



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

“INESTABILIDAD DE LADERAS EN
TLATLAUQUITEPEC, SIERRA NORTE DE PUEBLA:
ANÁLISIS Y MODELACIÓN EN MATERIALES
SEDIMENTARIOS.”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A :

ROBERTO CARLOS BORJA BAEZA



FACULTAD DE FILOSOFÍA
Y LETRAS

ASESOR: Dra. IRASEMA ALCÁNTARA AYALA

MÉXICO, D. F. CIUDAD UNIVERSITARIA

MAYO DEL 2006



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.

DEDICATORIA

A mi Madre,

La confianza en que lograríamos estar aquí.
Los principios sólidos y claros en todo momento.
Los sacrificios que nunca se mencionan, pero se conocen.
Por la gota de sudor de los sábados por la tarde.
Porque un hogar es más que un ladrillo apilado y una mesa llena,
Es la plática en cada cena y tener cada diciembre una nueva cosecha.

A mi Padre (†),

A veces las palabras son confusas,
Las letras sofistas y las acciones relativas.
El ejemplo nunca requiere explicaciones,
Y es la mejor herencia y el mayor orgullo.
Es el principio de una vida.

A Abigail

La paciencia puede ser desesperante.
La comprensión laboriosa de asimilar.
El apoyo difícil de demostrar.
Pero encontrar todo esto en una sola persona,
Vale una vida esperar.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesora, **Dra. Irasema Alcántara Ayala**, por todo el apoyo en estos años de convivencia, la motivación en cada tarea para realizar el mejor trabajo, por el tiempo de dedicación durante todo el desarrollo de la tesis y las demás labores en conjunto. Pero por encima de lo anterior, por su amistad, sus palabras, los viajes y los pequeños detalles diarios, que demuestran su valor. Gracias. ... *Y sin embargo, se cae.*

A mis sinodales, **Mtra. Oralia Oropeza, Dr. José Ramón Hernández, Dr. Javier Delgado y Dr. Manuel Mendoza**, por su tiempo, disposición, comentarios y oportunas observaciones para enriquecer la presente tesis.

Al **PAPIIT** por el apoyo económico para la elaboración del presente trabajo a través de los proyectos IN310002-3 "Efectos espacio-temporales de la deforestación en la inestabilidad de laderas: un enfoque de prevención de desastres" y IX301504 "Deforestación, Deslizamientos y Desastres (3D): del Monitoreo a la prevención". Al **Instituto de Geografía**, por el uso de sus instalaciones. Al **CENAPRED** por permitir el acceso al laboratorio de mecánica de suelos, en particular al Ing. **Leobardo Domínguez**. A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por la oportunidad de acceder a su programa de posgrado, por los valores universitarios que marcan a quien se prepara en su campus y el orgullo de representar los ideales de la institución.

A la **Secretaría de Protección Civil de Puebla**, por sus apoyo en trabajo en la Sierra Norte de Puebla, muy en especial el reconocimiento a la labor de toda una vida dedicada a la protección civil del **Prof. Guillermo Melgarejo Palafox (†)** y a **Rubén Acevo**. A la **Presidencia Municipal de Tlatlauquitepec**, por el apoyo en las labores de campo.

A mis amigos y cómplices de carrera **Jovanna, Marlene, Ricardo, Omar y José**, por los momentos inolvidables, las risas, los comentarios cotidianos, los kilómetros recorridos, las pláticas y el continuo e incondicional apoyo en la realización de la presente tesis. Por que al final, con amigos como ellos, la vida siempre es justa. Mi mayor agradecimiento a **Manolo, Marilú, Eloisa y Francisco** por su compañerismo y su colaboración en trabajo de campo.

A mi familia, por que el verdadero respaldo nunca se escucha, se siente. A mi tía **Manuela** por marcar la pauta a seguir. A mis tíos **Ángel, Hermenegildo, Ana, Pedro, Alejandro y Marcos**. A mis primos, **Salvador Pérez, Marco Antonio Ramírez y Marco Antonio Borja**.

A **Marina**, por tu apoyo permanente, por escuchar cada detalle y confiar en mi palabra; a **Silvia**, por sobrevivir a las ausencias, la tranquilidad compartida y mantener nuestra amistad.

A la familia **Cruz-Guzmán**, por aguantarme cada día, darme la oportunidad de entrar a su hogar y dar sustento a parte de mi futuro, en especial a la **Sra. Coty. Abi**, Te Amo.

It's no secret that the stars are falling from the sky...

*Gracias,
Roberto.*

ÍNDICE

Índice	I
Índice de figuras y tablas	II
Resumen	V
Introducción	VI
Capítulo 1 Deforestación e inestabilidad de laderas	1
1.1 Deforestación	1
1.2 Deforestación en México	4
1.3 Perspectivas de la sustentabilidad forestal en México	8
1.4 Reforestación y servicios ambientales	10
1.5 Cubierta vegetal e inestabilidad	12
1.6 Cambio de uso de suelo e inestabilidad	18
1.7 Conceptualización de los procesos de remoción en masa	24
1.8 Importancia del estudio de los procesos de remoción en masa	28
1.9 Factores de inestabilidad	36
1.10 Efectos de la ocurrencia de procesos de remoción en masa	37
1.11 Precipitación e inestabilidad	39
1.12 Inestabilidad en el Municipio de Tlatlauquitepec	41
Bibliografía y mesografía.....	42
Capítulo 2 Características del entorno físico	47
2.1 Estratigrafía regional	47
2.2 Evolución geológica	51
2.3 Morfogénesis	54
2.4 Régimen de precipitación	58
2.5 Vegetación	69
Bibliografía y mesografía	73
Capítulo 3 Metodología	75
3.1 Características de la parcela experimental	75
3.2 Topografía	78
3.3 Geotecnia	82
Cohesión y ángulo de fricción interna	83
Limites plástico y líquido	86
Granulometría	91
Densidad del suelo	92
3.4 Conductividad hidráulica	95
Bibliografía	99
Capítulo 4 Modelación	101
4.1 Introducción	101
4.2 Tipos de modelos	102
4.3 Modelación de inestabilidad de laderas	103

4.4 Modelación de laderas en la localidad de La Unión, Tlatlauquitepec	109
4.5 Validación de los resultados de modelación	114
4.6 Análisis de sensibilidad	116
Sensibilidad de parámetros individuales	117
Sensibilidad global	124
Bibliografía	130
Discusión y conclusiones	132

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1 Ubicación de la localidad de La Unión	VIII
Figura 2 Mosaico aéreo del municipio de Tlatlauquitepec y de la localidad de La Unión	IX
Figura 3 Imagen de satélite Ikonos de la localidad de La Unión	IX
Figura 4 Mapa topográfico simplificado de Tlatlauquitepec	XI
Figura 5 Perfil Topográfico del municipio de Tlatlauquitepec	XII
Figura 1.1 Principales causas de la deforestación en México	5
Figura 1.2 Deforestación en el municipio de Tlatlauquitepec, cerca de la localidad de La Unión	8
Figura 1.3 Interacción entre vegetación y estabilidad de laderas	16
Figura 1.4 Diferentes tipos de anclaje del sistema de raíces	17
Figura 1.5 Flujo subsuperficial en diferente arreglo estructural	19
Figura 1.6 Mapa de pendientes de la carta Teziutlán	21
Figura 1.7 Áreas deforestadas o perturbadas de la carta Teziutlán	22
Figura 1.8 Carreteras y ríos de la carta topográfica Teziutlán y su proximidad a procesos de remoción en masa	25
Figura 1.9 Factores internos y externos de inestabilidad	36
Figura 1.10 Daños en calles y casas habitación por procesos de remoción en masa	38
Figura 2.1 Geología de la Carta Teziutlán	52
Figura 2.2 Geología regional	53
Figura 2.3 Rocas sedimentarias en la Sierra Norte de Puebla	53
Figura 2.4 Rocas ígneas en la Sierra Norte de Puebla	52
Figura 2.5 Columnas estratigráficas para los municipios de Zacapoaxtla y Teziutlán	55
Figura 2.6 Mapa morfológico del área localizada entre la cabecera municipal de Tlatlauquitepec y la presa La Soledad	57
Figura 2.7 Elevaciones de origen sedimentario del municipio de Tlatlauquitepec	57
Figura 2.8 Esguerramiento superficial, orden de ríos e isoyetas de la cuenca del río Xucayucan	61
Figura 2.9 Precipitación media anual de la carta Teziutlán y su ubicación en las regiones de precipitación media anual en México	63
Figura 2.10 Precipitación histórica las estaciones meteorológicas cercanas a la localidad de La Unión	64
Figura 2.11 Precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas cercanas a la localidad de La Unión	64
Figura 2.12 Precipitación media, máxima y mínima de la Republica Mexicana en el período 1941-2005	65
Figura 2.13 Estación Meteorológica <i>Vantage Pro Davis</i> instalada en la parcela experimental	65
Figura 2.14 Gráfica de precipitación y temperatura horaria de la localidad de La Unión	67
Figura 2.15 Formación de niebla en La Unión	68
Figura 2.16 Daños en el municipio de Tlatlauquitepec por el huracán Stan, cerca de la localidad de La Unión	68
Figura 2.17 Precipitación horaria y acumulada durante la presencia del huracán Stan en la localidad de La Unión	69

