



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

CENTRO DE GEOCIENCIAS

**MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE
REMOCIÓN EN MASA CON BASE EN ANÁLISIS
MULTIVARIADO: LA REGIÓN DE ZAPOTITLÁN DE
MÉNDEZ, PUEBLA.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

P R E S E N T A

ZOILA HERNÁNDEZ MENA



DIRECTOR DE TESIS:

DRA. LUCIA CAPRA PEDOL

MÉXICO, 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración y guía de la Dra. Lucia Capra en la realización de este trabajo, también la revisión de los doctores José Lugo, Jorge Gama, José Juan Zamorano y Jorge López; así como la supervisión de tutoría de los doctores Lorenzo Vázquez y Aline Concha. Gracias a la UNAM y CONACYT por el apoyo económico y al personal del posgrado del Instituto de Geología y Centro de Geociencias por las facilidades académicas y administrativas.

DEDICADO

A mi gran familia Pablo y Pablito, a mis padres y hermanos HMena-Orozco.

Í N D I C E

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| RESUMEN. | 1 |
| C a p í t u l o I | |
| INTRODUCCIÓN. | 2 |
| 1.1. Objetivo del trabajo. | 3 |
| 1.2. Metodología de trabajo. | 3 |
| C a p í t u l o II | |
| MARCO GENERAL E HISTÓRICO. | 4 |
| 2.1. Localización. | 4 |
| 2.2 Historia y situación hidroclimatológica. | 5 |
| 2.3 La precipitación de 1999. | 7 |
| C a p í t u l o III | |
| GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA. | 10 |
| 3.1. Estratigrafía. | 10 |
| 3.1.1 Mesozoico. | 10 |
| 3.1.2 Cenozoico | 14 |
| 3.2. Marco geomorfológico. | 16 |
| C a p í t u l o IV | |
| MARCO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA. | 19 |
| MARCO TEÓRICO. | |
| 4.1 Aspectos generales de las laderas. | 19 |
| 4.2 Aspectos generales de los procesos de remoción en masa. | 21 |
| 4.2.1 Descripción de la clasificación de los procesos de remoción. | 22 |
| 4.2.2 Los procesos de remoción en roca. | 24 |
| 4.2.3 Los procesos de remoción en materiales pedológicos. | 25 |
| MARCO HISTÓRICO. | |
| 4.3 Antecedentes de los estudios de los procesos de remoción en México. | 26 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN. | |
| 4.4 Aspectos generales de los PRM en la zona de estudio. | 29 |
| 4.4.1 Características de los PRM en roca de la zona de estudio. | 30 |
| 4.4.2 Características de los PRM en suelos de la zona de estudio. | 36 |
| 4.4.2.1 Suelos residuales. | 39 |
| 4.4.2.2 Suelos transportados. | 42 |
| 4.5 Características granulométricas y mecánicas de los materiales pedológicos. | 45 |

C a p í t u l o V

| | |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| MÉTODO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS MAPAS TEMÁTICOS. | 54 |
| 5.1 Modelo digital de elevación. | 54 |
| 5.2 Mapa de pendientes. | 55 |
| 5.3 Mapa de exposición de laderas. | 57 |
| 5.4 Mapa de geometría de las laderas. | 60 |
| 5.5 Mapa de longitud de flujos. | 62 |
| 5.6 Mapa de inventario de procesos de remoción. | 64 |
| 5.7 Mapa de geología. | 65 |
| 5.8 Mapa de índice calidad de roca. | 67 |

C a p í t u l o VI

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| MARCO, MÉTODO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR PROCESO DE REMOCIÓN EN MASA. | 69 |
| MARCO TEÓRICO. | |
| 6.1 Modelos y herramientas empleadas en la zonificación de la susceptibilidad por procesos de remoción en masa. | 69 |
| MARCO HISTÓRICO | |
| 6.2 Antecedentes de estudios de probabilidad de ocurrencia en los procesos de remoción. | 70 |
| MÉTODO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN. | |
| 6.3 Metodología empleada para la elaboración de los mapas de susceptibilidad y desarrollo de la obtención de estos por medio de dos análisis: máxima probabilidad y discriminante. | 71 |
| 6.4 Discusión de los mapas de susceptibilidad obtenidos bajo análisis de máxima probabilidad y discriminante. | 83 |
| CONCLUSIONES. | 85 |
| APÉNDICE. | 87 |
| REFERENCIAS. | 100 |

RESUMEN

Los fenómenos naturales que se derivan de la inestabilidad de laderas se han convertido en uno de los desastres naturales más recurrentes y amenazantes que en la actualidad se registran no solo a nivel mundial sino que también en el nacional. La mayoría de esos problemas, en nuestro país, son el resultado de la interacción entre las condiciones climáticas y la vulnerabilidad de un gran número de asentamientos humanos de la república. Un caso es el ocurrido a finales de 1999 en el que una zona montañosa de la Sierra Madre Oriental fue afectada por una prolongada lluvia que rebasó la precipitación promedio anual y que trajo como consecuencia la activación de procesos de remoción en masa con volúmenes de metros a cientos de metros cúbicos. Una de las regiones que presenta importante evidencia de esos fenómenos es la porción central de la Sierra Norte de Puebla exactamente en los alrededores del poblado de Zapotitlán de Méndez, en donde dentro de un área de aproximadamente 875 km² se han registrado hasta la fecha 38 procesos gravitacionales principalmente de caída, deslizamientos y flujos. Los movimientos se produjeron básicamente en rocas sedimentarias triásico-jurásicas, en las capas superiores de suelos volcánicos y en materiales intemperizados residuales y transportados. La identificación y el comportamiento de los factores que promueven la ocurrencia de dichos movimientos mediante técnicas multivariantes son presentados en este trabajo. Por razón de dichos procesos se plantea determinar la susceptibilidad de la zona a los movimientos con base en la zonificación del peligro. El análisis estadístico de estos factores determinan la mayor o menor susceptibilidad a los movimientos de remoción en masa. Debido a la efectividad que han venido mostrando en trabajos de prevención de peligro en diversas partes del mundo, dos técnicas multivariantes son aplicadas. La primera mediante un análisis de máxima probabilidad usando la herramienta espacial de ArcGis, la cual muestra la aportación general de los factores a los procesos erosivos. La segunda se basa sobre un análisis discriminante a partir de la cual se obtienen factores que permiten establecer la mayor o menor influencia de cada parámetro a la ocurrencia de los procesos de remoción en masa. Finalmente, los coeficientes obtenidos son utilizados por medio de funciones condicionantes para obtener un mapa de susceptibilidad. La comparación de ambos modelos permitió evaluar las zonas de mayor susceptibilidad a procesos y de observar como las propiedades geomecánicas del material, la geología, el modelo de elevación digital y la exposición de la ladera corresponden con los factores que más favorecen la ocurrencia de los movimientos. Ambos modelos permitieron obtener como producto final un mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa donde se visualizan las zonas de mayor potencial.

I. INTRODUCCIÓN.

Los movimientos de ladera, entendidos como fenómenos naturales de evolución del relieve terrestre, constituyen uno de los procesos geológicos más frecuentes que han afectado la superficie de la Tierra y una de las amenazas naturales que en la actualidad han incrementado su presencia dentro del territorio nacional debido a la recurrente formación de fenómenos meteorológicos extraordinarios. Los efectos socioeconómicos debido a estos procesos de remoción son cada vez mayores por el aumento en la vulnerabilidad social (OAS, 1993). En los últimos años México ha interactuado con una infinidad de eventos atmosféricos que han dejado enseñanzas y rasgos físicos sobre la evolución del relieve, en especial el montañoso. Uno de esos incidentes es el registrado a finales de 1999 en la Sierra Norte de Puebla, como consecuencia de la estacionaria depresión tropical No. 11, la cual manifestó procesos gravitacionales excepcionales en una superficie de más de 4,000 km² (Lugo-Hubp, 2005). Una lluvia extraordinaria por encima de las precipitaciones promedio anuales de la zona, presentó entre otras cosas ciertos tipos de fenómenos de inestabilidad.

En la actualidad esta zona presenta una importante actividad erosiva que se ha manifestado de manera notoria durante dos eventos meteorológicos históricos ocurridos en 1944 y 1999 respectivamente. Por otra parte, de 1999 a la fecha la reactivación de viejos y la activación de nuevos procesos gravitacionales debido a los recientes eventos de lluvias dentro de una porción de la Sierra Norte han sido comprobadas mediante el registro y monitoreo de las condiciones de estabilidad de ciertos deslizamientos (SCT, 1999; Hernández-Mena, 2002). Con dichos estudios es posible considerar a esta región como una de las zonas del país con mayor susceptibilidad a este tipo de fenómenos, por lo que es de suma importancia la identificación, el análisis y la discriminación de los factores principales que generan los procesos gravitacionales en dicha zona.

Se sabe que los movimientos de ladera están controlados por una serie universal de factores que hace que no se encuentren limitados a áreas concretas, como ocurre con otro tipo de procesos geodinámicos (volcánicos o sísmicos). Se han identificado dos tipos importantes de factores, unos unidos a la propia naturaleza, composición, estructura y forma del geosistema, mientras que los segundos pueden ser considerados como factores externos que al actuar sobre las laderas provocan o desencadenan condiciones de inestabilidad al modificar las condiciones preexistentes (Ferrer, 1994; Sharpe, 1938; Varnes, 1984). Por lo tanto, el grado de equilibrio de una ladera es entonces función del tiempo y de las características específicas de los factores y procesos derivados que actúan en una región.

Una vez identificados los factores principales que generan los procesos de remoción existen diversos métodos directos e indirectos que permiten definir la potencialidad del peligro y por consiguiente la susceptibilidad a este. Dentro de esos procedimientos están las técnicas multivariadas. Esta última es la que se ha

venido utilizando en los estudios previos a este proyecto debido a su simpleza conceptual en la obtención de datos y a la alta compatibilidad con un SIG.

1.1 Objetivo.

Evaluar mediante un análisis estadístico de multivariable, la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa en la región del Valle de Zapotitlán de Méndez, con base en la observación y caracterización de los deslizamientos ocurridos en el área y la relación que guardan con la geología, geomorfología y las condiciones geotécnicas del terreno, mostrando los resultados en mapas de susceptibilidad a deslizamientos de la zona.

1.2. Metodología.

1. Búsqueda y revisión bibliográfica.

Selección y análisis de la información de acuerdo a temas geológicos, geomorfológicos y geotécnicos. De esta manera se obtuvo un marco de referencia que sirve de punto de partida en la presente investigación.

2. Trabajo de Campo.

Se realizaron las siguientes actividades:

- Elaboración de la columna estratigráfica y unidades de suelos contenidas.
- Reconocimiento y caracterización de morfologías y de rasgos estructurales que tienen relación con los procesos de remoción en masa.
- Evaluación de la condición física de los macizos rocosos.
- Pruebas mecánicas en suelos.
- Realización de un inventario para los tipos de movimientos de remoción en masa reconocidos en el área, incluyendo localización, tipo de movimiento, dimensiones, tipo de roca entre otros.

3. Trabajo de gabinete.

- Análisis de la información obtenida en campo, y las pruebas mecánicas realizadas a las muestras.
- Generación del mapa de inventario de movimientos con base en datos vectoriales 1:50 000.
- Elaboración de mapas temáticos con base en datos vectoriales 1:50 000 de los distintos factores morfométricos (i.e. pendientes, geometría, exposición y concentración), de geología y de índice de calidad de roca.
- Identificación de los mecanismos de falla.
- Análisis de estabilidad de las formaciones encontradas para evaluar las condiciones actuales del terreno mediante el índice de calidad de roca.
- Procesamiento estadístico (análisis multivariable de máxima probabilidad y discriminante). Determinación de los factores más discriminantes y elaboración de los mapas correspondientes.
- Discusión de los datos obtenidos y evaluación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa para el área de estudio.

II. MARCO GENERAL E HISTÓRICO.

2.1. Localización.

La región del Valle de Zapotitlán de Méndez y sus alrededores se encuentra en la Sierra Norte del estado de Puebla, dentro de la provincia fisiográfica conocida como Sierra Madre Oriental casi en los límites con el Eje Neovolcánico (Morán-Zenteno, 1982), en la porción SE de la hoja F14D84 Filomeno Mata (INEGI, 1984), entre los paralelos 20°/ 00' y 20°/ 02' de latitud Norte y entre los meridianos 97°/ 45' y 97°/ 40' de longitud Este (figura 1).

La zona de estudio comprende la carretera estatal interserrana Zacatlán-Zacapoaxtla y los caminos que la circundan, numerosas rancherías se encuentran ampliamente diseminadas en este territorio serrano y se comunican entre ellas por una red extensa de veredas o caminos de terracería. Dentro de la región se encuentran tres poblados con denominación de cabecera municipal: Hueytlalpan al noreste, Camocuautla en el límite noroeste y Zapotitlán de Méndez el más importante con aproximadamente 2700 habitantes (INEGI, 1999). La mayoría de la población es indígena, conservan sus propios lenguajes, la agricultura de temporal y el comercio es su fuente de sostenimiento económico.

El área según INEGI (INEGI, 1999) está regida básicamente por dos climas: el clima semicálido húmedo con lluvias todo el año (ACf) que domina en casi toda la zona centro y este, y el clima templado húmedo con lluvias todo el año (Cf) que se encuentra hacia el oeste. El poblado de Zapotitlán de Méndez cuenta con una estación meteorológica (No. 21-108) ubicada a 20°/ 00' / 00" latitud Norte y 97°/ 43' / 00" longitud Oeste, con altitud de 780 msnm en la que se ha registrado una temperatura media anual 21.6 C° y una precipitación media anual de 1021.1 milímetros, estimada para el lapso de 1961-1989.

La vegetación típica es de selva: palo mulato (*Bursera simaruba*), chote (*Parmentiera edulis*), guácima (*Guazuma ulmifolia*) entre otras. Aunque en muchos lugares ha sido sustituida por cafetales existen áreas en las que aún es posible apreciar selva; en áreas dispersas se observan pastizales cultivados e inducidos y en las partes más altas es posible apreciar bosques principalmente de pino (*Pinus*), encino (*Quercus oleoides*) y ocote (*Pinus pseudostrabus*) (INEGI, 1999).

El sistema fluvial incluye numerosas corrientes intermitentes y perennes localizadas dentro de la región hidrológica Tuxpan-Nautla RH27 (INEGI, 1999), en lo que se conoce como Cuenca del Río Tecolutla que se inicia en la Sierra Madre Oriental teniendo como corriente principal al Tecolutla, que nace en la Sierra de Puebla, en la frontera norte de ese estado, con Hidalgo y se forma por los ríos: Necaxa, Tenango, Laxaxalpan, Tecuantepec o Zempoala, Joloapan, Apulco y Chichicatzapa; atraviesa el norte de Veracruz para desembocar en el Golfo de México en el poblado que lleva su nombre. El área se subdivide en subcuencas, de las cuales la subcuenca del Río Zempoala es la de mayor importancia para este estudio. La subcuenca se observa en el sector sudeste de la Hoja Filomeno

Mata F14-D84 y en el sector central de la Hoja Cuetzalan F14-D85 (INEGI, 1984), en donde recibe las aguas del Río Tehuancate, su afluente principal Facultad de Ingeniería (1996).

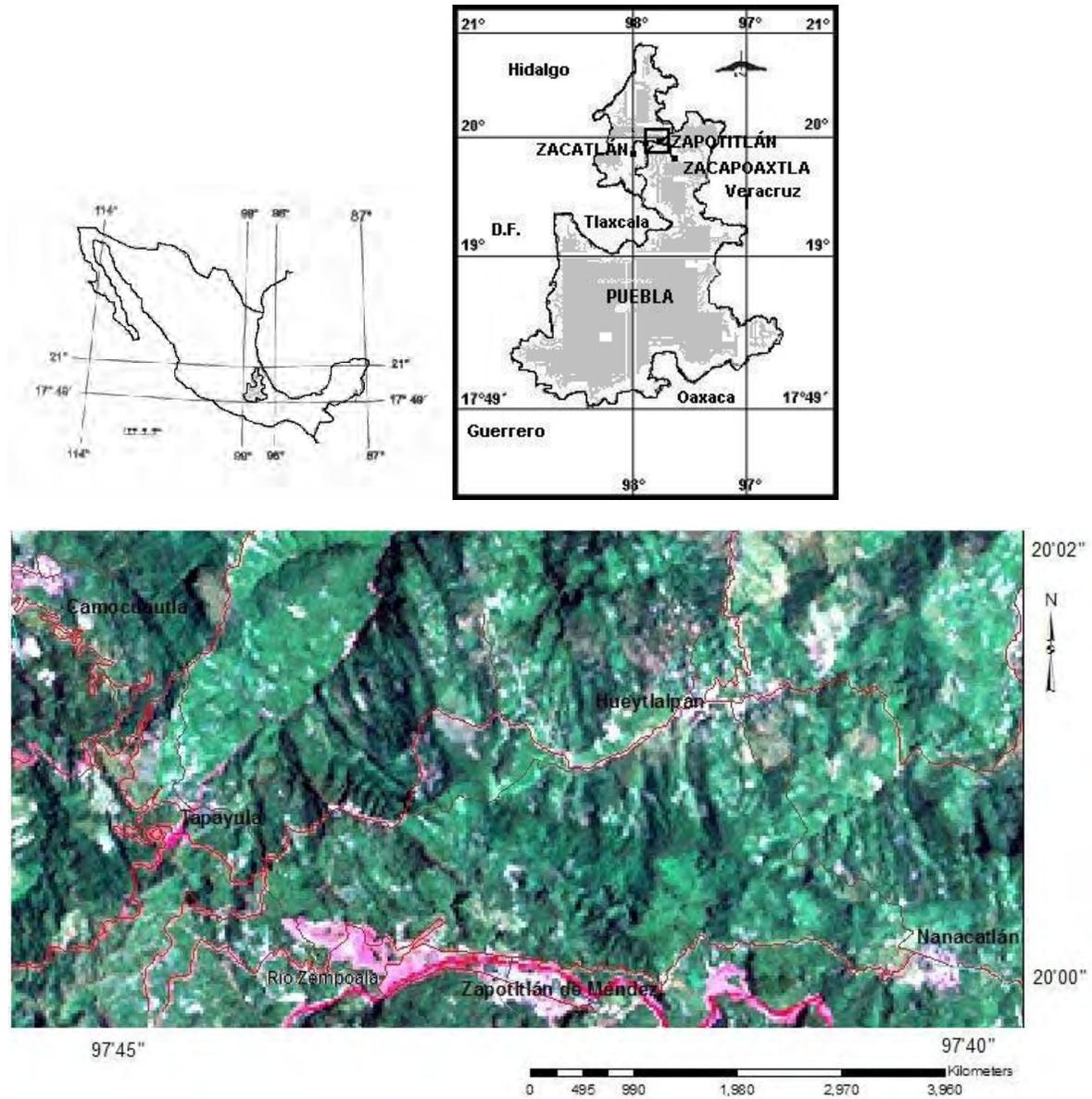


Figura 1. Localización de la zona de estudio con aproximadamente 800 km² mostrados en la imagen satelital landsat 2000.

2.2. Historia y situación hidroclimatológica.

Los intensos cambios climáticos que en la actualidad experimenta nuestro planeta (Organización de Estados Americanos, 1993) traen como consecuencia fenómenos inesperados que en muchas ocasiones terminan debido a la vulnerabilidad social como desastres naturales. Los fenómenos meteorológicos

actualmente cobran al año cerca de 250 mil vidas humanas, daños materiales entre 50 mil y 100 mil millones de dólares (Organización Meteorológica Mundial, 1999), y debido al gran número de peligros como inundaciones y deslizamientos que se genera a partir de ellos son considerados como los de mayor riesgo. El efecto de esos fenómenos se ha visto reflejado en muchos países de América, en nuestro país estas manifestaciones afectan la temporada de sistemas meteorológicos de origen tropical, tales como: ciclones, tormentas y ondas tropicales. El territorio nacional altamente vulnerable por sus dos límites costeros presenta en promedio 24 ciclones tropicales en los océanos Pacífico y Atlántico, de los cuales en los últimos años (1970-2006) entre 3 y 4 penetran al continente causando severos daños en infraestructura urbana, carretera e hidráulica produciendo intensas lluvias, inundaciones, fuertes vientos, procesos erosivos y mareas. La susceptibilidad de la zona a dichos procesos puede verse en los registros de los últimos 37 años que ha sido afectada por 155 ciclones tropicales de los cuales 20 fueron intensos con categoría superior a III (Servicio Meteorológico Nacional, 2007).

Un ejemplo de la agresividad de los fenómenos meteorológicos es el registrado durante la temporada de huracanes de 1999, la cual fue considerada como una de las más activas dentro de los últimos años debido al impacto de seis ciclones tropicales, de los cuales cuatro se originaron en el Golfo de México, uno en el mar Caribe y uno más en el Pacífico (Tabla 1).

| IMPACTO DE LOS CICLONES TROPICALES EN MÉXICO DURANTE 1999 | |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nombre | Lluvia máxima en 24 horas e Inundaciones Asociadas. |
| DT 2 | San Luis Potosí: 371 mm. |
| Bret | Nuevo León: 381mm. |
| DT 7 | Tamaulipas: 248.5 mm. |
| Greg | Colima: 400 mm inundaciones y desbordamientos de ríos en Colima, Guerrero, Michoacán y Jalisco. |
| DT 11 | Puebla: 420 mm inundaciones y desbordamientos de ríos en Puebla, Veracruz e Hidalgo. |
| Katrina | Tabasco: 146 mm. |

Tabla 1. En 1999 los seis ciclones tropicales mostrados, afectaron muchas ciudades dejando un gran número de daños materiales y pérdidas humanas. Los datos fueron tomados de la página del Servicio Meteorológico Nacional (www.smn.mx), temporada 1999.

Dentro de la gran actividad de huracanes de la temporada de 1999, la cuenca oceánica del Atlántico registró siete ciclones más por encima de la media de nueve ciclones tropicales de 1966 a 1999 (SMN-CNA, 1999). Debido a los efectos que generó la depresión tropical No. 11 se consideró como el evento ciclónico de

mayor afectación en México para ese año y el principal factor desencadenante de muchos procesos de remoción entre ellos los de los alrededores del Valle de Zapotitlán de Méndez. De acuerdo a los reportes emitidos por el Servicio Meteorológico Nacional, la depresión tropical 11 se formó en el sur del Golfo de México durante la tarde del día 4 de Octubre a partir de una onda tropical muy activa, la No. 35. Su formación se inicio a 90 km al noreste de Coatzacoalcos, Ver., con vientos máximos sostenidos de 55 km/h y rachas de 75 km/h, permaneciendo semiestacionaria hasta el día siguiente. En la mañana del día 5 la depresión tropical se localizaba a 150 km al Norte de Coatzacoalcos, Ver., con vientos máximos de 55 km/h y rachas de 75 km/h, al final del día se localizó a 135 km, al noreste de Veracruz, nuevamente como semi estacionaria y con la misma fuerza de vientos que presentó durante toda la trayectoria. Para la madrugada del día 6 la onda se mantenía con la misma fuerza y al amanecer se localizó a 115 km al Noreste de Alvarado, Ver. Por la tarde, como resultado de la interacción del frente frío No. 5, la depresión tropical se degradó a una línea de vaguada cuando se encontraba a 240 km al noreste de Veracruz.

La duración de esta depresión fue de 48 horas, tiempo en el que recorrió una distancia de 457 km, a una velocidad promedio de 7 km/h (Comisión Nacional del Agua, 1999; Comisión Nacional del Agua, 2000). Debido a su cercanía, desplazamiento e interacción con un sistema frontal, aunado con el factor orográfico en el oriente y centro de México se produjeron lluvias torrenciales con las consecuentes inundaciones y deslaves del terreno. Durante toda su trayectoria la depresión tropical favoreció la entrada de humedad con importantes precipitaciones hacia las costas e interior del país, con un registro de lluvia máxima puntual en 24 horas de 420 mm en Tenango, Pue. (octubre 4), 382 mm en La Laguna, Pue. (octubre 5), 212.2 mm en Martínez de la Torre, Ver. (octubre 5), y 102 en la Presa La Esperanza, Hidalgo (octubre 4). (SMN-CNA, 1999).

2.3. La precipitación de 1999.

La magnitud y duración de lluvia que acompaña a los fenómenos meteorológicos es variable y difícil de predecir, puede ser muy intensa y durar lapsos inconstantes con disparos máximos en unas pocas horas o minutos. Una precipitación fuerte o también denominada “extraordinaria”, causa dos tipos de daños. Uno es debido a la infiltración del agua dentro de los suelos y sistemas rocosos que sostienen la infraestructura, causando inestabilidad. El otro y más común es la inundación sobre el terreno que pone en riesgo todo lo que se encuentra dentro del valle.

Unos de los peligros más comunes que se originan por la precipitación son los deslizamientos debido principalmente al efecto del agua sobre el sistema rocoso que desajusta el equilibrio en las laderas, en la actualidad hay un innumerable ejemplo de ese tipo de fenómenos y muchos pueden ser asociados a sucesos comúnmente llamados “eventos gatillo” o “detonadores” (Wieczoreck, 1987; Nagarajan, 1998), tal es el caso de los desarrollados en la Sierra Norte de Puebla durante el temporal de 1999 que han sido referidos hasta la fecha en varios trabajos y de los que resaltan Alcántara-Ayala (2004), Bitrán (2000), Borja-Baeza

(2003), Capra et al. (2003a), Capra (2003b), Capra (2006), Cuanalo-Campos (2004), Dávila-Hernández (2003), Flores-Lorenzo (2002), Hernández-Mena (2002), López-Mendoza (2003), Marcos-López (2003), Lugo-Hubp et al. (2001), Lugo-Hubp et al. (2005), y Ochoa-Tejeda (2004).

Es por ello que los registros de la precipitación a corto, mediano y largo plazo son importantes para evaluar la sensibilidad de diversas regiones a las condiciones meteorológicas y peligros climáticos, a fin de garantizar la preparación de estrategias que permitan a la sociedad organizarse y enfrentar situaciones adversas (Organización de Estados Americanos, 1993). En la actualidad el conocimiento de dichos valores solo se ha utilizado como referencia debido a la dificultad de determinar una conexión directa debido a que se ha observado que los procesos de remoción están más asociados a la combinación de una serie de factores y no a un factor específico. Sin embargo, la relación entre la cantidad y duración de lluvias y los movimientos ayudan a entender los procesos que generan a estos y sobre todo proveen una base de posible predicción de fenómenos de falla.

El registro de las precipitaciones que desencadenaron los eventos erosivos de 1999 indica que los días 4, 5 y 6 de octubre la depresión tropical descargó en el sector oriente y centro del territorio mexicano precipitaciones promedio de más de 634 mm en la zona afectada. En algunos sectores específicos, como los alrededores de la presa Tenango, la precipitación alcanzó casi los 1000 mm, en los tres días de referencia. Específicamente en la parte norte del estado de Puebla ocurrieron lluvias extraordinarias de 126 mm el día 30 de septiembre en la presa la Soledad, y en octubre de 420, 441 y 134 mm los días 4, 5 y 6 en la presa Tenango, de 382 mm el día 5 en la presa La Laguna. En Xicotepec de Juárez la lluvia alcanzó valores máximos de 696 mm en tres días. El registro pluviométrico de las principales ciudades afectadas del estado se muestra en la Tabla 2.2.

El valor de los datos anteriores puede apreciarse mejor si se considera que el estado de Puebla es uno de los diez estados de la República Mexicana que anualmente presenta un registro de precipitación media superior a 1,000 mm y la precipitación normal estándar anual de la estación Zapotitlán de Méndez que se encuentra dentro del área de estudio es de 2,022 mm (1961-1990) con una máxima mensual de 795 mm que normalmente se obtiene durante la temporada de lluvia que es de Junio a Noviembre (SMN, 2007). Con ello puede apreciarse el valor y modo de lluvia necesario para que se desaten procesos de remoción en dicha zona.

PRECIPITACIÓN EN 24 HORAS PARA LAS PRINCIPALES CIUDADES DEL ESTADO DE PUEBLA AFECTADAS POR LA DT 11

| CIUDAD | DÍAS DE OCTUBRE DE 1999 | | | TOTAL ACUMULADO |
|----------------------|-------------------------|--------|--------|-----------------|
| | DÍA 4 | DÍA 5 | DÍA 6 | |
| Xicoteppec de Juárez | 256.4 | 326.6 | 113.8 | 696.8 |
| Zacapoaxtla | 340.0 | 343.0 | 125.5 | 808.5 |
| Nuevo Necaxa | 225.0 | 283.0 | 78.4 | 586.4 |
| Tenango | 420.0 | 441.0 | 134.0 | 995.0 |
| La Laguna | 160.0 | 382.0 | 122.0 | 664.0 |
| Nexapa | 3.4 | 238.7 | 283.0 | 524.1 |
| Huachinango | 1.5 | 285.0 | 200.0 | 486.5 |
| Teziutlán | 26.0 | 305.0 | 360.0 | 691.0 |
| Ahuazotepec | 0.0 | 174.0 | 251.8 | 425.8 |
| Venustiano Carranza | 1.0 | 146.0 | 275.0 | 422.0 |
| El Carmen | 2.0 | 140.0 | 227.0 | 369.0 |
| Rancho Nuevo | 26.0 | 200.0 | 320.0 | 546.0 |
| | 1465.3 | 3269.3 | 2496.5 | 7215.1 |

Tabla 2. Registro de precipitaciones de algunas ciudades de Puebla que fueron afectadas por la depresión tropical No. 11. Los valores fueron tomados de los registros que la CNA y el SMN proporcionan al público a través de sus páginas principales de internet y de algunos registros que la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT.

III. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.

El área se encuentra dentro de la provincia geológica de Sierra Madre Oriental, la cual consiste de una cadena montañosa que se extiende por más de 800 km de longitud con amplitud promedio de 80 km y con altitudes que van de los 2000 a los 3000 m (López-Ramos, 1979). Esta constituida por un basamento heterogéneo y una secuencia sedimentaria plegada que va desde el Paleozoico al Eoceno Superior, cubierta por derrames y depósitos volcánicos recientes. Representa a un cinturón de pliegues y cabalgaduras que va desde el noroeste de Torreón, Coah., se dirige hacia Monterrey, N.L. (W-E), y prosigue hacia el sureste de Teziutlán, Pue. (NW-SE) para desaparecer bajo los productos de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). A lo largo de esta cadena de sierras se distinguen varios sectores debido a sus variantes en cuanto a su estilo y orientación de deformación, estos son; el Sector San Pedro El Gallo como un conjunto individualizado al noroeste de Torreón; el Sector Transversal y la Saliente de Monterrey como una unidad al norte; el Sector de Peregrina y Valle como la unidad central; el Sector Huayacocotla como la unidad meridional, al cual corresponde el área de estudio.

3.1 Estratigrafía.

La zona de estudio presenta una secuencia aflorante constituida por rocas continentales y marinas, las cuales están cubiertas en algunas partes, por derrames de basaltos y depósitos piroclásticos. La edad de la secuencia es Mesozoica, específicamente, abarca un lapso desde el Jurásico hasta el Cretácico. La estratigrafía que se presenta a continuación se realizó con base en trabajos de diversos autores que se han realizado en la zona y levantamientos directos de campo (Imlay, 1948; Cantú- Chapa, 1969; Heim, 1926; Erben, 1956; Balam y Canché, 1992; Facultad de Ingeniería, 1996). La secuencia y área de exposición pueden verse en el mapa geológico expuesto en la figura 3.1 y en la columna de la figura 3.2.

3.1.1 Mesozoico.

Triásico-Jurásico Medio.

Formación Huayacocotla (Jhx).

Aflora al sur y este de la zona de estudio; en los alrededores del poblado de Zapotitlán de Méndez, Pue. Consiste de una secuencia de lutitas físlas con intercalaciones de areniscas muy competentes, las lutitas son de color gris oscuro y negro, de aspecto verdoso, ambos colores intemperizan en tonos amarillos y rojizos; los estratos van de 2 a 10 cm de espesor. Las areniscas son de grano fino a medio, presentan un color gris claro, en estratos de 5 a 25 cm, de la muestra de mano puede observarse que la composición principal consta de cuarzo, feldespatos y líticos, cementados con sílice y en ocasiones por material calcáreo. Las areniscas pueden ser clasificadas según Folk (1974) como grauvacas líticas con un alto contenido de cuarzo. Los clastos varían de subangulosos a

subredondeados, mal seleccionados, con clasificación regular y una madurez textural submadura. Los paquetes de areniscas pueden ser observados con mayor precisión hacia la cima de la formación y en ocasiones estos paquetes pueden observarse en forma de nódulos

Dentro de la zona de estudio no es posible observar la relación que guarda con la formación que le sobreyace, pero, cerca de Santa María Tlaola, Pue., sobreyace paraconformemente a la Formación Huizachal. En el lecho del Río Zempoala, exactamente a la altura del valle de Zapotitlán de Méndez, la formación subyace discordantemente con la Formación Cahuasas. La formación que se describe es especialmente notable por los fósiles que contiene, consistentes en numerosas amonitas: *Coroníceras*, *Arietites*, *Oxynoticeras*, *Echioceras*, *Microderoceras*. En la región se han colectado ejemplares que corresponden con los géneros *Coroníceras*; por lo que se le asigna a esta formación una edad Sinemuriano-Pleinsbaquiano (Schmidt-Effing, 1980; Facultad de Ingeniería, 1996).

Formación Cahuasas (Jcs).

Dentro del área de trabajo esta secuencia aflora al NW de Zapotitlán de Méndez y al NE de Tepango de Rodríguez, puede observarse aflorando en el tramo de la carretera estatal No. 108 de Tapayula a Zapotitlán de Méndez. Para la zona de estudio la Formación Cahuasas esta constituida por una alternancia de lutitas de color gris verdoso, limolitas café rojizo y areniscas de color gris claro y gris verdoso, las cuales intemperizan a café rojizo y amarillo. En la cima de esta secuencia aún es posible encontrar estratos de conglomerados con clastos de andesitas que se encuentran intercalados con grandes espesores de limolitas y lutitas. Los espesores de las lutitas y limolitas son variables, los estratos pueden ir de 5 cm hasta grandes espesores de casi 1m, dando un aspecto masivo y poco resistente. Mucho de lo que fueron esos grandes espesores de conglomerado ha sido erosionado y removido por los factores de estabilidad natural que presentan este tipo de laderas. En el lecho del Río Zempoala es posible encontrar grandes bloques de conglomerados que atestiguan esos movimientos. Las areniscas presentan laminación y sus estratos van de 5 a 40 cm. Los clastos son subangulosos, con mala clasificación y una madurez textural submadura. Los conglomerados presentan espesores que van de 30 cm a 1 m y en el lecho del Río Zempoala, cerca de Zapotitlán de Méndez existen bloques de conglomerados con espesores mayores a 1m. El conglomerado es de tipo polimictico, constituido principalmente por fragmentos de cuarzo, areniscas y andesitas. Sobreyace discordantemente a la Formación Huayacocotla, tal como se observa aproximadamente a lo largo del km 62 de la carretera estatal No. 108 y al NW de Zapotitlán de Méndez. Subyace discordantemente a la Formación Tepéxic en los flancos del Anticlinorio de Villa Juárez, muy cerca del poblado de Tapayula y al NE de Camocuautla. Con base en las relaciones estratigráficas obtenidas, y en vista de que en trabajos previos no se ha colectado material fosilífero determinativo, se le asigna una edad Jurásico Medio (Bajociano-Bathoniano?).

Formación Tepexic (Jtx).

Esta formación aflora en franjas angostas con orientación NW-SE. Se encuentra dentro de la zona al NE de Tapayula y al NW de Zapotitlán de Méndez (figura 3.1). Cerca de Camocuautla es posible observar a esta secuencia. La secuencia de la Formación Tepexic esta constituida por una arenisca calcárea de color gris en estratos de 10 a 25 cm, compuesta por cuarzo, líticos y feldespatos en una matriz arcillosa calcárea. Hacia la cima la caliza pasa a ser más arcillosa y adquiere un color más oscuro, sus estratos van de 30 a 40 cm de espesor; presenta intercalaciones de lutitas calcáreas carbonosas en estratos de 3 a 6 cm, de color negro, con gran fisilidad. Contiene algunos horizontes de limolitas de 50 cm de espesor que al igual que en la Formación Cahuasas dan un aspecto masivo. Sobreyace discordantemente a la Formación Huayacocotla como se observa al este de Zapotitlán de Méndez, Pue. También, sobreyace discordantemente a la Formación Cahuasas al S de Tapayula, Pue. Por otra parte, el contacto superior es concordante y transicional con la Formación Santiago. Con base en sus relaciones estratigráficas y por el contenido fosilífero reportado por Balam y Canché (1992), *Gryphaea sp.*, se le asignó una edad Calloviano. La acumulación se dio en un ambiente de plataforma en condiciones de mediana a alta energía. Con esta formación se inicia la transgresión del Jurásico Tardío, al inicio de la cual, se depositaron terrígenos asociados a zonas continentales próximas.

Formación Santiago (Jsg).

Esta formación aflora en dos franjas angostas orientadas NW-SE, al NE y NW de Zapotitlán de Méndez, Pue. Dentro de la región, la secuencia consta de una intercalación de calizas arcillosa de color blanco a la intemperie y gris oscuro al fresco, de espesores delgados que van de 5 a 15 cm, y lutitas carbonosas físciles con tonos que varían de pardos a rojos oscuros. Los espesores de las lutitas carbonosas van de 2 a 18 cm. Sobreyace en forma concordante a la Formación Tepexic y subyace de manera similar a la Formación Tamán. Dentro del área no fue posible encontrar ninguna especie de vida pasada, por lo que, de acuerdo a los géneros reportados dentro de Facultad de Ingeniería (1996), *Reineckeia*, *Macrocephalites* y *Stephanoceras* colectados al sur de Xicotepec de Juárez, les permite asignar una edad Calloviano Superior-Oxfordiano. La formación se acumuló en un ambiente de plataforma media no restringida, de acuerdo con el contenido fosilífero de organismos amonoideos. Se correlaciona con la Formación Zuloaga al norte de México. La plataforma tuvo que encontrarse cerca de una masa continental que aportó material arcilloso a la secuencia.

Formación Tamán (Jt).

Aflora en una franja orientada NW-SE, al N de Zapotitlán de Méndez, Pue. Constituida por una secuencia ínter estratificada de calizas tipo wackestone de color gris oscuro y lutitas calcáreas negras y rojizas. Las calizas presentan espesores delgados pero bien definidos que van de 7 a 12 cm, la roca es muy competente y al golpe del martillo despide un olor a hidrocarburo. Las lutitas, por el contrario, se encuentran en estratos que van de 3 a 25 cm, presenta piritita diseminada y vetillas irregulares de calcita. Sobreyace concordantemente y transicional a la Formación Santiago y subyace de la misma manera a la

Formación Pimienta. De acuerdo con los ejemplares mencionados en Facultad de Ingeniería (1996), recolectados al norte de Tepatlán, Pue. , *Idoceras* sp. y *Aspidoceras* sp., se le asigna una edad Kimmeridgiano Temprano- Tithoniano Temprano. La Formación Tamán se correlaciona con parte de la Formación Las Trancas en Zimapán, Hgo., y con la Formación San Andrés expuesta en Cuetzalan, Pue. Esta secuencia sé depósito en un ambiente de plataforma media, poco oxigenada, sin barreras que impidieran la entrada de amonoideos.

