain". Proceedings of the sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, pp. 861-871.
- Ayala-Carcedo, F., y Corominas, J. (2003). Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales mediante el uso de un sistema de información geográfica. Aplicación a la pobla de Lillet (Pirineo Oriental). En Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG (p. 55). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Baez, J. (2014). Procesos Gravitacionales en El Municipio de Temascaltepec, México (Tesis de Licenciatura) Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Bernal, J. (2013). Remoción en Masa en El Extremo Noroeste del Parque Estatal Otomí-Mexica, Estado de México (Tesis de Licenciatura) Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Bloom, A. (1982). La superficie de la Tierra. OMEGA. España.
- Brunsten, D. (1979). "Mass movements", en Embleton, C. E. y J. B. Thornes (eds.), Progress in Geomorphology, Arnold. pp. 130.186.

- Campos, F. (2014). “Evaluación de la Susceptibilidad de Remociones en Masa en la Quebrada de los Chanchos, Región Metropolitana, Chile” (Tesis de licenciatura). Universidad de Chile.
- Capra, L., Lugo, J., y Dávila, N. (2003). Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20 (2), 95-106.
- Castillo, F. (2013). Análisis Multivariante para la zonificación de peligro por procesos de ladera en el municipio de Temascaltepec. (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- CENAPRED (2001) Serie de fascículos. Inestabilidad de Laderas. México.
- Chaverri, I. (2016).” Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica” (Tesis de Licenciatura) Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Cruz, M. (2015). Análisis de Susceptibilidad por Procesos de Remoción en Masa, en la Subcuenca del rio San Marcos, Sierra Norte de Puebla, México. (Tesis de Maestría) Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- De Pedraza J. (1996), *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*, Editorial Rueda, S.L. Madrid.
- Edward A. Keller y Robert H. (2004). Movimientos en masa. En Riesgos Naturales (pp. 148-181). Madrid: PEARSON.
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Arce, J.L., Capra, L., Garduño, V.H., and Espíndola, J.M. (2002). Geology of Nevado de Toluca Volcano and surrounding areas, central Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of America Map and Chart Series MCH089, 26 p.
- Garduño, A. (2013). Vulnerabilidad ante los movimientos de ladera en el pueblo Santa Cruz Ayotuxco, municipio de Huixquilucan, Estado de México (Tesis de Licenciatura) Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- González de Vallejo, L. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid: PEARSON. Prentice Hall
- Gutiérrez, M. (2008). Geomorfología. Madrid: PEARSON. Prentice Hall.

- Hauser, A. (1993.) Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45, p. 7-29.
- Hernández, Z. (2008) Mapa de Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa con base en Análisis Multivariado: La Región de Zapotitlán de Méndez, Puebla. (Tesis de Maestría) Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Hervás de Diego, J. y Barredo, J. I. (2001). Evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso conjunto de SIG, Teledetección y Métodos de evaluación multicriterio, aplicación al barranco de Tirajana (Gran Canaria). V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, pp. 305-316.
- INEGI. (1975) .Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (1976) .Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jiménez, J. (2005). Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de rules, Granada. (Memoria de Doctorado). Universidad de Granada, España.
- Legorreta, G., Bursik, M., Pouget, S., Lugo, J., Paredes, L., y Aceves, F. (2014). Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 66(2), 343-354. Recuperado en 03 de mayo de 2018, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222014000200010&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222014000200010&lng=es&tlng=es).
- Lionel Fidel S. y Bilberto Zavala C. (2006). Susceptibilidad a los Movimientos en Masa en la Cuenca de la Quebrada Hualanga. Patatez, Libertad. XIII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos, Sociedad Geológica de Peru -SGP. Recuperado el 22 de Agosto de 2018, de [file:///C:/Users/HP/Downloads/Susceptibilidad a los movimientos en masa cuenca quebrada Hualanga.pdf](file:///C:/Users/HP/Downloads/Susceptibilidad%20a%20los%20movimientos%20en%20masa%20cuenca%20quebrada%20hualanga.pdf)
- Mendoza M.J., Domínguez L. (2005). “Estimación de la amenaza y el riesgo de deslizamientos en laderas”. México.
- Mora, S., y Vahrson, W. (1991) Determinación a priori de la Amenaza de Deslizamientos sobre grandes áreas, utilizando Indicadores Morfodinámicos. In

Alzate, J.B. (ed) Memoria sobre el primer simposio internacional sobre sensores remotos, sistemas de información Geográfica (SIG), para estudios de Riesgos naturales, Bogotá, Colombia. 259 – 273

- Mora, S., y Vahrson, W. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulleting of the Association of Engineering and Geologist*. 31(1): 49-58.
- Mujica, S. y Pacheco, H. (2013). Metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca del río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela. *Revista de Investigación*, Vol. 37, pp. 215-243.
- Muñoz-Jauregui, Jesús Arturo, y Hernández-Madrigal, Víctor Manuel. (2012). Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 29(1), 103-114. Recuperado el 18 de julio de 2018, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1026-87742012000100007&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742012000100007&lng=es&tlng=es).
- Palma, G. (2008) Evaluación de Riesgo por Caída de Bloques en Santiago Miltepec, Toluca. Estado de México, Tesis de Licenciatura, Departamento de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Pineda, J. (2014). Procesos Gravitacionales en el municipio de Lerma, Estado de México (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Plan de Desarrollo Municipal de Toluca 2016-2018
- Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca 2013-2015
- Roa, J.G. (2006). Aproximación al Mapa de Susceptibilidad y Amenazas por Deslizamientos de la Ciudad de Trujillo, Venezuela. *Revista ÁGORA -Trujillo*. No. 17. Recuperado el 22 de julio de 2018, de <http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/17651/articulo8.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Saaty, T.L. (1990). *Multicriteria Decision Making - The Analytic Hierarchy Process*, Volume I, AHP Series, McGrawHill, New York, NY.

- Segura, G., Badilla, E. y Obando, L. (2011) Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba.- *Revista Geológica de América Central*, pp.101-121.
- SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales). 2004. Memoria técnica para el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de tierra en El Salvador. (En línea) San Salvador, El Salvador. Consultado 25 ago. 2012. Disponible en: <http://www.snet.gob.sv/Documentos/SusceptMovMasa-ES-SNET-2004.pdf>
- Suárez, J. (2009). Zonificación de Susceptibilidad, Amenaza y Riesgo. En Deslizamientos. Análisis Geotécnico Vol. 1(p. 533). Colombia: U.I.S. Escuela de Filosofía.
- Tarbuck, E. y F. Lutgens (2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física, Editorial Pearson Prentice Hall, Madrid, España, pág. 426-478.
- Villacorta, S. (2007). “Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca del río Llaminchán (Cajamarca, Perú)” (Tesis de Maestría). Red DESIR.