Figura 2.18a Vegetación del estado de Puebla	71
Figura 2.18b Vegetación y suelos de la Localidad de La Unión	71
Figura 3.1 Esquema de la metodología empleada en la tesis	76
Figura 3.2 Parcela experimental en la localidad de La Unión	78
Figura 3.3 Estación Total Trimble 5600 empleada en el levantamiento topográfico	79
Figuras 3.4 a y b. Despliegue en pantalla de los puntos obtenidos con la Estación Total	80
Figuras 3.5 a y b. Curvas de nivel finales	80
Figuras 3.6 a y b. Visualización de curvas de nivel a detalle	81
Figuras 3.7 a, b Modelo sombreado de la ladera en análisis (a), modelo tridimensional de las curvas de nivel (b)	81
Figura 3.8 Imagen tridimensional del modelo digital de elevación	82
Figura 3.9 Gráfica ejemplo de la ecuación de Coulomb	84
Figura 3.10 Extracción de muestra cúbica para procesar en laboratorio	85
Figura 3.11 Curvas esfuerzo-deformación de la muestra cúbica obtenida en La Unión	86
Figura 3.12 Perfil de la ladera de La Unión	87
Figura 3.13 Copa de Casagrande	88
Figura 3.14 Gráfica de límite plástico, límite líquido, índice de plasticidad y contenido de agua del perfil de la ladera en estudio	90
Figura 3.15 Curva granulométrica de los materiales a diferente profundidad del perfil de La Unión	92
Figura 3.16 Extracción de muestras de suelos para calcular la densidad real y la aparente	93
Figura 3.17 Gráfica de densidad real y aparente de la parcela experimental	93
Figura 3.18 Imágenes de la instalación del permeámetro Guelph en la parcela experimental	98
Figura 4.1 Pantalla principal del programa CHASM	105
Figura 4.2 Ejemplo de modelación realizada con el programa SEEP/W	105
Figuras 4.3 a y b Ejemplos de modelación con los programas GALENA y STABLE	106
Figura 4.4 Modelo infinito de estabilidad de laderas	108
Figura 4.5 Pantallas de los programas DLISA y LISA	110
Figura 4.6 Ladera de control	113
Figura 4.7 Precipitación horaria registrada durante los días de mayor impacto del huracán Stan en La Unión	114
Figura 4.8 Ladera en análisis antes del impacto del huracán Stan	115
Figuras 4.9 Proceso de remoción en masa ocurrido en la ladera en estudio durante el impacto del huracán Stan	115
Figura 4.10 Proceso de ladera ocurrido a 50 metros de la parcela en análisis	116
Figura 4.11a Gráfica de la relación entre la variación de la pendiente y el FS	117
Figura 4.11b Gráfica de la relación entre la variación de la pendiente y el FS a detalle	118
Figura 4.12a Relación entre la profundidad del suelo y el factor de seguridad	118
Figura 4.12b Relación entre la profundidad del suelo y el factor de seguridad a detalle	119
Figura 4.13a Variación del factor de seguridad en función del peso del suelo	120
Figura 4.13b Variación del factor de seguridad en función del peso del suelo a detalle	120
Figura 4.14a Relación en la variación de la cohesión del suelo y su influencia en el FS	121
Figura 4.14b Cambio del FS en función de la cohesión en el umbral de la estabilidad	122
Figura 4.15a Relación entre el ángulo de fricción interna y el factor de seguridad	122
Figura 4.15b Detalle de la relación entre la variación del ángulo de fricción interna y el factor de seguridad	122
Figura 4.16a Variación de la cohesión de las raíces y su impacto en el factor de seguridad	124
Figura 4.16b Variación de la cohesión y su impacto en el factor de seguridad en los límites de la estabilidad	124
Figura 4.17 Análisis de sensibilidad de la ladera sin cubierta forestal en condiciones normales ..	126
Figura 4.18 Análisis de sensibilidad de la ladera sin cubierta forestal saturada	126
Figura 4.19 Análisis de sensibilidad de la ladera con cubierta forestal en condiciones normales	128

Figura 4.20 Análisis de sensibilidad de la ladera con cubierta forestal saturada	128
--	-----

TABLAS

Tabla 1.1 Tasas de deforestación en América Latina	4
Tabla 1.2 Variación temporal en las superficies de diferentes tipos de vegetación y usos del suelo en México	6
Tabla 1.3 Tasas de deforestación en México en diferentes años	7
Tabla 1.4 Condiciones de reforestación desde 1993 hasta el año 2003 en México	10
Tabla 1.5 Mecanismos físicos e hidrológicos de la vegetación asociados a la inestabilidad de laderas	15
Tabla 1.6 Relación entre zonas deforestadas, pendiente y procesos de remoción en masa en la carta Teziutlán	20
Tabla 1.7 Relación entre procesos de remoción en masa y su proximidad a carreteras y ríos	24
Tabla 1.8 Clasificación de los procesos de remoción en masa, EPOCH, 1993	29
Tabla 1.9 Ejemplos de procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla	27
Tabla 1.10 Algunos desastres provocados por procesos de remoción en masa en el siglo XX en México, reportados por la prensa nacional	33
Tabla 1.11 Principales flujos de lodo registrados en México en la década de los 90s	34
Tabla 2.1 Calculo del escurrimiento en la subcuenca del río Xucayucan	61
Tabla 2.2 Estaciones meteorológicas empleadas para determinar las isoyetas de la carta Teziutlán y las condiciones pluviales históricas en la localidad de La Unión	62
Tabla 3.1 valores promedio de cohesión y ángulo de fricción interna en diferentes tipos de suelo	84
Tabla 3.2 Resultados del cálculo de limite plástico, limite liquido, índice de plasticidad y su clasificación SUCS	89
Tabla 3.3 Contenido de agua en porcentaje del perfil analizado	89
Tabla 3.4 Resultados de granulometría de la parcela experimental	91
Tabla 3.5 Densidad aparente y real de la parcela experimental	94
Tabla 3.6 Rangos promedio de conductividad hidráulica considerando la granulometría de los suelos	95
Tabla 3.7 Rango de conductividad hidráulica en varios materiales de suelos	96
Tabla 3.8 Resultados de conductividad hidráulica de la parcela experimental	98
Tabla 4.1 Modelos para calcular la estabilidad de laderas utilizando la ecuación infinita de laderas	106
Tabla 4.2 Ejemplo de clases de estabilidad	107
Tabla 4.3 Valores de las propiedades físicas y del suelo de la ladera modelada	111
Tabla 4.4 Variación del factor de seguridad en función de los cambios en el valor de cada parámetro	112
Tabla 4.5 valores de las propiedades físicas y del suelo de la ladera de control	113

RESUMEN

Diversos estudios en el mundo han establecido, desde diferentes enfoques, la relación existente entre la deforestación y la inestabilidad de laderas principalmente en materiales volcánicos. En México, cuyas características morfológicas y litológicas resultan en una considerable gama de escenarios que favorecen la inestabilidad de laderas, los pocos estudios existentes en esta temática se han enfocado también básicamente en materiales ígneos cuaternarios. Sin embargo, eventos de precipitación extraordinaria como el acontecido en octubre de 1999 o los daños provocados por el huracán Stan en el año 2005 en la Sierra Madre Oriental, conformada por materiales sedimentarios, fueron determinantes en la ocurrencia de numerosos procesos de remoción en masa, y confirman el hecho de que en estos materiales los procesos gravitacionales son, al igual que los volcánicos, de gran relevancia.

En el presente trabajo se modela la interacción de los factores que condicionan la inestabilidad de laderas en el norte del municipio de Tlatlauquitepec. Los parámetros principales empleados en la modelación están relacionados con las propiedades de los materiales, así como con factores climáticos, particularmente la precipitación como mecanismo detonante. Resultados de esta modelación indican que la inestabilidad de laderas en este tipo de materiales está controlada por la deforestación y el cambio de uso de suelo, los cuales inciden en las propiedades de los materiales, como por ejemplo la cohesión. Esta última fue considerada derivado de un análisis de sensibilidad, como la propiedad de los suelos que mayor influencia tiene en la inestabilidad.

La modelación se realizó en dos laderas con características similares, pero diferente cobertura de vegetación natural, con el objetivo de comparar la influencia de la presencia de vegetación en ambientes litológicos y climáticos similares. La validación de los resultados obtenidos de la modelación, por un lado, permite establecer la importancia de la influencia antrópica, expresada mediante las prácticas de la deforestación; y, por el otro, sugiere que la precipitación es el factor desencadenante más importante de la inestabilidad de laderas en la Sierra Norte de Puebla.

INTRODUCCIÓN

La importancia del entendimiento de la mecánica de los procesos de remoción en masa radica en el interés de evitar el impacto de tales fenómenos en la sociedad, desde cualquier punto de vista en que se le observe. Para ello, diversos trabajos en el mundo abocados a los procesos gravitacionales han aportado bases teóricas para la comprensión del fenómeno y de las causas que lo generan.

Los estudios que se han llevado a cabo en torno al tema son múltiples y bajo diferentes perspectivas y metodologías, pero coinciden con un fin; el mitigar los daños y reducir el riesgo (Clerici, 2000). Como respuesta a las condiciones naturales y sociales del entorno, el riesgo puede ser reducido o sustituido, en algunos casos, por la prevención o bien por la mitigación del peligro, esto se logra al aplicar acciones que prevean los daños posibles por la presencia del fenómeno natural. El estudio de los procesos de ladera, y de todo fenómeno que represente un peligro o amenaza a la sociedad, pretende en su expectativa más ambiciosa reducir la ocurrencia de desastres.