Formación Pimienta (Jp).

Aflora en una franja con orientación NW-SE, al norte de Zapotitlán de Méndez. La unidad está constituida por una caliza arcillosa de color gris oscuro y negro al fresco con tonos cremas al intemperismo, en estratos que van de 15 a 40 cm, es un wackestone con pellets en una matriz de micrita; se encuentra ínter estratificada con lutitas carbonosas de color negro al fresco y tonos pardos al intemperismo, de aspecto laminar en estratos de 10 a 20 cm; además, se presentan lentes delgados y bandas de pedernal negro. Al golpe del martillo la caliza presenta un fuerte olor a hidrocarburo, lo que representa su alto contenido de materia orgánica. Sobreyace en forma transicional con la Formación Tamán y subyace concordantemente con la Formación Tamaulipas Inferior. Con base en los fósiles recolectados en Facultad de Ingeniería (1996), *Spiticeras* sp. , *Olcostephanus* sp. , *Suarites velardense*, *Inoceramus bassei*, entre otros, se le puede asignar una edad que va del Tithoniano Temprano-Berriasiano. La unidad es correlacionable con la parte alta de la Formación Las Trancas y la Formación Santuario, ambas del área de Zimapán, Hgo. El ambiente de depósito desarrollado para dar origen a esta secuencia fue de plataforma con condiciones al mar abierto y aporte de terrígenos finos.

Jurásico Medio-Cretácico Superior.

Formación Tamaulipas Inferior (Kti).

En la figura 3.1 se observa como una amplia franja de orientación NW-SE, al norte del área de estudio. Dentro de la zona de estudio es posible observar a las calizas de la Formación Tamaulipas Inferior, como calizas de color gris claro con tonos amarillos en estratos de 15 a 40 cm, con una textura que va de mudstone a wackestone. Contiene nódulos y algunas bandas pedernal de color negro a gris, es posible observar algunas estilolitas, así como fracturas rellenas de calcita. Pueden observarse algunos horizontes de bentonita de color verde pistache con espesores pequeños de 2 a 4 cm. Sobreyace concordantemente a la Formación Pimienta. El contacto superior es difícil de reconocer en esta zona y de acuerdo con la Facultad de Ingeniería (1999) se considera al contacto paraconforme con la Formación Tamaulipas Superior. Con base en las relaciones estratigráficas y con el contenido fosilífero que diversos autores han reportado se le asigna a la Formación Tamaulipas Inferior una edad correspondiente al Valanginiano-Aptiano. Es posible correlacionar a esta formación con las formaciones Cupido del Golfo de Sabinas, Taraises del noreste de México y con la Formación Paso Buques de la Cuenca Salina del Istmo. Las calizas de la Formación Tamaulipas

inferior se depositaron en un ambiente marino profundo, de cuenca, prevaleciendo durante el depósito aporte de terrígenos e influencia volcánica.

Formación Tamaulipas Superior (Kts).

Aflora ampliamente en el Valle de la Cruz de Chaca y cerca de Hueytlalpan, al N de Zapotitlán de Méndez Pue (figura 3.1). La secuencia consiste de calizas wackestone gris claro y oscuro en estratos de 20 a 30 cm con bandas de pedernal negro, estilolitas, vetillas de calcita y ocasionalmente se encuentran horizontes de calizas arcillosas que le dan un tono más oscuro a la secuencia. También es posible encontrar horizontes de lutitas calcáreas de color gris oscuro en paquetes de 5 a 10 cm. La caliza Tamaulipas sobreyace paraconformemente a la Formación Tamaulipas Inferior y subyace en forma concordante a la Formación Agua Nueva. De acuerdo a los microfósiles reportados en Facultad de Ingeniería (1996), Globogerinelloides sp., Hedbergella sp., Pithonella ovalalis, Rotalipora sp., entre otros, es posible asignarle una edad correspondiente al lapso Albiano-Cenomaniano. Las calizas Tamaulipas Superior se correlacionan con las formaciones El Abra y Tamabra del subsuelo de Poza Rica, Ver. Su cima se correlaciona con la Formación Cuesta del Cura del noreste de México. El ambiente que generó esta secuencia fue de mar abierto.

Formación Agua Nueva (Kan).

Aflora cerca del poblado de Hueytlalpan, al NE de Zapotitlán de Méndez, Pue. Esta formación contiene horizontes de caliza tipo wackestone de color gris claro y espesores de 15 a 30 cm, ínter estratificado con niveles de calizas arcillosas de 15 a 20 cm, bandas de pedernal negro y lutitas negras que intemperizan en tonos verde. Sobreyace de manera concordante a la Formación Tamaulipas Superior, y subyace en la región, de manera concordante y transicional a la Formación San Felipe cerca de Jojupango, Pue. Facultad de Ingeniería (1996). Con base en las relaciones estratigráficas y en el contenido de microfósiles que se determinaron en Facultad de Ingeniería (1999), Helvetoglobotruncana sp., Marginotruncana Sigali, Heterohelix moremani, se le asigna una edad del Turoniano. La acumulación se llevó a cabo en una cuenca de aguas tranquilas con profundidad moderada, en un ambiente reductor con aporte de terrígenos finos.

3.1.2 Cenozoico.

Terciario.

Rocas Intrusivas.

Las rocas ígneas ácidas emplazadas a poca profundidad muestran edades que oscilan del Terciario al Mioceno tardío, ubicadas dentro de los planos de debilidad que se formaron durante el evento Laramide. Estas rocas corresponden con granitos, sienitas y granodioritas con estructuras de diques (Yáñez y García, 1982). Las únicas rocas de este tipo se pueden observar justo debajo del puente de entrada al poblado Zapotitlán de Méndez y que permite cruzar el Río Zempoala. La pequeña exposición de apenas aproximadamente 36 m² corresponde con un dique de granodiorita y se encuentra emplazado dentro de la

Formación Huayacocotla. Este afloramiento no fue cartografiado dentro del mapa geológico general de la zona debido a su poca exposición y a que solo puede verse cuando el río baja su nivel de agua.

Depósitos piroclásticos.

Las rocas piroclásticas se encuentran aflorando al NW y NE de Zapotitlán de Méndez, coronando las lutitas y areniscas del Triásico-Jurásico, la mayor exposición de este tipo de rocas puede observarse en la carretera estatal NO. 208, antes de llegar al poblado en estudio. Otros afloramientos se pueden ver en el camino de terracería que va a Nanacatlán, Pue. Consiste de un depósito de flujo de ceniza parcialmente soldado con espesor de 2 a 6 metros con predominio de vidrio vesiculado y algunos fragmentos de pómez y líticos vítreos tipo obsidiana. Estos depósitos se pueden atribuir a la secuencia piroclástica de la caldera de los Humeros (Ferriz y Mahood, 1984), ubicada al SW del área de estudio. La unidad es de color gris y blanco que intemperiza en rosados y violetas, con un buen porcentaje de material arcilloso que puede sentirse al tocar el afloramiento. El intemperismo químico que presentan es profundo, desarrollando una morfología típica caracterizada por sus numerosas escorrentías. Este depósito no tiene una distribución continua y homogénea solo forma pequeños remanentes en las porciones medias y altas de la sierra.

Hacia la parte NW del área de estudio se registraron depósitos piroclásticos de caída que cubren de manera irregular rocas de las formaciones Cahuastas, Tamán y Santiago. Son masivos con espesores que van de 1 a 2 m y se diferencian a simple vista por su contraste en color uno de color rojizo y otro con tonalidades más amarillas. Evidencian al menos dos eventos separados. Consisten en clastos de arenas finas a limos, con algunos cristales de biotitas y plagioclasas de tamaño de las arenas finas. No fueron cartografiados dentro del mapa geológico general debido su dispersión y poca exposición sobre el terreno.

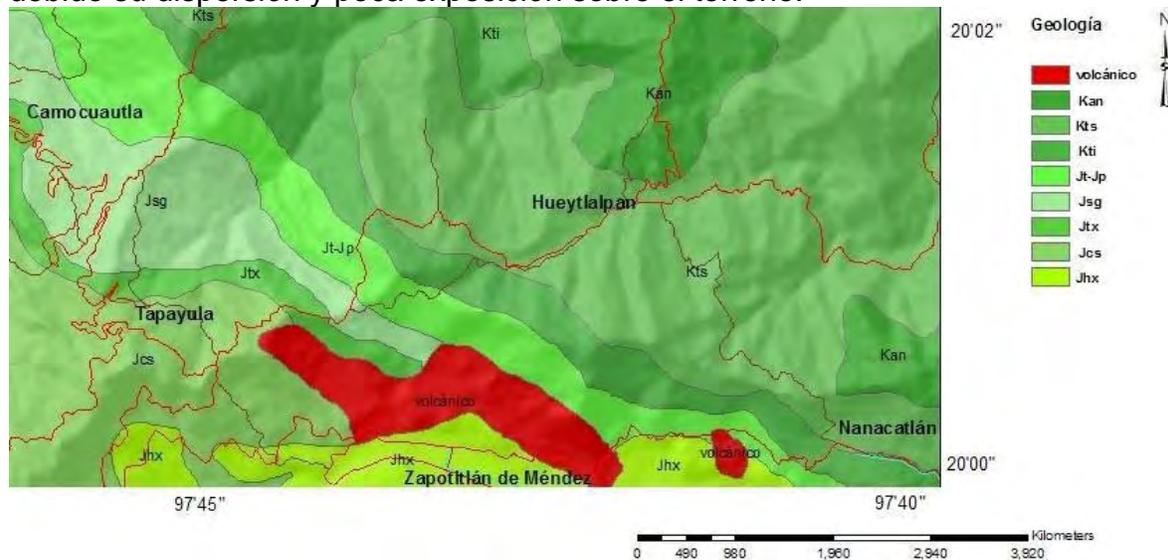


Figura 3.1 Mapa geológico de la zona de estudio con el registro de nueve formaciones geológicas.

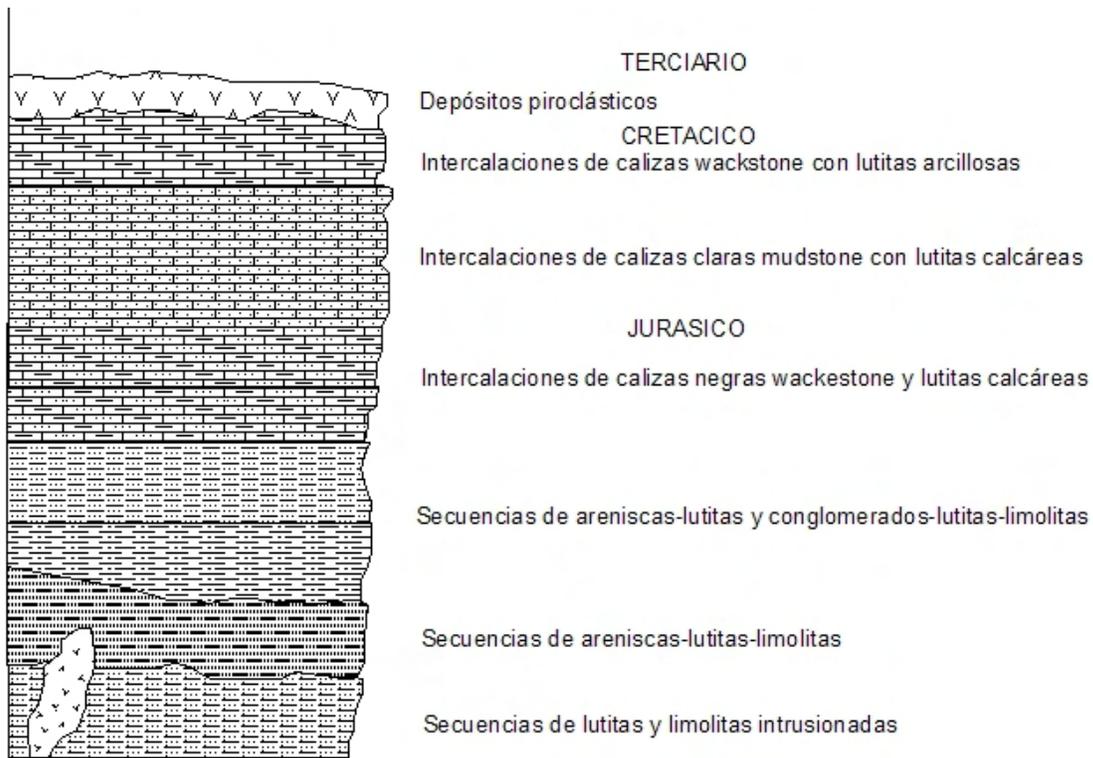


Figura 3.2 Secuencia estratigráfica del área de estudio (fuente: Imlay (1948), Cantú-Chapa (1969), Heim (1926), Erben (1956), Balam y Canché (1992) y Facultad de Ingeniería (1996).

3.2 Marco geomorfológico.

Dentro de la región de estudio la mayoría de las geoformas son modeladas a partir de estructuras plegadas desarrolladas en rocas calcáreas, calcáreo-arcillosas y clásticas. Otras formas se han modelado a partir de derrames basálticos y acumulaciones piroclásticas. El tipo de relieve que se extiende en la zona es el propio de las montañas plegadas, largos cordones serranos que muestran una tendencia general hacia el noreste (Lugo-Hubp, 1990). Para este sector en particular, las sierras se encuentran conformadas en su mayoría por rocas de tipo clástico y calcáreo-arcilloso, lo que hace aun más abrupto el relieve. El relieve de esta parte de la Sierra Norte del estado de Puebla, se caracteriza por la existencia de una erosión profunda, los valles son estrechos con cauces con fragmentos de caídos, la disección se lleva a cabo en forma brusca, rápida y profunda como lo evidencian los procesos de remoción de mayor volumen.

En general, la zona de estudio presenta un relieve escarpado con pendientes mayores a 45° y desniveles topográficos de más de 1,000 metros. La topografía de la región refleja por sí misma la presencia de escarpes con cambio de dirección que marcan zonas de posibles procesos de ladera y que con la

ocurrencia del fenómeno hidrológico pasaron a ser áreas de movimientos de remoción.

La configuración del drenaje sigue un patrón de tipo dendrítico en la zona montañosa, la tributaria principal localizada en una planicie intermontaña presenta leves meandros, lo que puede decir que el drenaje puede ampliar y suavizar los valles. La disección de la zona puede verse en lo profundo y angosto de sus valles como consecuencia de los procesos tectónicos de la Sierra Madre Oriental (SMO) y de la erosión vertical. La profundidad de disección varía de entre 900 y 1,200 m. Debido a los materiales piroclásticos recientes, se densifican drenajes, pues, antiguos drenajes fueron cubiertos durante esos eventos. Muchos de esos antiguos drenajes siguen teniendo actividad y su salida puede ser observada a lo largo de muchos puntos, en especial sobre el corte carretero.

Aunque casi todo el relieve de esta parte de la Sierra Norte parece caer dentro de una región geomórfica general de ladera por lo accidentado y profundo de la zona, con ayuda de imágenes satelitales y fotografías aéreas fue posible delimitar tres regiones geomorfológicas que se diferencian por el tipo de rocas expuestas, la disección del relieve en cuanto a densidad y profundidad. El mapa resultante puede verse en la Figura 3.3.

Zona de montaña de rocas plegadas calcáreas. Delimitada por encima de los 1000 msnm constituida por rocas calcáreas jurásicas y cretácicas plegadas de alta competencia mecánica. Con exposiciones casi verticales de más de 10 metros en su mayoría sin cobertura vegetal. En algunos puntos cercanos a la zona de estudio, rumbo a el poblado de Tepango de Rodríguez esta región hace contacto con rocas volcánicas formando altos escarpes de circos de erosión como los que Lugo-Hubp, (2005) plantea para su término de ladera meridional de la SMO, pero dentro de la zona no se identifican.

Zona de premontaña de rocas clásticas. Delimitada por debajo de los 1,000 msnm y hasta aproximadamente los 300 msnm, está constituida por rocas sedimentarias triásico-jurásicas básicamente clásticas en las que según el mapa de regiones geomorfológicas (figura 3.3) presenta la mayor densidad de cauces fluviales con los más profundos cortes de disección por ende una mayor erosión fluvial. En algunas zonas se encuentra cubierta por depósitos piroclásticos que modifican la velocidad y el tipo de erosión haciendo que aparentemente se observe una menor profundidad y densidad de los valles.

Zona de piedemonte y terrazas fluviales. Ubicada por debajo de los 300 msnm, está constituida por la combinación y mezcla de rocas sedimentarias y volcánicas que se acumulan por procesos gravitatorios y fluviales. El valle del Río Zempoala representa la mayor exposición de este tipo, debido a la gran actividad de disección vertical que manifiesta en sus alrededores. Al menos se observan dos terrazas una baja que suele inundarse en un temporal normal y en la que se encuentran algunos cultivos y otra más alta en donde se asienta el poblado. Existe una evidencia continua de procesos gravitacionales en las paredes de dicho valle.

En el capítulo de mapas temáticos se describirán con mayor detalle los parámetros morfométricos que caracterizan el área de trabajo.

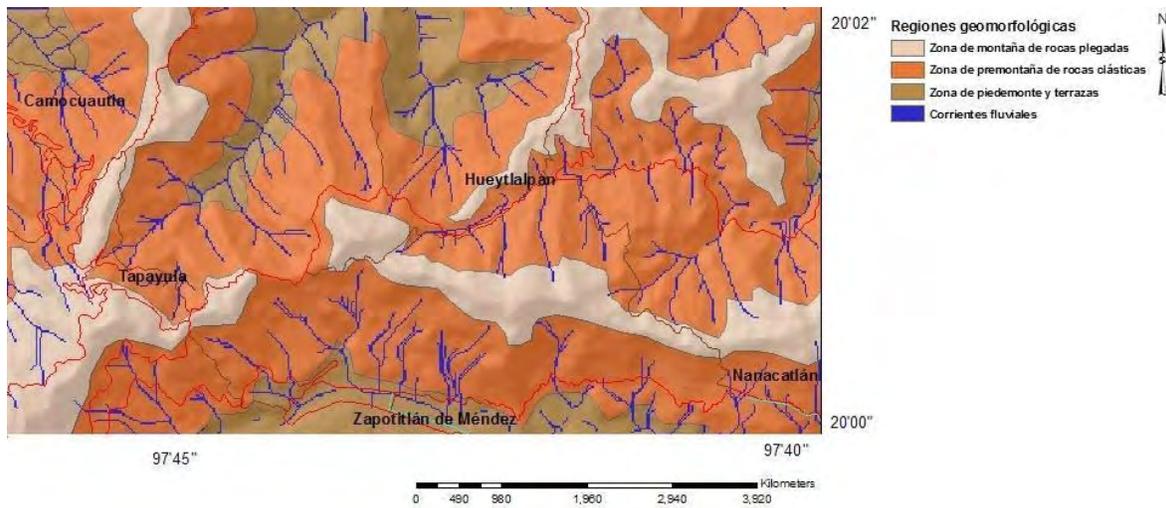


Figura 3.3 Mapa de regiones geomorfológicas de la zona de estudio en el que se muestra tres regiones delimitadas con base en atributos morfométricos y posición altitudinal.

IV. MARCO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA.

MARCO TEÓRICO.

4.1 Aspectos generales de las laderas.

A diferencia de los taludes creados por el hombre, las laderas son masas de tierra y roca que tienen una conformación actual debido a procesos naturales. De manera aparente la mayoría las laderas permanecen estables por muchos años, pero por los procesos de evolución del relieve las laderas pueden fallar en forma imprevista debido principalmente a cambios en la topografía, sismicidad, en los flujos de agua subterránea, en las precipitaciones, en la resistencia al corte, meteorización o en factores de tipo antrópico (Dikau et al., 1996). Las zonas montañosas de la Sierra Norte del estado de Puebla, se encuentran afectadas por muchos de los cambios mencionados, destacando las abundantes precipitaciones y las diferencias en los materiales en cuanto a la resistencia al corte, por consiguiente, las variaciones de los niveles freáticos y el efecto erosivo que el agua genera dentro y fuera de las laderas constituyen uno de los principales agentes desencadenantes de deslizamientos. Dentro de la zona de la Sierra Norte existe evidencia clara de la relación directa entre el régimen de aguas subterráneas, debido principalmente, a las lluvias y a la ocurrencia de deslizamientos. Los últimos procesos erosivos notorios fueron los registrados durante la temporada de lluvias de 1999 que registró cientos de procesos erosivos inmediatos y diferidos (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 1999). Según Suárez (1998) quien ha trabajado ampliamente en zonas de inestabilidad de laderas por lluvias, la ladera ésta conformada por una serie de elementos que a continuación se describe.

Una ladera puede definirse con los siguientes elementos (Fig. 4.1):

- **Altura.** Distancia entre el pie y la cabeza. Resulta difícil determinar la cabeza en laderas naturales ya que la vegetación y los accidentes topográficos pueden ocultarla.
- **Pie.** Sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
- **Cabeza o escarpe.** Sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
- **Altura del nivel freático.** Distancia del pie del talud hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
- **Pendiente.** Medida de la inclinación de la ladera. Se mide en grados o en porcentaje.



Figura 4.1 Perfil de una ladera natural (Suárez, 1998).

Una vez que una ladera sea afectada por un proceso gravitacional, esta puede modificar su conformación natural (figura 4.2) quedando con rasgos específicos que delatan el tipo de proceso al que fue sometida. Una nomenclatura para describir las partes de una ladera modificada ha sido presentada por Suárez (1998) y a continuación se describe:

- **Escarpe principal.** Una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causada por el desplazamiento del material fuera del terreno original.
- **Escarpe secundario.** Superficie inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.
- **Cabeza.** Partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- **Cima.** El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- **Corona.** El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
- **Superficie de falla.** Área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado.
- **Pie de la superficie de falla.** Línea de intersección entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- **Base.** Área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- **Punta o uña.** El punto de la base que se encuentra a mas distancia de la cima.
- **Costado o flanco.** Un lado del movimiento.
- **Superficie original del terreno.** Superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
- **Derecha e izquierda.** Deben utilizarse estas palabras refiriéndose al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

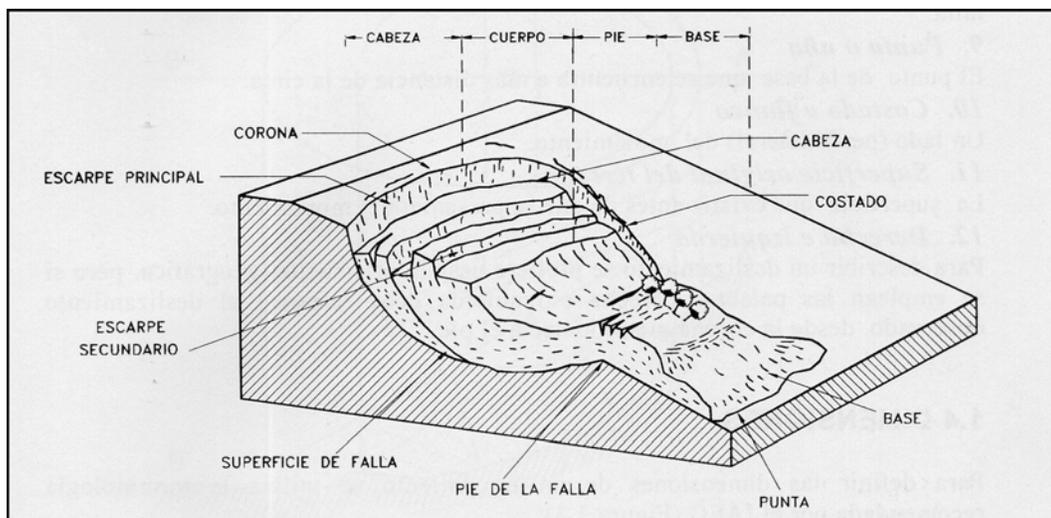


Figura 4.2 Partes que componen una ladera afectada por un proceso de remoción (Suárez, 1998).

4.2 Aspectos generales de los procesos de remoción en masa.

La dinámica de la superficie de la Tierra puede observarse debido a que cualquier terreno que no sea horizontal está sujeto a una serie de fuerzas que tienden a nivelarlo y a otra serie de fuerzas que se oponen a ese cambio. La mayoría de las pendientes abruptas que existen en la naturaleza se han formado por diversos procesos geomorfológicos que actúan de manera individual o conjunta, siendo la erosión en general y los fenómenos de inestabilidad los que tienden a suavizar dichas pendientes.

Los movimientos de ladera, entendidos como fenómenos naturales de evolución del relieve terrestre, constituyen uno de los procesos geológicos más frecuentes que siempre han afectado la superficie de la Tierra y una de las amenazas naturales que en la actualidad han incrementado su presencia dentro del territorio nacional debido principalmente a la recurrente formación de fenómenos meteorológicos extraordinarios (SMN, 2007), a la generación de sismos, a procesos volcánicos y en muchos casos como respuesta a actividades antrópicas, como el caso de la inestabilidad de laderas debida a cortes carreteros. Los efectos socioeconómicos debido a estos movimientos de remoción son cada vez mayores debido al aumento en la vulnerabilidad social y a la múltiple variedad de procesos detonadores que los generan. En nuestro país existen zonas que con un solo evento han presentado de cientos a miles de procesos gravitacionales de diferentes magnitudes, tal es el caso de la Sierra Norte de Puebla (Lugo-Hubp 2001 y 2005).

Muchos son los términos que hacen referencia a este tipo de fenómenos naturales (Alcántara 2000), entre los que encontramos: *deslizamientos*, el término más común dado erróneamente por ser el tipo de proceso de remoción más explícito del conjunto, *movimientos de masa* dado por Hutchinson (1968), *movimientos de ladera*, *procesos gravitacionales* y *procesos de remoción* aplicados por Varnes (1958,1978), diferencia entre *movimiento de masas* y *masas transportadas* determinada por Brundsdén (1984), y recientemente *movimientos de terreno* mencionado por Alcántara (2000). Todas las anteriores expresiones se refieren básicamente a los procesos que ocurren debido a la inestabilidad de las laderas y solo difieren, entre algunas cosas, en la inclusión o exclusión de algún tipo de proceso en particular, el medio de transporte, algún atributo o factor, la velocidad de movimiento, tamaño de las partículas movidas o simplemente en la objetividad del autor.

Por lo tanto, para el desarrollo de este trabajo se considera a los procesos de remoción en masa (PRM) como al conjunto de movimientos de materiales producto de los procesos que natural o antrópica, actúan en la superficie del relieve y que desencadenan condiciones de inestabilidad en la misma.

Debido a la gran variedad de clasificaciones que en la actualidad se presentan, se ha elegido seguir la agrupación que plantea Dikau et al. (1996), en la que se ven

resumidos los diferentes trabajos que hasta esa fecha se habían realizado. El esquema puede ser visto a detalle en la figura 4.3.

| Tipo de movimiento | Subtipo |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Caída o desprendimiento de suelo o roca | |
| 2. Vuelco o desplome de suelo o roca | |
| 3. Deslizamiento rotacional | Deslizamiento rotacional simple Deslizamiento rotacional múltiple Deslizamiento rotacional sucesivo |
| 4. Deslizamiento traslacional | Deslizamiento traslacional o de bloques Deslizamiento de suelos Deslizamiento rocoso Deslizamiento de derrubios |
| 5. Extensión lateral | Extensión lateral en roca Extensión lateral en suelos |
| 6. Flujos | Flujos de rocas Flujo de derrubios Flujos de arena |
| 7. Complejos | Alud o avalancha de rocas Flujo deslizante |

Figura 4.3. Clasificación de los proceso de remoción en masa, Dikau et al. (1996).

4.2.1 Descripción de la clasificación de los procesos de remoción.

Caída o desprendimiento.

Son movimientos de suelos y fragmentos aislados de rocas que pueden caer libremente, rodando o rebotando (Dikau et al., 1996). Es común observarlos en topografías abruptas y acantilados. La forma y volumen de los caídos depende de la naturaleza del material y del grado de alteración que presenten. Pueden clasificarse de acuerdo al tamaño de las partículas desprendidas y al origen y naturaleza del material del cual se generan (Whalley, 1984). Se presentan en materiales rocosos no consolidados o poco consolidados y en suelos.

Vuelco o desplome.

Consiste en una rotación hacia adelante de un macizo rocoso, derrubio o suelo teniendo un pivote o punto de rotación como referencia en el movimiento. Generalmente este modo de falla envuelve bloques columnares de material rocoso

consolidado y poco consolidado o suelos que por su génesis desarrollan estructuras y formas susceptibles de fallar en la base, lo que genera el vuelco Dikau et al. (1996).

Deslizamiento rotacional.

Es un movimiento de material rocoso o de suelo pendiente abajo a lo largo de una superficie de falla de tipo cóncava. Varnes (1978) lo define como un movimiento rotatorio producido a lo largo de un eje paralelo al perfil de la ladera sobre una superficie cóncava que resulta ser la superficie de falla. A menudo la superficie puede observarse como circular pero no siempre lo es. Pueden dividirse de acuerdo al número de planos de falla similares o consecutivos que presente, o sea en rotacionales múltiples o consecutivos (Dikau et al., 1996). Un indicador de movimiento es la aparición de grietas de tensión en la corona o cabeza de la ladera principal o en laderas secundarias. Generalmente produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, formándose flujos por debajo del pie de la ladera. La superficie de falla esta influenciada por las discontinuidades y es común encontrar este tipo de movimiento en suelos y rocas poco consolidadas o gravemente alteradas.

Deslizamiento traslacional.

El movimiento de la masa de suelo o roca se desplaza hacia abajo o hacia fuera a lo largo de una superficie más o menos plana con muy poco de rotación o volteo, (Suárez, 1998). En suelos pueden abarcar total o parcialmente el perfil del suelo pero en rocas pueden llegar a ser de un volumen considerable pues están definidos por las superficies de debilidad de las formaciones rocosas. Se clasifican de acuerdo al material que se desliza en deslizamientos de bloques, rocosos, en suelos y de derrubios (Dikau et al., 1996). Son los más inestables y comunes debido a que dependen de su control estructural y estado del material que los forme. En muchos de estos deslizamientos las masas pueden deformarse y romperse y llegar a convertirse en flujos.

Extensión lateral.

Movimientos laterales de masas en roca o suelo controlados por la extensión de fracturas de corte y tensión (deformación plástica de las rocas) (Dikau et al., 1996). El mecanismo de falla puede seguir movimientos de rotación, traslación y flujo. Son comunes en masas rocosas que se encuentran sobre suelos finos plásticos y en suelos finos sensitivos (arcillas y limos que pierden su resistencia al remoldearse), suelos marinos y de glaciares (Suárez, 1998).

Flujos.

Son movimientos de suelos, rocas o derrubios ladera abajo en donde las partículas o bloques tienen movimientos relativos con respecto a la masa global en movimiento que puede contener un porcentaje importante de matriz y pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos (Dikau et al., 1996). Están asociados a la saturación de los materiales subsuperficiales, es por ello que muchos deslizamientos pueden terminar como flujos de acuerdo al contenido de agua que la masa preexistente presente.

Complejos.

Es común que los procesos de remoción se combinen o que se conviertan en otro a medida que avanzan y como consecuencia generen un movimiento ladera abajo difícil de interpretar. Es por ello, que se ha creado el concepto de “complejo”, en el cual se logran identificar dos o más tipos principales de desplazamientos Suárez (1998). Dos ejemplos de este tipo de movimientos son los aludes o avalanchas y los flujos deslizantes (Dikau et al., 1996).

4.2.2 Los procesos de remoción en roca.

En la mayoría de los casos la estabilidad de las laderas en roca depende propiamente de la resistencia de la roca y de la resistencia al corte de los planos de discontinuidad que presentan, debido a esto, es aceptable que cada formación geológica posea una susceptibilidad específica a los procesos de remoción de acuerdo a las características físicas que muestren sus materiales. Entonces, para un macizo rocoso que generalmente está formado por varios tipos de rocas y que es considerado como un medio heterogéneo y discontinuo, el comportamiento mecánico debe ser diferente en cada material, por consiguiente, pueden estudiarse las propiedades mecánicas de los tipos de roca y las características mecánicas de sus discontinuidades de manera individual y reagrupar esos valores en una aproximación en conjunto. Un acercamiento a este tipo de estimación de las condiciones de estabilidad la presenta Hoek et al. (1994) desarrollan una metodología para obtener un índice de calidad geomecánica para macizos rocosos con rango numérico de 0 a 100, basado en la identificación, descripción y clasificación de las características mecánicas de la estructura y superficies de discontinuidad. Una carta mostrada en la figura 4.4 resume el trabajo desarrollado por Hoek et al. (1998) y muestra una forma rápida de estimar la calidad de los macizos en campo.

| INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI) | Condición de la superficie | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------|--------|------------|
| | Disminución en calidad de superficie | | | | |
| |  | | | | |
| | Muy buena | Buena | Moderada | Escasa | Muy escasa |
|  INTACTA O MASIVA - macizo rocoso con pocas discontinuidades, carente de planos de deformación. | 80 | 70 | | | |
|  POCO FOLIADA - macizo rocoso parcialmente fracturado con hasta tres sistemas de discontinuidades. Puede contener intercalaciones de rocas foliadas. | | 60 | 50 | | |
|  MODERADAMENTE FOLIADA - macizo rocoso fracturado constituido por intercalaciones de rocas foliadas y no foliadas en proporciones semejantes. | | | 40 | 30 | |
|  BRECHADA - macizo rocoso muy alterado tectónicamente con aspecto brechoide. | | | | 20 | 10 |
|  MUY FOLIADA - macizo rocoso plegado, altamente fracturado, constituido únicamente por rocas muy foliada. | N/A | N/A | | | 5 |

Figura 4.4 Carta para estimar el GSI basado en el estado de la estructura y las condiciones que presentan las discontinuidades en macizos rocosos modificado de Hoek et al. (1998).

Actualmente este sistema de estimación de la calidad es una fuente confiable de estimación y cuantificación de la principales características geomecánicas pues permite evaluar de manera sencilla la disminución de la resistencia y el aumento de la deformabilidad de las rocas en formaciones naturales.

4.2.3 Los procesos de remoción en materiales pedológicos.

Las condiciones o factores en los que se desarrolla un suelo pueden dar una idea de las características y propiedades a esperar, por esto, es común enfocar los estudios relacionados con suelos primeramente al análisis de los procesos que les dieron origen. Para la interpretación de los procesos de remoción en roca (PRM) resulta de gran importancia iniciar el estudio del comportamiento mecánico de estos con la identificación de los principales factores generadores de suelos y la manera en que influyen en el proceso de desestabilización.

Por otro lado, una forma de clasificar a los suelos y que ayuda a entender de mejor manera el comportamiento físico de estos pueden ser la que se hace de acuerdo a su origen. Se distinguen entre suelos residuales y transportados. Los suelos residuales son aquellos que se forman *in situ* a partir de una roca o material depositado, estabilizado y sin riesgo de desplazamiento por procesos geológicos. Los suelos transportados son aquellos que se forman a partir de materiales que han sido transportados del lugar de origen e incorporados a nuevas condiciones de formación. Las características de ambos suelos son muy diferentes, los residuales generalmente están controlados por la morfogénesis y composición del material parental, mientras que los transportados se encuentran sometidos, entre otras cosas, a la marcada actividad gravitacional que influyó en su formación y que en algunos casos sigue influyendo.

Para poder determinar el comportamiento mecánico de los suelos es necesario determinar las condiciones litológicas, estratigráficas e hidrogeológicas. De la litología es importante determinar el tipo de roca madre y su estado, los minerales presentes, el tamaño que presentan las partículas, en especial los porcentajes de finos (arcillas y limos), la estructura y las discontinuidades. Para la estratigrafía resulta significativo establecer la posición en la que se encuentran y la relación que guardan con los diversos grupos de rocas que conforman el relieve natural de las laderas. Por otro lado, de la situación hidrogeológica las condiciones de humedad y el comportamiento interno del agua ya sea permanente u ocasional resultan los mejores indicativos de la resistencia al corte y comportamiento de las laderas de este tipo de materiales.

Geotécnicamente es utilizada la teoría de la mecánica de suelos clásica (Terzaghi, 1967) para identificar las propiedades mecánicas básicas que determinaran el comportamiento mecánico de los suelos. La granulometría y los límites de Atterberg pueden revelar la capacidad de los suelos ante los procesos de inestabilidad a los que son sometidos. Una descripción con más detalle de este tratamiento puede verse al final del capítulo (apartado 4.5).

MARCO HISTÓRICO.

4.3 Antecedentes de los estudios de procesos de remoción en México.

Aunque no con el nombre de procesos de remoción en masa, el estudio de la inestabilidad de laderas en México lleva ya varios años realizándose, sobre todo desde el punto de vista de la ingeniería en especial dentro de los campos de la geotécnica. Varias son las grandes obras que en las últimas décadas se han construido dentro del territorio nacional y que en cierto momento han recurrido a un estudio de estabilidad de los macizos rocosos en los que se edifica, ya sea por estar planeado dentro del mismo proyecto o por la activación de algún factor detonante dentro del sistema rocoso durante la fase de construcción. Entre los estudios más importantes se tiene los realizados por Comisión Federal de Electricidad (CFE), Comisión Nacional del Agua (CNA) y Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) que son las instituciones nacionales que tienen a su cargo la construcción de presas, hidroeléctricas, túneles de

conducción, obras subterráneas y carreteras. Unos ejemplos de estos tipos de trabajos pueden verse en los siguientes trabajos: Herrera y Reséndiz (1992) presentan el estudio de un deslizamiento de talud natural en materiales volcánicos de un millón de metros cúbicos que se produjo durante la construcción de la hidroeléctrica Agua Prieta en el estado de Jalisco. García-Herrera (2002) muestra el análisis de un gran número de deslizamientos ocurridos durante la explotación de un tajo a cielo abierto de una mina de plata-plomo-zinc. Comisión Federal de Electricidad (1985) despliega el comportamiento de las presas construidas durante 1974-1984 haciendo referencia a los diversos problemas de inestabilidad de los taludes naturales en los que fueron construidas. Rendón-Huerta (1993) menciona algunos de los problemas geotécnicos que ocurrieron durante la construcción de los túneles del proyecto hidroeléctrico Zimapán.

Por otra parte, hace apenas unos años y como respuesta a la continua presencia de este tipo de fenómenos dentro del territorio nacional, se han venido desarrollando una serie de investigaciones referentes a dichos eventos. Muchas son las formas en las que se ha abordado el estudio de estas manifestaciones las cuales van desde el simple estudio de las condiciones geotécnicas de la zona para estabilizar caminos lo mas pronto posible en comunidades afectadas, hasta publicaciones en las que no solo se analiza el tipo de movimiento ocurrido, si no que también se involucra el grado de peligro que estos eventos pueden generar, aún, considerando que este tipo de sucesos están sujetos a muchos grados de incertidumbre.