Existen diversos factores que controlan la inestabilidad de las laderas, y uno de ellos es la vegetación. La importancia de la influencia de los sistemas de raíces vegetales en los procesos de remoción en masa ha recibido una considerable atención en los últimos años, particularmente desde el punto de vista de la deforestación, debido a que es un factor crucial en la estabilidad de laderas. El papel de la vegetación y de las raíces radica en el mantenimiento de la resistencia y del deterioro de las capas de suelo. Si se considera que comprender la realidad de la génesis de los procesos de remoción en masa, es el primer paso para estructurar y aplicar medidas y técnicas que eviten en lo posible el deterioro en la estructura social por la acción de estos procesos y la mitigación de desastres, determinar la influencia de la deforestación de la inestabilidad del terreno se vuelve un aporte sustancial en el estudio de los procesos de ladera.

El objetivo principal del trabajo es realizar una modelación del impacto del cambio de uso de suelo, básicamente por deforestación, en materiales sedimentarios.

En resumen, la metodología desarrollada para el cumplimiento de este objetivo, misma que se detalla en el capítulo 3, fue la siguiente:

1. Análisis de las series de precipitación del área
2. Instalación y monitoreo de una estación pluviométrica
3. Levantamiento topográfico a detalle mediante una estación total
4. Análisis de la conductividad hidráulica
5. Análisis de resistencia de materiales en campo y laboratorio (caracterización geotécnica)
6. Modelación matemática de la relación vegetación-inestabilidad

El análisis de la estabilidad de una pendiente se puede realizar para dos distintos escenarios: *análisis previo a la ruptura*, en donde se aplican cálculos de seguridad en un sentido global que muestre como la pendiente se puede comportar en el momento de la ruptura de la cohesión. *Análisis posterior a la ruptura*, donde se recopila suficiente información para hacer un análisis retrospectivo de los procesos de remoción ocurridos, así como de los latentes con la idea de actuar conforme a las condiciones que la situación requiera (Casale y Margottini, 2000). Lo anterior se entiende al decir que el primer caso es

prevención y el segundo es reacción ante los fenómenos gravitacionales. Los datos que se requieren para interpretar la estabilidad de una ladera son principalmente geología, resistencia de los materiales, las condiciones hidrológicas, la porosidad y su permeabilidad, entre los más importantes. La presente tesis está enmarcada en un posible enfoque preventivo, con el fin de poder establecer bases para trabajos de mitigación en diferente escala, por ejemplo municipal.

Como se ha establecido, se parte de la hipótesis de la inherente relación de la cubierta vegetal con la inestabilidad, cuya ausencia causada por la deforestación incrementa la posibilidad de la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Por el contrario, la susceptibilidad de laderas a la ocurrencia de deslizamientos puede verse reducida por el correcto establecimiento de una cubierta vegetal. El uso sistemático de cubiertas vegetales inducidas como prevención de deslizamientos se ha empleado durante siglos en diferentes culturas. Sin embargo, diversos estudios muestran que una ladera totalmente poblada de vegetación no siempre aporta estabilidad al terreno, no así el caso de la deforestación, caso que con mayor probabilidad puede desestabilizar la pendiente (Collison y Anderson, 1996).

En otros países, la importancia de la influencia de los sistemas de raíces vegetales en la estabilidad de los suelos en las laderas ha recibido una considerable atención, particularmente desde el punto de vista de la deforestación en la pendiente y recientemente en la estabilidad de los suelos. Un factor crucial en la estabilidad de laderas abruptas con vegetación es el papel de las raíces de la vegetación en el mantenimiento de la resistencia y del deterioro de las capas de suelo, por lo que determinar la influencia de tales raíces, y en su caso su ausencia por deforestación es vital en el estudio de la estabilidad.

Como consecuencia inmediata al cambio de la cubierta vegetal natural, se modifica el régimen local de infiltración. En la medida en que cada estrato del suelo absorbe agua, la infiltración permite que llegue a unidades geológicas más profundas. Si estas unidades son permeables, la infiltración continúa hasta llegar al nivel freático, lo cual se denomina como recarga. La velocidad máxima a la que el agua se incorpora al suelo se conoce como capacidad de infiltración. Cuando ésta última es alta después de un período de precipitación, el suelo se satura y alcanza una condición que puede desestabilizar el terreno. En esta situación, se presenta el flujo superficial, es decir, agua que corre por la superficie del suelo (Price, 2003).

El incremento de la capacidad infiltración y de la permeabilidad en las capas de suelos de la superficie de laderas con vegetación, se puede atribuir a la presencia de raíces, canales vacíos de raíces y al incremento de la aspereza macroscópica superficial. Sin embargo, lo anterior no es suficiente para afirmar que el incremento de la permeabilidad es causado por la vegetación (Greenway, 1987).

Para desarrollar el trabajo planteado se eligió la localidad de La Unión, en el municipio de Tlatlauquitepec, localizado en la Sierra Norte de Puebla (figura 1), poblado que ha sido afectado por diversos procesos de ladera en años recientes y que ha presentado un claro avance en la deforestación de las sierras que le rodean, lo cual se puede percibir en fotografías aéreas e imágenes de satélite (figuras 2 y 3), como razones principales. En el capítulo 3 se presenta de manera específica el argumento de las condiciones de selección del sitio.

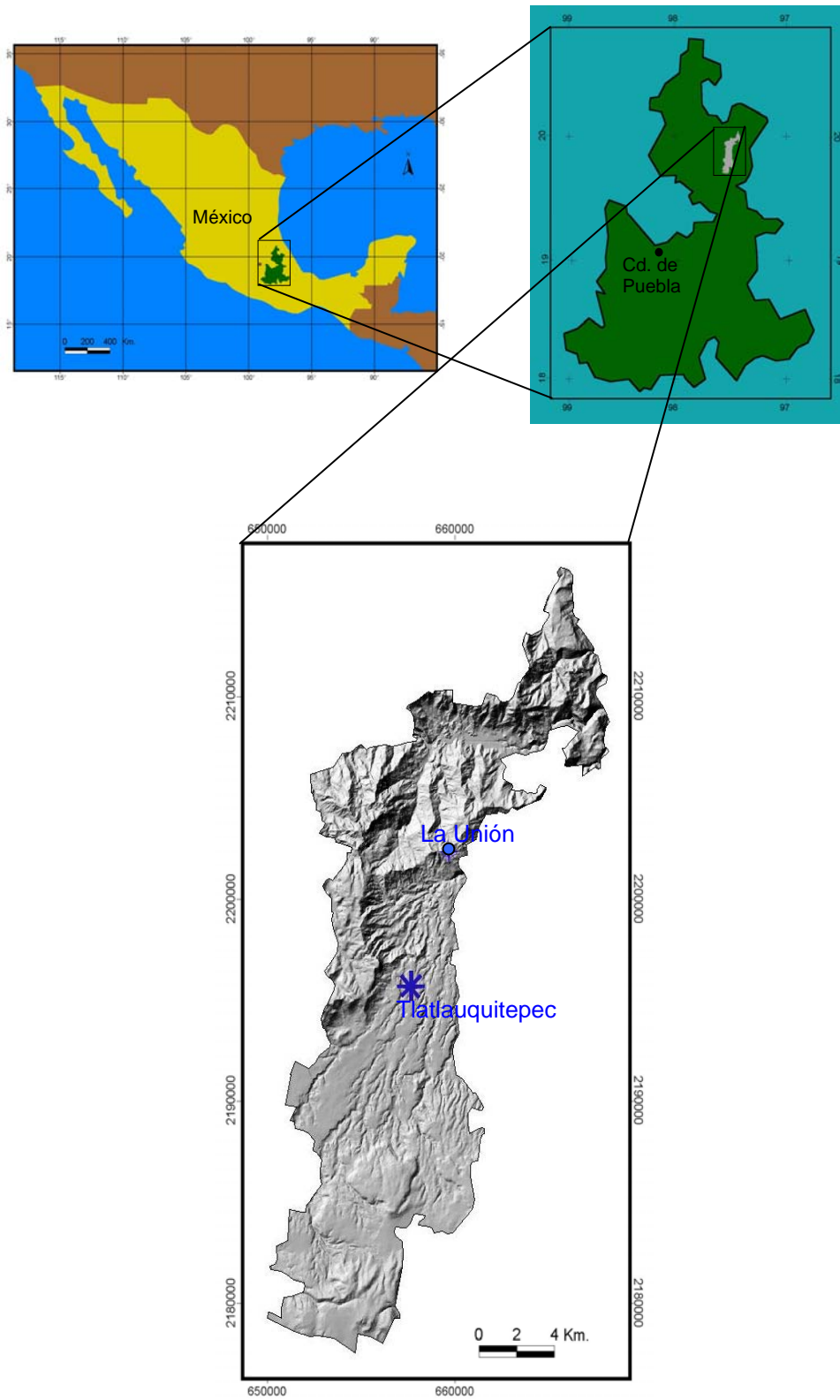


Figura 1 Ubicación de la localidad de La Unión

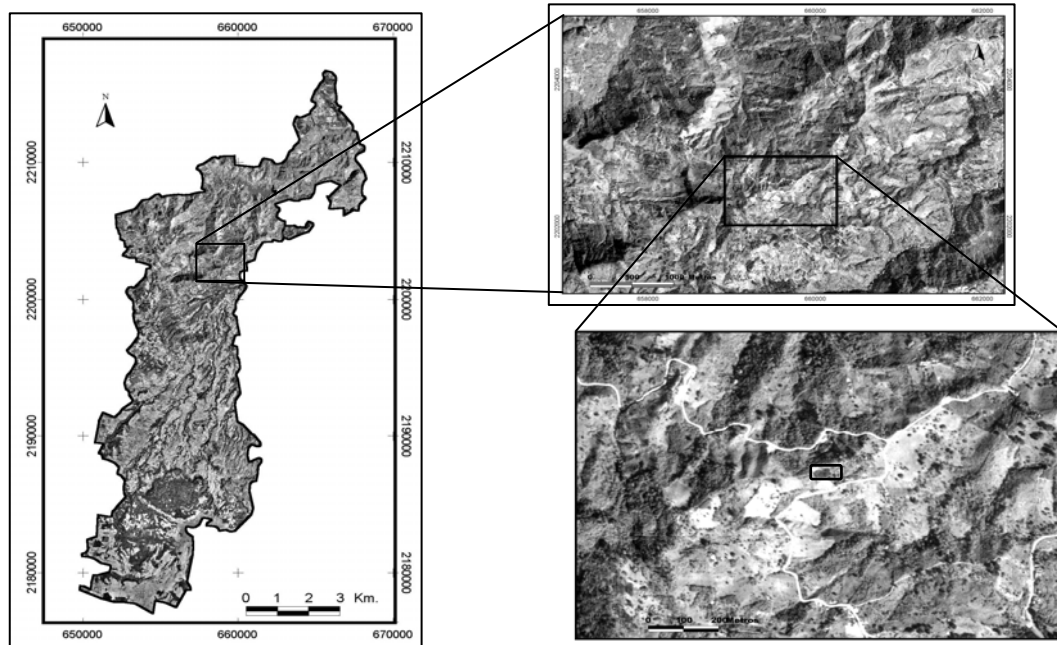


Figura 2 Mosaico aéreo del municipio de Tlatlauquitepec y de la localidad de La Unión (elaborado con base en fotografías aéreas, cortesía de la Presidencia Municipal de Tlatlauquitepec).

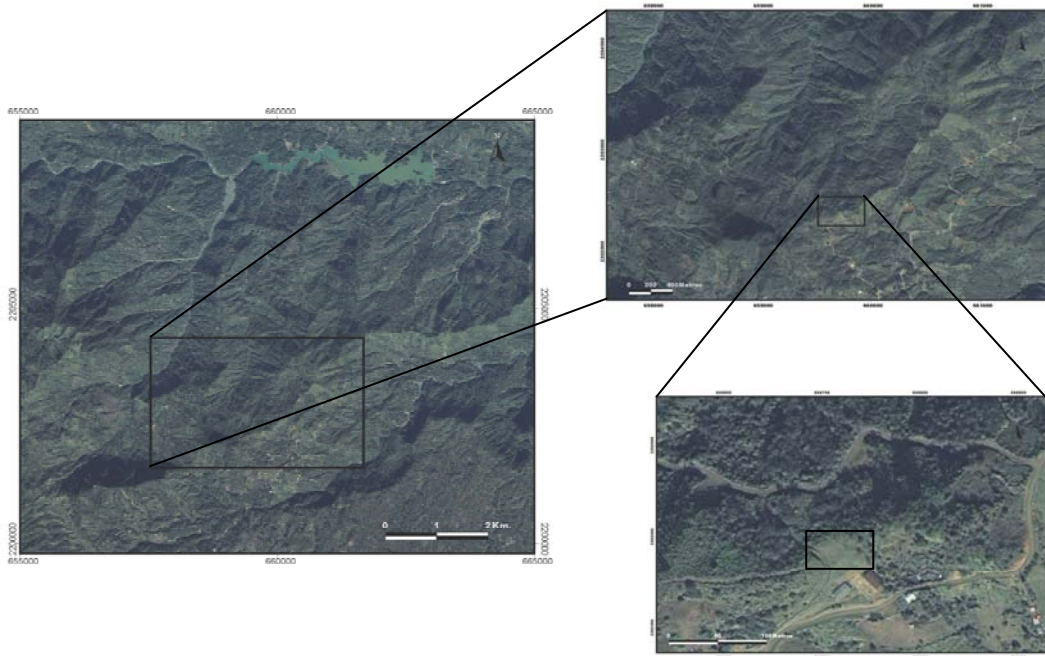


Figura 3 Imagen de satélite Ikonos de la localidad de La Unión (en el recuadro se observa el área de ubicación de la parcela experimental)

La Sierra Norte de Puebla está constituida principalmente por rocas sedimentarias mesozoicas plegadas, en parte cubiertas por rocas volcánicas pliocénicas y cuaternarias, asociadas a la caldera de los Humeros. Para el objetivo del presente trabajo, las investigaciones se centrarán en los materiales sedimentarios, particularmente lutitas, ya que son unidades litológicas con alta incidencia de inestabilidad de laderas, no sólo en México sino también en el mundo. En estudios previos, Marcos-López (2003) apoya esta afirmación al establecer a la zona de La Unión (localidad en donde se localiza la ladera a estudiar) como una zona de alta susceptibilidad a deslizamientos superficiales.

La localidad de La Unión ocupa el lugar 20 por su población total dentro de las 87 comunidades que integran el municipio de Tlatlauquitepec, con un total de 600 habitantes, con una distribución equitativa por género, con 306 hombres por 294 mujeres. También se ubica dentro de las 20 primeras por la población económicamente activa (PEA), número de viviendas con electricidad y habitantes con ingresos de dos a cinco salarios mínimos. Se caracteriza por tener muy bajos niveles de alfabetismo y de escolaridad promedio, únicamente cinco viviendas cuentan con drenaje y la población con acceso a los servicios de salud es poca, aunque en este último aspecto recientemente se instaló un centro de salud en la localidad.

En cuanto a los niveles de bienestar de la localidad, es el hecho de que pocas viviendas cuentan con servicio de gas y la mayor parte utiliza la leña como combustible primario; más de la tercera parte de la PEA se dedica a las actividades primarias, lo que se refleja directamente en los niveles de deforestación, así como el uso de la madera como un material básico de construcción.

La comunidad se localiza en el noreste del municipio, cerca de las comunidades de Xomiaco y Calatepec, en la zona de descenso hacia la presa La Soledad. Está localizada a poco más de 7 kilómetros al noreste de la cabecera municipal, un camino de terracería le comunica con la carretera a Calatepec y asentado en materiales sedimentarios de origen marino, principalmente lutitas y calizas, en laderas montañosas, que presentan alta disección, con una altitud promedio de 1740 msnm. (figuras 4 y 5).

La estructura de la tesis consiste en 4 capítulos. En el primero, se abordan los aspectos teóricos de la deforestación, definición, estadísticas en el mundo y en México, perspectivas de reforestación y la relación cambio de uso de suelo-inestabilidad, con énfasis en la influencia de los sistemas radicales. Asimismo, se realiza un breve análisis de la ocurrencia de deslizamientos y el cambio de uso de suelo en la región, a modo de justificación de la realización de la tesis en dicha área. Como complemento de este capítulo se exponen aspectos teóricos básicos de los procesos de remoción en masa, la importancia de su estudio y los factores causales, particularmente la precipitación.

El capítulo dos se compone de una descripción del entorno físico, desde una perspectiva regional (Sierra Norte), municipal (Tlatlauquitepec) hasta escala local, en la comunidad de La Unión. Más allá de la descripción, durante el capítulo se analiza la relación existente entre los aspectos físicos y la inestabilidad de laderas, con especial atención a la precipitación local.

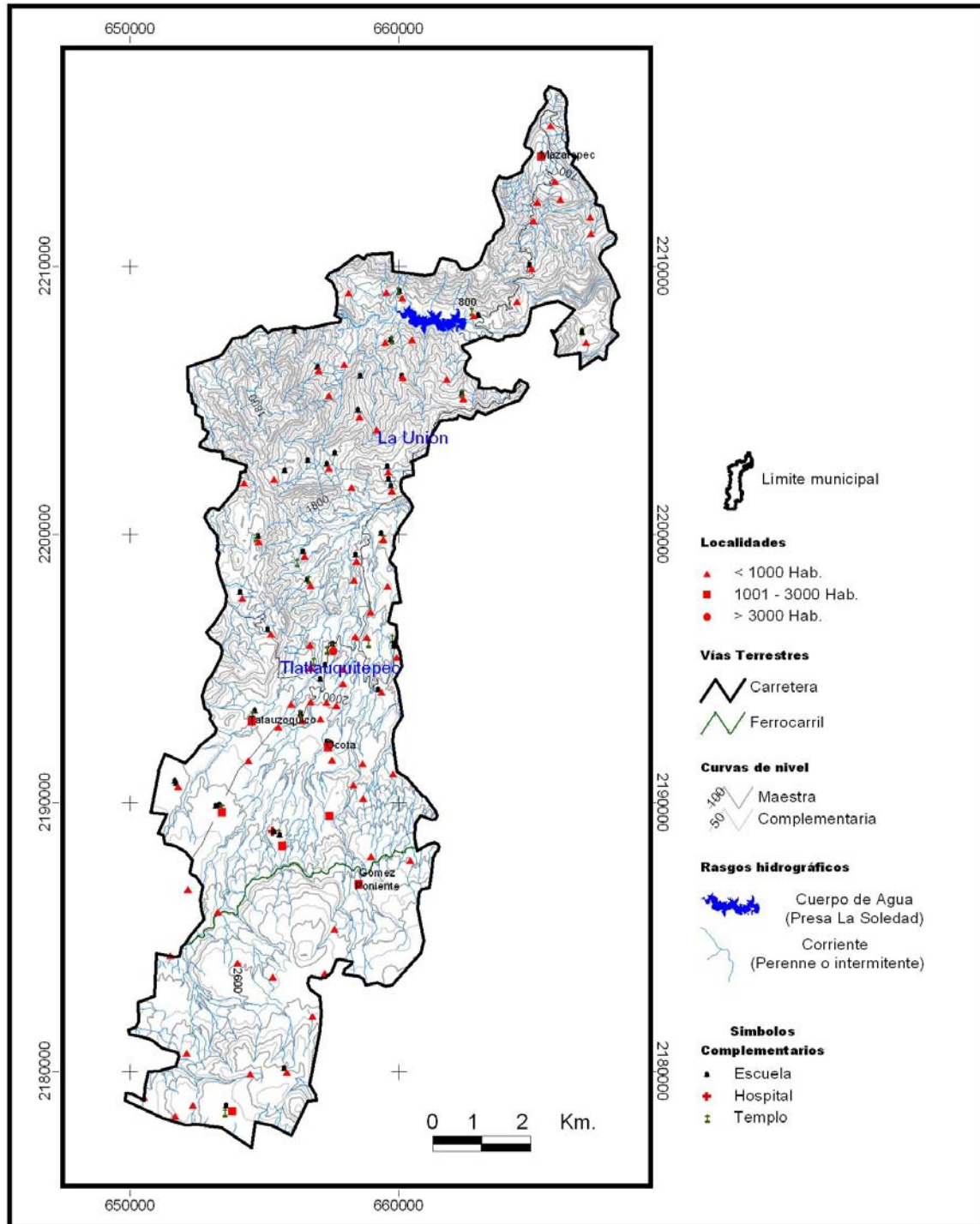


Figura 4 Mapa topográfico simplificado de Tlatlauquitepec.