Uno de los primeros estudios corresponde al realizado en Mezquitlán (Lugo-Hubp et al. 1993, 1996) el cual reconoce los factores que determinaron la ocurrencia de dichos procesos e identifican los mecanismos que contribuyeron a la inestabilidad.

En 1996 el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) presenta un fascículo referente a los procesos de inestabilidad de laderas en donde se explica detalladamente el fenómeno, los tipos, el impacto dentro del territorio y las medidas preventivas.

Por otro lado, Cruz y Delgado (2000), estudiaron una serie de deslizamientos en la Carretera Tijuana-Ensenada, Baja California. Utilizando sondeos geotécnicos identificaron los horizontes litológicos que actúan como planos de deslizamiento en los movimientos que se tenían a lo largo de los cortes carreteros.

Alcántara-Ayala (2000) ofrece una propuesta para el uso de los términos relacionados con los procesos de remoción de masas en México.

Lugo-Hubp et al. (2001), publican por primera vez un análisis sobre los procesos gravitacionales en las montañas de Puebla a raíz del evento meteorológico de 1999.

Vázquez-Conde et al. (2001) presentan un análisis de los efectos causados por la lluvia de 1999, mostrando periodos de retorno de más de 25 años para las regiones de la Sierra Norte de Puebla.

Flores-Lorenzo y Alcántara-Ayala (2002) marcan una cartografía morfogenética e identifican los movimientos de masas en Teziutlán.

Arreygue-Rocha et al. (2002) desarrollan un análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe de la falla La Paloma, la cual debe principalmente su desequilibrio a eventos sísmicos.

Capra et al. (2003₁) analiza las características de los movimientos de masas en el terreno volcánico de la ciudad de Teziutlán. En el mismo año, Capra et al. (2003₂) identifica los procesos de remoción para la zona de Zapotitlán de Méndez y describe la relación que guardan la litología y el tipo de movimiento.

Alcántara-Ayala (2004) evalúa el riesgo que induce la caída de lluvia en los desprendimientos en México, mencionando el caso de la Sierra Norte.

Lugo-Hubp et al. (2005) clasifican el relieve afectado por la lluvia de 1999 en el que identifica los principales tipos de procesos sus causas y efectos.

Caballero et al. (2006) describen los efectos de un evento meteorológico extraordinario ocurrido en Septiembre de 1998 en Motozintla, Chiapas y caracterizan los procesos de remoción detallando la descripción de los principales depósitos de flujo que afectaron la zona.

Keefer et al. (2006) presentan los procesos de inestabilidad que un sismo de magnitud 7 en el 2003 generó en las laderas de los alrededores de los volcanes Nevado y de Fuego hasta llegar casi a las laderas de las costas de Manzanillo, Colima.

García-Palomo, et al. (2006) presentan un inventario de 206 sitios por peligro a deslizamiento en la Sierra de Guadalupe identificando los principales mecanismos de falla.

Capra et al. (2006) detalla la importancia del factor geológico dentro de los procesos de remoción de la Sierra Norte ejemplificando con el caso del deslizamiento ocurrido en Totomoxtla.

Como respuesta a la peculiaridad de dicho evento, se han desarrollado una serie de trabajos de tesis que abordan al igual que los trabajos mencionados anteriormente diferentes aspectos de estudio, Hernández-Mena (2002) desarrolla una descripción geológico-geotécnica de unos de los movimientos de mayor magnitud, identificando a los factores condicionantes y detonantes. Flores-Lorenzo (2002) realiza un trabajo sobre el riesgo debido a la inestabilidad de laderas en el área de Teziutlán. Borja-Baeza (2003) despliega un análisis de susceptibilidad y

riesgos en la zona de Zacapoaxtla. Davila-Hernández (2003) presenta un mapa de susceptibilidad para la ciudad de Teziutlán. López-Mendoza (2003) genera un programa preventivo para la mitigación del desastre en el valle de Zapotitlán de Méndez. Marcos-López (2003) analiza espacialmente la distribución de los procesos en la parte de Tlatlauquitepec. Ochoa-Tejeda (2004) muestra una metodología de estudio para laderas inestables utilizando percepción remota. Cuanalo-Campos (2004) habla sobre los métodos correctivos para estabilizar movimientos en las laderas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.4 Aspectos generales de los procesos de remoción en masa en la zona de estudio.

Dentro de la zona de estudio se reconocieron desde la lluvia de 1999 hasta el ultimo temporal de lluvias del 2005 (Stan), 38 movimientos de los cuales 34 son producto del evento meteorológico de 1999 y 4 aparecieron durante las lluvias generadas por el huracán Stan. La localización y descripción de los fenómenos se realizó en dos grupos: el de los ocurridos propiamente en roca (materiales de mayor competencia) y el de los ocurridos en materiales menos competentes. En particular en esta categoría se incluye material incoherente, sea de origen volcánico (depósitos piroclásticos no soldados) y material muy intemperizado, incluyendo suelos y paleosuelos. De estos dos conjuntos se identificaron 19 corrimientos en roca y 19 en suelos (depósitos volcánicos o rocas severamente intemperizadas). Los movimientos encontrados en el área corresponden mayormente según la clasificación de Dikau et al (1996) con procesos de caída, deslizamientos y flujos. Los procesos en roca presentan principalmente movimientos de caída, deslizamientos traslacional simple y de bloques. Por otra parte, los ocurridos en materiales tipo suelo corresponden con eventos que inician como deslizamientos traslacionales o rotacionales que terminan como flujos. Los volúmenes de material rocoso removido en cada proceso de remoción van del orden de metros a cientos de metros cúbicos. Dos procesos encontrados dentro del área de trabajo y que corresponden al evento de 1999 son considerados de suma importancia dentro de este estudio debido al volumen involucrado y a su cercanía a los poblados; estos son los deslizamientos de Zapotitlán de Méndez y Tapayula.

En su mayoría los eventos se localizaron dentro de las partes cóncavas de las laderas iniciándose en muchos casos en los trazos carreteros o en franjas donde la deforestación es alta. En la línea carretera pueden verse ladera abajo de la carpeta asfáltica o en el talud superior. Los movimientos se generan a partir de la combinación de los factores geológicos (litología y estructura geológica), hidrogeológicos (presencia de agua) y geotécnicos (comportamiento mecánico de los materiales). El mecanismo de falla y modo de desprendimiento son controlados por los factores geológicos y geotécnicos. Muchos de estos fenómenos coinciden también con los asentamientos humanos principales dado que las comunidades de este tipo se encuentran establecidas al pie de la carretera debido a que dependen de las vías de comunicación para realizar sus actividades cotidianas.

4.4.1 Características de los PRM en roca de la zona de estudio.

La determinación de la calidad de los diversos macizos rocosos encontrados en el área se realizó con base en la última carta presentada en Hoek et al. (1998) asignando valores de GSI a cada formación geológica reconocida en el área. Con la obtención de una estimación de calidad para cada formación y con los límites geológicos definidos, se elaboró, dentro de un mapa geológico una cartografía de la calidad de roca que es presentado en el capítulo de mapas temáticos y que de manera descriptiva representa uno de los principales factores actuantes que es la diversidad de competencias de los materiales en la zona. Para complementar la descripción de las discontinuidades de los macizos se siguió el planteamiento que marca en su manual de pruebas de campo y laboratorio la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas: Comisión de estandarización de pruebas de laboratorio y campo. Las características analizadas son: orientación, espaciamiento, persistencia, rugosidad, apertura, relleno, filtración, número y tamaño de bloque (ISMR, 1981). La combinación de los resultados obtenidos a partir de la metodología de Hoek y la ISMR permitió obtener que de las nueve formaciones geológicas cartografiadas algunas presenten rangos de valores de GSI similares lo que redujo la zona a cinco áreas con diferentes clases de calidad (figura 4.5 y tabla 4.1). La coincidencia en calidad se debe a las similitudes en génesis y procesos exógenos que han afectado al conjunto de rocas sedimentarias de la Sierra Madre Oriental y depósitos volcánicos que conforman la región.

| INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI) | Condición de la superficie | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------|----------|--------|------------|
| | Disminución en calidad de superficie | | | | |
| | a | b | c | d | e |
| | Muy buena | Buena | Moderada | Escasa | Muy escasa |
|  INTACTA O MASIVA - macizo rocoso con pocas discontinuidades, carente de planos de deformación. | 80 | 70 | | | |
|  POCO FOLIADA - macizo rocoso parcialmente fracturado con hasta tres sistemas de discontinuidades. Puede contener intercalaciones de rocas foliadas. | | 60 | 50 | | |
|  MODERADAMENTE FOLIADA - macizo rocoso fracturado constituido por intercalaciones de rocas foliadas y no foliadas en proporciones semejantes. | | | 40 | 30 | |
|  BRECHADA - macizo rocoso muy alterado tectónicamente con aspecto brechoide. | | | | 20 | 10 |
|  MUY FOLIADA - macizo rocoso plegado, altamente fracturado, constituido únicamente por rocas muy foliada. | N/A | N/A | | | 0 |

Figura 4.5 Rangos de GSI determinados para las formaciones geológicas identificadas en la zona de estudio. Jhy: 0-5 (5e), Volcánico: 10-20 (4e), Jcs-Jsg-Jtx: 21-30(3d y 3e), Kan: 31-40 (3c) y Jt-Jp-Kts-Kti: 41-50 (3b). 1, 2, 3, 4 y 5: estructura, a, b, c, d y e: condiciones de las superficies. Modificado de Hoek et al. (1998)

Los rasgos más relevantes que muestran los procesos gravitacionales pueden verse en la tabla 4.2 de la que se destaca que las zonas más activas en procesos en roca se encuentran entre los 1,100 y 1,300 msnm con más del 60% de eventos que se encuentran principalmente dentro de la formación jurásica Cahuasas (Jcs) (figura 4.6). El 84% se encuentra con superficies activas que en cada temporal incrementan sus dimensiones, los más comunes son los del orden de metros cúbicos. Solo tres eventos fueron del orden de cientos a miles de metros cúbicos.

Los tipos de movimientos encontrados en roca son básicamente caídas, deslizamientos traslacionales simples y de bloques, aunque, en algunos casos debido a la intensa alteración de la roca se tiene que un movimiento que ha iniciado como deslizamiento concluye como flujo o es clasificado como deslizamiento de tipo rotacional (figura 4.7). Normalmente es detectado en secuencias sedimentarias de areniscas-conglomerados-lutitas que deben su comportamiento a la intensa actividad meteórica diferencial que se da en estas series por la presencia de lutitas y la variación de los niveles freáticos,

produciendo niveles freáticos colgados que generan grandes espesores de material altamente alterado que adquiere un comportamiento típico de los materiales considerados como suelos.

En los eventos registrados se tiene que más del 80% corresponden con deslizamientos de los que en mayor número son del tipo cuña y planar. Dichos movimientos involucran de una a tres formaciones con un visible aumento en la dimensión al incrementar el número de formaciones rocosas participantes. La influencia del relleno dentro de las discontinuidades es evidente debido a su presencia en la totalidad de los deslizamientos, predominando el tipo arcillo-limoso. Los espesores de los rellenos van de 5 cm a 1m y más del 84% de estos muestran evidencia visible de agua. Por último es de resaltar que casi el 90% de los movimientos registrados se encuentra directamente asociado al trazo del corte carretero y a la deforestación que existe en los alrededores de la carretera como consecuencia de la misma.

| Formación | Volcánico | Kan | Kts | Kti | Jt-Jp | Jtx | Jcs | Jhy |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Discontinuidades | superficies de depósito | estratificación fracturas | estratificación fracturas | estratificación fracturas | estratificación fracturas | estratificación fracturas | estratificación fracturas falla | estratificación fracturas foliación |
| No de familias | | -2 1 sistema | -2 1 sistema | -2 1 sistema | -4 2 sistemas | -4 2 sistemas | -4 2 sistemas | -4 2 sistemas |
| Orientación | Variable: rellenan superficies | N-S NE -NE -SW | NW-SE NE -NE -SW | NW-SE -NE -SW | NW-SE -NE -SW -SE -NW | NW-SE -NE -SW -SE -NW | NW-SE -NE -SW -SE -NW NE | NW-SE -NE -SW -SE -NW NW |
| Espacimiento | Cerrado 60-200 mm | Moderado 200-600 mm | Moderado 200-600 mm | Moderado 200-600 mm | Amplio 600-2000 mm | Moderado-muy amplio 200-6000 mm | Moderado-muy amplio 200-6000 mm | Muy cerrado-cerrado 20-200 mm |
| Persistencia | | Muy alta >20 m Muy baja <1 m | Muy alta >20 m Baja 1-3 m | Muy alta >20 m Baja 1-3 m | Muy alta >20 m Baja 1-3 m | Muy alta >20 m Baja 1-3 m | Muy alta >20 m Baja 1-3 m | Muy alta >20 m Baja 1-3 m |
| Rugosidad | Rugoso-ondulante | Liso-plano | Liso-plano | Liso-plano | Liso-ondulante | Rugoso-plano | Liso-plano | Rugoso-plano |
| Resistencia | 10 Roca débil | 100 Roca resistente | 250 Roca muy resistente | 250 Roca muy resistente | 100 Roca resistente | 100 Roca resistente | 100 Roca resistente | 5 Roca débil |
| Abertura | 1 mm | 1-3 mm 1-2 mm | 1-3 mm 2 mm | 2-3 mm 1-2 mm | 1-3 mm 1-3 mm | 3 mm 1-3 mm | 1-3 mm 1-2 mm 2 mm | 1-2 mm 1-2 mm 1 mm |
| Relleno | arc- lim | Arc-lim | arc-lim arenoso | arenoso | Arc-lim Calcáreo | Arc-lim | arc- lim | Arc-lim calcáreo |
| Filtraciones | evidentes | No evidentes | No evidentes | No evidentes | evidentes | evidentes | evidentes | Evidentes |
| Tamaño de bloques | Masivo: Bloques muy pequeños | Prismas: Bloques pequeños-medios | Prismas: Bloques medios-grandes | Prismas: Bloques medios-grandes | Cúbica: Bloques medios | Tabular-cúbica: Bloques medios-grandes | Prismas: Bloques medios-muy grandes | Fragmentada: Bloques medios |

Tabla 4.1 Resumen descriptivo de condiciones mecánicas de las discontinuidades encontradas en los macizos rocosos del área, utilizando la clasificación ISMR (1981).



a)



b)



c)



d)

Figura 4.6 Procesos de remoción en masa dentro de la Formación jurásica Cahuasas, a) Deslizamiento planar y de bloques en horizontes predominantemente de areniscas con alto grado de intemperismo., b) deslizamiento rotacional en una secuencia de lutitas con alto grado de meteorización., c) deslizamiento traslacional y de bloques en una secuencia de areniscas y lutitas con presencia de un escurrimiento colgado un estrato de lutitas., d) deslizamiento planar en areniscas y lutitas con fracturamiento como superficie deslizante.



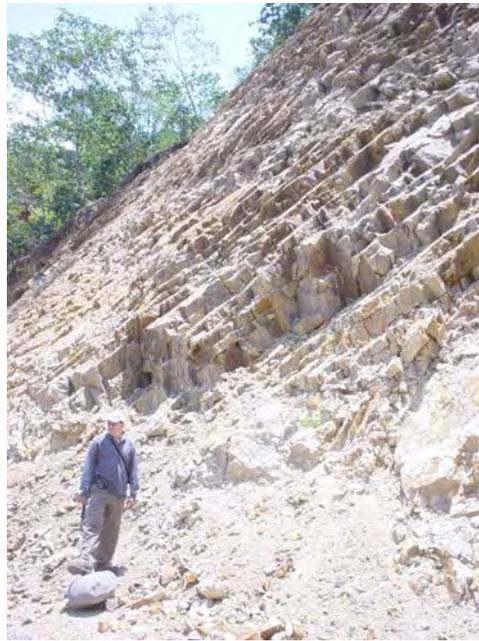
a)



b)



c)



d)

Figura 4.7 Deslizamientos planar y de bloques en secuencia de conglomerados lutitas., a) Detalle del plano de deslizamiento., b) Tamaño máximo de los bloques de 1.5 x 1.5 m., c) Detalle del conglomerado., d) Deslizamiento planar en calizas con estratificación como superficie deslizante.

| No. De movimiento | UTM X | UTM Y | Elevación | Tipo de MRM | Tipo de deslizamiento | Estado | Geología | Formaciones involucradas | Formación más inestable | Relleno entre discontinuidades | Tipo de relleno | Evidencia de agua en el relleno | Espesor máximo del relleno | Asociado al corte carretero | Dimensiones | Ø residual del relleno | Máxima resistencia a la compresión simple | GSI |
|-------------------|--------|---------|-----------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|--------------------|
| 1 | 631166 | 2213747 | 1280 | 2 | 3.00 | 1.00 | 8.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 100.00 | 1.00 | 2.00 | 22.00 | 100.00 | 20.00 |
| 2 | 632707 | 2213895 | 1197 | 2 | 3.00 | 1.00 | 8.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 100.00 | 1.00 | 1.00 | 22.00 | 100.00 | 20.00 |
| 3 | 633466 | 2214764 | 1106 | 2 | 2.00 | 1.00 | 3.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 5.00 | 1.00 | 1.00 | 18.00 | 250.00 | 45.00 |
| 4 | 632522 | 2212381 | 834 | 2 | 3.00 | 1.00 | 9.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 10.00 | 1.00 | 1.00 | 22.00 | 5.00 | 15.00 |
| 5 | 632257 | 2212540 | 861 | 2 | 3.00 | 1.00 | 9.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 10.00 | 1.00 | 1.00 | 22.00 | 5.00 | 15.00 |
| 6 | 632083 | 2212538 | 876 | 1 | 1.00 | 1.00 | 8.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 100.00 | 1.00 | 1.00 | 22.00 | 100.00 | 20.00 |
| 7 | 631056 | 2214126 | 1215 | 2 | 3.00 | 1.00 | 7.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 50.00 | 1.00 | 1.00 | 22.00 | 100.00 | 25.00 |
| 8 | 630900 | 2214685 | 1165 | 2 | 2.00 | 1.00 | 6.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 3.00 | 1.00 | 18.00 | 1.00 | 1.00 | 13.00 | 100.00 | 30.00 |
| 9 | 630823 | 2214432 | 1181 | 2 | 2.00 | 1.00 | 6.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 3.00 | 1.00 | 18.00 | 1.00 | 1.00 | 13.00 | 100.00 | 30.00 |
| 10 | 631746 | 2212559 | 920 | 2 | 3.00 | 1.00 | 6.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 100.00 | 2.00 | 1.00 | 22.00 | 100.00 | 20.00 |
| 11 | 631140 | 2215035 | 1128 | 2 | 3.00 | 1.00 | 8.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 18.00 | 1.00 | 1.00 | 13.00 | 100.00 | 30.00 |
| 12 | 630905 | 2213594 | 1274 | 3 | 4.00 | 1.00 | 8.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 100.00 | 1.00 | 2.00 | 22.00 | 100.00 | 20.00 |
| 13 | 630796 | 2213294 | 1395 | 2 | 3.00 | 1.00 | 8.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 100.00 | 1.00 | 1.00 | 22.00 | 100.00 | 20.00 |
| 14 | 631728 | 2212858 | 1210 | 2 | 3.00 | 1.00 | 8.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 100.00 | 1.00 | 1.00 | 22.00 | 100.00 | 20.00 |
| 15 | 631809 | 2212514 | 912 | 2 | 3.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 100.00 | 2.00 | 1.00 | 22.00 | 250.00 | 20.00 |
| 16 | 634392 | 2212751 | 1109 | 2 | 2.00 | 2.00 | 6.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 10.00 | 1.00 | 1.00 | 18.00 | 100.00 | 45.00 |
| 17 | 631581 | 2215652 | 1110 | 2 | 3.00 | 1.00 | 8.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 3.00 | 1.00 | 18.00 | 1.00 | 1.00 | 13.00 | 100.00 | 30.00 |
| 18 | 631803 | 2213304 | 1192 | 3 | 4.00 | 1.00 | 8.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 100.00 | 1.00 | 1.00 | 22.00 | 100.00 | 20.00 |
| 19 | 632814 | 2212562 | 756 | 2 | 5.00 | 1.00 | 8.00 | 3.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 100.00 | 1.00 | 3.00 | 22.00 | 100.00 | 20.00 |
| | | | | 1-Caidas 2-Deslizamientos 3-Flujos | 1- Caída 2- Planar 3- Cula 4- Rotacional 5- Miso | 1- Activo 2- Inactivo | 1- Kar 2- Kls 3- Ks 4- Sp 5- J 6- Jg 7- Jx 8- Jcs 9- Jxc 10- volcánico | Numero de formaciones involucradas en cada movimiento | Formación mas inestable | 1- Si 2- No | 1- Arenoso 2- Arc-lim 3- Calcareo | 1- Si 2- No | cm | 1- Si 2- No | 1- Metros 2- Centos 3- Mtes | Hoek (2000) | ISMR (1981) | Hoek et al. (1998) |

Tabla 4.2 Detalle de algunos rasgos característicos obtenidos de los procesos de remoción en roca ocurridos dentro del área de estudio.

4.4.2 Características de los procesos de remoción en suelos de la zona de estudio.

Los suelos desarrollados en las laderas estudiadas de la Sierra Norte y que se han identificado involucrados en fenómenos gravitacionales resultan ser elementos condicionados estrechamente en su desarrollo por el material parietal, la situación climática y el relieve.

Los depósitos piroclásticos que cubren porciones de la parte oeste, noroeste y sureste y los coluviones encontrados en las partes medias de los taludes (zona de premontaña), resultan ser la roca madre de los suelos más inestables identificados, debido a que dentro de estas fueron identificados en mayor número los procesos erosivos en suelo. Aunque gran parte de las formaciones de la zona son predominantemente sedimentarias el desarrollo superficial de suelos en este tipo de elementos es pobre lo que hace que sea más marcada la susceptibilidad a inestabilidad en los materiales volcánicos sin restar importancia a la meteorización diferencial que existe en las secuencias sedimentarias con presencia de lutitas y que a profundidad desarrollan superficies de debilidad.

Por otro lado la situación climática del área esta regida por un clima semicalido-húmedo con lluvias todo el año y temporal alto de mayo a octubre, bajo una temperatura promedio de 21° y precipitación media anual de 1021 mm (INEGI, 1999). Dichos parámetros propician cambios físicos y químicos sobre los materiales determinando la intensidad y velocidad de transformación de las rocas y suelos. El intemperismo químico es el principal factor intempérico en la zona mediante la alteración y lavado de los materiales debido a las continuas fluctuaciones en los niveles freáticos y a la exposición por erosión de las superficies del terreno. La capacidad de expansión y contracción de las arcillas heredadas y de neoformación es alta debido a la marcada presencia de estructuras tabulares prismáticas típicas de fenómenos de expansión y contracción reflejando la presencia de arcillas del tipo de las smectitas que presentan propiedades absorbentes que permiten el acercamiento y separación de cationes o moléculas de agua entre estratos (Instituto Mexicano del Transporte, 1998).

La asociación de suelos que puede observarse de acuerdo al factor relieve está dada por las formas topográficas de la zona, de esta manera, las partes altas y más accidentadas presentan el menor desarrollo de suelo debido a la exposición directa de las formaciones sedimentarias, a la pendiente y plegamiento. La parte media de las laderas que en algunos lugares presenta formas más redondeadas debido a los depósitos volcánicos permite un mejor desarrollo de los suelos y debido a las elevadas pendientes existe una mayor acción erosiva en ellos. La parte de ladera inferior aloja a los suelos coluviales que de alguna forma evidencian la acción de los procesos erosivos de la zona.

Dentro del estudio de los procesos gravitacionales de la región resultó de mayor importancia la descripción y análisis de los suelos residuales por considerarse el

inicio de la actividad erosiva y porque en estos es posible encontrar un mayor número de información acerca de las condiciones mecánicas que guardan los materiales y su activación. Por otro lado los suelos transportados que originalmente han sido los materiales más propensos a los efectos gravitatorios, en este trabajo serán entendidos como lo más próximo a un fin erosivo dando una idea del potencial de desestabilización que puede alcanzar el terreno.

De esta forma, el comportamiento mecánico de los suelos de la zona puede estar controlado básicamente por la litología, estratigrafía y condiciones hidrogeológicas.

Los movimientos tipo suelo que se encontraron en la Sierra Norte corresponden con eventos que en su mayoría inician como deslizamientos traslacionales porque adoptan como superficie deslizante el límite suelo-roca, un plano de estratificación o una fractura (figuras 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11). Otros movimientos encontrados son del tipo rotacionales, debido a la presencia de intensa actividad meteórica en el material base. La mayoría de los procesos terminan como flujos debido a la acumulación excesiva de agua logrando una capacidad de movimiento hasta las partes más bajas, de ahí que, básicamente sean de este tipo los mayormente encontrados en estos materiales.

En la mayoría de los fenómenos de remoción detectados pudo observarse que ocurre como superficie deslizante el límite suelo-roca el cual puede asociarse a niveles colgados de agua permanentes y temporales que provocan procesos de disolución y lavado de partículas, siendo más evidente en deslizamientos de coluviones arcillosos sobre superficies rocosas como lo son las lutitas, calizas, areniscas que pueden actuar como barreras que facilitan acumulación y formación de corrientes de agua, desequilibrando los sistemas.

Para los procesos erosivos los rasgos más relevantes pueden verse en la tabla 4.3 en la que se destaca que las zonas más activas se encuentran entre los 1100 y 1300 msnm seguidos de un grupo que predomina a los 600 a 800 msnm. El 75% de los movimientos fue clasificado como flujo de los cuales el 70% ocurrió en suelos volcánicos. Coincidentemente al igual que en los procesos en roca el 84% de las superficies se encuentran activas con un predominio de los del orden de metros cúbicos. Solo se ubicó un movimiento del orden de cientos de metros cúbicos. La mayoría de los movimientos ocurren en pendientes que van desde los 5° hasta los 30° con una tendencia de espesores de 1 m que pueden alcanzar hasta los 2.5 m.

| No. De movimiento | UTM X | UTM Y | Elevación | Pendiente | Tipo de MRM | Tipo de deslizamiento | No. horizontes | Horizonte inestable | Estado | Geología | Evidencia de Humedad | Espesor máximo | Asociado al corte carretero | Dimensiones | |
|-------------------|-----------|------------|-----------|-----------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------|---------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------|-----------------------------|--------------|------------------------------------|
| 1 | 633462.00 | 2214501.00 | 1165.00 | 21.17 | 3.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 0.40 | 1.00 | 1.00 | |
| 2 | 630505.00 | 2212726.00 | 1431.00 | 13.75 | 3.00 | 1.00 | 4.00 | 3.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | |
| 3 | 635219.00 | 2211749.00 | 649.00 | 18.22 | 3.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| 4 | 633280.00 | 2212136.00 | 665.00 | 33.91 | 2.00 | 2.00 | 3.00 | 3.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.78 | 1.00 | 1.00 | |
| 5 | 635916.00 | 2212284.00 | 691.00 | 29.25 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 2.50 | 1.00 | 2.00 | |
| 6 | 633208.00 | 2212637.00 | 760.00 | 14.94 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 1.50 | 1.00 | 1.00 | |
| 7 | 633959.00 | 2214770.00 | 1115.00 | 39.93 | 3.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| 8 | 632299.00 | 2213608.00 | 1222.00 | 26.69 | 3.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| 9 | 630046.00 | 2215620.00 | 848.00 | 19.17 | 3.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.90 | 1.00 | 1.00 | |
| 10 | 630444.00 | 2215319.00 | 939.00 | 7.85 | 3.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| 11 | 630347.00 | 2214465.00 | 1080.00 | 7.17 | 3.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.50 | 1.00 | 1.00 | |
| 12 | 631339.00 | 2215289.00 | 1117.00 | 8.54 | 3.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 0.60 | 1.00 | 1.00 | |
| 13 | 630799.00 | 2214231.00 | 1185.00 | 20.31 | 3.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.80 | 1.00 | 1.00 | |
| 14 | 630908.00 | 2213394.00 | 1370.00 | 17.81 | 3.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| 15 | 632103.00 | 2213121.00 | 1200.00 | 37.12 | 3.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| 16 | 631832.00 | 2212863.00 | 1207.00 | 26.87 | 3.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 1.00 | |
| 17 | 630896.00 | 2214315.00 | 1187.00 | 24.35 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.60 | 1.00 | 1.00 | |
| 18 | 633764.00 | 2212796.00 | 756.00 | 15.92 | 3.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| 19 | 631165.00 | 2213289.00 | 1209.00 | 10.63 | 3.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| | | | | | 1-Caídas 2-Deslizamientos 3-Flujos | 1-Flujo en suelo volcánico 2-Flujo de detritos | | | De arriba a abajo | 1- Activo 2- Inactivo | 1- Volcánico 2- No volcánico | 1- Si 2- No | En metros | 1-Si 2-No | 1- Metros 2- Centos 3- Miles |

Tabla 4.3 Rasgos de los movimientos gravitacionales ocurridos en los suelos inestables de la Sierra Norte.

4.4.2.1 Suelos residuales.

Los suelos que presentan mayor actividad erosiva son los formados como resultado de la alteración de los depósitos volcánicos recientes y las secuencias sedimentarias conglomerado-arenisca-lutita. Esto puede deberse a que por un lado los suelos formados sobre depósitos volcánicos poseen textura fina con materiales de amplia capacidad de absorción que generan reacción ante el agua mientras que las secuencias de arenisca y conglomerado tienden a formar suelos de textura gruesa sumamente permeables que permiten el paso hasta las lutitas que reaccionan ante la presencia del agua, generándose así problemas de inestabilidad.

En los depósitos de ceniza se desarrollan suelos en los que aún es posible identificar las relaciones estratigráficas primarias y el material parietal. Los espesores de los perfiles pueden llegar a ser profundos alcanzando valores máximos de hasta 2.5 metros. Los distintos horizontes son identificados debido al cambio de color y textura presentando colores pardo-amarillentos y rojizos (figura 4.8 a). Algunas limitantes y características físicas importantes que proporcionan información de las condiciones de estabilidad que presentan son: un grado de pedregosidad de aproximadamente 2%, desarrollo de estructura débil con forma prismática que rompe a angular en bloques con agregados de tamaño fino a medio, presencia de superficies de deslizamiento y algunos cutánes, densidad aparente mediana, una textura de Franco arcillo-limosa a Franco arcillosa, estabilidad de agregados baja con notable turbidez en el agua que se observa por la facilidad de erosión y movilidad de los materiales finos en presencia de agua (figura 4.8 a y b). Según la clasificación de FAO- UNESCO (1988-1990) los suelos generados a partir de las cenizas volcánicas pueden nombrarse como Andosoles y en algunos casos pueden clasificar como cambisoles debido a notorios cambios de color, estructura y consistencia.

En el depósito de pómez que se encuentra identificado hacia la parte sureste de la zona se desarrollan básicamente suelos poco profundos, casi sin agregación macroscópica, con espesores menores a medio metro que pueden clasificar como Regosoles debido a las características no consolidadas del material, incipiente desarrollo, textura del tamaño de las arenas y buen drenado (figura 4.8 c). La mayor parte del material que se encuentra expuesto sufre procesos erosivos debido a la intensa actividad pluvial y no permite un desarrollo óptimo del suelo (figura 4.8 d).

Por otro lado, las secuencias sedimentarias de areniscas-lutitas y conglomerados-lutitas presentan un alto grado de meteorización debido a las condiciones climáticas que prevalecen en la zona a lo largo del año y a la marcada deforestación. Aún siendo las areniscas elementos rocosos competentes, la alta meteorización puede hacer que este tipo de materiales asemeje su comportamiento a los de tipo suelo, dado que las lutitas son unos de los materiales más susceptibles a los procesos de remoción por estar conformadas con capas de diferente estado de meteorización los cuales pueden generar planos

de debilidad o trayectorias de infiltración, aumentando así las dimensiones de los elementos movidos. La diferencia de permeabilidad que presentan estas rocas puede llegar a generar niveles colgados de corrientes de agua produciendo en zonas determinadas meteorización diferencial la cual actúa mediante empuje hidráulico, produciéndose inestabilidad diferencial dentro del macizo rocoso (figura 4.9). Otro aspecto apreciable observado inicialmente en los procesos de meteorización de las lutitas de la región es que forman capas de arcilla laminar que pueden terminar como amplios mantos blandos sobre todo en los sitios en los que el espesor de secuencias de lutitas alcanza mas de 2 metros. Los suelos que se desarrollan pueden ser de tipo de los Regosoles y Leptosoles.



Figura 4.8 Suelos inestables en depósitos volcánicos. a) y b) Dos eventos de caída de ceniza de hasta 2.5 m se identifican generando suelos de tipo andosoles y cambisoles. c) Flujo de pómez sobre paleosuelos

producto de los depósitos de cenizas, la coincidencia de materiales altamente susceptibles como lo son los depósitos de cenizas y pómez genera una mayor probabilidad a deslizamiento en la superficie de contacto. d) Erosión en el flujo de pómez.



a)



b)



c)



d)

Figura 4.9 Suelos residuales en secuencias sedimentarias de lutitas. a) Suelos someros en secuencias de estratos de lutitas de 1 m. b) Leptosoles que sobreyacen secuencias alteradas de lutitas. c) Deslizamiento rotacional que termina como flujo en secuencias de hasta 2.5 m de lutitas meteorizadas. d) Escurrimientos sobre materiales impermeables que dan origen a niveles freáticos diferenciales de agua.

4.4.2.2 Suelos transportados.

Los suelos más jóvenes de la región se desarrollan a partir de materiales transportados generados básicamente por procesos de tipo exógeno entre los que destacan los gravitacionales y la erosión hídrica de origen pluvial. De esta forma, el terreno presenta innumerables depósitos coluviales y coluvioaluviales que evidencian el estado erosivo por el cual esta atravesando la zona. Las masas de materiales sueltos y heterogéneos se encuentran depositadas principalmente en la parte inferior de las laderas pero es posible encontrar algunos depósitos en la zona de ladera media. Las mezclas pueden variar pero generalmente involucran materiales finos provenientes de los depósitos volcánicos y las secuencias de lutitas, fragmentos de areniscas, lutitas, calizas, material orgánico y en algunos casos fragmentos de pómez (aluvión vulcanogénico). La mayoría de los depósitos se encuentran asociados a corrientes pluviales naturales o en su defecto están muy cerca de ellas, en temporada de lluvias pueden ser observadas con mayor claridad. Debido a esto, existe un alto contenido de agua dentro de la mayor parte de ellos generando corrientes de agua a la base del coluvión, sobre todo si el material base es impermeable, como lo es el caso de los materiales arcillosos. En algunos sectores del área se identificaron coluviones que presentan varios movimientos relativos diferentes debido a la alternancia de materiales heterogéneos con diferente permeabilidad.

Los suelos producto de depósitos de acumulación de materiales coluviales de origen volcánico y sedimentario presentan colores pardo-amarillentos, y rojizos respectivamente, una alta pedregosidad de mas del 50%, desarrollo de estructura débil, con forma prismática o en algunos casos mas del tipo columnar, presencia de superficies de deslizamiento y algunos cutánes, en promedio la densidad aparente resulta mediana a baja. La textura va de franco-arcillo-limosa a franco arcillosa y la estabilidad de agregados es muy baja con notable turbidez en el agua (Schlichting y Blume, 1966; Siebe, 1996). La pobre estabilidad ante el agua facilita la destrucción en temporales de lluvia de capas completas de materiales con alto contenido de materiales finos llegando a mover grandes cantidades de suelos y exponiendo rocas más competentes al intemperismo. La mayoría de los suelos transportados registrados como inestables pueden llegar a ser clasificados según la clasificación de FAO- UNESCO (1988-1990) como Regosoles o Leptosoles.



a)



b)



c)



d)

Figura 4.10 Suelos residuales en coluviones. a) Regosol en depósito de coluvión generado por un proceso gravitatorio de miles de metros cúbicos en las lluvias de 1999. b) Detalle del reciente suelo generado a partir de material coluvial antes mencionado. c) Estructura columnar en suelo coluvial con composición principalmente volcánica. d) Suelo coluvial en un depósito de flujo de lodo generado a partir de la movilidad de partículas finas de lutitas.



a)



b)



c)



d)

Figura 4.11 Suelos residuales en coluviones. a) Suelo en depósito de cenizas que cubre a un antiguo depósito coluvial que presenta diferencia en contenido de agua apreciable en la foto por el cambio de color. b) Suelos en depósitos coluviales cubriendo calizas, en muy pocos sectores de calizas es posible apreciar este suelo de composición volcánica. c) Suelo sobre depósitos de antiguos flujos de detritos y lodos. d) Suelo coluvial de aluvión vulcanogénico en areniscas y calizas que presenta diferencia de permeabilidad en cada capa.

4.5 Características granulométricas y mecánicas de los materiales pedológicos.

La estabilidad en los suelos varía notablemente de acuerdo con la profundidad debido a los cambios en los materiales existentes, al grado de meteorización, a la unidad de suelo, pero, en especial a la forma y tamaño de las partículas que lo componen. Dos aspectos importantes en la resistencia al corte de los suelos como lo son la cohesión y la fricción varían considerablemente de acuerdo a los cambios texturales que con la profundidad se presentan. Mecánicamente, la cohesión que es debida en gran parte a la cementación (Sowers, 1981) en los suelos desaparece casi por completo con las variaciones en las condiciones de humedad, la saturación y el estado de agregación de los suelos, entre más granular se presente el suelo menos cohesivo será. Por otro lado la fricción interna de los materiales también se ve afectada por el tamaño de las partículas debido al variable comportamiento mecánico que presentan con base en su granulometría, sobre todo en respuesta al interactuar con agua.

Una forma de determinar la composición mecánica de los suelos y obtener algunas de sus principales propiedades geotécnicas es mediante la descripción de la distribución de los tamaños de las partículas que los constituyen, expresado como un porcentaje en relación con el peso total de la muestra seca. Algunas propiedades físico-mecánicas utilizadas en la teoría de la mecánica de los suelos y su comportamiento dependen casi exclusivamente de esta clasificación. Las propiedades que se pretenden determinar de los suelos de la Sierra Norte son las referentes a los contenidos de humedad dadas en este caso por los límites de Atterberg teniendo como objetivo principal el obtener una clasificación o comportamiento geotécnico para los diversos tipos de suelos muestreados en la zona.

Para llevar a cabo la obtención de la distribución de las partículas se utilizó el método de análisis granulométrico por tamices para la separación principal de fracción gruesa-media-fina y un analizador óptico de partículas marca FRISTCH para la parte fina, dicho aparato detecta los tamaños de limos y arcillas medio acuoso con base en la Ley de Stoke. Los resultados texturales pueden observarse en la tabla 4.4 en la que se presenta la descripción de los tamaños para cada horizonte que conforma un determinado suelo y los valores de contenido de agua de suelos muestreados durante el temporal de lluvias del 2005 (bajo la presencia del huracán Stan con precipitaciones de 500 mm dentro de la zona (SMN, 2007). Los suelos en su mayoría están compuestos por tamaños de arenas finas y con al menos 30% de parte fina (limos y arcillas), lo que hace que cualquiera que sea su clasificación estos se vean influenciados por el comportamiento mecánico típico de las arcillas y limos. Por otro lado, dentro de la misma tabla es posible apreciar la variabilidad entre cada horizonte de suelos en la capacidad de retener agua, teniendo como rango un dominio de casi el 50% con contenido de agua de 20-30%. Es importante resaltar que debido al alto contenido de limos que presentan la mayoría de los suelos y de acuerdo a la ecuación universal de predicción de

pérdidas de suelo, elaborada por Wischmeier y Smith (1978), existe una alta susceptibilidad de erosión de los suelos.