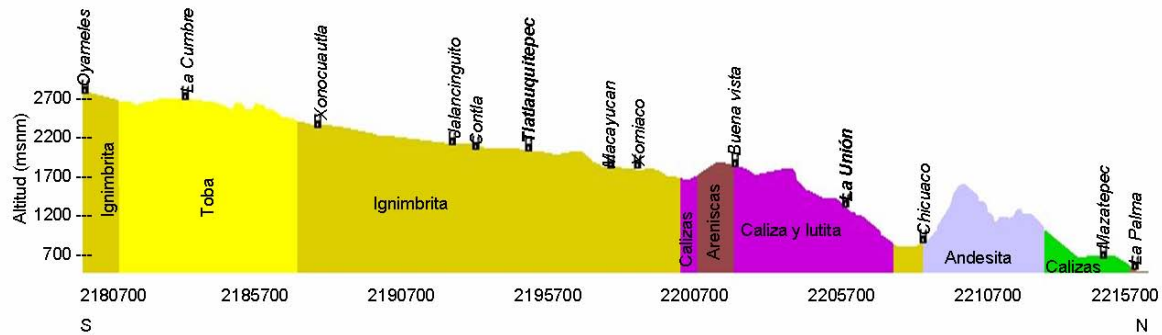


Figura 5 Perfil topográfico del municipio de Tlatlauquitepec, con orientación sur-norte, donde se integra la litología del estrato superior (no se representa la profundidad del estrato).

La metodología desarrollada en la presente tesis se detalla en el capítulo tres, abordando los aspectos considerados en la definición del tema, la ubicación de la parcela experimental y las pruebas de mecánica de suelos realizadas para obtener la información de los distintos parámetros, necesaria para efectuar la modelación.

Por último, en el capítulo cuatro se presentan los detalles y resultados de la modelación de la parcela experimental, así como las conclusiones de la tesis.

Bibliografía

- Casale, R. y Margottini, C. (2000). *"Floods and landslides: Integrated Risk Assessment"* Springer, Berlin.
- Clerici, A. (2000). "Simulation of the Parma River blockage by the Corniglio landslide (Northern Italy)". *Geomorphology No. 33*.
- Collison A. J. y Anderson M. G. (1996). "Using a combined slope hydrology/stability model to identify suitable conditions for landslide prevention by vegetation in the humid tropics". *Earth surface processes and landforms, Vol 21*, Londres.
- Greenway, D.R. (1987). Vegetation and Slope Stability. En: *Slope Stability*. John Wiley and Sons Ltd.
- Marcos-López, J. (2003). *Distribución espacial de los procesos de remoción en masa y riesgos asociados en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla*. Tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Price, M (2003). *"Agua subterránea"*. Limusa, México.

CAPÍTULO 1 DEFORESTACIÓN E INESTABILIDAD DE LADERAS

1.1 Deforestación

Desde hace años se ha definido que una alteración en el equilibrio de los elementos de la naturaleza tiene influencia, con mayor o menor impacto, de forma inmediata o paulatina y a diferente escala, en un número considerable de elementos del sistema natural. Particularmente, la cobertura vegetal es uno de los elementos que mayor impacto tiene en el entorno inmediato y a escala global y las consecuencias de la deforestación alrededor del planeta lo demuestran.

El análisis del uso del suelo y del cambio en la cobertura vegetal han sido siempre un área de investigación importante en la geografía (Mertens y Lambin, 2000). En la actualidad, los estudios sobre la dinámica de cambio en la cobertura del suelo y la deforestación son importantes y necesarios porque proporcionan la información para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada. Asimismo, dichos estudios se han convertido en herramientas de gran utilidad para elaborar proyecciones sobre futuros cambios en ecosistemas y sus implicaciones en diversos escenarios naturales regionales, tanto a escala temporal como espacial (Lambin, 1997; Vitousek *et al.*, 1997).

El término de cubierta del suelo se refiere a los atributos de una parte de la superficie de la Tierra y la subsuperficie inmediata, incluyendo la biota, la topografía, la superficie y aguas subterráneas e incluso estructuras humanas. El uso del suelo se refiere a los objetivos para los cuales el hombre explota la cubierta más superficial de la corteza terrestre. Por ejemplo, el bosque es un tipo de cubierta del suelo integrado por diversa especies arbóreas y puede ser explotado para diversos usos del suelo, como recreativo, para la producción de madera o la conservación de fauna (Turner *et al.*, 1993).

En términos generales, el cambio de la cubierta del suelo se refiere las modificaciones en los atributos de una parte de la superficie terrestre y el subsuelo (Diouf y Lambin, 2001). Particularmente, el cambio en la cubierta vegetal es a menudo concebido como la simple e irreversible conversión de un tipo de cobertura a otra. En esta representación se puede considerar, por ejemplo, a la deforestación como el total y permanente cambio de un medio con alta densidad de cubierta forestal a un área con baja cubierta de árboles y frecuentemente esta transición esta relacionada a las actividades primarias, en especial la agricultura (Mertens y Lambin, 2000).

Las causas y las consecuencias del cambio y del uso suelo sobre el ambiente físico y social son temas de investigación frecuente (Veldkamp y Verburg, 2004), entre los que cabe destacar la elaboración de modelos para proyectar alternativas de uso del suelo, opciones de solución de modificaciones en desarrollo y una aproximación de mayor precisión cuantitativa acerca de el proceso de cambio de la cobertura vegetal del suelo (Lambin *et al.*, 2000; Lambin *et al.*, 2001; Veldkamp y Lambin, 2001).

La cobertura del suelo es un parámetro fundamental para describir la superficie terrestre. El estudio de la cobertura vegetal puede ser empleado para analizar la dinámica en la superficie. Aún más, los estudios temporales de las variaciones espaciales de la cobertura de vegetación pueden relacionarse a los cambios antrópicos e incluso servir de indicadores de las consecuencias de estas variaciones (Fernandes *et al.*, 2004).

El interés del análisis de cubierta del suelo, tanto a escala regional como global, ha crecido en los últimos años, estimulado entre otros factores por los estudios enfocados al cambio climático y el mejoramiento de los equipos para elaborar mapas más precisos, por ejemplo, sistemas de información geográfica y satélites que proporcionan imágenes de alta resolución (Townshend *et al.*, 1994).

A partir de la segunda mitad del siglo XX, el hombre se ha convertido en el principal desencadenador de la actividad transformadora de los ecosistemas. La magnitud y el alcance espacial de las alteraciones humanas de la superficie de la Tierra en las últimas décadas no tienen precedentes. Entre estas alteraciones, el cambio de uso del suelo se encuentra entre los más importantes (Lambin *et al.*, 1999); éste cambio llega a ser tan significativo que multiplicado a escala mundial, afecta los aspectos claves del funcionamiento del sistema natural de todo el planeta (Sala *et al.*, 2000). Una de las actividades que mayores alteraciones causa a la superficie es la intensificación del uso del suelo que a menudo, aunque no exclusivamente, se asocia a la agricultura. La intensificación agrícola ha sido definida por Brookfield (1972) como la substitución de las condiciones naturales del suelo con fines de incrementar la producción de un área determinada.

México, con un territorio continental de cerca de dos millones de kilómetros cuadrados, es uno de los cinco países biológicamente más ricos, por lo tanto considerado como megadiverso; sin embargo, sufre procesos rápidos de cambio de uso del suelo (Mas *et al.*, 2004). La planificación del uso del suelo, medida necesaria para reducir el proceso alteración de este uso en la superficie terrestre, es resultado de un compromiso razonable entre el potencial ambiental en términos de la disponibilidad de recursos naturales y la demanda social en términos de las exigencias de bienes y servicios por comunidades específicas humanas (Bocco *et al.*, 2001b).

El Ordenamiento Ecológico es el instrumento de la política ambiental que regula las modalidades del uso del suelo y orienta el emplazamiento de las actividades productivas, en el marco de la política de desarrollo regional y a partir de procesos de planeación participativa. Este tipo de ordenamiento a nivel local es expedido por las autoridades municipales; regula los usos del suelo fuera de los centros de población y establece criterios de regulación ecológica dentro de los centros de población que se integran en los programas de desarrollo urbano (INE, 2000).