La clasificación mecánica de los suelos presentada en la tabla 4.4 se obtuvo utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) que es la clasificación más utilizada en geotecnia la cual fue propuesta por el Dr. Arturo Casagrande en 1942 (Juárez y Rico, 2004). Este método divide al suelo en dos grupos el de la parte gruesa conformada por partículas mayores a la malla # 200 (0.074 mm) y el de la fracción fina que se forma con todas aquellas partículas menores a la malla #200. Esta división tiene como objetivo separar a los suelos en, suelos gruesos y suelos finos (SG y SF).

Los suelos gruesos son referidos a suelos que poseen más del 50% de material retenido en la malla #200 y se simbolizan por las letras G y S (del inglés *gravel* y *sand*). La separación de arenas y gravas se da a través de la malla # 4 (4.76 mm). Dichos suelos se subdividen en cuatro categorías de acuerdo a la graduación de los tamaños, presencia de finos y plasticidad de los mismos. Su clasificación puede quedar denotada por dos letras mayúsculas. Las categorías derivan en los siguientes suelos:

1. GW y SW: Suelos bien graduados limpios de finos, si tienen menos del 5% de finos no influyen en el comportamiento mecánico.

GW; $C_u > 4$ y $1 < C_c < 3$: Gravas bien graduadas.

SW; $C_u > 6$ y $1 < C_c < 3$: Arenas bien graduadas.

C_u : Coeficiente de uniformidad.

C_c : Coeficiente de curvatura.

2. GP y SP: Suelos uniformes limpios de finos, si tienen menos del 5% de finos no influyen en el comportamiento mecánico.
3. GM y SM: Suelos son cantidad apreciable de finos no plásticos en más del 12% en peso que influyen en el comportamiento mecánico.
4. GC y SC: Suelos son cantidad apreciable de finos plásticos en más del 12% en peso que influyen en el comportamiento mecánico.

Por otra parte los suelos finos son referidos a suelos que poseen más del 50% de material que pasa la malla #200 y se simbolizan por las letras M y C (del inglés *mud* y *clay*). Dichos suelos se subdividen en tres categorías de acuerdo al índice de plasticidad (IP). Las categorías derivan en los siguientes suelos:

1. C: limos inorgánicos.
2. M: arcillas inorgánicas.
3. O: limos y arcillas orgánicas.

Una segunda letra es asignada a la clasificación de los suelos finos en función de su compresibilidad (H: alta y L: baja) definida por el límite líquido (%LL). Los límites de estos suelos suele presentarse en una carta de plasticidad.

| No.muestra | P natural | P seco | P gravas | P arenas | % Gravas | % Arenas | %Lim+Ar | % Limos | % Arcillas | Contenido de agua | Tipo de suelo (SUCS) |
|------------|-----------|--------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|------------|-------------------|----------------------|
| S19H2 | 53.06 | 42.26 | 3.69 | 29.43 | 6.95 | 55.47 | 37.58 | 37.58 | 0.00 | 20.35 | SGSM |
| S19H1 | 54.59 | 37.39 | 16.67 | 18.76 | 30.54 | 34.37 | 35.10 | 35.10 | 0.00 | 31.51 | SGSM |
| S16H1 | 55.75 | 51.58 | 30.12 | 17.58 | 54.03 | 31.53 | 14.44 | 13.38 | 1.06 | 7.48 | SGGM |
| S15H2 | 53.89 | 38.49 | 8.81 | 24.43 | 16.35 | 45.33 | 38.32 | 35.76 | 2.56 | 28.58 | SGSM |
| S15H1 | 51.45 | 26.34 | 13.63 | 12.36 | 26.49 | 24.02 | 49.48 | 40.13 | 9.40 | 48.80 | SGGM |
| S14H2 | 55.25 | 39.84 | 22.24 | 16.64 | 40.25 | 30.12 | 29.63 | 29.63 | 0.00 | 27.89 | SGGM |
| S14H1 | 53.35 | 44.61 | 19.40 | 19.35 | 36.36 | 36.27 | 27.37 | 27.37 | 0.00 | 16.38 | SGGM |
| S13H2 | 51.28 | 40.62 | 10.38 | 26.61 | 20.24 | 51.89 | 27.87 | 27.87 | 0.00 | 20.79 | SGSM |
| S13H1 | 52.36 | 40.09 | 26.66 | 12.25 | 50.92 | 23.40 | 25.69 | 20.62 | 5.07 | 23.43 | SGGM |
| S11H1 | 52.32 | 33.02 | 3.67 | 23.98 | 7.01 | 45.83 | 47.15 | 47.15 | 0.00 | 36.89 | SGSM |
| S10H2 | 51.56 | 38.84 | 9.49 | 26.27 | 18.41 | 50.95 | 30.64 | 30.64 | 0.00 | 24.67 | SGSM |
| S10H1 | 52.47 | 31.16 | 8.43 | 20.01 | 16.07 | 38.14 | 45.80 | 45.80 | 0.00 | 40.61 | SGSM |
| S9H2 | 51.89 | 40.93 | 25.41 | 14.95 | 48.97 | 28.81 | 22.22 | 22.22 | 0.00 | 21.12 | SGGM |
| S9H1 | 51.99 | 35.31 | 17.70 | 16.90 | 34.05 | 32.51 | 33.45 | 33.45 | 0.00 | 32.08 | SGGM |
| S8H2 | 51.41 | 39.24 | 4.77 | 32.23 | 9.28 | 62.69 | 28.03 | 28.03 | 0.00 | 23.67 | SGSM |
| S8H1 | 53.83 | 40.03 | 1.96 | 36.22 | 3.64 | 67.29 | 29.07 | 24.34 | 4.74 | 25.64 | SGSM |
| S7H2 | 51.64 | 37.83 | 13.92 | 23.36 | 26.96 | 45.24 | 27.81 | 27.81 | 0.00 | 26.74 | SGSM |
| S7H1 | 51.54 | 43.84 | 23.89 | 19.35 | 46.35 | 37.54 | 16.10 | 15.08 | 1.03 | 14.94 | SGGM |
| S6H2 | 52.27 | 43.43 | 18.30 | 23.10 | 35.01 | 44.19 | 20.80 | 19.12 | 1.68 | 16.91 | SGSM |
| S6H1 | 53.17 | 38.32 | 3.46 | 32.66 | 6.51 | 61.43 | 32.07 | 32.07 | 0.00 | 27.93 | SGSM |
| S5H1 | 66.44 | 42.41 | 5.67 | 23.78 | 8.53 | 35.79 | 55.67 | 30.05 | 25.62 | 36.17 | SFM |
| S4H3 | 41.33 | 29.17 | 22.47 | 5.39 | 54.37 | 13.04 | 32.59 | 32.59 | 0.00 | 29.42 | SGGM |
| S4H2 | 41.21 | 29.41 | 12.94 | 15.03 | 31.40 | 36.47 | 32.13 | 32.13 | 0.00 | 28.63 | SGM |
| S4H1 | 40.00 | 27.35 | 8.16 | 17.66 | 20.40 | 44.15 | 35.45 | 33.20 | 2.25 | 31.63 | SGSM |
| S2H4 | 31.33 | 27.86 | 22.81 | 4.46 | 72.81 | 14.24 | 12.96 | 12.25 | 0.71 | 11.08 | SGGM |
| S2H3 | 23.46 | 20.84 | 15.98 | 4.45 | 68.12 | 18.97 | 12.92 | 12.92 | 0.00 | 11.17 | SGGM |
| S2H2 | 26.12 | 11.38 | 4.98 | 6.26 | 19.07 | 23.97 | 56.97 | 53.33 | 3.63 | 56.43 | SFM |
| S2H1 | 20.72 | 14.41 | 2.20 | 10.99 | 10.62 | 53.04 | 36.34 | 32.58 | 3.76 | 30.45 | SGSM |
| S1H1 | 35.34 | 27.52 | 2.65 | 21.45 | 7.50 | 60.70 | 31.81 | 30.90 | 0.91 | 22.13 | SGSM |

Tabla 4.4 Distribución granulométrica de los tamaños de las partículas por horizontes de los suelos, variabilidad de los contenidos de agua y tipos de materiales con la profundidad. Tipo de suelo según el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). Mas del 50% de porcentaje de gravas y arenas = suelo grueso (SG). Mas del 50% de porcentaje de limos y arcillas = suelo fino (SF). Suelos con cantidad apreciable de finos en más del 12% influyen en el comportamiento mecánico.

Una mejor apreciación de la distribución de los tamaños es mostrada en la representación grafica semi logarítmica- acumulativa de la figura 4.12 (curva granulométrica geotécnica) que sirve para valorar la graduación de los elementos que componen un suelo, obteniendo una idea cualitativa del tipo de material con predominio, los tramos horizontales tienden a representar carestía de tamaños y los tramos verticales, predominio de determinado diámetro de partículas. Por lo tanto, el material mejor graduado sería aquel cuyo gráfico granulométrico fuera una línea recta desde el límite superior de la izquierda hasta el límite inferior de la derecha. Los valores geotécnicos de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c) son obtenidos con base a las curvas acumulativas de acuerdo con los diámetros efectivos que presentan al 10, 30 y 60%.

De las graficas acumulativas de la Sierra Norte podemos apreciar que la mayoría de los suelos presentan una tendencia hacia los materiales gruesos concentrándose la fracción gruesa en la parte arenosa fina. Por otro lado también se puede observar que para la fracción fina el dominio se encuentra en la zona de los limos.

A pesar de las elevadas cantidades de finos en la mayoría de los suelos, es de resaltar que solo unos cuantos suelos presentan cantidades importantes de arcillas, lo que hace pensar que los suelos analizados puedan definir su comportamiento mecánico en función de la cantidad de finos no plásticos presentes.

Con el fin de detallar el estudio de la consistencia de estos suelos y como respuesta al alto contenido de materiales finos que en su mayoría presentan, se desarrolló una prueba clásica de plasticidad dentro de la fracción fina de los suelos recolectados teniendo como objetivo obtener una mejor idea de la condición mecánica de los materiales con base en los contenidos de humedad que le atribuyen al suelo cierto estado de consistencia. Dentro del estudio de la mecánica de suelos se suele referir a la consistencia de un suelo como su resistencia al esfuerzo cortante la cual como se ha mencionado dependerá del contenido de humedad presente en el material al momento de verse sometido a un cambio dentro del sistema de equilibrio.

Los estados de consistencia de los suelos han sido descritos por Atterberg, el cuál determinó que la plasticidad es una propiedad circunstancial que depende directamente de la cantidad de agua presente en un suelo, así, el contenido de humedad de un suelo no es un componente constante, sobre todo en suelos superficiales como los de la Sierra Norte, donde las condiciones climáticas provocan considerables variaciones. Sin embargo, los límites de consistencia son independientes del clima y del contenido de humedad que pueda tener una muestra en un momento dado, siendo valores característicos para cada suelo, de ahí la importancia de determinar para la zona las capacidades plásticas de los mismos.

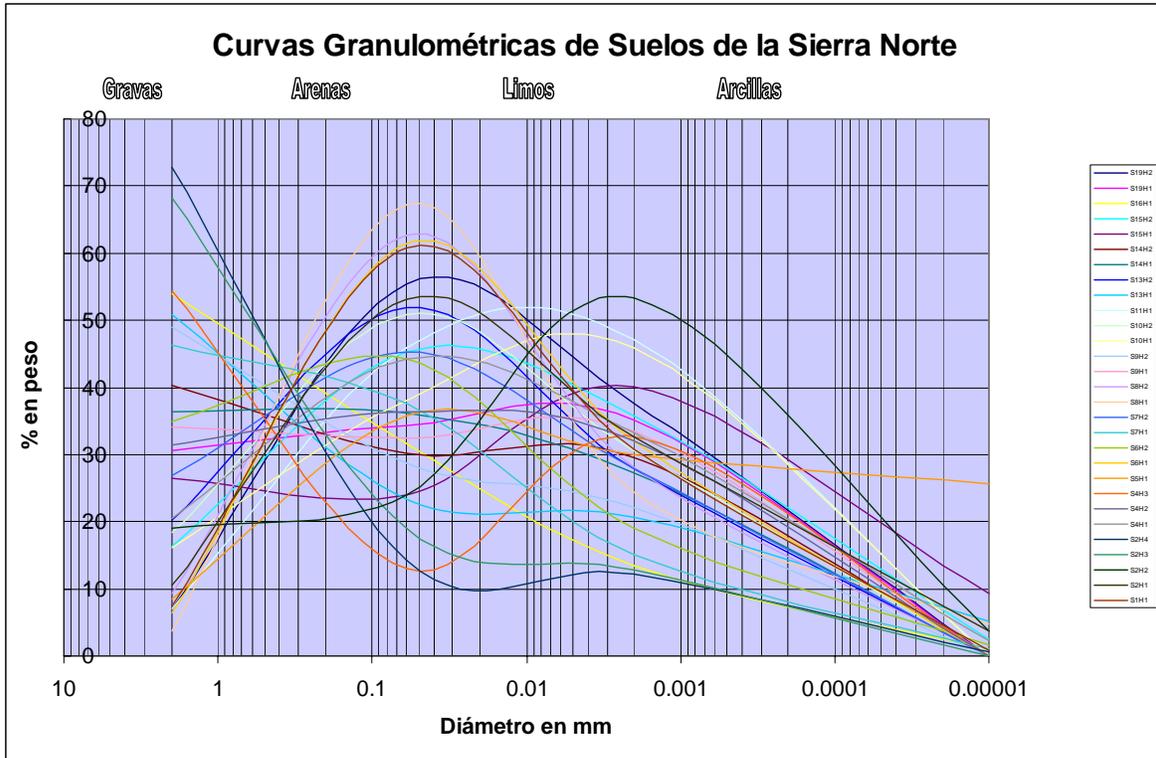


Figura 4.12 Curvas granulométricas geotécnicas de los suelos de la Sierra Norte de Puebla por horizontes.

Los estados de consistencia básicos de acuerdo al contenido de humedad que Atterberg presenta se describen a continuación:

Estado líquido. Caracterizado por la condición del suelo a fluir, tiene las propiedades y apariencia de una suspensión.

Estado plástico. Aquel en el que el suelo se hace manejable, dócil o moldeable.

Estado sólido. Determinado por la condición de que el suelo no reduce más volumen, aun cuando continúe el proceso de evaporación.

Las fronteras que separan los estados de consistencia quedan determinadas mediante lo que Atterberg denominó “límites de consistencia”, que son solo diferentes condiciones en porcentajes de humedad a los que se somete un suelo un esquema es presentado en la figura 4.13. De esta forma el límite de contracción (% LC) es el contenido de humedad de un suelo en apariencia sólida, el límite líquido (% LL) el contenido de humedad en su apariencia líquida y el límite de plasticidad (% LP) el contenido en el estado plástico, teniendo en mente que la plasticidad puede definirse como la propiedad por la cual un material es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse o agrietarse (Juárez y Rico, 2004).

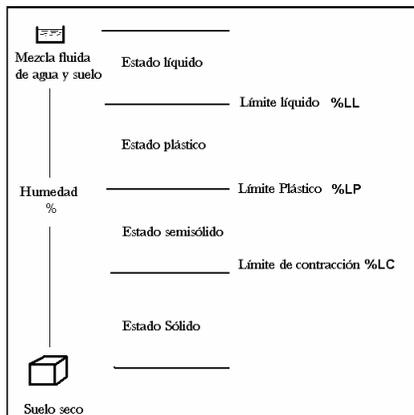


Figura 4.13 Estados de consistencia de un suelo: Límites de Atterberg. Modificado de www.wikipedia.com, 2007.

El método que se utilizó para determinar los límites de Atterberg fue el diseñado para el penetrómetro de cono (mod. 81-b0100/A semiautomático) que mediante un procedimiento sencillo permite determinar el límite líquido como el porcentaje de humedad que presenta un suelo cuando un cono normalizado es capaz de penetrar una muestra preparada en un determinado tiempo. Dicha prueba sustituye satisfactoriamente la tradicional prueba de Casagrande, siguiendo las normas ASTM D5, BS 200, NFT66-044 y CNR N° 24.

El procedimiento inicia con la preparación de la parte fina de la muestra que se homogeniza y se reparte en tres contenedores de los que se obtienen su peso una vez llenados. Posteriormente, una muestra es llevada a la base del penetrómetro en donde se le aplican tres cargas, cuidando mantener en cada una limpio el cono. Las tres lecturas son tomadas en la carátula y registradas. Para las siguientes dos muestras se realiza el mismo procedimiento, solo que ahora se agrega mas agua a cada una de estas, registrando el peso de la muestra húmeda. Nuevamente se obtienen tres lecturas para cada muestra, un promedio de las lecturas de penetración serán tomadas de cada muestra para realizar las gráficas de interpolación. Por ultimo, los tres contenedores son secados en horno a más de 90° C por 12 horas y se obtienen el peso seco del suelo.

Con los resultados se calcula el contenido de humedad de cada muestra, para después realizar un gráfico con el contenido de humedad en el eje de las abscisas y las medidas de penetración en el eje de las ordenadas. Se obtiene la línea de tendencia y se determina el contenido de humedad para una penetración de 20 mm. El valor obtenido corresponderá con el límite líquido (% LL) del suelo.

Una vez obtenido el % LL se procede a obtener el límite plástico (% LP) que indica que es el cociente en porcentaje del peso del suelo húmedo entre el peso del

suelo seco. Una aproximación de este índice puede obtenerse también mediante el método del penetrómetro de cono considerando al mínimo valor de contenido de humedad de la curva que se modela para la obtención del límite líquido como el porcentaje de límite plástico (Campbell, 1976).

| Muestra | Prueba 1 LL | Prueba 2 LL | Prueba 3 LL | %LP | %LL |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| S19H1 | | | | 43 | 59 |
| Penetración | 11 | 17 | 26 | | |
| Msh+c | 94 | 111 | 121 | | |
| Mss+c | 63 | 72 | 75 | | |
| Mc | 3 | 4 | 3 | | |
| Mh | 31 | 38 | 46 | | |
| Mss | 60 | 69 | 72 | | |
| %Cont. h | 53 | 56 | 64 | | |
| Muestra | Prueba 1LL | Prueba 2 LL | Prueba 3 LL | % LP | %LL |
| S5H1 | | | | 30 | 38 |
| Penetración | 8 | 19 | 29 | | |
| Msh+c | 94 | 147 | 149 | | |
| Mss+c | 77 | 115 | 113 | | |
| Mc | 27 | 26 | 27 | | |
| Mh | 17 | 32 | 36 | | |
| Mss | 50 | 88 | 87 | | |
| %Ch | 34 | 36 | 42 | | |

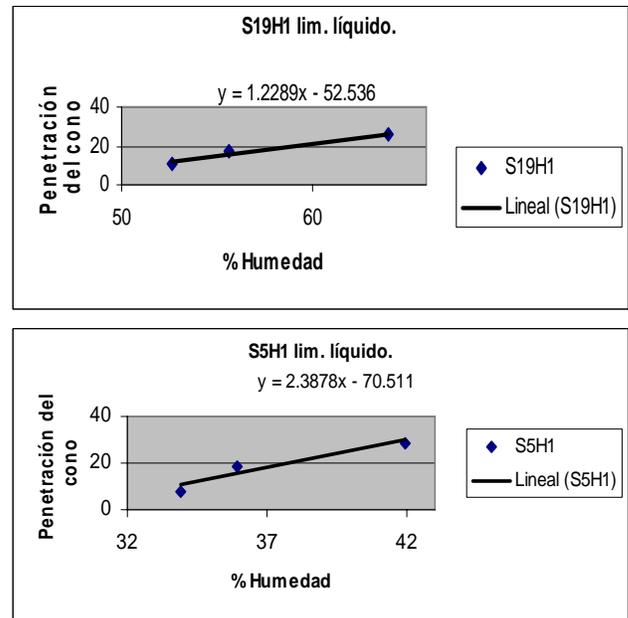


Figura 4.14 Resultados de pruebas de límite líquido bajo el método del penetrómetro de cono. S19H1: suelo en flujo volcánico y S5H1: suelo en depósito de pómez .

Una forma de representar los datos de consistencia y de comparar la capacidad mecánica de dichos materiales es mediante la Carta de Plasticidad que fue establecida por Casagrande como un método para representar y comparar las propiedades de plasticidad en los suelos. Dicha carta maneja en el eje de las abscisas los límites líquidos y en el de las ordenadas el índice de plasticidad en porcentaje ($\%Ip = \%LL - \%LP$), su objetivo es ubicar cualquier suelo por medio de las dos características que definen su plasticidad el $\%Ip$ y $\%LL$ y clasificar la parte fina de los suelos en función de su compresibilidad.

Las tendencias de los suelos de la Sierra Norte pueden verse en la carta de plasticidad mostrada en la figura 4.15 en la que se aprecia la clasificación mecánica correspondiente para cada horizonte de los suelos inestables que componen la región en estudio y su capacidad a la compresibilidad. Con este análisis podemos concluir que el 75% de los suelos contienen en su componente fina una cantidad apreciable de limos con predominio del tipo de alta compresibilidad (el 60%). Por otro lado, dentro de los materiales arcillosos predominan los de baja compresibilidad. En general sin importar el tipo de material fino, la fracción retenida dentro de la malla # 200 tiende a presentar valores de 52% de finos de alta compresibilidad y 48% de baja lo que hace que sean altamente susceptibles a colapsos y procesos de remoción por la alta capacidad

de adsorción de agua que se ve reflejada en los altos contenidos naturales de humedad que en su mayoría rebasan más de 25%.

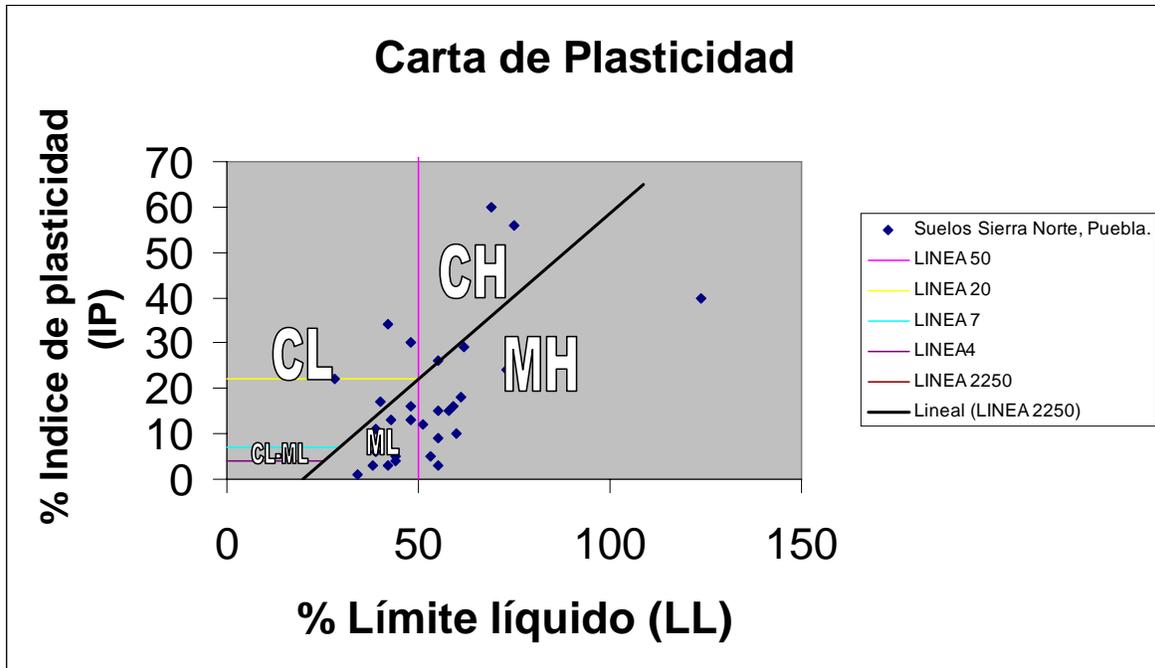


Figura 4.15 Carta de Plasticidad para la fracción fina de los suelos de la Sierra Norte. CL: arcillas de baja compresibilidad, CH: arcillas de alta compresibilidad, ML: limos de baja compresibilidad y MH: limos de alta compresibilidad.

Por último en la tabla 4.5 se presentan algunos rasgos de los horizontes inestables para cada proceso de remoción en suelo resaltando las características granulométricas; en especial el porcentaje de finos, los estados de consistencia y la clasificación según SUCS para la fracción fina. En la tabla sobresale que la falla en los suelos ocurre casi siempre en los horizontes más profundos, con porcentajes de finos plásticos y no plásticos superiores al 12% lo que hace que según la clasificación del SUCS influyan en el comportamiento mecánico de todo el solum. También es posible observar una presencia similar de inestabilidad tanto en arcillas como en limos dominando en materiales limosos.

| No. De movimiento | UTM X | UTM Y | No. horizontes | Horizonte inestable | % Gravas | % Arenas | % Lim+Arc | % Limos | % Arcillas | % Lim. Plástico | % Lim. Líquido | % IP | Compresibilidad | Tipo de suelo |
|-------------------|-----------|------------|----------------|---------------------|----------|----------|-----------|---------|------------|-----------------|----------------|-------|-----------------|---------------|
| 1 | 633462.00 | 2214501.00 | 1.00 | 1.00 | 7.50 | 60.70 | 31.80 | 30.90 | 0.90 | 29.00 | 55.00 | 26.00 | H | CH |
| 2 | 630505.00 | 2212726.00 | 4.00 | 3.00 | 68.12 | 18.97 | 12.92 | 12.92 | 0.00 | 39.00 | 42.00 | 5.00 | L | ML |
| 3 | 635219.00 | 2211749.00 | 2.00 | 2.00 | 31.40 | 36.47 | 32.13 | 32.13 | 0.00 | 29.00 | 55.05 | 36.00 | H | CH |
| 4 | 633280.00 | 2212136.00 | 3.00 | 3.00 | 31.40 | 36.47 | 32.13 | 32.13 | 0.00 | 39.00 | 50.75 | 12.00 | H | MH |
| 5 | 635916.00 | 2212284.00 | 1.00 | 1.00 | 8.53 | 35.79 | 55.67 | 30.05 | 25.62 | 35.00 | 38.00 | 3.00 | H | CL |
| 6 | 633208.00 | 2212637.00 | 2.00 | 2.00 | 35.01 | 44.19 | 20.80 | 19.12 | 1.68 | 43.00 | 58.00 | 15.00 | H | CH |
| 7 | 633959.00 | 2214770.00 | 2.00 | 2.00 | 26.96 | 45.24 | 27.81 | 27.81 | 0.00 | 52.00 | 55.00 | 3.00 | H | MH |
| 8 | 632299.00 | 2213608.00 | 2.00 | 2.00 | 9.28 | 62.69 | 28.03 | 28.03 | 0.00 | 32.00 | 48.00 | 16.00 | L | ML |
| 9 | 630046.00 | 2215620.00 | 2.00 | 2.00 | 48.97 | 28.81 | 22.22 | 22.22 | 0.00 | 28.00 | 39.00 | 11.00 | H | CL |
| 10 | 630444.00 | 2215319.00 | 2.00 | 2.00 | 18.41 | 50.95 | 30.64 | 30.64 | 0.00 | 50.00 | 60.00 | 10.00 | L | MH |
| 11 | 630347.00 | 2214465.00 | 1.00 | 1.00 | 7.01 | 45.83 | 47.15 | 47.15 | 0.00 | 33.00 | 34.00 | 1.00 | L | CL |
| 12 | 631339.00 | 2215289.00 | 1.00 | 1.00 | 50.92 | 23.40 | 25.69 | 20.62 | 5.07 | 18.00 | 75.00 | 57.00 | H | CH |
| 13 | 630799.00 | 2214231.00 | 2.00 | 2.00 | 20.24 | 51.89 | 27.87 | 27.87 | 0.00 | 18.00 | 48.00 | 30.00 | L | CL |
| 14 | 630908.00 | 2213394.00 | 2.00 | 2.00 | 40.25 | 30.12 | 29.63 | 29.63 | 0.00 | 49.00 | 73.00 | 24.00 | H | MH |
| 15 | 632103.00 | 2213121.00 | 2.00 | 2.00 | 16.35 | 45.33 | 38.32 | 35.76 | 2.56 | 30.00 | 43.00 | 13.00 | L | ML |
| 16 | 631832.00 | 2212863.00 | 1.00 | 1.00 | 54.03 | 31.53 | 14.44 | 13.38 | 1.06 | 23.00 | 40.00 | 17.00 | L | CL |
| 17 | 630896.00 | 2214315.00 | 2.00 | 2.00 | 16.07 | 38.14 | 45.80 | 45.80 | 0.00 | 25.00 | 62.00 | 37.00 | H | CH |
| 18 | 633764.00 | 2212796.00 | 2.00 | 2.00 | 6.51 | 61.43 | 32.07 | 32.07 | 0.00 | 50.00 | 53.00 | 3.00 | H | MH |
| 19 | 631165.00 | 2213289.00 | 2.00 | 2.00 | 6.95 | 55.47 | 37.58 | 37.58 | 0.00 | 6.00 | 28.00 | 22.00 | L | CL |

Tabla 4.5. Granulometría y tipo de suelo en base a la carta de plasticidad de los horizontes detectados como inestables en los suelos fallados de la Sierra Norte.

V. MÉTODO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS MAPAS TEMÁTICOS.

Las características e interpretación de los diversos factores que intervienen dentro de los procesos desarrollados en la región de estudio podrán ser analizadas en los diferentes tipos de mapas temáticos que se presentan en este capítulo, los cuales sirvieron como base fundamental en la realización de los análisis estadísticos multivariable y en la generación del mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa de la zona.

5.1 Modelo digital de elevación.

Las características geomorfológicas del área de estudio fueron obtenidas mediante la construcción de los mapas temáticos en el programa ArcGis 9.0 (ArcMap 9.1). Los mapas fueron desarrollados a partir del modelo digital de elevación (MDE) creado en el sistema de información geográfica (SIG) utilizando los datos vectoriales de las cartas topográficas 1:50, 000 F14D84 y E14B14, datos de campo, imágenes satelitales de la zona de 1999 y 2001, fotografías aéreas de vuelos 1:75, 000 de INEGI, 1995 y 1:15, 000 de SCT realizado el 21 de Octubre de 1999.

En el MDE de la zona de estudio (figura 5.1) se reconocen desniveles de más de 1000 metros con elevaciones máximas y mínimas respectivamente de los 1,711 a 432 msnm. Las mayores elevaciones se observan principalmente hacia el suroeste, centro y noreste del área, corresponden con cordones serranos sedimentarios típicos de la Sierra Norte con tendencia general hacia el noroeste y noreste. Por otra parte las áreas de menor nivel corresponden básicamente con geoformas de piedemonte y terrazas fluviales dentro de estrechos valles en las que existe una gran actividad erosiva en sus alrededores. El drenaje dendrítico se concentra en mayor medida en la zona de ladera media por lo que se espera encontrar una mayor acción erosiva dentro de esta parte del relieve. Los caminos que permiten el acceso a las principales cabeceras municipales conservan en largos tramos el mismo nivel permitiendo que una ladera adopte una misma orientación con respecto a la carretera en varias ocasiones, favoreciendo un proceso de remoción.

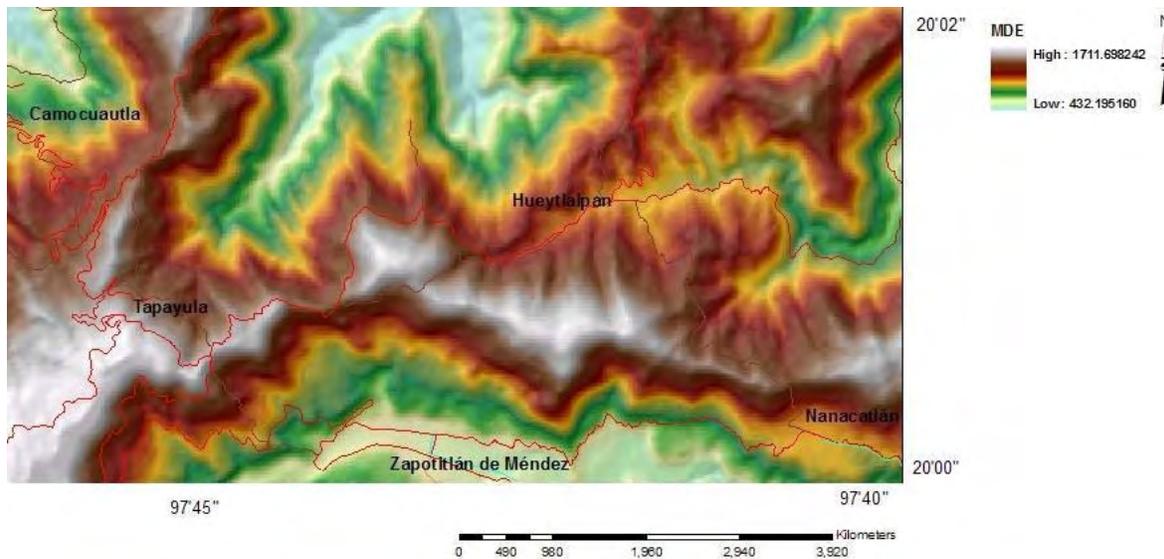


Figura 5.1 Modelo digital de elevación de la zona de estudio realizado en ArcMap 9.1.

5.2 Mapa de pendientes.

El relieve de una determinada área juega un papel definitivo en la estabilidad de la misma, puesto que es necesaria cierta pendiente para que se produzcan los movimientos gravitacionales de masas, en algunos casos aún con pendientes bajas se verifica el movimiento, de ahí que, la cartografía y el análisis de este factor está dentro de las indispensables características en un estudio de susceptibilidad.

Un mapa topográfico es la base para la elaboración de un mapa de pendientes debido a esto, el mapa de pendientes de la zona fue construido a partir de los valores de altura obtenidos en el MDE mediante la función *slope* en *ArcGis Spatial Analyst Toolbar*, el cual, calcula la máxima tasa de cambio en Z entre cada célula y sus vecinas. El cálculo se hace utilizando la función gradiente en dirección X y Y (diferencias de alturas vs. diferencias de distancias). El resultado es un raster que puede ser expresado en porcentajes o en grados.

Los valores obtenidos en el mapa (Figura 5.3 a), oscilan entre 0° y 61° encontrándose un mayor número de pendientes entre los 20° y 40° . Como puede observarse en los mapas la mayoría del relieve de la zona presenta pendientes susceptibles o propensas a movimientos gravitacionales considerando que al aumentar el gradiente de una ladera se incrementa la probabilidad de falla (Dai y Lee, 2002), el 73% de los píxeles analizados presentan pendientes superiores a 20° de los cuales el 68% tienen pendientes entre los 20° y 45° .

El mapa b (figura 5.3 b) presenta una clasificación de 4 categorías, dichas categorías se han aproximado a los valores tendenciosos de pendientes que presenta el estudio con el fin de resaltar las zonas críticas que favorecen la

ocurrencia de procesos de acuerdo a este factor. De igual forma, del mapa puede observarse que más del 50% de los elementos analizados se encuentran dentro de las categoría de MEDIANA a ALTA, es decir, mas del 50% de los pixeles analizados presentan pendientes entre los 15 y 45 grados.

El comportamiento que los datos de pendiente siguen con respecto a los movimientos de masa puede apreciarse en los histogramas de la figura 5.2. El histograma que modela las tendencias de las zonas inestables (estabilidad/inestabilidad: 1) muestra que la pendiente para este estudio influye en dos intervalos, el primero se encuentra de los 10°-25° y el más representativo lo encontramos entre los 30° y 40°. Ambos intervalos caen dentro de las categorías marcadas en el mapa b de la figura 5.3.

Es importante resaltar que los poblados principales de la zona se encuentran rodeados por las pendientes de mayor susceptibilidad (según el análisis estadístico de pendiente mostrado en la figura 5.2) y la carretera estatal que ofrece la única salida a la ciudad fue trazada en mayor parte en pendientes de 25°-45°.

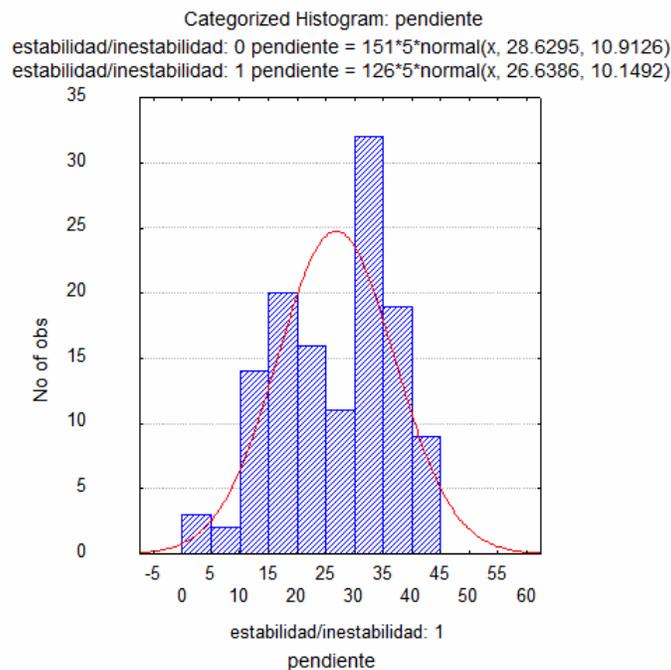
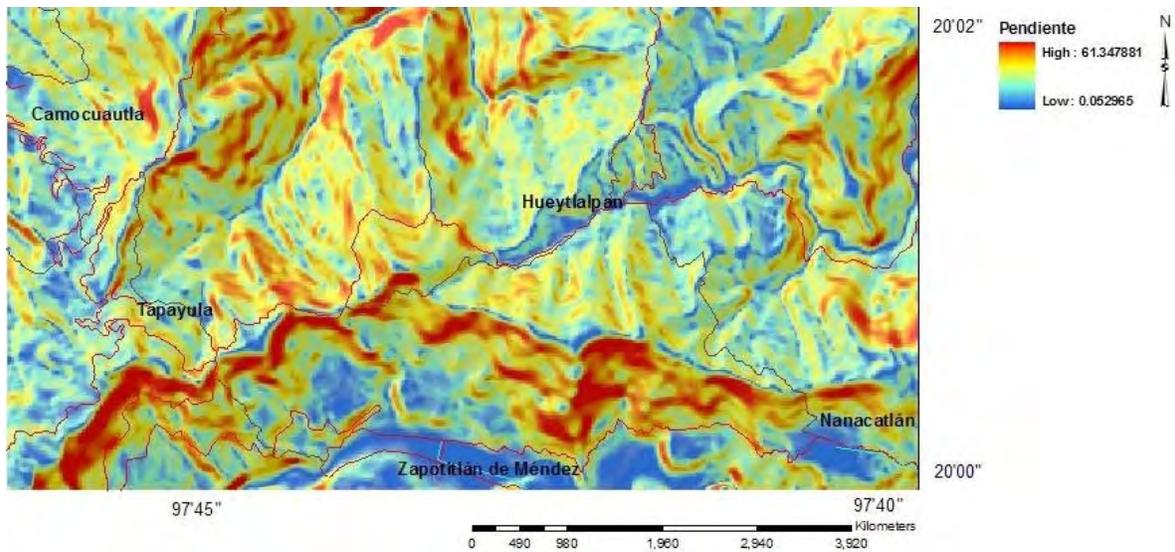
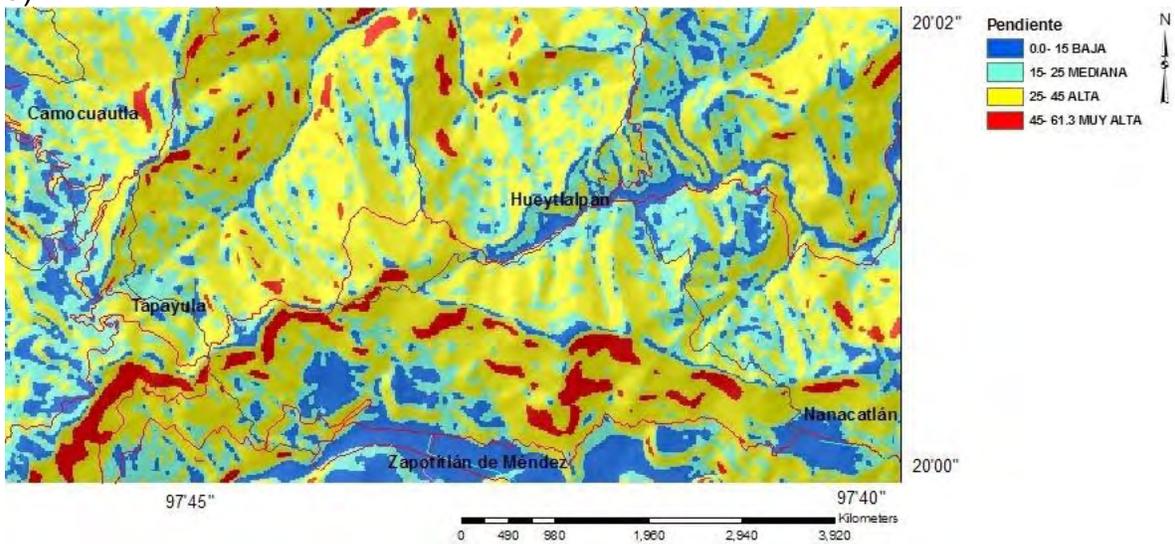


Figura 5.2 Histograma por grupo de los datos del factor pendiente realizados en Statistica 6.0.



a)



b)

Figura 5.3 Mapas de pendiente de la zona de estudio. a) mapa general de los datos de pendiente, b) mapa con cuatro clasificaciones que muestra rangos de baja muy alta inclinación.

5.3 Mapa de exposición de laderas.

Un mapa de exposición de laderas permite conocer, de un relieve, la orientación con respecto a los puntos cardinales de las caras de las laderas que lo conforman. Existen diversos usos para este tipo de imágenes, sin embargo, en lo que se refiere al estudio del peligro de los procesos de remoción las condiciones de humedad que guarda una ladera debido a la influencia del sol sobre esta, determinarán el tipo de procesos exógenos a ocurrir. Dado que no siempre es posible encontrar información disponible acerca de las condiciones freáticas y sus fluctuaciones, en el análisis de peligros puede usarse la cartografía de medidas indirectas como son la orientación de las laderas y la vegetación que permiten revelar condiciones hidrológicas de una zona. En los procesos gravitacionales la

resistencia de los macizos rocosos pueden verse severamente resentidos por el efecto de inestabilidad que el agua influya sobre estos, de tal forma que, la cantidad de humedad que presente una ladera debe al menos incluirse aunque de manera indirecta en un estudio de peligro, sobre todo en lugares donde es evidente que uno de los factores detonantes es la acumulación de agua dentro del sistema rocoso por efecto de la lluvia.

El mapa de exposición (figura 5.5) fue calculado mediante los datos de elevación del MDE definiendo la dirección de cara de la ladera de cada dato y sus vecinos, para ser presentado en un raster expresado en grados (0° - 360°) en base a los puntos cardinales y dando un valor de -1 a las zonas planas. Esto puede fácilmente crearse usando la función *aspect* en *ArcGis Spatial Analyst Toolbar*.

Dentro del mapa los valores resultantes abarcan todos los cuadrantes principales de 0° - 360° presentando tendencias de orientación N-S, NE-SW y NW-SE. El mapa b presenta una clasificación con 9 categorías cada 45° de los que resaltan las distribuciones hacia el norte, noreste y noroeste, seguidas de las que tienden hacia el sur y sureste.

La zona de estudio presenta una gran influencia de los vientos en las vertientes que se orientan hacia el norte, en especial de los vientos provenientes del Golfo de México que con la entrada de cualquier fenómeno meteorológico deja caer una buena cantidad de lluvia, la cual, últimamente ha manifestado tener una gran influencia en la inestabilidad de laderas. Por lo tanto, debe esperarse una mayor actividad erosiva dentro de las caras de las laderas con exposición hacia el norte que son las mayormente presentadas dentro del área. Los resultados de la estadística de este factor dentro de la zona indican que la mayoría de los procesos erosivos se manifiestan en laderas con orientaciones preferenciales hacia el N, NW y SE (Figura 5.4)

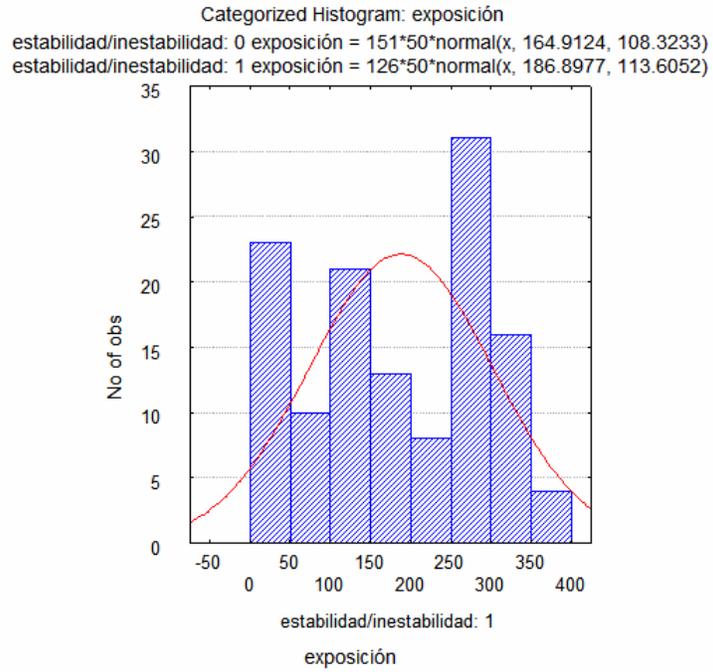
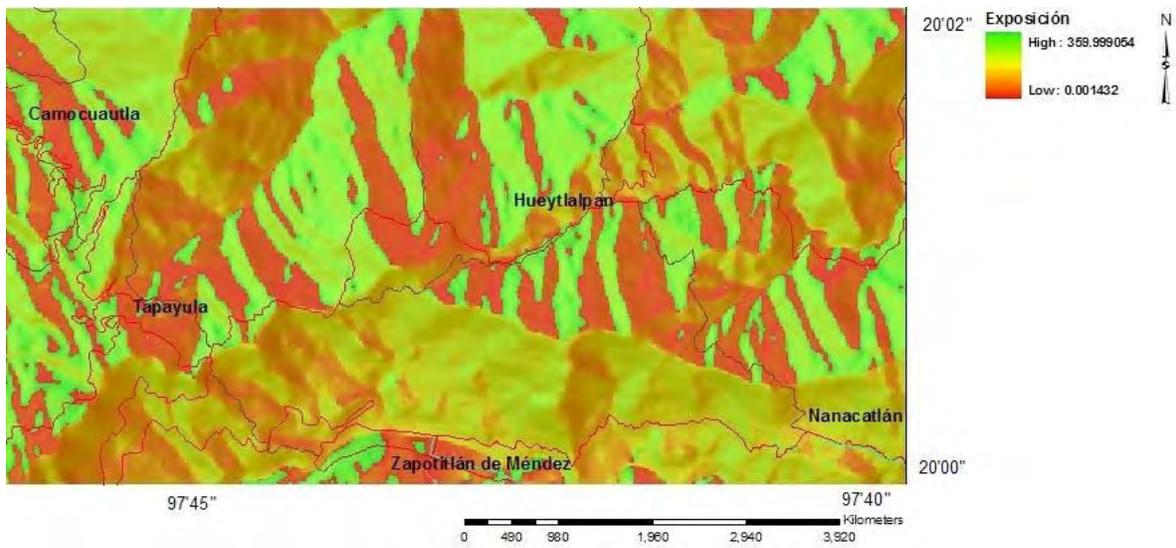
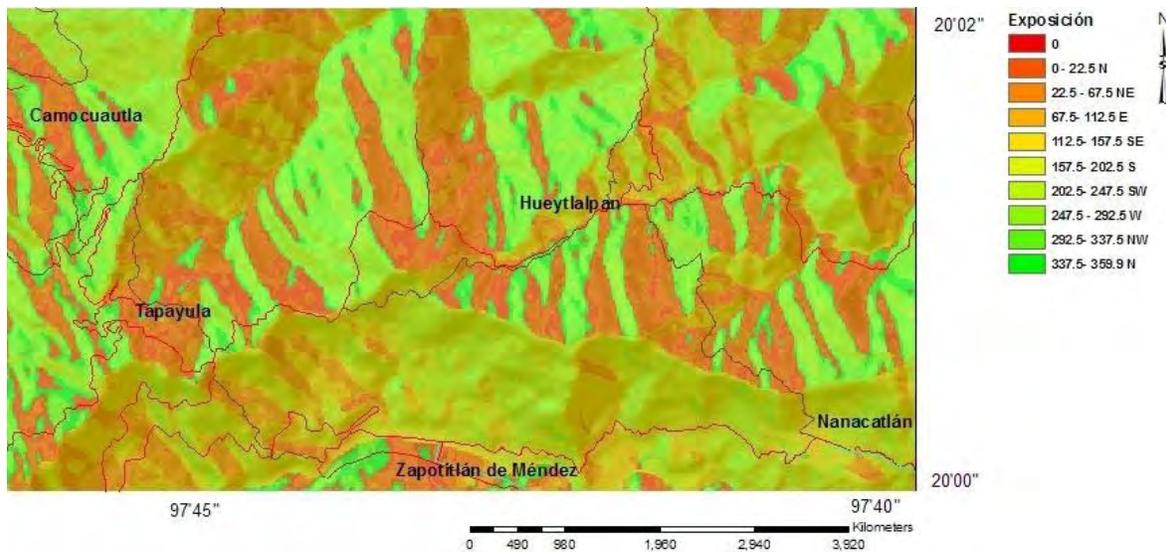


Figura 5.4 Histograma por grupo de los datos del factor exposición realizado en Statistica 6.0.



a)



b)

Figura 5.5 Mapas de exposición de laderas. a) mapa general de la orientación del relieve con respecto a los puntos cardinales y marco de 0 a 360°, b) mapa con nueve clasificaciones que muestra tendencia hacia el norte, noreste y noroeste.

5.4 Mapa de geometría de las laderas.

La morfología de una ladera afecta su estabilidad debido a que la dirección y comportamiento de los escurrimientos están influenciados por la forma de la misma, es decir, la concentración o dispersión del escurrimiento depende de la morfología de la ladera. De esta forma el drenaje tiende a concentrarse en una ladera cóncava como respuesta a la presión del agua sobre los flancos de la misma, mientras que, en la parte convexa el escurrimiento tiende a dispersarse sin permitir la concentración, que resulta ser la causa primordial en el desajuste del equilibrio de la ladera.

Un mapa que expresa la morfología del relieve puede ser el de geometría de laderas (Lugo-Hubb, 1989). Para la zona de estudio el mapa que muestra la forma que presentan las laderas fue generado a partir de los datos de elevación del MDE con la función *curvature* en *ArcGis Spatial Analyst Toolbar*. El programa realiza el cálculo de la curvatura mediante la segunda derivación del raster de pendientes, permitiendo conocer superficies rectas (casi planas), cóncavas y convexas, los

valores positivos representan formas cóncavas, los negativos indican formas convexas y las partes planas son representadas con cero.

El resultado del mapa de geometría muestra un rango de valores que van de -6.6 a 6.5 estos números son comunes en relieves montañosos (figura 5.7). Las formas convexas y cóncavas son dadas por las laderas de los cordones serranos que bordean los estrechos valles de la zona de estudio, mientras que las únicas formas planas o semiplanas son las terrazas formadas por el Río Zempoala (figura 5.7 a). El mapa b) presenta esta clasificación evidenciando: convexa, cóncava y plana, de las que el 51% son formas convexas y el 49% restante cóncavas. El programa solo registra un elemento plano que no puede visualizarse en el mapa, pero no significa que no existan elementos semi planos en la zona como podrían ser las terrazas fluviales.

Los resultados estadísticos de este factor revelan que la mayoría de los procesos de remoción ocurren en laderas cóncavas y un grupo menor de fenómenos que se presentan en valores muy cercanos a la concavidad (figura 5.6).

Los procesos gravitacionales de mayores dimensiones que ocurren en formas de laderas cóncavas probablemente debido a la concentración del flujo de agua. Por otro lado en las laderas convexas se espera tener procesos gravitacionales mas superficiales como respuesta a la intensa erosión superficial laminar. Aunque no se descarta que con la combinación de factores ocurran movimientos considerables, pues, lluvias intensas y continuas pueden generar erosiones profundas sobre todo en materiales tipo suelo.

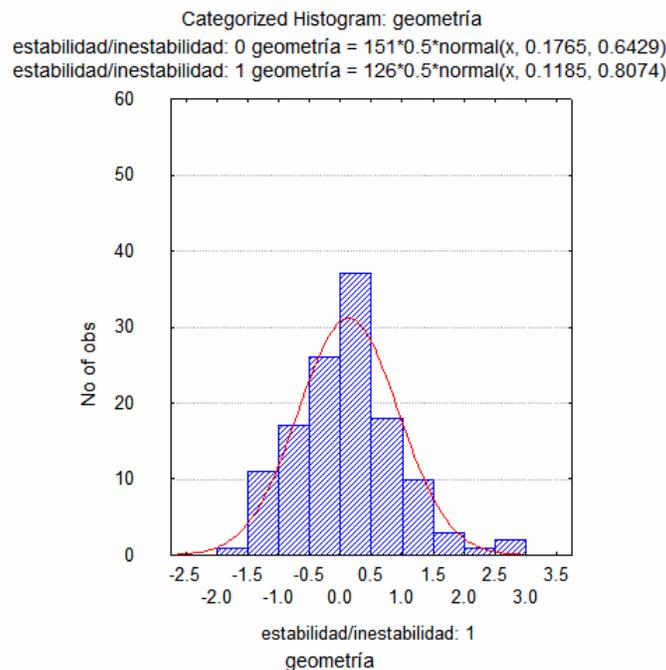
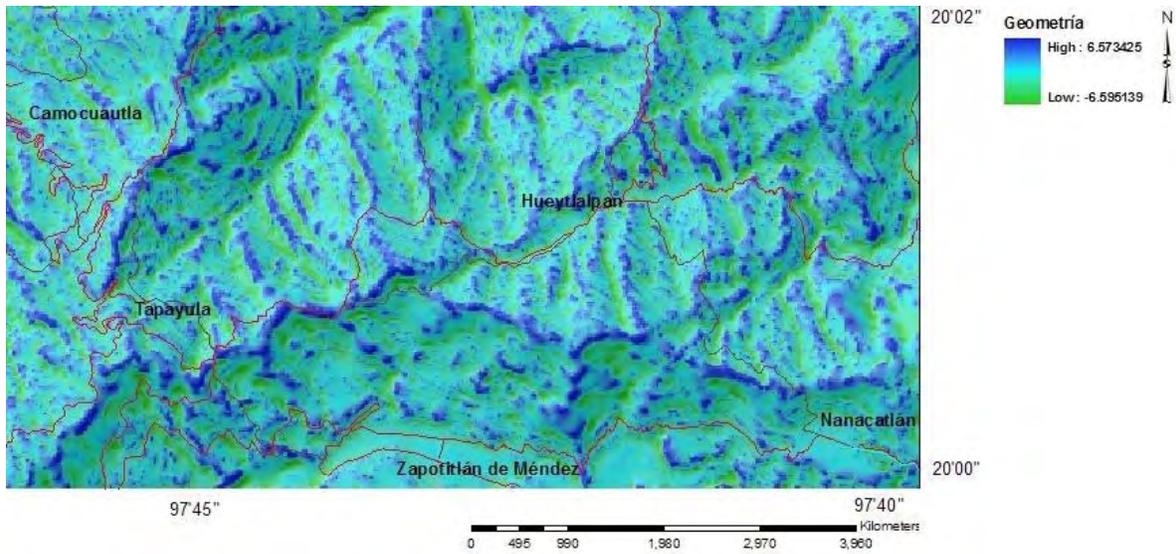
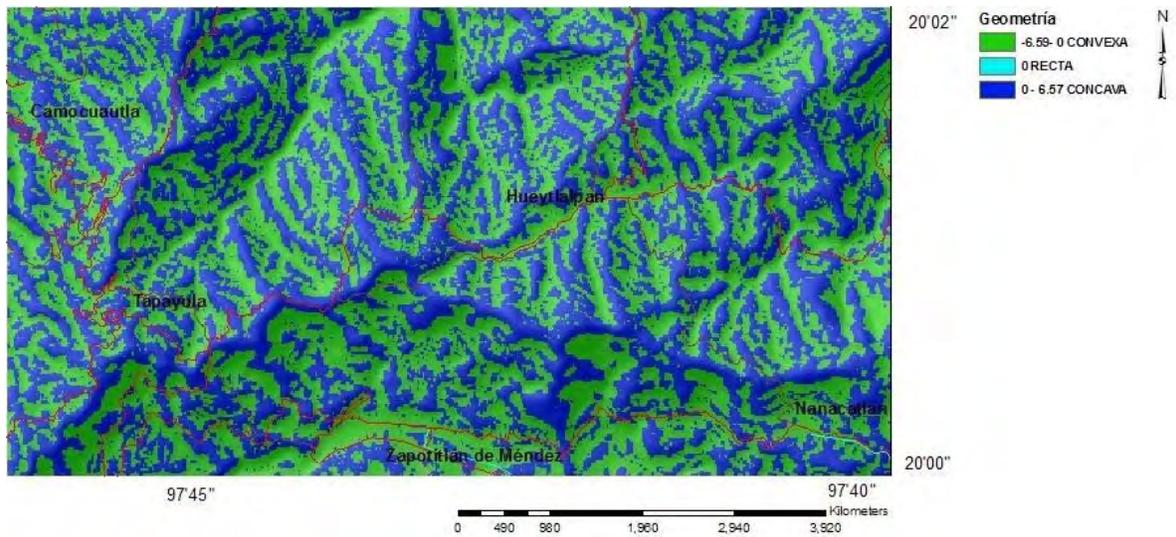


Figura 5.6 Histograma por grupo de datos del factor geometría realizado en Statistica 6.0.



a)



b)

Figura 5.7 Mapas de geometría de laderas. a) mapa que presenta rango de valores de 6.6 a 6.5 e interpretan relieve montañoso. b) mapa con tres clasificaciones: recta, cóncava y convexa.

5.5 Mapa de concentración de flujo.

Debido a la importancia que tiene el comportamiento del factor hidrológico dentro de los procesos de remoción es relevante conocer el camino del agua en la superficie de las laderas y el estado de sus concentraciones. Un mapa que puede vincularse con el comportamiento del agua en superficie es el de concentración de flujo, esta proyección mide el número de líneas de flujo que pasan por cada píxel a

través de su trayectoria dentro de una cuenca. Esta medida regularmente es útil para calcular el tiempo de concentración del agua en una cuenca.

Para generar este mapa, primero se crea un mapa de dirección de flujo a partir del MDE, el cual indica la dirección en la cual el agua debería fluir en cada píxel analizado. El raster resultante se toma como base para generar el mapa de concentración, el cual puede ser trazado ladera abajo o ladera arriba. Para incorporarlo al análisis de laderas el trazo fue realizado ladera abajo.

Del mapa obtenido (figura 5.9) puede observarse que no hay mucha concentración de agua en las partes altas de las montañas, seguramente debido a lo escarpado de las pendientes que ahí se presentan y a las geometrías convexas que son dispersoras. Por otra parte ladera abajo, dentro de la parte de ladera media e inferior existe la mayor agrupación de trayectorias de flujos de agua que terminan concentrándose altamente en los estrechos valles que caracterizan la zona, los principales valles corresponden con el Valle de Zapotitlán de Méndez y el Valle de la cañada de Tapayula. El mapa b muestra una clasificación de cinco categorías para una mejor apreciación de la forma en la que se presenta el factor en la zona.

Las tendencias estadísticas del factor pueden verse en los histogramas de la figura 5.8 en la que se observa que el mayor número de procesos se localizan en las dos primeras categorías que corresponden a las de menor concentración y en muchas ocasiones coinciden con corrientes naturales.

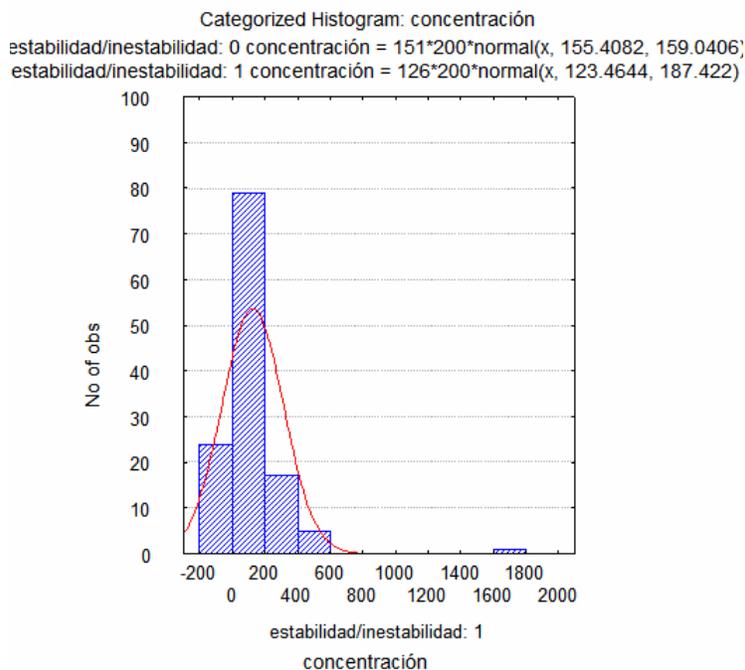
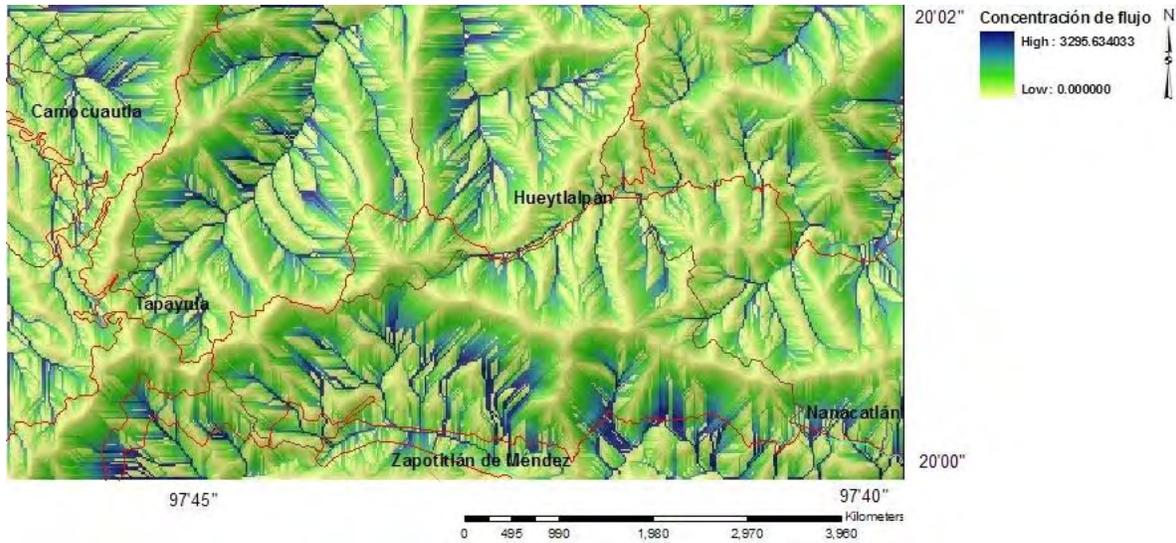
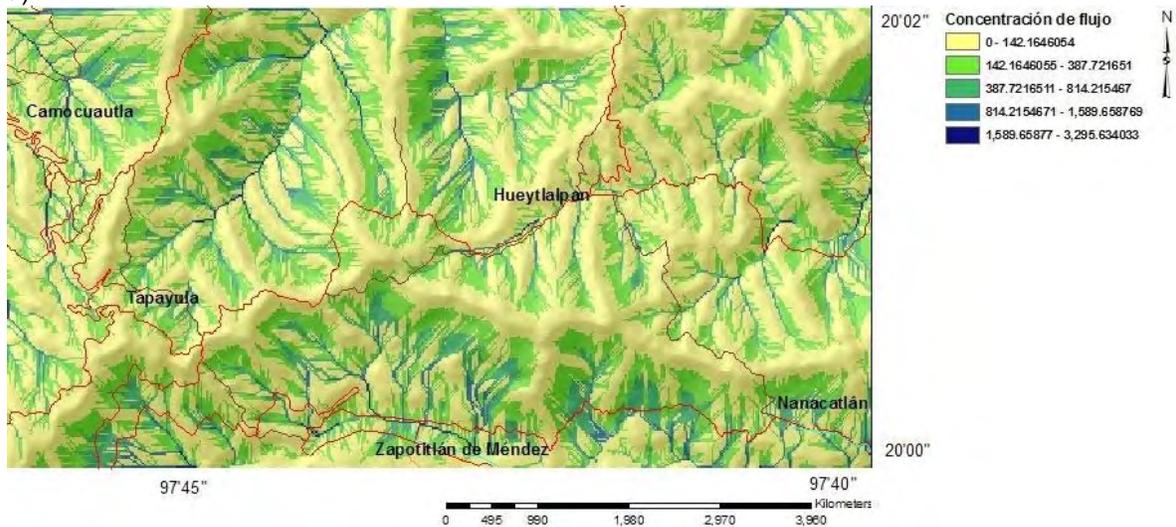


Figura 5.8 Histograma por grupo de los datos del factor concentración realizado en Statistica 6.0.



a)



b)

Figura 5.9 Mapas de concentración de flujo. a) mapa que presenta los rangos generales de concentración de la zona, b) mapa con cinco clasificaciones.

5.6 Mapa de inventario de procesos de remoción.

Cuando un peligro potencial está presente en una determinada área, uno de los primeros pasos en su evaluación es realizar un levantamiento de los eventos ocurridos en épocas recientes. Para el peligro por procesos de remoción, resulta de gran importancia reconocer dichos fenómenos debido a que el método para determinar la susceptibilidad en base a los movimientos existentes resulta apropiado ya que permite realizar una estimación de procesos ocurridos y factores participantes. Aunque, es importante resaltar que la ausencia de evidencia de ninguna manera garantiza la no aparición de este tipo de peligros en un evento próximo.

El producto de la evaluación de los procesos gravitacionales puede visualizarse en un mapa de inventario en el que se encuentran perfectamente ubicados los movimientos pudiendo ser agrupados de acuerdo a las características particulares que se necesiten, sirviendo como fuente de datos para entender las condiciones que contribuyen a la ocurrencia. El mapa de inventario de la zona fue generado en base a la ubicación y descripción en campo de todos los procesos ocurridos en la zona hasta el 2006, la ubicación de cada punto se realizó utilizando un instrumento de posicionamiento global y el detalle de el trazo de las áreas probables de deslizamientos fue corroborado con imágenes satelitales de la zona de 1999 y 2001, fotografías aéreas de vuelos 1:75 000 de INEGI, 1995 y 1:15 000 de SCT. Un total de 38 movimientos fueron ubicados (figura 5.10) el empleo de las imágenes satelitales y fotografías aéreas de antes y después del evento fue para verificar lo encontrado en campo y para trazar las áreas susceptibles. Dentro del inventario se tiene una base de datos de las características principales de los movimientos que incluye elevación, tipo de MRM, estado, dimensión, espesores, propiedades geotécnicas, etc. La base de datos puede verse en una tabla del capítulo 5 de procesos de remoción, en donde se discutirán los resultados.

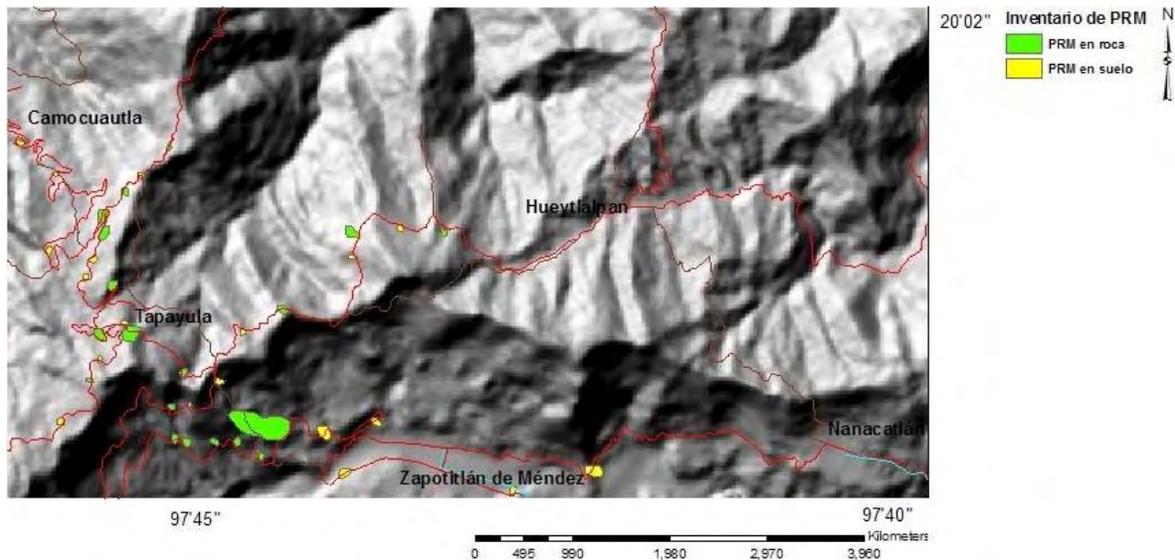


Figura 5.10 Mapa de inventario de movimientos de remoción de masas.

5.7 Mapa de geología.

Existen al menos tres factores que deben ser evaluados en el análisis del peligro por MRM, uno de ellos es el factor geológico que en muchos casos, como en el área estudiada, puede llegar a ser uno de los detonantes principales en la aparición de dichos fenómenos. El área de estudio presenta una secuencia aflorante constituida principalmente por rocas continentales y marinas, las cuales están cubiertas en algunas partes por depósitos piroclásticos (estos son descritos en el capítulo III). El mapa raster presenta nueve formaciones geológicas reconocidas dentro de la zona en las que resalta su condición mecánica debido

principalmente: al tipo de clima, los procesos tectónicos y acción antrópica que han prevalecido en la región a lo largo del tiempo (figura 5.11).

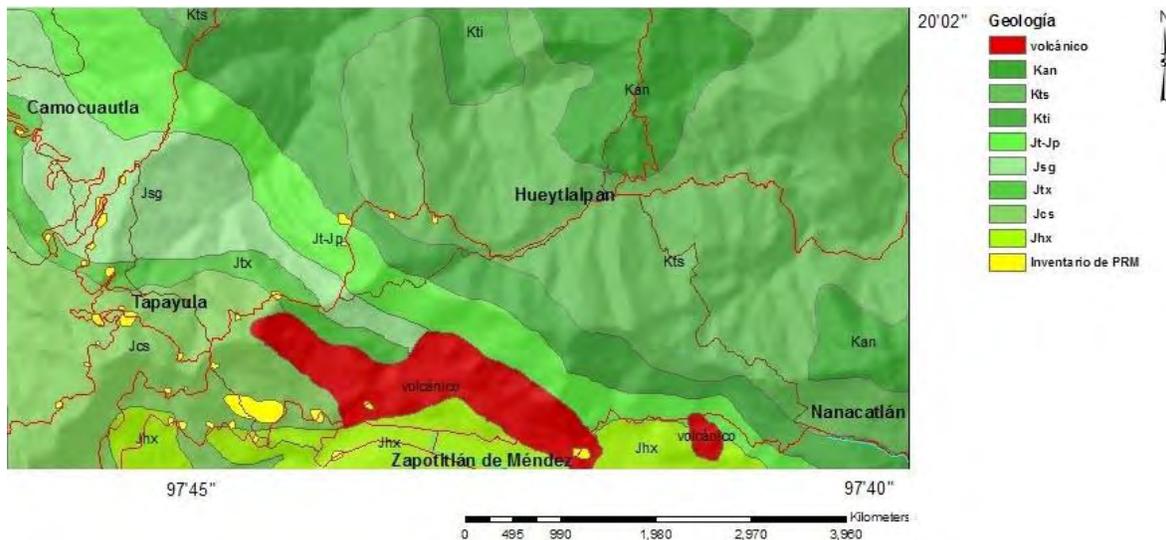


Figura 5.11 Mapa de la geología de la zona de estudio. Formaciones: Kan (Agua nueva), Kts (Tamaulipas superior), Kti (Tamaulipas inferior), Jt-Jp (Tamán-Pimienta), Jsg (Santiago), Jtx (Tepéxic), Jcs (Cahuasas) y Jhx (Huayacocotla).

Los procesos de remoción en la zona se encuentran principalmente en las formaciones Cahuasas (4:Jcs) y Santiago (6:Jsg). Otras formaciones que presentan importante número de fenómenos son Huayacocotla (3:Jhx) y Tepéxic (5:Jtx). Esto puede verse en los histogramas de la figura 5.12.

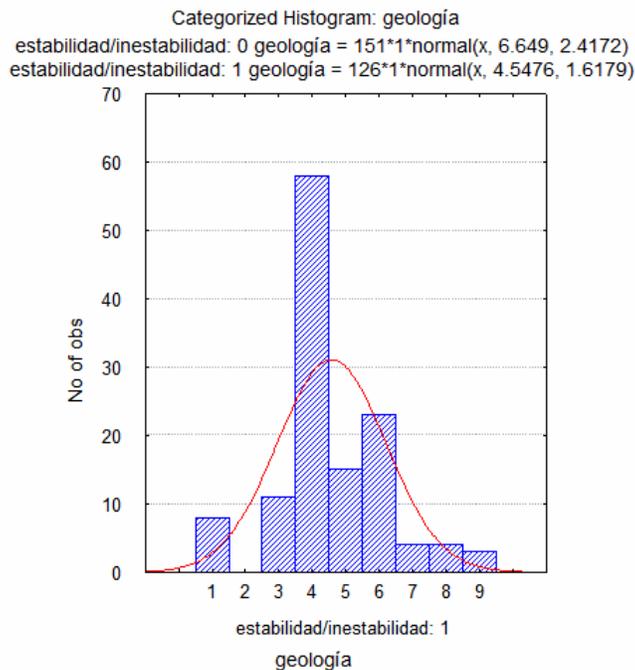


Figura 5.12 Histograma por grupo del factor geología realizado en Statistica 6.0

5.8 Mapa de índice calidad de roca.

Aun más importante que la identificación del tipo de roca en la evaluación del peligro, es el determinar o inferir la calidad o estado mecánico en el que se encuentra la roca o grupo de rocas que conforman los macizos rocosos. Para lograrlo la mecánica de rocas ha desarrollado dos grupos de estudio denominados roca intacta y macizo rocoso. El primero considera a la roca como un medio sólido, continuo y policristalino; en él que la calidad depende de las propiedades físicas de los minerales y de la forma en que están unidos. Por otro lado, el macizo rocoso es considerado un medio heterogéneo y discontinuo que involucra los distintos tipos de litologías, las estructuras geológicas que lo forman, sus condiciones de alteración y meteorización. El estado físico dependerá básicamente de la relación y condición que guarden las discontinuidades que conforman la estructura geológica. La determinación de la situación física de los macizos rocosos ha sido desarrollada por varios autores entre los que destacan los siguientes índices: el RMR de Bieniawsky, el RSR de Wickham, el Q de Barton y el RQD de Deere. (Barton, 1974; Deer y Patton, 1971; Bieniawski, 1989; Varnes, 1978; Hoek y Bray, 1981; ISRM, 1978). En recientes años Hoek (1994) presentó un sistema para estimar la reducción de la resistencia en los macizos rocosos para diferentes condiciones geológicas, basándose en la identificación y clasificación en campo de la macroestructura y condición de las superficies de discontinuidad que presentan.

La construcción del mapa de índice de calidad de roca (figura 5.13) esta basado en los principios que Hoek plantea, para generarlo se tomó cada una de las formaciones geológicas de el área de estudio y mediante la descripción de cada formación como macizo rocoso se obtuvo un rango de valor de GSI, ese valor fue marcado en el plano basándose en los contactos geológicos que cada formación presenta. De igual forma se realizó una breve descripción de las discontinuidades siguiendo el método elaborado por la comisión para la normalización de pruebas de campo y laboratorio de la ISRM (1978), que sirvió para complementar el rango de calidad que presentan los macizos de la zona.

Por último, los resultados estadísticos de los procesos de remoción encontrados en la zona son mostrados en los histogramas de la figura 5.14 en los que se muestra que las laderas fallan en mayor proporción en zonas con rangos de índice de calidad de 21-30.