En cuanto a la deforestación, esta tiene influencia en el incremento en la erosión de suelos, la magnitud y frecuencia de inundaciones, el régimen pluvial regional, la desertificación e incluso en el tema, aún por definir claramente, del cambio climático global, entre otros, además de considerar la disminución de la biodiversidad. Asimismo, como proceso paralelo a la erosión y a las inundaciones, los procesos de remoción en masa han incrementado su frecuencia, entre otras causas que se detallan más adelante, por la reducción de la cobertura vegetal natural.

Si bien existen diferentes conceptos o definiciones acerca del término deforestación, en general se menciona la eliminación de la cobertura vegetal para utilizar el suelo en otras actividades no forestales. Algunos autores mencionan que se debe dar a gran escala la tala, mientras que la Unidad del Inventario Nacional de Recursos Naturales considera la eliminación completa de áreas de arboledas (Varela, 1998), es decir, integran una escala de supresión forestal para hablar de deforestación, mientras que otros términos no

insertan esta característica espacial para acuñar el concepto de deforestación. Por ejemplo, la SEMARNAP en 1998, se limitaba a establecer la deforestación como la eliminación de la vegetación forestal o el cambio de uso de suelo hacia usos no forestales; recientemente la misma Secretaría define este término como el proceso que ocurre en un ecosistema cuando la velocidad de pérdida de cobertura vegetal es mayor que la capacidad de recuperación natural de dicho ecosistema (semarnat.gob.mx); la FAO incluye todo cambio de forestal a no forestal en un período determinado. También puede expresarse como la eliminación completa de áreas arboladas para dedicarlas a usos del suelo no forestales (SEMARNAP, 1998).

El ordenamiento es un instrumento de política y sirve para regular o modificar el uso del suelo y necesariamente incluye una evaluación de actitud del territorio bajo algún mecanismo. El problema es que las evaluaciones no se realizan, por lo que sólo se utiliza el territorio y a veces el uso escogido no es el mejor. El término uso de suelo se refiere al empleo que se le da a un terreno específico y a su cobertura vegetal. El uso puede ser agrícola, pecuario, urbano (todas ellas coberturas antrópicas) o forestal cuando se ha preservado la vegetación natural de la zona (bosque, selva o matorral) (semarnat.gob.mx).

Es indudable que la deforestación es uno de los medios de transformación de uso del suelo más ampliamente difundido, no sólo en México, sino en todo el mundo, puesto que los cambios hacia un uso productivo distinto al forestal (agrícola, industrial) o de crecimiento demográfico (infraestructura, de asentamientos humanos) son constantes y es prácticamente imposible que retornen a un uso forestal total o parcialmente, salvo algunos intentos como los Parques Nacionales o áreas protegidas, mismos que han sido infructuosos en la mayoría de los casos. Si bien los cambios provocados por las actividades primarias, principalmente la agrícola, son considerables, la industria forestal es la que mayores hectáreas de cubierta forestal utiliza para solventar sus requerimientos. Lo anterior sin mencionar la difícil cuantificación del volumen de reservas forestales perdidas por la tala clandestina.

En los últimos decenios ha habido una deforestación excesiva en las áreas tropicales de América Latina debido, entre otras cosas, al aumento de la población y a la tala extensiva, la ampliación de las modalidades de cultivo y la disminución del rendimiento agrícola. Las políticas gubernamentales también han contribuido a acelerar la deforestación con medidas para aumentar la rentabilidad de la agricultura en las áreas forestadas, construir caminos en las zonas fronterizas entre la agricultura y zona forestal y adoptar modalidades de cultivo que favorecen la producción mecanizada en gran escala.

La deforestación de los bosques tropicales no es un fenómeno particular de América Latina. Según datos de la FAO, la superficie de bosques tropicales talados todos los años en la región durante el decenio de 1980 fue de alrededor de 7,4 millones de hectáreas, casi igual a la superficie deforestada todos los años en Asia y África en conjunto. En América Latina, la mayor parte de la deforestación, más del 85%, tiene lugar en la cuenca alta del Amazonas de Sudamérica. Sin embargo, las tasas más altas de deforestación se registran en México y en Centroamérica, donde quedan relativamente pocos bosques primarios (Jaramillo y Kelly, 1998).

En la década de los años 60s, la pérdida anual forestal se estimaba en 11 millones de ha, mientras que para los 80s, esta estimación aumentó a 15.5 millones de ha. Durante la década de los noventa se perdieron en promedio casi 15 millones de hectáreas de bosque

por año, sobre todo en las zonas tropicales. Tan sólo América Latina ha perdido para inicio de los 90s poco más de la mitad de sus áreas forestales originales, principalmente en Brasil, Costa Rica y México (Velázquez *et al.*, 2002b). La tabla 1.1 muestra cifras de deforestación para América Latina, donde destaca el porcentaje anual de deforestación para Centroamérica y México muy por encima del resto de los países latinoamericanos.

Tabla 1.1 Tasas de deforestación en América Latina.

Región	Número de países	Superficie de tierra (mill. has.)	Cubierta forestal en 1980 (mill. has.)	Cubierta forestal en 1990 ((mill. has.)	Deforestación anual entre 1981 y 1990 (mill. has.)	Porcentaje de deforestación anual
Centroamérica y México	7	239.6	79.2	68.1	1.1	1.5
Caribe	19	69.0	48.3	47.1	0.1	0.3
Sudamérica	7	1,341.6	864.6	802.9	6.2	0.7
Total	33	4,778.3	1,910.4	1,756.3	15.4	0.8

Fuente: FAO, 1993.

Las causas del acelerado ritmo de deforestación en América Latina son diversas y complejas. En análisis recientes se ha detectado una relación significativa entre varios factores importantes. Con datos de 24 países de la región, Southgate (1990) observa que la expansión de las tierras agrícolas en América Latina, entre 1982 y 1987, se relaciona con el crecimiento demográfico, el aumento de las exportaciones agrícolas y los cambios en los rendimientos agrícolas. Cropper y Griffiths (1994) observan que las tasas de deforestación anual en América Latina, Asia y África se relacionan con el ingreso *per cápita* y con los precios equivalentes de importación y exportación de los troncos. Barbier (1997) llega a la conclusión de que el cambio en la cubierta forestal entre 1980 y 1985 en 21 países latinoamericanos está estrechamente vinculado con la producción *per cápita* de madera industrial en rollos, los rendimientos agrícolas y la densidad de la población rural (Jaramillo y Kelly, 1998).

En la actualidad los estudios sobre los procesos dinámicos de los cambios en la cobertura del suelo y la deforestación son importantes y necesarios porque proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Velázquez, *et al.*, 2002a).

1.2 Deforestación en México

Para el caso de México, así como en el resto del planeta, la deforestación siempre ha estado presente, pero al transcurrir el siglo XX esta condición se aceleró con la intervención humana, y las causas de deforestación como plagas e incendios se vieron reducidas en porcentaje por otras de origen antrópico, como tala con fines agropecuarios, extracción de maderas y secundarios, infraestructura y cambios de uso del suelo con fines industriales o de vivienda; resultado todas ellas básicamente del crecimiento demográfico.

Es un hecho que la deforestación es un problema global, con notable énfasis en América Latina, donde las actividades económicas primarias aún tienen un papel importante en la economía de estos países. Así, estudios han concluido que la deforestación en Colombia,

en la región de la frontera con Ecuador entre 1973 y 1996 alcanzó el 43%, mientras que en el país Andino fue del 22% (Viña *et al.*, 2004). Álvarez y Naughton (2003) mencionan que las tasas de deforestación en la región amazónica varían regionalmente como resultado de la política y de factores macroeconómicos sociales locales. Por su parte, Sánchez- Azofeifa *et al.* (2001) hacen notar que incluso los parques nacionales en países como Costa Rica, que tiene uno de los sistemas de áreas protegidas e investigación de biodiversidad más completos de Latinoamérica, sufren la problemática de la deforestación, aunque en menor grado. En otro estudio, estos autores calcularon en 4.2% la pérdida de cubierta forestal en un área compartida por zonas protegidas por el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (de Costa Rica) y bosque ajeno a este programa de conservación.

Las condiciones del medio natural para México son favorables en cuanto a la porción de zonas con cobertura vegetal importante, tanto en relieve, clima, suelos, régimen pluvial, etc. lo que resulta en una riqueza de este tipo de suma importancia nacional. La disminución notable de sus servicios ha motivado diversos estudios que refuerzan estas ideas, aunque cabe señalar que los menos se abocan a realizar propuestas de mejoramiento de las condiciones forestales en el país.

Para el caso de México, la SEMARNAP ha calculado en porcentajes algunas de las causas principales de la deforestación. La alteración de la cobertura vegetal en selvas y bosques es la más frecuente en México, mientras que los matorrales presentan índices a nivel nacional menores de deforestación. Asimismo, la conversión de vegetación primaria a secundaria es más acelerada que la recuperación de vegetación secundaria a primaria, esto por el hecho de que la vegetación secundaria es la que mayor modificación sufre para adaptarse a los usos agropecuarios. La ganadería ha afectado principalmente a bosques y pastizales, mientras que la agricultura ha transformado preferencialmente selvas y matorrales (semarnat.gob.mx).

La Figura 1.1 muestra las principales causas de deforestación en México y en la tabla 1.2 se especifican las áreas de cobertura de los principales tipos de vegetación y su variación temporal de 1973 al año 2000, donde se puede observar indirectamente con claridad el aumento de los asentamientos humanos (más del 500% de aumento en el área) mientras que las selvas son las que mayor reducción de cobertura presentan.