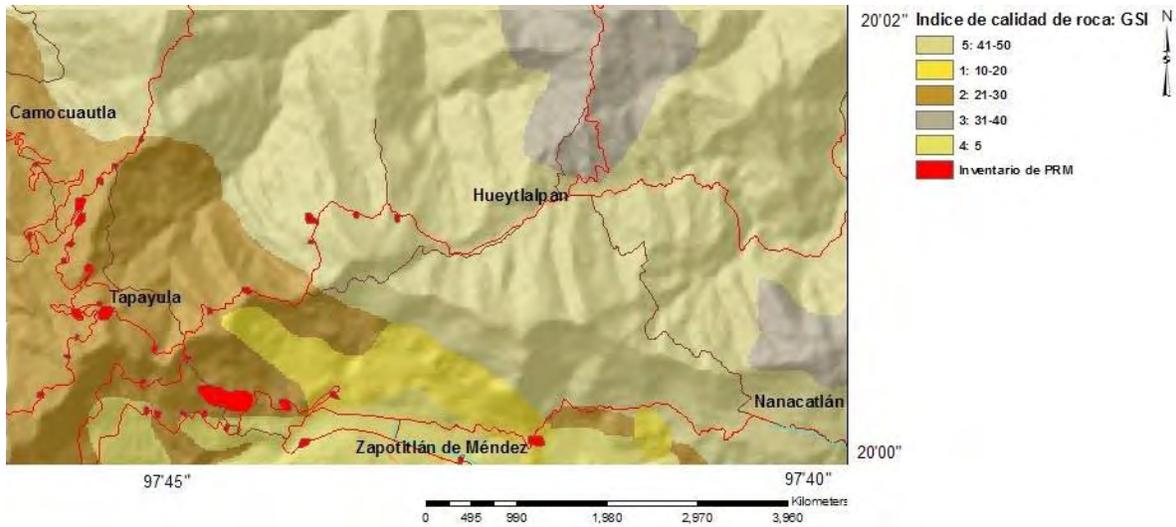


Figura 5.13 Mapa de índice de calidad geomecánica de los materiales encontrados en la zona de estudio. GSI (Geological Strength Index). Basado en Hoek, (1994).

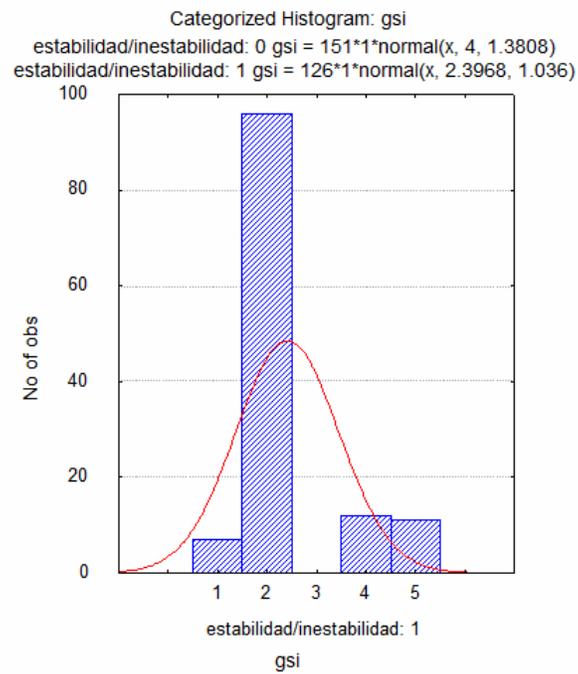


Figura 5.14 Histograma por grupo del factor índice de calidad de roca (GSI) realizado en Statistica 6.0.

VI. MARCO, MÉTODO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA.

MARCO TEÓRICO.

6.1 Modelos y herramientas empleadas en la zonificación de la susceptibilidad por procesos de remoción en masa.

La zonificación de peligro por procesos de remoción en masas consiste en la división del terreno en áreas homogéneas y la calificación de cada una de estas de acuerdo al grado real o potencial de peligro. Los modelos que hasta la fecha se han desarrollado para identificar la aparición futura de dichos eventos trabajan básicamente con metodologías de tipo directo e indirecto. En la primera, se realiza un mapeo bajo criterios de experiencia profesional que muestra la distribución espacial de los parámetros que pueden tener influencia en el desarrollo de los movimientos (Pachauri, 1992). En la segunda, se maneja la estimación de áreas que han estado libre de movimientos de ladera, pero que presentan las condiciones físicas ideales o muy similares a las que se han visto sujetas a este tipo de procesos (Dai y Lee, 2002).

Carrara (1983), ha diferenciado las técnicas de zonificación en tres formatos que siguen la metodología de tipo directo e indirecto y la combinación de estas:

1. Modelos de caja blanca. Modelos determinísticos que se basan en modelos físicos de estabilidad de taludes y modelos hidrológicos.
2. Modelos de caja negra. Modelos que se basan solo en análisis estadísticos.
3. Modelos de caja gris. Modelos basados parcialmente en modelos físicos y análisis estadísticos.

Actualmente, las técnicas más utilizadas para la elaboración de mapas de peligro y por ende de susceptibilidad son los análisis heurísticos y estadísticos. Los primeros manejan un conocimiento a priori de las posibles causas de inestabilidad de la ladera, los factores de desequilibrio son clasificados y favorecidos de acuerdo con un supuesto grado de importancia en favor del movimiento (Clerici, 2002).

Por otro lado, los métodos estadísticos se basan en la relación establecida entre factores principales naturales y la distribución de deslizamientos ya existentes (Clerici, 2002), y superponen mapas de factores calculando la densidad de deslizamiento de acuerdo a una técnica de análisis que puede ser bivariada o multivariada.

En la técnica bivariada la importancia de cada factor o combinación de factores puede ser analizada individualmente y es posible asignarle un peso adicional a cada factor o combinación, mientras que en la técnica multivariada todos los factores relacionados con la ocurrencia de movimientos dan la contribución relativa al peligro total que presente una unidad de área. Estos análisis se basan en la presencia o ausencia del fenómeno.

Al presente, las técnicas multivariadas son las más utilizadas y en su mayoría necesitan un paquete adicional de estadística para realizar el análisis de regresión logística, discriminante y condicional. El análisis de regresión estima la probabilidad que resulta de la combinación de variables dependientes e independientes. El discriminante amplía y resalta la distancia entre dos o más grupos definidos mediante la función discriminante de variables establecidas. Por último, el análisis condicional estima la probabilidad entre el número de factores y la ocurrencia de los procesos en una determinada área (Clerici, 2002).

Debido a que la zonificación de este tipo de procesos requiere interacciones complejas entre un gran número de factores que presentan una cierta relación entre sí y de la evaluación de las relaciones entre varias condiciones del terreno, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son el conjunto de herramientas más útiles que en la actualidad se conocen, pues permiten resolver los modelos planteados anteriormente debido a la capacidad de almacenamiento y manipulación de la información con la que cuentan. En la actualidad existen muchos SIG que difieren entre sí con respecto al tipo de estructura de datos, compresión de información, dimensión, hardware e interfase de usuario (Burrough, 1986). Un sistema ideal para la zonificación de peligro por movimientos gravitacionales debe poder desarrollar análisis espacial sobre mapas múltiples y tablas de atributos, además de poseer una gran capacidad de procesamiento de imágenes (escaneadas y satelitales). La creación de una buena base de datos de tipo digital en formato raster y la compatibilidad con el SIG garantizarán la modelación de el mapa resultante.

MARCO HISTÓRICO.

6.2 Antecedentes de estudios de probabilidad de ocurrencia en los procesos de remoción.

Desde principios de los 70's cientos de trabajos han propuesto diferentes métodos que con ayuda de un SIG plantean estimar la probabilidad de ocurrencia de los procesos de remoción en masa (Clerici, 2002). Uno de los primeros SIG utilizados para zonificar este tipo de fenómenos fue el usado por Newman (1978), posteriormente se han reportado centenares de casos con diferentes técnicas, concepciones de uso y factores desencadenantes. La mayoría de los casos que hasta la fecha se han presentado muestran una zonificación cualitativa de riesgo con énfasis en la entrada de información geomorfológica, los ejemplos y lista de artículos pueden ser encontrados básicamente en Carrara, et al. (1983, 1991, 1992, 1995 y 2003), Soeters y van Westen (1996), Guzzetti et al. (1999), Dai y Lee (2002), Lee (2004), Gorsevski (2000 y 2001), Larsen (1998), Nagarajan et al. (2000), Remondo et al., (2003), Santacana et al. (2003), Clerici (2002) y Lorente, et al. (2002).

En resumen, los métodos que se han publicado manejan un modelo conceptual que Clerici (2002) presenta de la siguiente forma:

- 1) Mapeo de los deslizamientos.

- 2) Mapeo de factores ambientales que se supone están relacionados directa o indirectamente con la inestabilidad de la ladera.
- 3) Estimación de la relación de los factores con la inestabilidad.
- 4) Clasificación de áreas en diferentes dominios de distinto grado de susceptibilidad mediante las relaciones detectadas entre factores.

Algunos de los trabajos que hasta la fecha se han realizado y que manejan la idea conceptual presentada con anterioridad son: Carrara, et al. (1983, 1991, 1992, 1995 y 2003), que básicamente utiliza análisis estadísticos multivariados y desarrolla la idea fundamental del modelo enlistado anteriormente. Brabb (1978, 1984 y 1989), analiza factores como geología, pendientes y movimientos activos. Soeters y van Westen (1996), zonifican mediante el reconocimiento de zonas de inestabilidad y factores generadores. Guzzetti et al. (1999), aplican análisis estadísticos multivariados y resaltan las condiciones de los factores participantes. Dai y Lee (2002), modelan la inestabilidad de laderas en una isla de Hong Kong mediante un análisis estadístico de regresión lineal múltiple utilizando Arcview. Lee (2004) aplica y compara métodos estadísticos con ayuda de un GSI, es de los pocos trabajos que comparan sus resultados. Gorsevski (2000 y 2001), combina y aplica modelos de regresión logística y análisis de componentes principales. Larsen (1998), presenta la distribución y frecuencia de deslizamientos en una determinada área de Puerto Rico mediante el tratamiento de imágenes satelitales en un SIG. Nagarajan et al. (2000), muestra un mapa de susceptibilidad con cinco áreas generadas a partir de una función discriminante bivariable. Remondo et al. (2003), desarrolla un modelo de susceptibilidad en base a las relaciones estadísticas entre movimientos conocidos y los factores condicionantes, crea su base de datos con ArcInfo 7.2. Santacana et al. (2003), desarrollan un mapa de susceptibilidad en los Pirineos españoles mediante un análisis estadístico multivariado en el que involucra 13 parámetros relacionados a la geometría de la ladera. Clerici (2002) utiliza un análisis multivariado condicional y desarrolla su propio GIS. Por último, Lorente, et al. (2002) explican la distribución espacial de los factores que generan flujos de detritos en los Pirineos centrales de España.

MÉTODO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

6.3 Metodología empleada para la elaboración de los mapas de susceptibilidad y desarrollo de la obtención de estos por medio de dos análisis: máxima probabilidad y discriminante.

La metodología presentada aquí para determinar la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa dentro de la zona de estudio fue obtenida estudiando la relación entre movimientos conocidos y los factores o parámetros que influyen en dichos movimientos mediante dos modelos. Teniendo como premisa que la relación estadística entre los movimientos desarrollados y los factores condicionantes pueden llegar a determinar la susceptibilidad a deslizamiento.

El primero, un análisis estadístico multivariado simple realizado con parámetros obtenidos a partir de un Modelo de Elevación Digital (MED), factores obtenidos de

fotografía aérea y satelital y verificaciones en campo (mostrados en el capítulo 4: Mapas temáticos). El análisis de máxima probabilidad y la base de datos fueron creados con Arcgis. El segundo, un análisis estadístico multivariado discriminante, en el que se utilizó Arcgis como SIG en el estudio multivariado y el software Statistica 6.0 para el análisis discriminante. Los detalles y pasos del desarrollo de la metodología pueden verse en la figura 6.1 y más adelante se describirán con detalle.

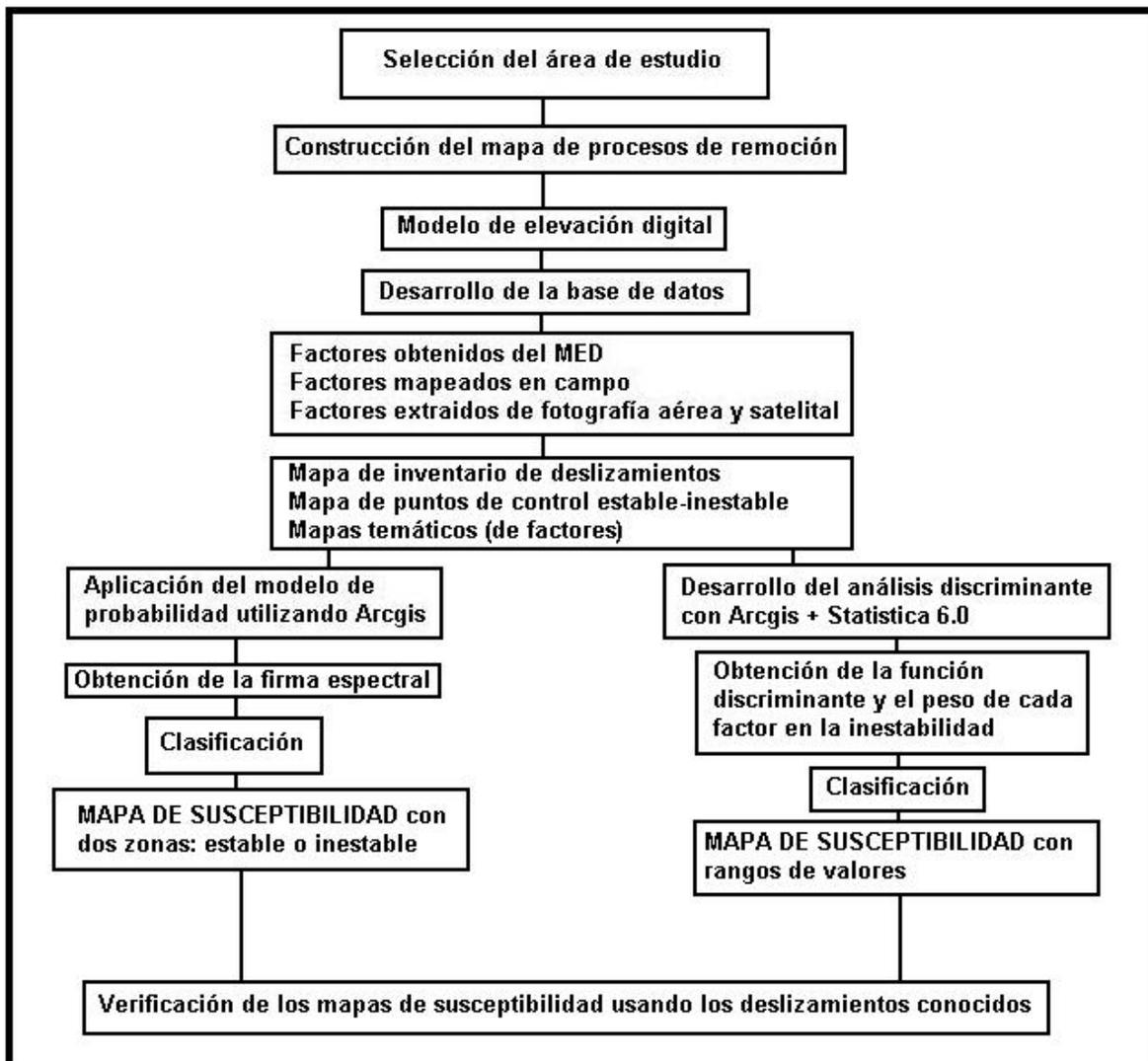


Figura 6.1 Esquema de la metodología empleada para la elaboración de los mapas de susceptibilidad de la zona de estudio.

El inicio del análisis comienza con la selección de un área potencialmente susceptible a procesos gravitacionales con aproximadamente 875 km² en dónde se tienen ubicados 38 movimientos de masa de los cuales se sabe por verificación de campo, fotografía aérea e imagen satelital que 34 ocurrieron dentro de el mismo evento de lluvia del 1999 y los otros cuatro seis años después durante la entrada del Huracán Stan en el 2005. Los procesos erosivos se manifestaron bajo

un registro de lluvia puntual de 420 mm en 24 horas en una zona donde la máxima mensual y anual son de 795 mm y 2022 mm respectivamente (1961-1990) (SMN, 2007).

Una vez seleccionada la superficie de trabajo se procedió a escoger y construir el tipo de mapa adecuado que representara la facilidad con la que el fenómeno puede ocurrir sobre la base del terreno sin aludir directamente al evidente factor detonante que representan las intensas lluvias de 1999. El análisis se realizó teniendo en cuenta que la zona presenta ocurrencia de deslizamientos con mucho potencial hacia el futuro.

El mapeo desarrollado fue de dos tipos: directo, observando la relación de los factores de ocurrencia con los movimientos y la geomorfología del terreno. Indirecto, levantando el mayor número de factores activos y analizando su contribución.

Una base de datos de las características más significativas de los procesos y los factores participantes fue generada paralelamente con el diseño del MDE y representan las condiciones particulares de la zona y la relación que guardan con la evolución del relieve. Dentro de la base de datos se tienen las características principales de los movimientos que incluye elevación, tipo de MRM, estado, dimensión, espesores y propiedades geotécnicas, los detalles pueden verse en el capítulo de procesos de remoción de masas.

Siguiendo con el desarrollo cartográfico se construyó un mapa inventario de los procesos encontrados dentro del área que sirve como base de datos para entender las condiciones que contribuyen a los movimientos y su relación con el terreno. El resultado es un mapa raster con áreas definitivas y probables de deslizamientos existentes.

Por otra parte, para lograr la evaluación del peligro y poder realizar el análisis de susceptibilidad se construyó en *ArcGis* un mapa raster de puntos de control en el que se localizaron las áreas de los deslizamientos registrados en el inventario caracterizados como áreas inestables y se determinaron nuevas áreas con características completamente opuestas a las inestables en cuanto a pendiente, altitud, exposición, geología, calidad de roca y vegetación, que se denominaron como áreas estables. Se recurrió a la ayuda de imágenes satelitales de antes y después del evento de 1999. El resultado es un mapa de áreas estables denominadas con 0 y áreas inestables que representan los deslizamientos ya conocidos, estos son identificados con 1. Un total de 277 puntos fueron creados.

Posteriormente con ayuda del MED se generaron algunos de los mapas de factores mediante las diversas funciones que presenta la librería de *ArcGis: ArcMap, Spatial Analyst*. Los mapas resultantes son: pendientes, exposición de laderas, geometría de las laderas y longitud de flujos. Otros factores fueron cartografiados mediante datos de campo y pruebas de laboratorio generando otros

mapas raster de factores como el de geología y el de calidad de roca. El detalle de su construcción es presentado en el capítulo de mapas temáticos.

Una vez obtenido todo el detalle cartográfico de la relación entre movimientos conocidos y los factores o parámetros que influyen en dichos movimientos se procedió a realizar el análisis de susceptibilidad de la zona mediante dos métodos.

El desarrollo de ambos modelos de probabilidad fue tratado en la versión 9.1 de ArcGis mediante el análisis de clasificación supervisada.

El **primer análisis** estadístico multivariable fue realizado mediante la aplicación del modelo de máxima probabilidad que ArcGis presenta dentro de su apartado desarrollado para el análisis espacial de elementos (Multivariate: Maximum Likelihood Classification MLC). El análisis fue desarrollado primeramente generando la firma espectral de los raster de componentes (pendientes, exposición de laderas, geometría de las laderas, longitud de flujos, geología e índice de calidad de roca) y el raster de puntos de control (indica los rangos de valores que entre todos los mapas caracterizan las zonas afectadas o no afectadas por movimientos). Una vez obtenida la firma espectral, el modelo de clasificación es corrido con la premisa de que cada una de las células es clasificada bajo la más alta probabilidad de ocurrencia, esto es, para no favorecer a ninguno de los posibles factores y ver de manera general su comportamiento dentro de la zona. El algoritmo usado por la MLC en ArcGis está basado en la normalidad distributiva de las clases y el Teorema de Bayes.

El resultado de la clasificación es un raster con dos zonas de susceptibilidad (0: estable y 1: inestable) que representan de manera general la contribución de todos los factores característicos de la zona al evento de inestabilidad que ha venido ocurriendo dentro de la misma. El mapa de susceptibilidad puede verse en la figura 6.2 en el que resalta que las zonas con mayor susceptibilidad dentro del área de estudio y que el mapa las denota como inestables se encuentran ubicadas hacia la parte suroeste afectando en gran medida los Valles de Tapayula y Zapotitlán de Méndez, siendo mas crítica la condición del Valle Tapayula por la mayor concentración de células con alta probabilidad. Del análisis pudo obtenerse que un 94% del área muestra condiciones estables mientras que para el 6% restante las condiciones son inestables.

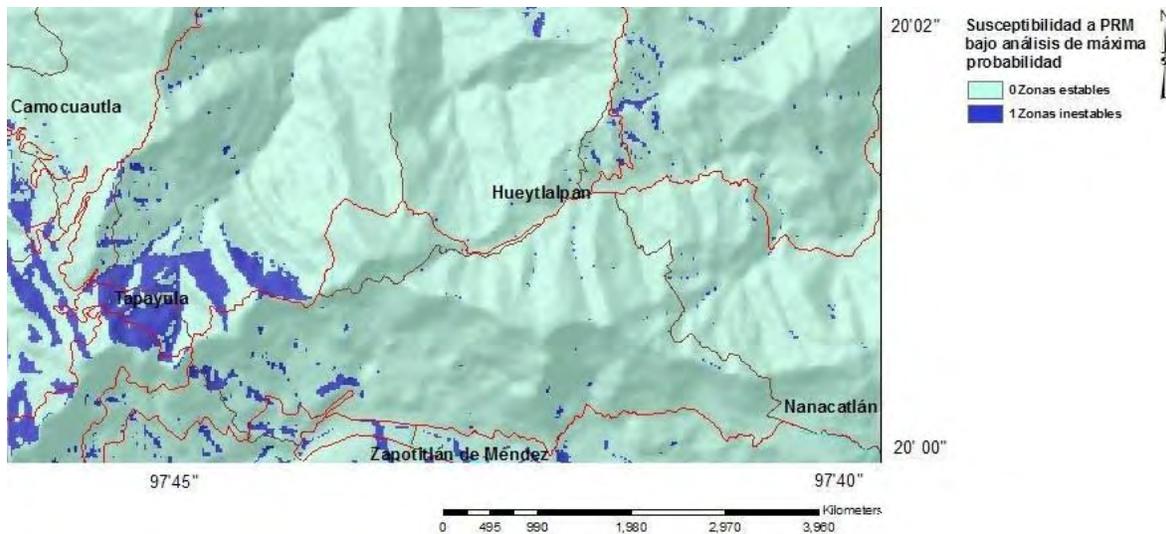


Figura 6.2 Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción de masas obtenido mediante una clasificación de máxima probabilidad de ocurrencia entre mapas de componentes y un mapa de puntos de control con áreas estables e inestables.

Para verificar la calidad de los datos mostrados en los mapas de susceptibilidad se observó la coincidencia de los procesos erosivos que hasta la fecha se han detectado en la zona con las áreas de probable ocurrencia que ha presentado el análisis de elementos. La sobreposición de los 38 MRM localizados dentro del campo de estudio en el mapa de susceptibilidad se muestra en la figura 6.3. La mayoría de los procesos gravitacionales se encuentran muy cerca de la parte inestable quedando algunos de estos dentro de dicha área o con la corona dentro de esta, tal es el caso de los dos procesos de mayor volumen registrado que parten cien por ciento de una zona sin estabilidad.

Otro aspecto que queda revelado en la exposición de la estabilidad de la zona en el mapa de susceptibilidad es la concentración de zonas inestables en el tramo carretero de Zapotitlán de Méndez a Camocuautla, el cual presenta los mayores cortes carreteros dentro de los macizos rocosos, una mayor densidad en curvas carreteras y un alto número de cambio de dirección de los taludes carreteros.

Hay que señalar que los deslizamientos ocurridos a lo largo de la carretera que caen en zonas estables dentro del análisis, pueden favorecer su posición debido a que la carretera no fue considerada como factor dentro del análisis, sin embargo como lo resaltamos en el párrafo anterior los cortes de carreteras son altamente favorables a la ocurrencia de este tipo de fenómenos.

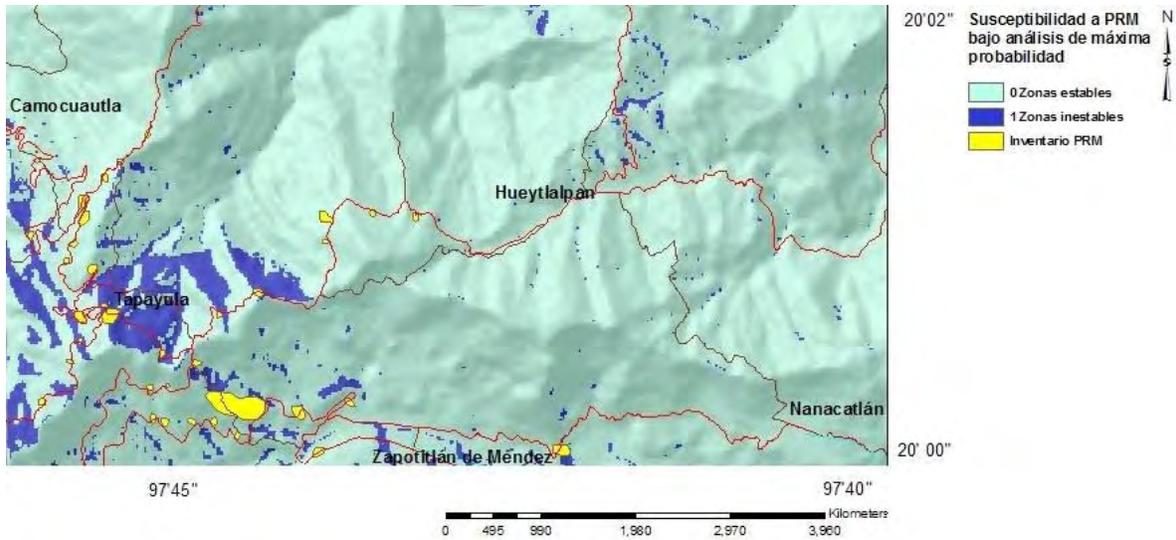


Figura 6.3 Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción de masas con la localización de los 38 procesos de remoción en masa que se han registrado en la zona.

Por otro lado, debido a que una de las finalidades de los análisis multivariable, en especial el discriminante, es la búsqueda e identificación del peso de las variables actuantes para adecuarlas con base en la magnitud de desempeño simplificando así el tratamiento estadístico del problema, logrando en algunos casos la eliminación del error por redundancia.

Debido a esto, se procedió a realizar un **segundo análisis** que nos permitiera identificar la contribución específica de cada uno de los factores identificados. Este segundo procedimiento correspondió con un análisis discriminante en el que el objetivo principal es predecir la susceptibilidad a MRM relativa a los factores característicos de la zona. De igual forma, el problema se plantea explotando el registro histórico de procesos ya ocurridos y la observación de variables cuantitativas con potencial influyente como lo son: pendiente, exposición, geometría, longitud de flujos, geología e índice de calidad de roca. La variable dependiente corresponde a la aparición del fenómeno y las independientes a los factores probables que los desencadenan. De esta forma el propósito del análisis es identificar la estabilidad o inestabilidad de las laderas de la zona de estudio mediante los factores actuantes identificados, discriminando a cada uno de estos al grado de poder observar su peso específico y la contribución al desencadenamiento del fenómeno.

La tabla de datos que se utilizaron en el análisis se muestra en el apéndice del texto. Unas listas parciales se muestran en las tablas 6.1 y 6.2 en las que en la primera columna se observan los grupos dependientes que representa valores de estabilidad de la zona determinados mediante el mapa de puntos de control, los valores en 0 corresponden con zonas que debido a las características observadas son consideradas como estables y los valores con 1 corresponden con zonas inestables. Las otras siete columnas muestran los valores de las variables independientes, es decir, de los factores actuantes en el sistema de estabilidad. Un total de 277 observaciones son incluidas en el problema.

| obs | estabilidad/ inestabilidad | mde | pendiente | aspecto | curvatura | long flujo | gsi | geología |
|-----|-------------------------------|---------|-----------|---------|-----------|------------|-----|----------|
| 1 | 1 | 882.94 | 22.40 | 254.12 | -1.12 | 60.00 | 2 | 5 |
| 2 | 1 | 899.36 | 13.22 | 271.16 | 1.45 | 20.00 | 2 | 5 |
| 3 | 1 | 891.50 | 23.44 | 268.72 | 0.26 | 40.00 | 2 | 5 |
| 4 | 1 | 989.43 | 12.21 | 296.82 | 0.17 | 0.00 | 2 | 6 |
| 5 | 1 | 991.14 | 13.15 | 288.30 | 0.15 | 20.00 | 2 | 6 |
| 6 | 1 | 1166.87 | 36.36 | 299.82 | -0.47 | 113.14 | 2 | 6 |
| 7 | 1 | 1160.45 | 36.49 | 292.18 | 0.01 | 0.00 | 2 | 6 |
| 8 | 1 | 1174.80 | 38.10 | 295.83 | 0.55 | 0.00 | 2 | 6 |
| 9 | 1 | 1168.34 | 22.87 | 332.47 | 1.18 | 0.00 | 2 | 6 |
| 10 | 1 | 1176.70 | 18.73 | 338.23 | 2.90 | 0.00 | 2 | 6 |
| 11 | 1 | 1169.54 | 15.93 | 9.76 | 0.96 | 0.00 | 2 | 6 |
| 12 | 1 | 1154.92 | 31.17 | 286.84 | 0.95 | 0.00 | 2 | 6 |
| 13 | 1 | 1175.00 | 26.63 | 296.17 | 0.46 | 28.28 | 2 | 6 |
| 14 | 1 | 1163.47 | 30.67 | 288.98 | -0.52 | 261.42 | 2 | 6 |
| 15 | 1 | 1168.89 | 28.74 | 286.20 | 0.41 | 20.00 | 2 | 6 |
| 16 | 1 | 1181.77 | 27.61 | 287.87 | -0.19 | 60.00 | 2 | 6 |
| 17 | 1 | 1204.64 | 34.04 | 304.52 | -0.62 | 76.57 | 2 | 6 |
| 18 | 1 | 1218.91 | 32.57 | 296.51 | 0.30 | 28.28 | 2 | 6 |
| 19 | 1 | 1217.95 | 28.48 | 286.78 | 0.78 | 0.00 | 2 | 6 |
| 20 | 1 | 1206.88 | 32.34 | 298.56 | -0.66 | 28.28 | 2 | 6 |

Tabla 6.1. Datos de inestabilidad de las primeras veinte observaciones empleadas en el análisis discriminante usando Statistica 6.0

| obs | estabilidad/ inestabilidad | mde | pendiente | aspecto | curvatura | long flujo | gsi | geología |
|-----|-------------------------------|---------|-----------|---------|-----------|------------|-----|----------|
| 258 | 0 | 1128.70 | 49.89 | 215.69 | 0.34 | 113.14 | 5 | 9 |
| 259 | 0 | 1109.50 | 50.45 | 217.16 | 0.43 | 113.14 | 5 | 9 |
| 260 | 0 | 1090.29 | 50.90 | 218.34 | 0.60 | 141.42 | 5 | 9 |
| 261 | 0 | 1135.90 | 47.49 | 213.00 | 0.42 | 84.85 | 5 | 9 |
| 262 | 0 | 1126.78 | 24.32 | 16.95 | -1.87 | 193.14 | 5 | 8 |
| 263 | 0 | 1144.02 | 21.51 | 28.99 | -0.22 | 56.57 | 5 | 8 |
| 264 | 0 | 1153.20 | 22.91 | 320.47 | -0.33 | 28.28 | 5 | 8 |
| 265 | 0 | 1134.97 | 19.70 | 334.37 | -0.98 | 156.57 | 5 | 8 |
| 266 | 0 | 1156.06 | 30.84 | 299.15 | -0.85 | 124.85 | 5 | 8 |
| 267 | 0 | 1276.76 | 32.27 | 181.08 | 1.03 | 184.85 | 3 | 2 |
| 268 | 0 | 1272.97 | 37.75 | 194.75 | 1.04 | 136.57 | 3 | 2 |
| 269 | 0 | 1243.74 | 32.68 | 203.78 | -0.54 | 0.00 | 3 | 8 |
| 270 | 0 | 1250.27 | 29.67 | 187.21 | -0.24 | 224.85 | 3 | 2 |
| 271 | 0 | 1175.54 | 37.42 | 148.21 | 0.31 | 113.14 | 5 | 8 |
| 272 | 0 | 1176.93 | 37.12 | 155.80 | 0.52 | 0.00 | 5 | 8 |
| 273 | 0 | 1142.02 | 38.03 | 151.19 | 0.18 | 28.28 | 5 | 8 |
| 274 | 0 | 1139.44 | 39.44 | 150.53 | -0.18 | 141.42 | 5 | 8 |
| 275 | 0 | 892.55 | 12.01 | 130.03 | -0.22 | 1115.39 | 5 | 9 |
| 276 | 0 | 896.90 | 5.64 | 144.80 | -0.17 | 1087.11 | 5 | 9 |
| 277 | 0 | 895.93 | 10.50 | 159.38 | 0.04 | 466.27 | 5 | 9 |

Tabla 6.2. Datos de estabilidad de las últimas veinte observaciones empleados en el análisis discriminante usando Statistica 6.0

Una vez introducidos los datos se realizó el análisis discriminante seleccionando *Discriminant Análisis* del menú *Statistics- Multivariate Exploratory Techniques* desplegándose así el resultado de dicho análisis. El resumen de la exploración de los datos mediante la técnica discriminante se muestra en la tabla 6.3. En ella se observa el comportamiento de las mismas variables utilizadas para el desarrollo del primer análisis con objeto de ver la aportación que cada una de estas componentes realiza en la estabilidad del sistema y para realizar una equiparable comparación de los mapas resultantes de ambos procesos. El análisis de las siete variables en dos grupos muestra valores similares en el poder discriminario del modelo (dados por la Wilks' Lambda), el valor discriminante del modelo es de 0.63705 lo que indica que no existe un alto poder discriminario entre los dos grupos y la aportación a las condiciones dependientes es muy similar. Esto podría interpretarse como que cada porción del terreno de la zona de estudio puede tener la facilidad de permanecer estable o de salirse de la situación de equilibrio límite debido a la similitud en peso de aportación de cada factor desencadenante.

Por otro lado, otro aspecto que se revela es que la variable que representa la calidad de la roca (gsi) es la que mayormente contribuye a la discriminación entre los dos grupos, seguida por mde, aspecto, geología, curvatura, pendiente y longitud de flujo (entre mas pequeño sea el valor de lambda parcial mayor será su contribución). Aunque el rango de diferencia entre parciales de lambda no es del

todo considerable, este análisis puede darnos una idea de las tendencias que presentan sobre el terreno dichas variables.

Independientemente de los valores antes descritos, el software señala que los únicos resultados que deben utilizarse para la interpretación del análisis debido a que están estandarizados y referidos a escalas comparables son los que presenta el resumen de coeficientes estandarizados mostrado en la tabla 6.4. Nuevamente en esta tabla reconocemos que en valor absoluto la primera función de discriminación muestra que la variable gsi es la que tiene el mayor peso junto con el mde, geología y aspecto. En otras palabras, estos valores son los que aportan una mayor influencia en los procesos de inestabilidad de laderas, mientras que los restantes aportan una influencia de menor grado.

| Discriminant Function Analysis Summary (deslizamientos.sta) | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------|---------------|----------------|------------------|----------|----------|-------------------|
| No. of vars in model: 7; Grouping: Var1 (2 grps) | | | | | | |
| Wilks' Lambda: .63705 approx. F (7,269)=21.894 p<0.0000 | | | | | | |
| N=277 | Wilks' Lambda | Partial Lambda | F-remove (1,269) | p-level | Toler. | 1-Toler. (R-Sqr.) |
| mde | 0.677392 | 0.940444 | 17.03511 | 0.000049 | 0.906585 | 0.093415 |
| pendiente | 0.637097 | 0.999925 | 0.02027 | 0.886902 | 0.860853 | 0.139147 |
| aspecto | 0.650206 | 0.979765 | 5.55566 | 0.019138 | 0.940543 | 0.059457 |
| curvatura | 0.641515 | 0.993039 | 1.88565 | 0.170837 | 0.880124 | 0.119876 |
| long flujo | 0.637436 | 0.999393 | 0.16329 | 0.686469 | 0.890690 | 0.109310 |
| gsi | 0.694072 | 0.917842 | 24.07869 | 0.000002 | 0.507753 | 0.492247 |
| geología | 0.643731 | 0.989620 | 2.82154 | 0.094168 | 0.513627 | 0.486373 |

Tabla 6.3. Resumen del análisis por función discriminante del total de variables del modelo. El factor que posee mayor poder discriminatorio corresponde con gsi.

| Variable | Standardized Coefficient for Canonical Variable |
|------------|-------------------------------------------------|
| | Root 1 |
| mde | -0.425437 |
| pendiente | -0.015522 |
| aspecto | -0.243467 |
| curvatura | 0.147619 |
| long flujo | 0.043318 |
| gsi | 0.667689 |
| geología | 0.235968 |
| Eigenval | 0.569738 |
| Cum.Prop | 1.000000 |

Tabla 6.4. Valores estandarizados resultado del análisis discriminario de dos grupos: estable/ inestable y siete variables: mde, pendiente, aspecto, curvatura, longitud flujo, gsi, y geología.

La confiabilidad de los resultados se muestra en la tabla 6.5 que indica los porcentajes en la clasificación en dos ramas de grupos de estabilidad: estable-0 e inestable-1. La primera columna muestra el porcentaje de casos que son correctamente clasificados en cada grupo. El porcentaje general de confianza del modelo es de 76% de un total de 277 observaciones con 72% para puntos estables y 80% para inestables. Las dos siguientes columnas presentan la clasificación de los puntos teniendo 151 estables y 126 inestables. Por lo tanto cada una de las probabilidades determinadas están dadas de acuerdo a los tamaños de muestra.

| Classification Matrix (deslizamientos) | | | |
|----------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| Rows: Observed classifications | | | |
| Columns: Predicted classifications | | | |
| Group | Percent Correct | G_1:0 p=.54513 | G_2:1 p=.45487 |
| G_1:0 | 72.84768 | 110 | 41 |
| G_2:1 | 80.15873 | 25 | 101 |
| Total | 76.17329 | 135 | 142 |

Tabla 6.5. Matriz de clasificación que indica la confiabilidad con base en los datos manejados dentro del modelo. 0-estable e 1-inestable.

Una vez identificadas las características estadísticas del modelo pasaremos a la obtención de la clasificación la cual es procesada para cada grupo y puede ser usada directamente para clasificar los casos. La obtención de esta función nos permitirá conocer la constante y los coeficientes de aportación de cada variable independiente sobre el modelo. El análisis de la clasificación es mostrado en la tabla de función de clasificación que se muestra en *Discriminant Function Analysis Results- Classification tab- Classification functions* (tabla 6.6). Esta función puede definir las transformaciones de las variables estables e inestables con base en los factores potenciales.

| Variable | Classification Function | |
|------------|-------------------------|-------------------|
| | G_1:0 p=.54513 | G_2:1 p=.45487 |
| mde | 0.0226 | 0.0256 |
| pendiente | 0.0994 | 0.1017 |
| aspecto | 0.0121 | 0.0155 |
| curvatura | 0.8401 | 0.5314 |
| long flujo | 0.0035 | 0.0031 |
| gsi | 2.5632 | 1.7473 |
| geología | 0.3489 | 0.1785 |
| Constant | -20.3255 | -20.5903 |

Tabla 7.6. Función de Clasificación del modelo estable-inestable que muestra los valores de transformación de las variables.