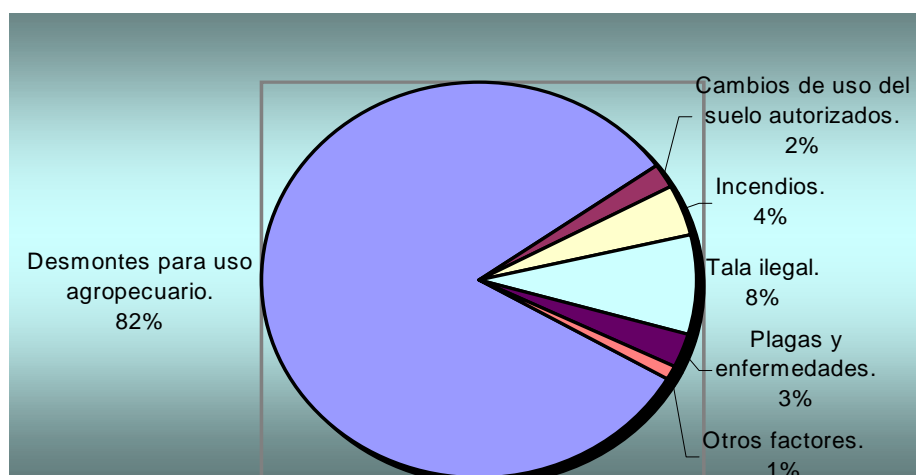


Figura 1.1 Principales causas de la deforestación en México (Fuente: SEMARNAP, 1999, Modificado de Esteban-Chávez, 2003).

Tabla 1.2 Variación temporal en las superficies de diferentes tipos de vegetación y usos del suelo en México

VEGETACIÓN Y USO DEL SUELO	SUPERFICIE (Km ²)		
	1976	1993	2000
Bosque	352 323	346 705	328 002
Selva	378 589	343 641	307 396
Matorral	605 287	576 478	557 416
Pastizal natural	104 907	102 191	85 083
Pastizal inducido y cultivado	150 294	175 732	232 414
Cultivos	263 446	302 087	327 587
Otros tipos de Vegetación*	77 453	76 607	84 327
Asentamientos humanos	2 344	11 204	12 419

*otros tipos de vegetación: áreas sin vegetación aparente, palmar, vegetación acuática, de desiertos arenosos, de dunas costeras, de galería, y gipsófila y halófila

Fuente: Semarnat.gob.mx

Las consecuencias de la destrucción de las selvas tropicales en distintas partes del planeta se han documentado extensamente, sin embargo, éstas continúan siendo reducidas a un ritmo alarmante. Entre 1964 y 1973 la tasa de deforestación en los bosques tropicales a nivel mundial se calculó en 21 hectáreas por minuto, cifra que se traduce en una pérdida anual de alrededor de 11 millones de hectáreas. Por lo que respecta a América Latina, se ha estimado que a finales del siglo XX sus bosques y selvas quedaron reducidos a sólo 366 millones de hectáreas, es decir, el 52.8% de los 693 millones con que originalmente contaba esa región (*ibid*).

Se estima que las selvas tropicales de México abarcaban originariamente 12% del territorio nacional y para 1981 constituían menos del 1%. De acuerdo con la SEMARNAT, entre 1976 y 1980 la deforestación anual de las selvas mexicanas fue de 160,000 hectáreas por año. En 1985, las cifras del INEGI señalan que en el país quedaban un total de 114,060 km² de selvas (*ibid*). En tanto que en 1994 indicaban un total de 196,724 km² de selvas. En la región Lacandona, las selvas húmedas tenían una extensión original de aproximadamente 1,300,000 ha y para 1982 se habían reducido a 584,178 ha. Para los bosques la situación no era mejor, sino por el contrario, diversos autores han señalado una reducción que va de un 5 a un 25 por ciento de la superficie en un período de 30 años (Palacio *et al.*, 2000, Bocco *et al.*, 2001a).

Diversos autores han publicado los resultados de los estudios que han realizado con el objetivo de establecer el área forestal pérdida en México (Sosa y Medina, 1978; Toledo, 1989; Myers, 1988; Masera, 1996; Lichtinger, 2001, citado por Velázquez *et al.*, 2002a), éstos no dejan de establecer en común la creciente problemática de la deforestación. (SEMARNAP, 1998). De acuerdo con la SEMARNAP, el 82% de la deforestación en México se debe a desmontes para uso agropecuario, lo que demuestra el impacto que esta actividad tiene sobre la vegetación y las implicaciones que la eliminación de ésta incluyen (*ibid*).

Tabla 1.3 Tasas de deforestación en México en diferentes años

Año	Tasa de deforestación estimada (miles ha/año)	Fuente
1988	615	FAO, 1988
1989	1 500	Toledo, 1989
1989	746	Castillo et al, 1989
1990	329	SARH, 1990
1991	370	SARH, 1991
1992	668	Masera et al, 1992
2000	631	FAO, 2000
2000	769	Instituto de Geografía, UNAM, 2002

Fuente: Varios

Diversos estudios regionales sostienen que la tasa de deforestación oscila entre 1 y 10.4 por ciento anual (Velázquez *et al*, 2002a) siendo que su tendencia en el corto plazo, es a incrementarse tal insostenible situación (Masera, 1996). Sosa y Medina (1978) estimaron una deforestación anual de 400 mil hectáreas en la década de los 70s (SEMARNAP, 1998). La SARH estimaba que durante la década de los ochenta la pérdida de bosques fue de 370,000 ha anuales. Masera (1996) estimaba que la deforestación oscilaba en un rango de 320,000 y 670,000 ha anuales en la década de los años noventa. De acuerdo con la FAO, la deforestación en México alcanzó en la década de los 90s las 631 mil hectáreas por año (1.07%), lo que colocaría a México como el quinto país con más superficie deforesta cada año (semarnat.gob.mx). Según la OECD, México tiene uno de los índices más altos de deforestación en el mundo, con un índice de pérdida de 1.1% anual (Jaramillo y Kelly, 1998). Asimismo, según el Inventario Nacional Forestal, alrededor de 770,000 hectáreas de bosque se perdieron entre 1993 y 2000.

De acuerdo con Esteban-Chávez (2003) son diversos los trabajos realizados en México con el objetivo de realizar una clasificación de la cobertura vegetal en el territorio nacional. Entre estos cabe destacar el Primer Inventario Forestal (1961-1985), la cartografía de uso del suelo de INEGI de 1968-1986 y de 1990, el Inventario Forestal de Gran Visión (1990), las series I y II de INEGI (1986, 1988), el Inventario Forestal Periódico (SARH, 1994) y el más reciente elaborado inventario forestal periódico desarrollado en conjunto por la SEMARNAP y la UNAM (2000).

De manera particular, en la Sierra Norte de Puebla, donde se ubica el municipio de Tlatlauquitepec, se presenta vegetación de bosque (oyamel, pino, pino-encino, mesófilo de montaña), selva (alta y mediana perennifolia), pastizales (inducido y de cultivo) y áreas de cultivos (Esteban-Chávez, 2003). Galván *et al* (1999) afirman que en general el estado de Puebla ha disminuido notablemente sus recursos forestales por la deforestación y particularmente la Sierra Norte presenta un estado acelerado de disminución de los recursos naturales, básicamente por el cambio de uso de suelo, provocado por la actividad agrícola.

De acuerdo con Cuanalo y Melgarejo (2002) la cubierta forestal de la Sierra Norte de Puebla había tenido un papel regulador en la erosión de los materiales de la región, pero a partir de la década de los 40s esta situación cambió cuando se aceleró el asentamiento de la población en las partes medias y altas de las montañas, población que ante sus necesidades de comunicación y hábitat transformaron el entorno al construir viviendas, carreteras y modificar el terreno, con las actividades agrícolas y ganaderas. Este cambio

del uso del suelo ocasionó una deforestación intensa, que continua hasta el momento, además de las modificaciones en la hidrología y la fauna regionales, junto con la consecuente aceleración de la actividad erosiva. Estas condiciones, además de incrementar la vulnerabilidad de la población, son condicionantes en la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

Esteban-Chávez (2003) menciona que la tala de árboles en el municipio de Tlatlauquitepec se destina principalmente a la venta regional, por lo que la tala opera de forma ilegal, pero respaldada por la población local, en consecuencia es necesario establecer programas de información de los numerosos beneficios que la conservación de la cobertura vegetal proporciona. Municipios perteneciente a la Sierra Norte de Puebla presentan la misma problemática de deforestación, aunque con diferentes causas y objetivos (figura 1.2).



Figura 1.2 Deforestación en el municipio de Tlatlauquitepec, alrededores de la localidad de La Unión.

1.3 Perspectivas de la sustentabilidad forestal en México

Como respuesta a las críticas constantes a las teorías y modelos de desarrollo económico y con fundamentos claros, a fines de la de cada de los 80s, la Comisión para el Desarrollo y el Medio Ambiente de las Naciones Unidas propone el concepto de desarrollo sustentable, que establece que el desarrollo se debe llevar a cabo sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades.

Un punto a destacar en el desarrollo sustentable, es su aplicación primaria en el ámbito local a través de las adaptaciones legales y económicas necesarias, de manera prioritaria a nivel nacional e internacional. Así, las políticas forestales se deben de evaluar en primer instancia a nivel regional, que en el caso de México sería en escala municipal o de pequeñas regiones forestales dentro de los estados, para lograr su correcto funcionamiento y alcanzar resultados a nivel nacional.