Obtenida la clasificación y con la producción de los valores que cada variable impone en el modelo para la activación de la modificación de las condiciones de equilibrio y su constante general, se desarrolló la función discriminante para cada uno de los dos casos utilizando los valores generados en la clasificación. Dichas formulas son mostradas a continuación:

(1)... ESTABLE= cte + (cfte mde*map mde) + (cfte pendiente*map pendiente) + (cfte aspecto*map aspecto) + (cfte curvatura*map curvatura) + (cfte long flujo*mapa long flujo) + (cfte gsi*mapa gsi) + (cfte geología*mapa geología)

(2)....INESTABLE= cte + (cfte mde*map mde) + (cfte pendiente*map pendiente) + (cfte aspecto*map aspecto) + (cfte curvatura*map curvatura) + (cfte long flujo*mapa long flujo) + (cfte gsi*mapa gsi) + (cfte geología*mapa geología)

Las ecuaciones anteriores son utilizadas para crear a través de las herramientas de ArcGis en *Spatial Analyst- Raster Calculation* los mapas que modelan cada uno de los dos grupos planteados en el análisis estable e inestable. El resultado son dos modelos raster con la visualización de cada una de las premisas. Estos mapas son la base para la generación del mapa final de susceptibilidad que se realizó mediante el cruce de ambos raster bajo un análisis condicionante con la siguiente formula:

(3)...Con (inestable>= estable, 1, 0)

El resultado es un mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masas con dos zonas estable e inestable bajo un proceso de análisis discriminante (figura 6.4). El mapa resalta que las zonas con mayor susceptibilidad y que se denotan como inestables están localizados en tres regiones hacia la parte suroeste y sureste afectando en gran medida los valles de todos los poblados, es especial, los de Tapayula, Camocuautla y Zapotitlán de Méndez que presentan una mayor concentración de células de alta probabilidad.

Evidentemente este mapa parece tener una mejor resolución en cuanto a los grupos planteados para el estudio (estable e inestable) debido a que los límites y áreas registradas se muestran mayormente definidas en regiones específicas. Esto se debe al poder de dominio que ciertos factores generan mediante el planteamiento del análisis discriminante y que son expresados visualmente en el mapa.

Tal es el caso de la influencia que ejerce el GSI, modelo digital de elevación, aspecto y geología en la apariencia final del mapa. De esta forma, las zonas mas susceptibles se encuentran sobre las rocas de menor competencia geotécnica con rangos bajos de GSI que coinciden con las partes de ladera alta y media, en formaciones rocosas sedimentarias jurásicas principalmente y depósitos volcánicos recientes poco consolidados que tienden a cubrir la superficie natural del terreno dentro de zonas con deformación de amplia exposición.

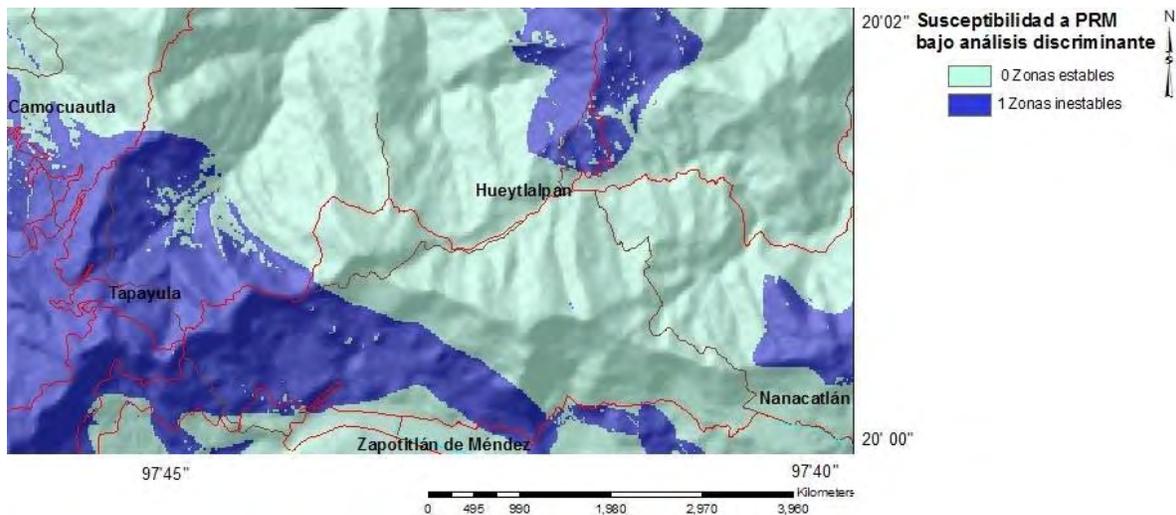


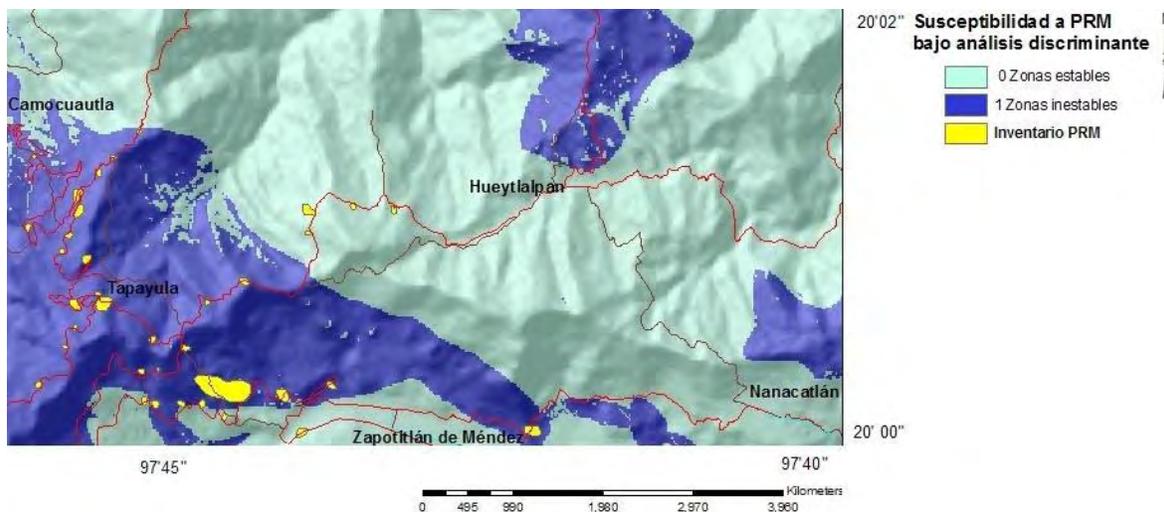
Figura 6.4 Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción de masas bajo análisis discriminante entre dos grupos estable-inestable y factores generadores.

La verificación de la calidad de los datos mostrados en el anterior mapa de susceptibilidad se confirmó con la sobre posición de los procesos erosivos que hasta la fecha se han detectado en el área de probable ocurrencia marcada por el análisis discriminante.

La sobre posición de los 38 MRM localizados dentro del mapa de susceptibilidad se observa en la figura 6.5. Un 87% de los procesos gravitacionales se encuentran dentro de las regiones inestables con excepción de algunos que son ubicados dentro de áreas más estables que a pesar de no contar al cien por ciento con los rasgos de inestabilidad si muestran algunas características como por ejemplo que se encuentran en la parte alta de la ladera justo dentro de la zona cóncava, dentro de corrientes naturales de agua importantes y bajo formaciones de secuencias rítmicas con espesores variables y diferente competencia.

La cercanía de la carretera con la corona de los procesos parece ser determinante en su activación. La mayor concentración de procesos inestables se encuentran en el tramo carretero de Zapotitlán de Méndez a Camocuautla, que presenta las mayores exposiciones de cortes carreteros dentro de los macizos rocosos, una alta densidad en curvas carreteras y un elevado número de cambio de direcciones en los taludes de la carretera.

Para este mapa los dos procesos de mayor volumen registrado parten cien por ciento de una zona sin estabilidad y su exposición queda completamente dentro de la misma.



6.5 Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción de masas bajo análisis discriminante con el registro de los 38 procesos erosivos que han ocurrido en las laderas.

6.4 Discusión de los mapas de susceptibilidad obtenidos bajo análisis de máxima probabilidad y discriminante.

Aunque ambos mapas fueron creados bajo caminos diferentes los datos base que se utilizaron para su elaboración son los mismos, por consiguiente, es válida la cuestión con respecto a los resultados obtenidos que a partir de este momento efectuamos, resaltando que los resultados obtenidos a partir de ambos métodos son satisfactorios y admisibles, debido a la evidencia erosiva que se sabe ocurre en la zona.

Por un lado, desde el aspecto visual puede notarse la similitud que ambos mapas presentan y que inicia con la más evidente que es la concurrencia espacial de las regiones estables e inestables y aún más la coincidencia de las zonas inestables y los procesos erosivos que se han registrado. En ambos mapas se puede observar que un considerable número de procesos inician en zonas con alto potencial o al menos en laderas que presentan algunas características de este tipo. Este resultado puede hablarnos de una calidad y certeza en el procesamiento de los datos debido a la tendencia similar de los resultados que afirman la participación general de los factores cartografiados que son evidentes al estar presentes encima de estos los procesos erosivos.

Otro aspecto que es posible apreciar es que ambos mapas presentan los resultados de inestabilidad con base en el mismo predominio de factores como lo son el GSI, aspecto, geología y mde. Esto puede verse en las zonas inestables del mapa bajo máxima probabilidad que muestra sus áreas inestables en mayor número sobre zonas de bajo índice de calidad de roca, sobre ladera superior y media, en la parte cóncava, preferentemente sobre rocas sedimentarias jurásicas y depósitos volcánicos recientes.

La zona NE de la región resultó ser una zona altamente susceptible a pesar de no haberse observado procesos de remoción. El análisis discriminante en especial evidencia la ocurrencia de esta área activa aun sin actividad presente y denota con mayor claridad los límites de peligro que hacia esta porción se presentan. Nuevamente los factores dominantes anteriormente mencionados son los que permiten la exposición cartográfica de esta área en el mapa.

Al comparar los mapas resulta evidente que al utilizar un análisis discriminante se estableció una mejor apreciación del poder de cada parámetro. Esto puede observarse al comparar el mapa realizado bajo este método con los mapas que representan los factores mas discriminantes, que le asignan cierto detalle, tal es el caso del mapa de GSI que presenta una indudable coincidencia con el mapa de susceptibilidad bajo modelo discriminante, debido sin duda alguna al mayor poder discriminante que dicho factor presenta.

No solo es posible apreciar el efecto dominante del factor en los límites si no también en las áreas que se vuelven más claras logrando que la dispersión de puntos se vea reducida.

CONCLUSIONES.

Los resultados muestran que es posible obtener mapas satisfactorios y coherentes mediante el uso de técnicas estadísticas multivariable y un SIG, siguiendo el principio de que las superficies futuras de falla de una ladera en una zona deben ocurrir más o menos bajo las mismas condiciones en las que han ocurrido en el pasado. De esta manera resulta importante estudiar el comportamiento y relación que existe entre los diversos factores que intervienen en el sistema de equilibrio de las laderas y los procesos de remoción existentes.

La aplicación previa de una función discriminante en el proceso de elaboración del mapa mejora las bases utilizadas durante la clasificación, mostrando el valor de peso que cada factor genera y la contribución al desencadenamiento del fenómeno. Muchos errores de interpretación pueden ser corregidos seleccionando adecuadamente variables claramente representativas.

Para este trabajo el resultado del análisis discriminante muestra que los parámetros que determinan una mayor susceptibilidad al fenómeno de remoción en las laderas son el índice de calidad de roca, la geología, el modelo digital de elevación y la exposición.

De ambos análisis se puede concluir que las áreas más susceptibles y con presencia de movimientos corresponden con zonas ubicadas hacia la parte oeste y suroeste afectando en gran medida los Valles de Tapayula y Zapotitlán de Méndez. La zona NE de la región resultó ser una zona altamente susceptible a pesar de no haberse observado procesos de remoción.

Dentro del área se ubicaron 38 movimientos de los cuales 34 corresponden con eventos ocurridos durante las lluvias de 1999 y 4 a los efectos del Huracán Stan en el 2005.

De los 38 fenómenos registrados 19 ocurrieron en roca entre los 1,100 y 1,300 msnm bajo mecanismos de caída, deslizamientos traslacional simple y de bloques. La mayor parte de estos se originan en rocas sedimentarias jurásicas con secuencias de areniscas-lutitas-limolitas y conglomerados-lutitas-limolitas. Más del 80% de las superficies se encuentran activas con dimensiones de metros a miles de metros cúbicos.

Los 19 procesos restantes ocurren en materiales pedológicos (depósitos piroclásticos, paleosuelos y coluviones) en el área de premontaña. En su mayoría inician como deslizamientos traslacionales que adoptan como superficie deslizante el límite suelo-roca, un plano de estratificación o una fractura, terminando como flujos debido a la acumulación excesiva de agua. También son encontrados procesos tipo rotacional, debido a la presencia de intensa actividad meteórica en el material base. Más del 80% de las superficies están activas con dimensiones de metros cúbicos.

Mecánicamente en su mayoría los suelos están compuestos por partículas de tamaño de arenas finas con al menos 30% de parte fina (limos y arcillas) que clasifican principalmente como suelos gruesos arenosos con cantidades importantes de limos o arcillas que influyen en el comportamiento mecánico (SGSM y SGSC). Las arcillas y limos se encuentran en 52% como de alta compresibilidad y 48% de baja lo que hace que sean altamente susceptibles a colapsos y procesos de remoción por la alta capacidad de adsorción de agua que se ve reflejada en los contenidos de agua que en su mayoría rebasan el 25%.

APÉNDICE.

1. Base de datos de los factores y puntos de control de las observaciones estables=0 e inestables=1.

| | estabilidad/ inestabilidad | dem | pendiente | aspecto | curvatura | long flujo | gsi | geología |
|----|-------------------------------|---------|-----------|---------|-----------|------------|-----|----------|
| 1 | 1 | 882.94 | 22.40 | 254.12 | -1.12 | 60.00 | 2 | 5 |
| 2 | 1 | 899.36 | 13.22 | 271.16 | 1.45 | 20.00 | 2 | 5 |
| 3 | 1 | 891.50 | 23.44 | 268.72 | 0.26 | 40.00 | 2 | 5 |
| 4 | 1 | 989.43 | 12.21 | 296.82 | 0.17 | 0.00 | 2 | 6 |
| 5 | 1 | 991.14 | 13.15 | 288.30 | 0.15 | 20.00 | 2 | 6 |
| 6 | 1 | 1166.87 | 36.36 | 299.82 | -0.47 | 113.14 | 2 | 6 |
| 7 | 1 | 1160.45 | 36.49 | 292.18 | 0.01 | 0.00 | 2 | 6 |
| 8 | 1 | 1174.80 | 38.10 | 295.83 | 0.55 | 0.00 | 2 | 6 |
| 9 | 1 | 1168.34 | 22.87 | 332.47 | 1.18 | 0.00 | 2 | 6 |
| 10 | 1 | 1176.70 | 18.73 | 338.23 | 2.90 | 0.00 | 2 | 6 |
| 11 | 1 | 1169.54 | 15.93 | 9.76 | 0.96 | 0.00 | 2 | 6 |
| 12 | 1 | 1154.92 | 31.17 | 286.84 | 0.95 | 0.00 | 2 | 6 |
| 13 | 1 | 1175.00 | 26.63 | 296.17 | 0.46 | 28.28 | 2 | 6 |
| 14 | 1 | 1163.47 | 30.67 | 288.98 | -0.52 | 261.42 | 2 | 6 |
| 15 | 1 | 1168.89 | 28.74 | 286.20 | 0.41 | 20.00 | 2 | 6 |
| 16 | 1 | 1181.77 | 27.61 | 287.87 | -0.19 | 60.00 | 2 | 6 |
| 17 | 1 | 1204.64 | 34.04 | 304.52 | -0.62 | 76.57 | 2 | 6 |
| 18 | 1 | 1218.91 | 32.57 | 296.51 | 0.30 | 28.28 | 2 | 6 |
| 19 | 1 | 1217.95 | 28.48 | 286.78 | 0.78 | 0.00 | 2 | 6 |
| 20 | 1 | 1206.88 | 32.34 | 298.56 | -0.66 | 28.28 | 2 | 6 |
| 21 | 1 | 1224.28 | 30.41 | 293.56 | 0.42 | 0.00 | 2 | 6 |
| 22 | 1 | 1138.10 | 4.66 | 332.13 | 0.20 | 0.00 | 2 | 5 |
| 23 | 1 | 1136.05 | 2.46 | 354.49 | 0.14 | 0.00 | 2 | 5 |
| 24 | 1 | 1136.20 | 3.29 | 329.45 | -0.05 | 1660.24 | 2 | 5 |
| 25 | 1 | 1219.17 | 20.79 | 284.33 | 0.96 | 20.00 | 2 | 6 |
| 26 | 1 | 1225.05 | 15.10 | 288.61 | 0.59 | 0.00 | 2 | 6 |
| 27 | 1 | 1230.75 | 12.15 | 287.59 | 0.16 | 40.00 | 2 | 6 |
| 28 | 1 | 1166.54 | 37.03 | 286.91 | -1.08 | 124.85 | 2 | 6 |
| 29 | 1 | 1163.51 | 41.44 | 292.47 | -0.63 | 76.57 | 2 | 6 |
| 30 | 1 | 1221.53 | 19.43 | 344.44 | -1.09 | 128.28 | 2 | 5 |
| 31 | 1 | 1238.14 | 18.86 | 3.94 | 1.02 | 60.00 | 2 | 5 |
| 32 | 1 | 1302.87 | 16.47 | 112.90 | 1.95 | 0.00 | 2 | 5 |
| 33 | 1 | 1303.89 | 11.28 | 95.22 | 1.63 | 0.00 | 2 | 5 |
| 34 | 1 | 1297.47 | 26.76 | 100.50 | 2.21 | 20.00 | 2 | 5 |

| | | | | | | | | |
|----|---|---------|-------|--------|-------|--------|---|---|
| 35 | 1 | 1289.21 | 37.17 | 117.21 | 2.55 | 28.28 | 2 | 5 |
| 36 | 1 | 1322.69 | 23.35 | 291.38 | -1.60 | 60.00 | 2 | 4 |
| 37 | 1 | 1310.87 | 11.40 | 322.59 | -0.60 | 557.99 | 2 | 4 |
| 38 | 1 | 1318.51 | 15.61 | 354.95 | -1.25 | 380.00 | 2 | 4 |
| 39 | 1 | 1331.28 | 22.21 | 307.14 | -1.07 | 435.98 | 2 | 4 |
| 40 | 1 | 1326.80 | 23.81 | 298.36 | -1.03 | 362.84 | 2 | 4 |
| 41 | 1 | 1391.27 | 22.03 | 12.38 | 0.56 | 40.00 | 2 | 4 |
| 42 | 1 | 1375.46 | 28.78 | 41.28 | 1.02 | 28.28 | 2 | 4 |
| 43 | 1 | 1329.05 | 34.46 | 47.28 | -0.20 | 84.85 | 2 | 4 |
| 44 | 1 | 1323.82 | 36.39 | 19.57 | -0.84 | 236.57 | 2 | 4 |
| 45 | 1 | 1349.91 | 32.40 | 7.45 | 0.37 | 40.00 | 2 | 4 |
| 46 | 1 | 1391.19 | 31.75 | 21.36 | 0.77 | 0.00 | 2 | 4 |
| 47 | 1 | 1358.90 | 34.01 | 28.76 | -0.76 | 96.57 | 2 | 4 |
| 48 | 1 | 1341.28 | 32.93 | 22.97 | -0.93 | 208.28 | 2 | 4 |
| 49 | 1 | 1384.40 | 33.94 | 15.94 | -0.30 | 140.00 | 2 | 4 |
| 50 | 1 | 1349.19 | 29.20 | 37.84 | 0.82 | 28.28 | 2 | 4 |
| 51 | 1 | 1331.62 | 31.77 | 44.38 | 0.24 | 56.57 | 2 | 4 |
| 52 | 1 | 1427.89 | 21.33 | 9.44 | 0.36 | 160.00 | 2 | 4 |
| 53 | 1 | 1434.73 | 18.59 | 13.59 | 0.04 | 140.00 | 2 | 4 |
| 54 | 1 | 1458.55 | 18.22 | 296.85 | 0.87 | 0.00 | 2 | 4 |
| 55 | 1 | 1464.10 | 19.15 | 294.08 | 0.18 | 0.00 | 2 | 4 |
| 56 | 1 | 1326.93 | 36.67 | 83.30 | -0.33 | 160.00 | 2 | 4 |
| 57 | 1 | 1325.44 | 35.83 | 82.73 | -0.04 | 100.00 | 2 | 4 |
| 58 | 1 | 1311.49 | 34.08 | 84.18 | -0.09 | 120.00 | 2 | 4 |
| 59 | 1 | 1494.11 | 11.39 | 314.91 | -0.17 | 184.85 | 2 | 4 |
| 60 | 1 | 1491.58 | 10.87 | 310.87 | -0.03 | 201.42 | 2 | 4 |
| 61 | 1 | 1173.63 | 35.72 | 159.01 | -0.54 | 188.28 | 2 | 4 |
| 62 | 1 | 1145.07 | 39.78 | 160.66 | -0.44 | 228.28 | 2 | 4 |
| 63 | 1 | 1216.55 | 41.93 | 222.06 | -0.74 | 84.85 | 2 | 4 |
| 64 | 1 | 1216.71 | 34.46 | 121.90 | -0.07 | 124.85 | 2 | 4 |
| 65 | 1 | 1195.45 | 36.52 | 131.22 | 0.76 | 141.42 | 2 | 4 |
| 66 | 1 | 1197.32 | 36.57 | 126.64 | 0.22 | 153.14 | 2 | 4 |
| 67 | 1 | 1281.42 | 18.54 | 23.77 | 0.03 | 28.28 | 2 | 4 |
| 68 | 1 | 1287.79 | 16.49 | 9.98 | 0.56 | 68.28 | 2 | 4 |
| 69 | 1 | 1285.89 | 21.05 | 19.09 | 0.36 | 0.00 | 2 | 4 |
| 70 | 1 | 1008.59 | 30.15 | 174.20 | 0.83 | 40.00 | 4 | 3 |
| 71 | 1 | 996.76 | 32.75 | 178.80 | 1.20 | 60.00 | 4 | 3 |
| 72 | 1 | 982.63 | 34.52 | 183.02 | 0.32 | 80.00 | 4 | 3 |
| 73 | 1 | 1014.54 | 36.29 | 222.45 | 1.16 | 56.57 | 2 | 4 |
| 74 | 1 | 1023.51 | 31.70 | 218.29 | 1.21 | 28.28 | 2 | 4 |

| | | | | | | | | |
|-----|---|---------|-------|--------|-------|--------|---|---|
| 75 | 1 | 987.81 | 42.39 | 218.03 | -0.22 | 56.57 | 2 | 4 |
| 76 | 1 | 987.28 | 21.38 | 154.69 | -0.10 | 0.00 | 2 | 4 |
| 77 | 1 | 969.38 | 33.11 | 150.21 | 0.64 | 376.57 | 2 | 4 |
| 78 | 1 | 965.03 | 34.22 | 144.12 | 0.12 | 557.99 | 2 | 4 |
| 79 | 1 | 961.53 | 39.12 | 189.10 | -0.30 | 120.00 | 2 | 4 |
| 80 | 1 | 959.88 | 40.42 | 184.46 | 0.03 | 244.85 | 2 | 4 |
| 81 | 1 | 926.00 | 40.19 | 194.08 | -0.13 | 284.85 | 4 | 3 |
| 82 | 1 | 945.01 | 39.04 | 192.66 | -0.87 | 140.00 | 2 | 4 |
| 83 | 1 | 906.46 | 20.71 | 215.71 | 0.28 | 28.28 | 4 | 3 |
| 84 | 1 | 900.18 | 21.69 | 214.83 | 0.32 | 28.28 | 4 | 3 |
| 85 | 1 | 1099.94 | 24.58 | 75.65 | 0.24 | 100.00 | 2 | 4 |
| 86 | 1 | 1109.77 | 30.45 | 74.01 | 0.00 | 80.00 | 2 | 4 |
| 87 | 1 | 1093.51 | 32.74 | 113.93 | 0.27 | 68.28 | 2 | 4 |
| 88 | 1 | 1021.28 | 31.17 | 100.23 | 0.14 | 20.00 | 2 | 4 |
| 89 | 1 | 1072.08 | 34.27 | 122.67 | 1.75 | 28.28 | 2 | 4 |
| 90 | 1 | 1001.32 | 32.43 | 130.51 | -1.11 | 84.85 | 2 | 4 |
| 91 | 1 | 974.51 | 13.61 | 89.92 | -0.21 | 180.00 | 2 | 4 |
| 92 | 1 | 974.09 | 16.18 | 95.08 | -0.06 | 100.00 | 2 | 4 |
| 93 | 1 | 954.53 | 12.78 | 112.53 | 0.43 | 0.00 | 2 | 4 |
| 94 | 1 | 946.21 | 15.56 | 89.85 | 0.23 | 280.00 | 2 | 4 |
| 95 | 1 | 963.18 | 9.10 | 96.82 | -0.08 | 240.00 | 2 | 4 |
| 96 | 1 | 1256.89 | 39.90 | 359.67 | 0.70 | 80.00 | 2 | 5 |
| 97 | 1 | 1255.72 | 37.72 | 352.81 | 0.54 | 40.00 | 2 | 5 |
| 98 | 1 | 1273.21 | 39.68 | 6.29 | 1.10 | 60.00 | 2 | 5 |
| 99 | 1 | 824.42 | 17.27 | 105.99 | 1.05 | 0.00 | 2 | 4 |
| 100 | 1 | 792.65 | 18.71 | 134.97 | 0.25 | 133.14 | 2 | 4 |
| 101 | 1 | 797.85 | 12.30 | 115.73 | -0.81 | 40.00 | 2 | 4 |
| 102 | 1 | 810.89 | 24.37 | 120.39 | 0.97 | 84.85 | 2 | 4 |
| 103 | 1 | 724.94 | 27.17 | 146.66 | -1.33 | 141.42 | 1 | 1 |
| 104 | 1 | 711.99 | 13.51 | 155.46 | -0.38 | 193.14 | 1 | 1 |
| 105 | 1 | 714.30 | 17.14 | 151.98 | -0.55 | 169.71 | 1 | 1 |
| 106 | 1 | 679.21 | 14.89 | 339.64 | 0.24 | 0.00 | 4 | 3 |
| 107 | 1 | 674.83 | 12.12 | 334.32 | -0.31 | 20.00 | 4 | 3 |
| 108 | 1 | 679.42 | 16.27 | 334.10 | -0.19 | 0.00 | 4 | 3 |
| 109 | 1 | 681.43 | 17.89 | 336.26 | -0.94 | 88.28 | 4 | 3 |
| 110 | 1 | 1118.75 | 44.62 | 289.53 | 0.00 | 156.57 | 5 | 9 |
| 111 | 1 | 1097.63 | 41.13 | 297.07 | -0.82 | 406.27 | 5 | 7 |
| 112 | 1 | 1122.35 | 42.77 | 295.53 | -0.47 | 377.99 | 5 | 7 |
| 113 | 1 | 1132.83 | 43.04 | 291.96 | 0.46 | 0.00 | 5 | 9 |
| 114 | 1 | 1171.50 | 39.65 | 291.65 | 0.11 | 244.85 | 5 | 9 |

| | | | | | | | | |
|-----|---|---------|-------|--------|-------|--------|---|---|
| 115 | 1 | 1168.59 | 34.80 | 229.19 | -1.06 | 344.85 | 5 | 7 |
| 116 | 1 | 1179.83 | 34.89 | 231.12 | -0.33 | 393.14 | 5 | 7 |
| 117 | 1 | 1198.86 | 33.37 | 25.60 | 0.39 | 104.85 | 5 | 8 |
| 118 | 1 | 1210.17 | 31.46 | 26.41 | 0.26 | 56.57 | 5 | 8 |
| 119 | 1 | 1131.06 | 32.80 | 28.69 | -1.16 | 311.13 | 5 | 8 |
| 120 | 1 | 1143.40 | 34.42 | 18.50 | -1.06 | 589.12 | 5 | 8 |
| 121 | 1 | 643.19 | 8.84 | 342.82 | -0.40 | 100.00 | 4 | 3 |
| 122 | 1 | 652.61 | 20.51 | 337.09 | -0.71 | 60.00 | 4 | 1 |
| 123 | 1 | 719.73 | 18.71 | 133.54 | 1.11 | 28.28 | 1 | 1 |
| 124 | 1 | 703.16 | 27.88 | 113.76 | -0.20 | 84.85 | 1 | 1 |
| 125 | 1 | 682.51 | 28.55 | 109.63 | -0.53 | 124.85 | 1 | 1 |
| 126 | 1 | 695.69 | 25.86 | 115.48 | 0.81 | 84.85 | 1 | 1 |
| 127 | 0 | 559.93 | 18.31 | 270.11 | 0.50 | 160.00 | 2 | 6 |
| 128 | 0 | 560.99 | 24.67 | 235.99 | -0.37 | 88.28 | 2 | 6 |
| 129 | 0 | 727.20 | 25.15 | 40.74 | -0.18 | 197.99 | 2 | 6 |
| 130 | 0 | 734.41 | 21.90 | 41.24 | -0.34 | 334.56 | 2 | 6 |
| 131 | 0 | 1071.00 | 32.24 | 310.20 | -0.91 | 197.99 | 2 | 6 |
| 132 | 0 | 1064.72 | 27.15 | 322.13 | -0.35 | 169.71 | 2 | 6 |
| 133 | 0 | 1081.82 | 32.66 | 318.63 | -0.94 | 226.27 | 2 | 6 |
| 134 | 0 | 1363.15 | 21.24 | 19.43 | 0.46 | 108.28 | 2 | 4 |
| 135 | 0 | 1371.43 | 15.48 | 15.41 | 0.41 | 80.00 | 2 | 4 |
| 136 | 0 | 1374.18 | 16.92 | 7.72 | 0.08 | 88.28 | 2 | 4 |
| 137 | 0 | 1380.02 | 15.65 | 0.72 | 0.11 | 68.28 | 2 | 4 |
| 138 | 0 | 1388.94 | 33.56 | 105.75 | 1.05 | 0.00 | 2 | 4 |
| 139 | 0 | 1371.10 | 33.87 | 122.10 | 0.86 | 0.00 | 2 | 4 |
| 140 | 0 | 1372.21 | 41.19 | 141.10 | 1.19 | 84.85 | 2 | 4 |
| 141 | 0 | 1272.48 | 43.90 | 124.96 | -0.50 | 282.84 | 2 | 4 |
| 142 | 0 | 1253.02 | 44.37 | 116.57 | -0.40 | 469.71 | 2 | 4 |
| 143 | 0 | 718.92 | 15.79 | 60.23 | 1.02 | 411.13 | 4 | 3 |
| 144 | 0 | 725.43 | 8.69 | 42.12 | 0.50 | 294.56 | 4 | 3 |
| 145 | 0 | 728.87 | 7.29 | 48.95 | 0.20 | 354.56 | 4 | 3 |
| 146 | 0 | 723.41 | 12.34 | 50.26 | 0.12 | 282.84 | 4 | 3 |
| 147 | 0 | 1092.25 | 30.56 | 357.05 | 2.36 | 20.00 | 2 | 4 |
| 148 | 0 | 1090.62 | 33.37 | 9.31 | 1.27 | 60.00 | 2 | 4 |
| 149 | 0 | 1100.55 | 31.56 | 8.28 | 0.66 | 60.00 | 2 | 4 |
| 150 | 0 | 1101.71 | 23.98 | 347.82 | 1.34 | 0.00 | 2 | 4 |
| 151 | 0 | 1044.70 | 36.48 | 253.35 | -0.09 | 108.28 | 2 | 6 |
| 152 | 0 | 1040.91 | 37.17 | 258.74 | -0.28 | 309.71 | 2 | 6 |
| 153 | 0 | 1038.69 | 37.13 | 263.21 | -0.11 | 337.99 | 2 | 6 |
| 154 | 0 | 1055.74 | 32.72 | 257.62 | 0.90 | 289.71 | 2 | 6 |

| | | | | | | | | |
|-----|---|---------|-------|--------|-------|--------|---|---|
| 155 | 0 | 804.56 | 31.43 | 22.97 | -0.54 | 20.00 | 2 | 6 |
| 156 | 0 | 809.22 | 30.79 | 13.58 | 0.38 | 120.00 | 2 | 6 |
| 157 | 0 | 835.26 | 33.73 | 8.86 | 1.23 | 80.00 | 2 | 6 |
| 158 | 0 | 830.82 | 36.61 | 19.62 | 0.24 | 0.00 | 2 | 6 |
| 159 | 0 | 796.06 | 17.75 | 141.32 | 0.28 | 28.28 | 2 | 6 |
| 160 | 0 | 799.40 | 18.04 | 156.16 | 0.34 | 0.00 | 2 | 6 |
| 161 | 0 | 801.56 | 23.04 | 169.77 | -1.07 | 100.00 | 2 | 6 |
| 162 | 0 | 794.68 | 15.26 | 172.69 | -0.18 | 60.00 | 2 | 6 |
| 163 | 0 | 793.82 | 15.58 | 159.42 | 0.28 | 0.00 | 2 | 6 |
| 164 | 0 | 689.70 | 31.36 | 302.28 | -0.98 | 28.28 | 5 | 7 |
| 165 | 0 | 686.77 | 26.14 | 303.80 | -0.70 | 28.28 | 5 | 7 |
| 166 | 0 | 697.34 | 27.24 | 297.72 | -0.22 | 0.00 | 5 | 7 |
| 167 | 0 | 702.18 | 32.25 | 295.09 | -0.68 | 0.00 | 5 | 7 |
| 168 | 0 | 1058.12 | 35.98 | 4.25 | 0.85 | 229.71 | 5 | 9 |
| 169 | 0 | 1055.73 | 28.86 | 9.11 | 1.19 | 20.00 | 5 | 9 |
| 170 | 0 | 1070.88 | 30.10 | 15.40 | 0.75 | 209.71 | 5 | 9 |
| 171 | 0 | 1075.81 | 24.17 | 27.24 | -0.03 | 113.14 | 5 | 9 |
| 172 | 0 | 1061.50 | 21.75 | 15.46 | -0.29 | 322.84 | 5 | 9 |
| 173 | 0 | 704.71 | 20.33 | 74.13 | 0.78 | 0.00 | 5 | 9 |
| 174 | 0 | 712.09 | 16.40 | 73.93 | 0.06 | 120.00 | 5 | 9 |
| 175 | 0 | 713.63 | 16.18 | 75.88 | 0.05 | 140.00 | 5 | 9 |
| 176 | 0 | 708.03 | 18.34 | 74.31 | 0.46 | 160.00 | 5 | 9 |
| 177 | 0 | 698.28 | 27.11 | 77.66 | 0.93 | 160.00 | 5 | 9 |
| 178 | 0 | 782.11 | 27.49 | 267.31 | 0.26 | 40.00 | 5 | 9 |
| 179 | 0 | 794.08 | 10.88 | 340.08 | 1.19 | 0.00 | 5 | 9 |
| 180 | 0 | 800.76 | 18.56 | 304.45 | 0.73 | 28.28 | 5 | 9 |
| 181 | 0 | 884.23 | 19.96 | 289.80 | 0.06 | 0.00 | 5 | 8 |
| 182 | 0 | 879.52 | 20.41 | 280.86 | 0.46 | 136.57 | 5 | 8 |
| 183 | 0 | 887.92 | 22.38 | 281.73 | -0.07 | 124.85 | 5 | 8 |
| 184 | 0 | 886.33 | 20.12 | 284.24 | 0.07 | 116.57 | 5 | 8 |
| 185 | 0 | 716.11 | 25.29 | 22.25 | 0.62 | 0.00 | 5 | 9 |
| 186 | 0 | 739.77 | 23.50 | 10.15 | 0.82 | 180.00 | 5 | 9 |
| 187 | 0 | 744.58 | 21.58 | 25.17 | 0.37 | 0.00 | 5 | 8 |
| 188 | 0 | 740.61 | 23.10 | 27.98 | 0.12 | 28.28 | 5 | 8 |
| 189 | 0 | 728.00 | 26.21 | 29.07 | 0.06 | 56.57 | 5 | 8 |
| 190 | 0 | 549.84 | 40.36 | 53.25 | 0.24 | 141.42 | 5 | 9 |
| 191 | 0 | 539.96 | 38.90 | 54.07 | 0.18 | 169.71 | 5 | 9 |
| 192 | 0 | 526.19 | 40.97 | 58.92 | 0.39 | 169.71 | 5 | 9 |
| 193 | 0 | 571.14 | 42.16 | 54.97 | 0.66 | 84.85 | 5 | 9 |
| 194 | 0 | 594.94 | 38.31 | 76.60 | 1.69 | 20.00 | 5 | 9 |

| | | | | | | | | |
|-----|---|---------|-------|--------|-------|--------|---|---|
| 195 | 0 | 641.09 | 46.09 | 84.57 | 0.27 | 320.00 | 5 | 9 |
| 196 | 0 | 683.56 | 43.95 | 83.23 | 0.27 | 260.00 | 5 | 8 |
| 197 | 0 | 686.16 | 44.02 | 82.36 | 0.45 | 240.00 | 5 | 8 |
| 198 | 0 | 665.87 | 46.81 | 84.45 | 0.39 | 260.00 | 5 | 9 |
| 199 | 0 | 667.23 | 36.14 | 90.10 | 0.51 | 280.00 | 5 | 9 |
| 200 | 0 | 652.70 | 32.80 | 98.04 | 0.44 | 60.00 | 5 | 9 |
| 201 | 0 | 662.15 | 34.35 | 108.37 | 0.22 | 268.28 | 5 | 9 |
| 202 | 0 | 1163.48 | 32.28 | 224.14 | -0.21 | 197.99 | 5 | 7 |
| 203 | 0 | 1145.96 | 33.05 | 227.56 | -0.03 | 246.27 | 5 | 7 |
| 204 | 0 | 1148.35 | 34.38 | 228.23 | 0.06 | 226.27 | 5 | 7 |
| 205 | 0 | 1165.81 | 33.68 | 230.79 | -0.04 | 197.99 | 5 | 7 |
| 206 | 0 | 1176.43 | 34.55 | 231.78 | 0.01 | 197.99 | 5 | 7 |
| 207 | 0 | 1158.58 | 34.74 | 227.97 | 0.03 | 246.27 | 5 | 7 |
| 208 | 0 | 820.37 | 10.55 | 206.93 | -0.32 | 189.71 | 1 | 1 |
| 209 | 0 | 824.37 | 11.74 | 210.98 | -0.06 | 84.85 | 1 | 1 |
| 210 | 0 | 817.05 | 12.87 | 205.03 | 0.21 | 141.42 | 1 | 1 |
| 211 | 0 | 814.61 | 15.12 | 202.30 | 0.26 | 133.14 | 1 | 1 |
| 212 | 0 | 820.50 | 12.40 | 207.23 | -0.32 | 104.85 | 1 | 1 |
| 213 | 0 | 1281.05 | 27.05 | 243.87 | 1.03 | 141.42 | 5 | 7 |
| 214 | 0 | 1247.04 | 41.43 | 240.67 | -0.20 | 197.99 | 5 | 7 |
| 215 | 0 | 1260.05 | 40.37 | 235.20 | 0.88 | 56.57 | 5 | 7 |
| 216 | 0 | 1269.67 | 37.14 | 238.64 | 1.87 | 193.14 | 5 | 7 |
| 217 | 0 | 937.25 | 41.02 | 239.63 | 0.34 | 84.85 | 5 | 9 |
| 218 | 0 | 896.89 | 43.70 | 241.05 | 0.38 | 311.13 | 5 | 9 |
| 219 | 0 | 896.47 | 40.45 | 244.92 | 0.34 | 197.99 | 5 | 7 |
| 220 | 0 | 918.97 | 39.88 | 238.50 | 0.10 | 169.71 | 5 | 9 |
| 221 | 0 | 988.84 | 11.47 | 350.92 | -0.25 | 334.56 | 5 | 8 |
| 222 | 0 | 985.14 | 15.08 | 13.24 | -0.22 | 68.28 | 5 | 8 |
| 223 | 0 | 995.65 | 17.96 | 29.07 | -0.40 | 28.28 | 5 | 8 |
| 224 | 0 | 993.11 | 13.43 | 20.62 | -0.52 | 331.13 | 5 | 8 |
| 225 | 0 | 739.72 | 21.27 | 352.06 | 0.82 | 20.00 | 5 | 8 |
| 226 | 0 | 730.33 | 25.14 | 358.00 | -0.36 | 88.28 | 5 | 8 |
| 227 | 0 | 748.61 | 21.46 | 346.98 | 0.54 | 48.28 | 5 | 8 |
| 228 | 0 | 988.86 | 19.27 | 176.59 | -0.31 | 76.57 | 3 | 2 |
| 229 | 0 | 993.48 | 5.40 | 161.52 | 0.41 | 0.00 | 3 | 2 |
| 230 | 0 | 992.10 | 4.55 | 209.39 | 0.51 | 0.00 | 3 | 2 |
| 231 | 0 | 987.29 | 13.11 | 217.89 | 0.16 | 28.28 | 3 | 2 |
| 232 | 0 | 1060.27 | 38.41 | 319.75 | -0.30 | 113.14 | 5 | 8 |
| 233 | 0 | 1040.16 | 36.68 | 320.12 | -0.48 | 181.42 | 5 | 8 |
| 234 | 0 | 1066.05 | 41.99 | 328.24 | -1.08 | 113.14 | 5 | 8 |

| | | | | | | | | |
|-----|---|---------|-------|--------|-------|--------|---|---|
| 235 | 0 | 906.21 | 28.47 | 235.53 | 0.36 | 113.14 | 5 | 8 |
| 236 | 0 | 906.21 | 28.47 | 235.53 | 0.36 | 113.14 | 5 | 8 |
| 237 | 0 | 863.00 | 36.27 | 198.15 | -1.17 | 180.00 | 5 | 8 |
| 238 | 0 | 845.58 | 34.34 | 204.12 | -0.50 | 208.28 | 5 | 8 |
| 239 | 0 | 848.27 | 27.94 | 220.58 | -0.27 | 321.42 | 5 | 8 |
| 240 | 0 | 867.79 | 35.80 | 203.48 | -1.61 | 333.14 | 5 | 8 |
| 241 | 0 | 837.88 | 44.11 | 130.02 | 0.27 | 84.85 | 5 | 8 |
| 242 | 0 | 867.05 | 41.76 | 135.15 | 0.53 | 226.27 | 5 | 8 |
| 243 | 0 | 840.18 | 43.09 | 132.95 | -0.36 | 226.27 | 5 | 8 |
| 244 | 0 | 853.94 | 43.71 | 134.20 | 0.64 | 282.84 | 5 | 8 |
| 245 | 0 | 826.28 | 41.87 | 132.69 | -0.93 | 254.56 | 5 | 8 |
| 246 | 0 | 830.05 | 19.60 | 314.22 | -0.02 | 395.98 | 5 | 8 |
| 247 | 0 | 818.79 | 18.49 | 301.06 | 0.52 | 0.00 | 5 | 8 |
| 248 | 0 | 828.90 | 24.23 | 301.13 | -0.67 | 301.42 | 5 | 8 |
| 249 | 0 | 815.59 | 17.63 | 297.58 | -0.21 | 141.42 | 5 | 8 |
| 250 | 0 | 829.71 | 19.95 | 310.23 | 0.02 | 564.26 | 5 | 8 |
| 251 | 0 | 1078.56 | 37.52 | 51.21 | 0.47 | 84.85 | 3 | 2 |
| 252 | 0 | 1079.26 | 36.61 | 40.86 | 0.67 | 124.85 | 3 | 2 |
| 253 | 0 | 1106.60 | 30.00 | 26.76 | 1.32 | 0.00 | 3 | 2 |
| 254 | 0 | 1117.97 | 29.83 | 42.50 | 0.87 | 28.28 | 3 | 2 |
| 255 | 0 | 1099.56 | 33.43 | 38.55 | 1.01 | 96.57 | 3 | 2 |
| 256 | 0 | 1108.65 | 34.32 | 50.05 | 0.65 | 56.57 | 3 | 2 |
| 257 | 0 | 1171.48 | 45.33 | 212.11 | 0.43 | 56.57 | 5 | 9 |
| 258 | 0 | 1128.70 | 49.89 | 215.69 | 0.34 | 113.14 | 5 | 9 |
| 259 | 0 | 1109.50 | 50.45 | 217.16 | 0.43 | 113.14 | 5 | 9 |
| 260 | 0 | 1090.29 | 50.90 | 218.34 | 0.60 | 141.42 | 5 | 9 |
| 261 | 0 | 1135.90 | 47.49 | 213.00 | 0.42 | 84.85 | 5 | 9 |
| 262 | 0 | 1126.78 | 24.32 | 16.95 | -1.87 | 193.14 | 5 | 8 |
| 263 | 0 | 1144.02 | 21.51 | 28.99 | -0.22 | 56.57 | 5 | 8 |
| 264 | 0 | 1153.20 | 22.91 | 320.47 | -0.33 | 28.28 | 5 | 8 |
| 265 | 0 | 1134.97 | 19.70 | 334.37 | -0.98 | 156.57 | 5 | 8 |
| 266 | 0 | 1156.06 | 30.84 | 299.15 | -0.85 | 124.85 | 5 | 8 |
| 267 | 0 | 1276.76 | 32.27 | 181.08 | 1.03 | 184.85 | 3 | 2 |
| 268 | 0 | 1272.97 | 37.75 | 194.75 | 1.04 | 136.57 | 3 | 2 |
| 269 | 0 | 1243.74 | 32.68 | 203.78 | -0.54 | 0.00 | 3 | 8 |
| 270 | 0 | 1250.27 | 29.67 | 187.21 | -0.24 | 224.85 | 3 | 2 |
| 271 | 0 | 1175.54 | 37.42 | 148.21 | 0.31 | 113.14 | 5 | 8 |
| 272 | 0 | 1176.93 | 37.12 | 155.80 | 0.52 | 0.00 | 5 | 8 |
| 273 | 0 | 1142.02 | 38.03 | 151.19 | 0.18 | 28.28 | 5 | 8 |
| 274 | 0 | 1139.44 | 39.44 | 150.53 | -0.18 | 141.42 | 5 | 8 |

| | | | | | | | | |
|-----|---|--------|-------|--------|-------|---------|---|---|
| 275 | 0 | 892.55 | 12.01 | 130.03 | -0.22 | 1115.39 | 5 | 9 |
| 276 | 0 | 896.90 | 5.64 | 144.80 | -0.17 | 1087.11 | 5 | 9 |
| 277 | 0 | 895.93 | 10.50 | 159.38 | 0.04 | 466.27 | 5 | 9 |

2. Resultados de pruebas de límites de consistencia.

| Muestra | Prueba 1LL | Prueba 2 LL | Prueba 3 LL | Limite. Plástico | Limite. Líquido |
|--------------------|------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|
| S19H2 | | | | 5.90857239 | 27.6428452 |
| Penetración | 14.2666667 | 24.8666667 | 25.7 | | |
| Msh+c | 107.54 | 126.16 | 144.4 | | |
| Mss+c | 88.49 | 98.71 | 104.29 | | |
| Mc | 3.47 | 3.56 | 3.48 | | |
| Mh | 19.05 | 27.45 | 40.11 | | |
| Mss | 85.02 | 95.15 | 100.81 | | |
| %Cont.h | 22.4064926 | 28.8491855 | 39.7877195 | | |
| S19H1 | | | | 42.7504272 | 59.0251444 |
| Penetración | 11.2666667 | 17.1 | 25.8 | | |
| Msh+c | 94.42 | 110.58 | 121.3 | | |
| Mss+c | 63.04 | 72.32 | 75.3 | | |
| Mc | 3.48 | 3.54 | 3.44 | | |
| Mh | 31.38 | 38.26 | 46 | | |
| Mss | 59.56 | 68.78 | 71.86 | | |
| %Cont. h | 52.6863667 | 55.6266356 | 64.0133593 | | |
| S16H1 | | | | 23.0817503 | 40.0424016 |
| Penetración | 7.63333333 | 10.9666667 | 25.1666667 | | |
| Msh+c | 93.34 | 104.72 | 129.45 | | |
| Mss+c | 78.75 | 84.03 | 98.77 | | |
| Mc | 26.56 | 26.47 | 26.52 | | |
| Mh | 14.59 | 20.69 | 30.68 | | |
| Mss | 52.19 | 57.56 | 72.25 | | |
| %Cont.h | 27.955547 | 35.9451008 | 42.4636678 | | |
| S15H2 | | | | 29.5657931 | 43.5050181 |
| Penetración | 11.4 | 16.6 | 20.5333333 | | |
| Msh+c | 94.93 | 101.3 | 108.73 | | |
| Mss+c | 70.08 | 72.46 | 76.9 | | |
| Mc | 3.52 | 3.5 | 3.5 | | |
| Mh | 24.85 | 28.84 | 31.83 | | |
| Mss | 66.56 | 68.96 | 73.4 | | |
| %Ch | 37.3347356 | 41.8213457 | 43.3651226 | | |
| S15H1 | | | | 84.0883306 | 124.606969 |
| Penetración | 15.4 | 20.8 | 24.1333333 | | |
| Msh+c | 89.02 | 100.64 | 107 | | |
| Mss+c | 42.56 | 47.31 | 47.76 | | |
| Mc | 3.43 | 3.55 | 3.51 | | |

| | | | |
|-----|-----------|------------|------------|
| Mh | 46.46 | 53.33 | 59.24 |
| Mss | 39.13 | 43.76 | 44.25 |
| %Ch | 118.73243 | 121.869287 | 133.875706 |

S14H2

49.3880649 72.7443653

| | | | |
|-------------|------------|------------|-----------|
| Penetración | 17.4 | 21.6666667 | 24.5 |
| Msh+c | 109.63 | 115.37 | 129.69 |
| Mss+c | 65.49 | 68.23 | 74.22 |
| Mc | 3.44 | 3.51 | 3.5 |
| Mh | 44.14 | 47.14 | 55.47 |
| Mss | 62.05 | 64.72 | 70.72 |
| %Ch | 71.1361805 | 72.8368356 | 78.436086 |

S14H1

40.5233941 38.778747

| | | | |
|-------------|------------|------------|------------|
| Penetración | 17.4666667 | 20.8333333 | 22.9333333 |
| Msh+c | 127.27 | 132.3 | 146.52 |
| Mss+c | 96.2 | 97.94 | 98.01 |
| Mc | 3.51 | 3.5 | 3.5 |
| Mh | 31.07 | 34.36 | 48.51 |
| Mss | 92.69 | 94.44 | 94.51 |
| %Ch | 33.5203366 | 36.3828886 | 51.3279018 |

S13H2

18.4817368 47.8201555

| | | | |
|-------------|------------|------------|------------|
| Penetración | 12.9333333 | 17.1666667 | 20.7666667 |
| Msh+c | 92.85 | 102.1 | 116.32 |
| Mss+c | 67.74 | 73.17 | 78.99 |
| Mc | 3.5 | 3.51 | 3.5 |
| Mh | 25.11 | 28.93 | 37.33 |
| Mss | 64.24 | 69.66 | 75.49 |
| %Ch | 39.0877958 | 41.53029 | 49.4502583 |

S13H1

18.7489469 74.9129458

| | | | |
|-------------|------------|------------|------------|
| Penetración | 7.7333333 | 13.4666667 | 20.5333333 |
| Msh+c | 111.05 | 142.53 | 155.56 |
| Mss+c | 76.96 | 96.27 | 89.33 |
| Mc | 3.51 | 3.52 | 3.51 |
| Mh | 34.09 | 46.26 | 66.23 |
| Mss | 73.45 | 92.75 | 85.82 |
| %Ch | 46.4125255 | 49.8760108 | 77.1731531 |

S11H1

33 33.6005933

| | | | |
|-------------|------------|------------|------------|
| Penetración | 11.1666667 | 17.0333333 | 20.6333333 |
| Msh+c | 193.91 | 214.8 | 225.14 |
| Mss+c | 145.55 | 165.4 | 175.03 |
| Mc | 26.58 | 25.41 | 25.82 |
| Mh | 48.36 | 49.4 | 50.11 |
| Mss | 118.97 | 139.99 | 149.21 |
| %Ch | 40.6489031 | 35.2882349 | 33.58354 |

S10H2

49.8536198 59.7777006

| | | | |
|-------------|-----------|------------|------------|
| Penetración | 7.1666667 | 16.2666667 | 27.5333333 |
|-------------|-----------|------------|------------|

| | | | |
|--------------|------------|------------|-----------|
| Msh+c | 113.69 | 118.07 | 134.53 |
| Mss+c | 83.29 | 84.2 | 92.58 |
| Mc | 26.53 | 25.47 | 26.64 |
| Mh | 30.4 | 33.87 | 41.95 |
| Mss | 56.76 | 58.73 | 65.94 |
| %Ch | 53.5588443 | 57.6706964 | 63.618441 |

S10H1

33.0072254 61.9089595

| | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|
| Penetración | 15.4666667 | 23.4 | 28.9 |
| Msh+c | 96.21 | 103.86 | 110.14 |
| Mss+c | 62.94 | 64.22 | 64.31 |
| Mc | 3.63 | 3.61 | 3.57 |
| Mh | 33.27 | 39.64 | 45.83 |
| Mss | 59.31 | 60.61 | 60.74 |
| %Ch | 56.0950936 | 65.4017489 | 75.4527494 |

S9H2

28.8431928 38.7771321

| | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|
| Penetración | 8.6666667 | 12.9333333 | 25.6 |
| Msh+c | 91.74 | 108.99 | 130.41 |
| Mss+c | 68.6 | 82.5 | 93.56 |
| Mc | 3.52 | 3.48 | 3.45 |
| Mh | 23.14 | 26.49 | 36.85 |
| Mss | 65.08 | 79.02 | 90.11 |
| %Ch | 35.5562385 | 33.5231587 | 40.8944623 |

S9H1

39.9775281 55.4753971

| | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|
| Penetración | 8 | 23.0333333 | 29.5 |
| Msh+c | 123.48 | 136.52 | 152.21 |
| Mss+c | 84.74 | 89.29 | 94.14 |
| Mc | 3.52 | 3.52 | 3.52 |
| Mh | 38.74 | 47.23 | 58.07 |
| Mss | 81.22 | 85.77 | 90.62 |
| %Ch | 47.6976114 | 55.0658738 | 64.0807769 |

S8H2

31.6750943 47.727747

| | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|
| Penetración | 8.4666667 | 12.6666667 | 33.5 |
| Msh+c | 157.13 | 155.18 | 175.21 |
| Mss+c | 116.31 | 106.59 | 113.86 |
| Mc | 3.45 | 3.48 | 3.48 |
| Mh | 40.82 | 48.59 | 61.35 |
| Mss | 112.86 | 103.11 | 110.38 |
| %Ch | 36.1687046 | 47.1244302 | 55.5807211 |

S8H1

35.0354656 48.0503677

| | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|
| Penetración | 13.1666667 | 24.3 | 30.6333333 |
| Msh+c | 147.57 | 172.48 | 189.16 |
| Mss+c | 101.91 | 113.72 | 127.54 |
| Mc | 3.53 | 3.56 | 3.48 |
| Mh | 45.66 | 58.76 | 61.62 |
| Mss | 98.38 | 110.16 | 124.06 |
| %Ch | 46.4118723 | 53.3405955 | 49.6695148 |

| | | | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|
| S7H2 | | | | 51.7622152 | 54.8083953 |
| Penetración | 19.1666667 | 23.8333333 | 33.1666667 | | |
| Msh+c | 167.07 | 172.69 | 187.69 | | |
| Mss+c | 109.26 | 112.38 | 120.97 | | |
| Mc | 3.53 | 3.52 | 3.53 | | |
| Mh | 57.81 | 60.31 | 66.72 | | |
| Mss | 105.73 | 108.86 | 117.44 | | |
| %Ch | 54.6770075 | 55.401433 | 56.8119891 | | |

| | | | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|-------------------|------------------|
| S7H1 | | | | 7.48929978 | 41.730012 |
| Penetración | 9.83333333 | 16.2333333 | 31.4333333 | | |
| Msh+c | 122.9 | 135.87 | 164.2 | | |
| Mss+c | 97.76 | 103.45 | 102.86 | | |
| Mc | 3.53 | 3.57 | 3.55 | | |
| Mh | 25.14 | 32.42 | 61.34 | | |
| Mss | 94.23 | 99.88 | 99.31 | | |
| %Ch | 26.6794015 | 32.4589507 | 61.7661867 | | |

| | | | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|
| S6H2 | | | | 42.8349382 | 57.9990902 |
| Penetración | 6.66666667 | 21.5666667 | 31.1666667 | | |
| Msh+c | 121.8 | 141.35 | 166.82 | | |
| Mss+c | 83.36 | 88.06 | 104.53 | | |
| Mc | 3.84 | 3.92 | 3.84 | | |
| Mh | 38.44 | 53.29 | 62.29 | | |
| Mss | 79.52 | 84.14 | 100.69 | | |
| %Ch | 48.3400402 | 63.334918 | 61.8631443 | | |

| | | | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|
| S6H1 | | | | 48.3619385 | 53.4929064 |
| Penetración | 8.5 | 23.3 | 29.8 | | |
| Msh+c | 116.26 | 137.9 | 144.73 | | |
| Mss+c | 78.53 | 90.64 | 94.2 | | |
| Mc | 3.83 | 3.87 | 3.83 | | |
| Mh | 37.73 | 47.26 | 50.53 | | |
| Mss | 74.7 | 86.77 | 90.37 | | |
| %Ch | 50.5087015 | 54.4658292 | 55.9145734 | | |

| | | | | | |
|-------------------|------------|------------|-----------|-------------------|-------------------|
| S4H3 | | | | 35.4764814 | 50.7483201 |
| 8.76666667 | 15.3 | 30.5333333 | | | |
| Msh+c | 77.27 | 101.82 | 118.1 | | |
| Mss+c | 55.58 | 69.95 | 75.82 | | |
| Mc | 3.52 | 3.51 | 3.53 | | |
| Mh | 21.69 | 31.87 | 42.28 | | |
| Mss | 52.06 | 66.44 | 72.29 | | |
| %Ch | 41.6634652 | 47.9680915 | 58.486651 | | |

| | | | | | |
|-------------------|-------|------------|-------|-------------------|-------------------|
| S4H2 | | | | 39.4461346 | 55.0479757 |
| 5.16666667 | 21.7 | 29.0666667 | | | |
| Msh+c | 66.29 | 91.62 | 95.21 | | |
| Mss+c | 47.37 | 59.39 | 60.58 | | |
| Mc | 3.6 | 3.59 | 3.8 | | |

| | | | |
|-----|------------|------------|------------|
| Mh | 18.92 | 32.23 | 34.63 |
| Mss | 43.77 | 55.8 | 56.78 |
| %Ch | 43.2259538 | 57.7598566 | 60.9897851 |

S4H1 46.5205385 69.5328501

| | | | |
|--------------------|------------|-----------|-------------|
| Penetración | 7.73333333 | 18.5 | 25.13333333 |
| Msh+c | 47.48 | 82.87 | 85.51 |
| Mss+c | 31.03 | 52.34 | 50.02 |
| Mc | 3.53 | 3.52 | 3.51 |
| Mh | 16.45 | 30.53 | 35.49 |
| Mss | 27.5 | 48.82 | 46.51 |
| %Ch | 59.8181818 | 62.535846 | 76.3061707 |

S2H4 8.84958124 42.3504188

| | | | |
|--------------------|------------|------------|-------------|
| Penetración | 7.96666667 | 19.2666667 | 27.83333333 |
| Msh+c | 97.01 | 87.24 | 116.86 |
| Mss+c | 77.02 | 65.78 | 75.68 |
| Mc | 3.58 | 3.54 | 3.54 |
| Mh | 19.99 | 21.46 | 41.18 |
| Mss | 73.44 | 62.24 | 72.14 |
| %Ch | 27.2194989 | 34.4794344 | 57.0834488 |

S2H3 38.7117396 43.8259135

| | | | |
|--------------------|------------|------------|-------------|
| Penetración | 13.3666667 | 19.7666667 | 28.83333333 |
| Msh+c | 85.03 | 87.33 | 91.72 |
| Mss+c | 60.91 | 62.04 | 63.94 |
| Mc | 3.93 | 3.87 | 3.77 |
| Mh | 24.12 | 25.29 | 27.78 |
| Mss | 56.98 | 58.17 | 60.17 |
| %Ch | 42.3306423 | 43.4760186 | 46.1691873 |

S2H2 80.7014141 43.8259135

| | | | |
|------------|------------|------------|------------|
| 5.96666667 | 17.4666667 | 35.1666667 | |
| Msh+c | 85.61 | 87.33 | 91.72 |
| Mss+c | 48.51 | 49.21 | 50.49 |
| Mc | 3.52 | 3.48 | 3.45 |
| Mh | 37.1 | 38.12 | 41.23 |
| Mss | 44.99 | 45.73 | 47.04 |
| %Ch | 82.4627695 | 83.3588454 | 87.6488095 |

S2H1 39.6975764 60.772392

| | | | |
|--------------------|------------|-------------|------------|
| Penetración | 12.3666667 | 21.83333333 | 27.6666667 |
| Msh+c | 74.43 | 108.91 | 128.7 |
| Mss+c | 49.59 | 69.4 | 77.33 |
| Mc | 3.83 | 3.76 | 3.74 |
| Mh | 24.84 | 39.51 | 51.37 |
| Mss | 45.76 | 65.64 | 73.59 |
| %Ch | 54.2832168 | 60.1919561 | 69.8056801 |

S1H1 43.4596634 55.0673244

| | | | |
|--------------------|------------|-------------|----|
| Penetración | 7.23333333 | 17.83333333 | 30 |
|--------------------|------------|-------------|----|

| | | | |
|--------------|------------|------------|-----------|
| Msh+c | 101.71 | 103.91 | 117.32 |
| Mss+c | 70.22 | 68.54 | 74.52 |
| Mc | 3.65 | 3.77 | 3.69 |
| Mh | 31.49 | 35.37 | 42.8 |
| Mss | 66.57 | 64.77 | 70.83 |
| %Ch | 47.3035902 | 54.6086151 | 60.426373 |

| | | | | |
|--------------------|------------|------------|-------------------|-------------------|
| S5H1 | | | 29.5464444 | 37.9056035 |
| Penetración | 8.03333333 | 18.5333333 | 28.8 | |
| Msh+c | 93.91 | 146.74 | 149.42 | |
| Mss+c | 76.86 | 114.94 | 113.11 | |
| Mc | 26.56 | 26.47 | 26.52 | |
| Mh | 17.05 | 31.8 | 36.31 | |
| Mss | 50.3 | 88.47 | 86.59 | |
| %Ch | 33.8966203 | 35.9443879 | 41.9332486 | |

REFERENCIAS.

Alcántara-Ayala, I., 2000. Landslide: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Universidad Nacional Autónoma de México: Boletín del Instituto de Geografía, 41:7-25.

Alcántara-Ayala, I., 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4): 107-124.

Alcántara-Ayala, I., 2004. Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in México: *Geomorphology*, 61(1-2):19-40.

Alcántara-Ayala, I., Esteban-Chávez, O., Parrot, J.F., 2006. Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, México. *Catena*, 65(5): 152-165.

Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V.H., Canuti, P., Casaglie, N., Iotti, A., Chiesa, S., 2002. Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(2):91-106.

Balam y Caché, J.L., 1992. Informe geológico final estudio San Carlos. IGRP-004. Petróleos Mexicanos (inédito).

Barton, N., 1974. Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, 7: 287-332.

Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley, New York, 251 p.

Bitrán, D., 2000. Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana, durante 1999. Centro Nacional de Prevención de Desastres, cuadernos de investigación, 50, 194 p.

Borja-Baeza, R., 2003. Análisis de susceptibilidad y riesgo asociado a procesos de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis de licenciatura, 154 p.

Brabb, E.E., 1984. Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. Fourth International Symposium on Landslides, Canadian Geotechnical Society, 1:307-324.

Brunsden, D., Chandler, J., 1984. Mudslides in slope instability. D., Brunsden and D.B. Prior Ed., Wiley, Chichester, 363-418 p.

Burrough, P.A., 1986. *Principles of geographical information systems and land resources assessment*. Clarendon press, Oxford, England, 194 p.

Caballero, L., Macías, J.L., García-Palomo, A., Saucedo, R., Borselli, L., Sarocchi, D., Sánchez, J.M., 2006. The September 8–9, 1998 Rain-Triggered Flood Events at Motozintla, Chiapas, Mexico. *Natural Hazards*, 39(1): 103-126.

Campbell, D.J., 1976. Plastic limit determination using a drop-cone penetrometer. *European Journal of Soil Science*, 27(3):295-300.

Cantú-Chapa, A., 1969. Estratigrafía del Jurásico Medio-Superior del subsuelo de Poza Rica, Ver, (área Soledad-Miquetla): *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, 1(1): 3-9.

Capra, L., Lugo-Hubp, J., Borselli, L., 2003. Mass movements in tropical volcanic terrains: the case of Teziutlán (México). *Engineering Geology*, 69: 359-379.

Capra, L., Lugo-Hubp, J., Dávila-Hernández, N., 2003₂. 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.

Capra, L., Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J., 2006. La importancia de la geología en el estudio de los procesos remoción en masa: el caso de Totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, numero especial de geología urbana, LVII, 2: 205-214.

Carrara, A. 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15(3):403-427.

Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Paqui, V., Reich, P., 1991. GIS techniques models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16:427-445.

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti., 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC journal*, (2):172-183.

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 1995. GIS based techniques for mapping landslide hazard. (<http://deis158.deis.unibo.it>).

Carrara, A., Crosta, G., Frattini, P., 2003. Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28:1125-1142.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 1996. Inestabilidad de laderas: Secretaría de Gobernación, México, Serie de fascículos, 36 p.

Clerici, A., Perego, S., Telli, C., Vescovi, P., 2002. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, 48:349-364.

Comisión Federal de Electricidad (CFE), 1985. Comportamiento de presas construidas en México, Vol. 2 (1974-1984): XV Congreso Internacional de Grandes Presas, CFE, México.

Comisión Nacional del Agua (CNA), 1999. Situación Hidroclimatológica en la zona norte de los estados de Hidalgo, Puebla y Veracruz, los primeros días de Octubre de 1999. Reporte interno de la subdirección técnica de CNA.

Comisión Nacional del Agua (CNA), 2000. Evaluación de daños por inundaciones. Reporte interno gerencia de CNA, I.

Cruz, M., Delgado, L., 2000. Los deslizamientos de la carretera Tijuana-Ensenada, Baja California. *GEOS, Unión Geofísica Mexicana*, 418-431 p.

Cuanalo-Campos, O., 2004. Metodología para la selección de procesos constructivos empleados en estabilizar deslizamientos de laderas: Las Villas, Cuba, Universidad Central Marta Abreu, tesis doctoral, 162 p.

Dai, F., Lee, C., 2002. Landslide characteristic and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong, *Geomorphology*, 42: 213-228.

Dávila-Hernández, N., 2003. Zonificación del peligro por procesos de remoción en masa con base en la aplicación de un análisis estadístico multivariado condicional: la barranca El Calvario, Teziutlán, Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis de licenciatura, 116 p.

Deere, D.V., Patton, A.D., 1971. Slope stability in residual soils. American Society of civil engineers, fourth panamerican conference on soil mechanics and foundation engineering, Puerto Rico, 1:87-170.

Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L., Ibsen, M.L., 1996. Landslide recognition identification, movement and causes, John Wiley & Sons, 251 pp.

Erben, H.K., 1956. El Jurásico medio y el Calloviano de México, en XX Congreso Geológico Internacional: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 140 p.

Facultad de Ingeniería- UNAM, 1996. Estudio geológico Coxquihui, informe final inédito, IGRVER-96/4-1, 258 p.

Facultad de Ingeniería- UNAM, 1999. Estudio geológico Tatatila (011999), informe final inédito, 298 p.

FAO-UNESCO, 1988-1990. Soil map of the World, revised legend: Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. WRS, report 60, 1:5 000 000, map and text, 119 p.

Ferrer, M., 1994. Inestabilidad de taludes y laderas: factores condicionantes y desencadenantes. Madrid. Ingeopress. 22: 20-25.

Ferriz, H., Mahood, G. A., 1984. Eruption rates and compositional trends at Los Humeros volcanic center, Puebla, México: Journal of Geophysical Research, B89, 8511-8524.

Flores-Lorenzo, P., 2002. Inestabilidad de las laderas y riesgos asociados en Teziutlán, Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis de licenciatura, 120 p.

Flores-Lorenzo, P., Alcántara-Ayala, I., 2002. Cartografía morfogenética e identificación de procesos en Teziutlán, Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Investigaciones Geográficas, 41: 7-25 p.

Folk, R.L., 1974. Petrology of Sedimentary Rocks: Hemphill Publication, 182 p.

García-Herrera, C., 2002. Análisis retrospectivo de un tajo a cielo abierto en una mina. Curso: Estabilidad de taludes en roca: Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas, ponencias practicas.

García-Palomo, A., Carlos-Valerio, V., López-Miguel, C., Galván-García, A., Concha-Dimas, A., 2006. Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the Mexico Basin. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana: número especial de geología urbana, LVIII (2): 195-204.

Gorsevski, P.V., Gessler, P., Foltz, R.B., 2000. Spatial prediction of landslide hazard using discriminant analysis and GIS. GIS in the rockies 2000 conference and workshop applications for the 21st century, Denver, Colorado, September 25-27.

Gorsevski, P.V., 2001. Statistical modeling of landslide hazard using GIS. Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, March 25 to 29, Reno Nevada. XI :103-109.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study. Geomorphology, 31:181-216.

Heim, A., 1926. Notes on the Jurassic of Tamazunchale (Sierra Madre Oriental, México): *Geol Helvetiae*, 20: 84-89.

Hernández-Mena, Z., 2002. Estudio geológico y geotécnico del deslizamiento Zapotitlán de Méndez ubicado en la Sierra Norte del Estado de Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de licenciatura, 97 p.

Herrera, S., Reséndiz, D. Agua Prieta landslide: A case history. *Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*, Volumen Marsal, 293-302 p.

Hoek, E., Bray, J.W., 1981. *Rock slope engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, London, 3 ed, 358 pp.

Hoek, E., Bray, J.W., 1994. Strength of rock and rock masses. *International Society for Rock Mechanics News Journal*, 2(2):4-16.

Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M., 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Aschist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57 (2): 151-160.

Hutchinson, J.N., 1968. Mass movement. *Encyclopedic of earth sciences*, Reinhold, New York, 668-659 p.

Imlay, R., Cepeda, E., Álvarez, M., Díaz, T., 1948. Stratigraphic relations of certain Jurassic Formations in Eastern México: *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, 32(9): 1750-1761.

Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 1998. Génesis, identificación y uso de los suelos de México. Secretaría de Comunicaciones y Transporte: IMT., documento técnico no. 19. 222 p.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1984. Carta geológica Veracruz, F14-3, escala 1: 250,000: México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1984. Cartas topográficas Filomeno Mata F14D84 y Hoja Cuetzalan F14-D85 escala 1:50,000: México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1999. Anuario estadístico del estado de Puebla. INEGI, 746 p.

International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1978. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6): 319-368.

Juárez-Badillo, E., Rico, A.R., 2004. *Mecánica de Suelos*: México, Ed. Rabasa, reimpresión, tomo 1, 275 p.

Keefer, D. K., Wartman, J., Navarro-Ochoa, C., Rodriguez-Maker, A., Wiczorek, G. F., 2006. Landslides caused by the M 7.6 Tecomán, México earthquake of January 21, 2003. *Engineering Geology*, 86: 183-197.

Larsen, M.C., Torres-Sánchez, A.J., 1998. The frequency and distribution of recent landslides in three montane tropical regions of Puerto Rico. *Geomorphology*, 24: 309-331.

Lee, S., 2004. Application of likelihood ratio and logistic regression models to landslide susceptibility mapping using GIS. *Environmental Management*, 34(2):223-232.

López-Mendoza, M., 2003. Diseño de un programa de prevención y mitigación de desastres asociados a inundaciones y procesos de remoción en masa en Zapotitlán de Méndez, Pue: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis de licenciatura, 244 p.

López-Ramos, E., 1979. Geología de México, México, 2da edición escolar, 3 tomos.

Lorente, A., García-Ruiz, J.M., Santiago-Beguería, Arnáez, J., 2002. Factors explaining the spatial distribution of hillslope debris flows. A case study in the flysch sector of the central Spanish Pyrennees. *Mountain Research and Development*, 22(1): 32-39.

Lugo-Hubp, J., 1989. Diccionario Geomorfológico. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, 337 p.

Lugo-Hubp, J., 1990. El Relieve de la República Mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista del Instituto de Geología*. 9(1):82-111.

Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J., Gallegos, G., 1993. Deslizamiento de tierras activo en Metztlán, Hgo: *Geofísica Internacional*, México, 32(1):153-166.

Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J., Salas, O., 1996. Landslide in Metztlán (State of Hidalgo), México-causes and effects, *Z. Geomorph. N.F. Suppl.-bd.* 103, April, 323-243.

Lugo-Hubp, J., Vázquez-Conde, M.T., Melgarejo-Palafox, G., García-Jiménez, F., Matías-Ramírez, G., 2001. Procesos gravitacionales en las montañas de Puebla. *Ciencias y desarrollo*, 27(157): 24-33.

Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J., Capra, L., Inbar., M., Alcántara-Ayala, I., 2005. Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, Octubre de 1999: causas y efectos, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2): 212-228.

Marcos-López, J., 2003. Distribución espacial de los procesos de remoción en masa y riesgos asociados en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis de licenciatura, 151 p.

Morán-Zenteno, D., 1984. Geología de la república mexicana. Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 82 p.

Nagarajan, R., 1998. Debris slides of Varandh ghat, west coast of India. *Bull Eng Geol Env*, 57: 59-63.

Nagarajan, R., Roy, A., Vinod Kumar, R., Mukherjee, A., Khire, M.V., 2000. Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bull Eng Geol Env*, 58: 275-287.

Ochoa-Tejeda, V., 2004. Propuesta metodológica para el estudio de inestabilidad de laderas a partir de los MDT y la percepción remota: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis de maestría, 213 p.

Organización de Estados Americanos (OEA), 1993. Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente y Oficina de Asistencia para Desastres en el Extranjero de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Washington, D.C., www.oas.org/usde/publications

Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1999. Vocabulario meteorológico mundial. VOM/OMM/BMO-No. 182.

Pachauri, A.K., Plant, M., 1992. Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering Geology*, 32:81-100.

Remondo, J., González-Díez, A., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A., 2003. Landslide susceptibility models utilising spatial data analysis techniques. A case study from the lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain). *Natural Hazards*, 30:267-279.

Rendón-Huerta, J., 1993. Aspectos geotécnicos en los túneles de la obra de excedencias del proyecto hidroeléctrico Zimapán, CFE: Memorias, IV Reunión Nacional, Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas, 515-533.

Santacana, N., Baeza Baeza, Corominas, J., De Paz, A., Marturía, J., A GIS-Based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards*, 30:281-295.

Schlichting, E., H.P. Blume 1966. *Bodenkundliches Praktikum*. Verlag Paul Parey, Hamburg & Berlin, Alemania.

Schmidt-Effing, R., 1980. The Huayacocotla Aulacogen in México (lower Jurassic) and the origin of the Mexico: proceeding of a symposium, The origin of the Gulf of Mexico in the Opening of the Central North Atlantic Ocean, 79-86.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), 1999. Estudios geotécnicos de las fallas ocurridas en la carretera interserrana tramo Zacatlán-Zacapoaxtla. Varios tomos inéditos.

Servicio Meteorológico Nacional – Comisión Nacional del Agua (SMN-CNA), 1999. Resumen de ciclones que afectaron al territorio nacional. Temporada 1999. <http://www.cna.org.mx>.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2007. Resumen de ciclones del Atlántico y Pacífico. <http://www.cna.org.mx>.

Sharpe, C:F:S, 1938. *Landslides and related phenomena*. Columbia University Press.

Siebe, C., Jahn, R., Stahr, K. *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. UNAM. Instituto de Geología. 57p.

Soeters, R., Van Westen, C.J., 1996. Slope instability recognition analysis, and zonation. Turner and Schuster Eds, *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board Special Report 176:11-33.

Sowers, G.F., 1981. Características de los suelos residuales. IV Congreso regional de Geotécnia, memorias, Barranquilla, Colombia.

Suárez, J., 1998. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Colombia, 548 p.

Terzaghi, K., Peck, R.B., 1967. *Soil mechanics in engineering practice*. Wiley, International.

Varnes, D.,1958. Landslides types and processes. Special report 29: Landslide and engineering practice, in Eckel, E. B. ed., National Research Council, Washington, 20-47 p.

Varnes, D.,1978. Slope movement types and processes. Special report 176: Landslide: analysis and control, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, 11-33 p.

Varnes, D., 1984. Landslide hazard zonation: review of principles and practice. Natural Hazards. UNESCO Press, Vol. 3, 63 p.

Vázquez-Conde, M.T., Lugo-Hubp, J., Matías, L.G., 2001. Heavy rainfall effects in Mexico during early October 1999. In: E. Grunfest and J. Handmer (Editors), Coping with flash floods. Kluwer Academic Press, Netherlands, pp. 289-299.

Whalley, W.B., 1984. Slope Instability, rockfalls. D., Brunsden and D.B. Prior Ed., Wiley, Chichester, 217-256 p.

Wilzoreck, G., 1987. Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. Geological Society of America, review in engineering geology, 7: 93-103.

Yañez-García, C., García-Durán, S., 1982. Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, Estados de Puebla y Veracruz, Comisión Federal de electricidad, 96 p.