La protección ambiental tiene como propósito primario proveer de mecanismos para evaluar costos y beneficios de las actividades del desarrollo antes de su inicio, lo cual no es la constante, pues la aplicación de tales lineamientos se realiza generalmente una vez iniciados los proyectos, cuando es prácticamente imposible modificar los planes de

desarrollo impuestos. En estas condiciones, se recurre al control de daños o bien al intento de corrección de alteraciones en el entorno, aunque no en todos los casos.

Son diversos los programas que se han establecido en México con el principal objetivo de detener la deforestación o bien reestablecer en lo posible las condiciones de cobertura vegetal previas en áreas hoy desprovistas de vegetación, desde la Ley Forestal de 1992 y su modificación en el año 2002. Algunos ejemplos de estos programas son PRODEFOR - Programa de desarrollo forestal-, PRODEPLAN -Programa de Plantaciones Comerciales Forestales- y PRONARE -Programa nacional de reforestación- los cuales aún se encuentran en desarrollo (conafor.gob.mx). Este último ha significado un avance en las estrategias de reforestación, otorgando un peso importante a las especies nativas, el incremento en la supervivencia de los árboles plantados y a la reforestación en zonas rurales, donde los cambios por tala afectan en comparación una mayor superficie. Un dato generado por este programa indica que la extensión reforestada entre 1993 y 2002 fue cercana al 0.5% de la superficie nacional, lo que equivale a dos veces la superficie del estado de Tlaxcala (semarnat.com)

Uno de los documentos que con mayor interés abordan el tema de la explotación forestal sustentable a nivel nacional para los próximos años es el Programa Estratégico Forestal para México 2025, presentado por la Comisión Nacional Forestal. En este se sientan las bases para realizar esta actividad de desarrollo y explotación constante, manteniendo el equilibrio del medio forestal. Como objetivo principal se ha planteado en el programa "lograr una gestión sustentable de los ecosistemas forestales, a través del fomento forestal integral cada vez más eficiente y el estímulo a esta forma de producción y conservación, el mejoramiento del bienestar social, especialmente en las áreas rurales, y el mantenimiento del potencial de producción maderable, no maderable y de servicios ambientales". Lo anterior resulta de las tendencias mundiales en el concepto de desarrollo sustentable, particularmente en la vegetación natural.

Con la dirección que señalan estas nuevas tendencias mundiales, la Comisión Nacional Forestal, constituida en el año 2001, elaboró este programa, que describe por primera vez en la historia de nuestro país, un diagnóstico, los objetivos, las estrategias y las acciones prioritarias que orientarán hacia un desarrollo forestal sustentable del país en los próximos 25 años, en un contexto que plantea problemas cada vez más complejos pero que en teoría también ofrece nuevas oportunidades.

El objetivo del "Programa Estratégico Forestal para México 2025 (PEF)", es impulsar y fortalecer el desarrollo sustentable de los recursos naturales en los ecosistemas forestales mediante acciones de conservación, protección, restauración, fomento y producción para el bienestar de la sociedad, con base en ajustes de las políticas, instituciones y legislación, así como en la propuesta de un programa de inversiones. El propósito es aprovechar las estrategias establecidas para formular planes y programas operacionales de corto, mediano y largo plazos, orientados al uso sustentable de los recursos forestales.

El PRONARE busca incrementar la eficiencia en el proceso de reforestación con objetivos de restauración en sitios potenciales previamente seleccionados, en estrecha colaboración con los propietarios y poseedores las áreas por reforestar.

La puesta en marcha necesita considerar que estos proyectos a mediano plazo en aspectos ambientales deberán ser económicamente viables, socialmente aceptables y ambientalmente factibles y para ello, la sociedad y las organizaciones mexicanas deberán

aprender que hoy ganan y ganarán más mañana, si invierten en procesos acordes con la naturaleza y que respeten y acrecienten el capital natural.

Tabla 1.4 Condiciones de reforestación desde 1993 hasta el año 2003 en México.

Año	Superficie reforestada (ha.)	Árboles producidos	Reforestación en zonas rurales (%)
1993	14 513	264 019	58.54
1994	42 303	89 285	40.13
1995	64 048	177 076	70.01
1996	109 880	364 729	67.72
1997	139 829	247 856	89.22
1998	200 621	292 136	89.42
1999	225 151	308 702	86.96
2000	240 495	292 565	90.9
2001	164 823	202 700	92.78

Fuente: PEF, 2005

1.4 Reforestación y servicios ambientales

Previamente se ha establecido que la pérdida de vegetación natural por el cambio de uso del suelo influye directamente en la biodiversidad local o regional, además de acelerar procesos naturales ya descritos como erosión e inundaciones. Sin embargo, su impacto puede ir más allá al incidir directa o indirectamente en la economía, en escalas tanto municipales como nacional, por ejemplo por el proceso de sedimentación y, principalmente, por la disminución de los ingresos derivados de los productos y servicios forestales, por ejemplo el ecoturismo, aún poco desarrollado en México.

El pago por servicios ambientales ha cobrado importancia por el mayor conocimiento de los bienes y servicios que se pueden obtener de los diversos ecosistemas, cuyos beneficios pueden ser dirigidos, tanto a las poblaciones urbanas como rurales. Parte de esta visión tiene su origen en la búsqueda de mecanismos para la conservación de tales ecosistemas y en su aprovechamiento continuo pero sostenible.

El Programa Nacional Forestal 2001-2006, en su apartado 3.9 establece que en México se cuenta con gran potencial para aprovechar el mercado de Servicios Ambientales, debido a la riqueza natural del territorio. La gran superficie de los ecosistemas forestales del país permite la captura de un volumen de carbono muy importante. En este aspecto, existen proyectos piloto que pueden aprovecharse para el desarrollo del mercado de los servicios ambientales. Lo anterior gracias a la gran diversidad genética, la cual está entre las mayores del mundo y es una ventaja comparativa de gran valor, aunque no se ha podido aprovechar al máximo. El desarrollo de este potencial serviría como una fuente importante de ingresos para el sector forestal, mismos que representarían un aporte adicional tanto en la conservación de las zonas con cobertura vegetal natural actuales, como en la recuperación de las áreas perdidas.

El principal problema de los servicios ambientales, desde el punto de vista de la sustentabilidad, es que su mercado es incipiente y no funciona adecuadamente, ya que no existe un precio que refleje cuánto cuesta mantenerlos o cuántos beneficios generan, lo que pone de manifiesto el desconocimiento de parte de la biodiversidad en el país, y

principalmente su uso potencial. Para lograr afrontar estos problemas es necesario establecer esquemas que establezcan, consoliden y promuevan mercados para servicios ambientales, incentivar a los propietarios de áreas forestales a la conservación, protección y manejo sustentable de sus recursos, por mencionar un par de alternativas.

Otra de las razones de las deficiencias del mercado de servicios ambientales es el desconocimiento de sus características. Es todavía muy difícil cuantificarlos y darles un precio. Un problema adicional tiene que ver con la tenencia y el productor de los servicios ambientales. Se considera a éstos como una externalidad, no como un producto generado por los propietarios de los recursos forestales, lo que dificulta el cobro directo por su utilización. Falta crear el marco legal y los mecanismos de cobro por su aprovechamiento, que es una condición para el establecimiento del mercado. Aquí la cuestión importante es que el conocimiento de la biodiversidad no sea un puente de enlace entre intermediarios que limiten la llegada de los beneficios a los dueños tradicionales de las tierras.

Respecto al mercado de captura de carbono, éste todavía no existe. Las negociaciones internacionales están estancadas y la participación de los bosques y selvas no está definida, en forma explícita. Sin embargo, esta condición está cerca de ser superada y entonces los medios naturales adquirirán un valor extra al otorgado actualmente. Respecto a la bioprospección que es un producto en el mercado de la biodiversidad, falta resolver los derechos de propiedad sobre el uso de flora y fauna para promoverlo, situación que se presenta preferencialmente el sureste de México, por ejemplo con el Corredor Biológico Mesoamericano (CBM).

Es indiscutible que la conservación de la biodiversidad en México está estrechamente ligada a la conservación de la cobertura vegetal natural. En este rubro, el problema se divide en dos partes: mantenimiento de la biodiversidad en las áreas forestales comerciales y en las áreas naturales protegidas (ANP). La insuficiente atención prestada por parte de las autoridades responsables a la ejecución de los programas de manejo, no ha contribuido a mejorar la condición ambiental en los bosques bajo manejo sistemático. Paralelamente, la pérdida de la cobertura vegetal natural tiene como consecuencia la pérdida de seres vivos, lo cual repercute en la disminución de recursos energéticos para todo el sistema natural o para alternativas farmacéuticas como consecuencias alternas.

Las Áreas Naturales Protegidas se destinan a conservar el hábitat y ecorregiones sin mayor o ninguna influencia humana. El Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) se componen de 127 áreas decretadas y corresponden al 8.67% del territorio nacional. En general, se considera que estas áreas son aún insuficientes y poco representativas, tomando en cuenta la diversidad biológica existente en México, y más aún es inadecuado el manejo que se ha realizado en estas áreas resguardadas.

Las causas de pérdida de la biodiversidad son las mismas que producen la deforestación y degradación de los ecosistemas forestales. La situación de las ANP está relacionada con la ausencia o debilidad de la supervisión y vigilancia para la aplicación de las leyes de conservación de los recursos naturales; faltan puestos de trabajo estables y bien remunerados; en muchos casos, los asentamientos humanos no han sido regularizados, además, existe todavía régimen de propiedad privada, ejidal y comunal dentro de las ANP y predomina el desconocimiento de la población, en general, en cuanto a los beneficios aportados por las mismas.

Sin duda, uno de los principales problemas de la administración forestal es la falta de continuidad, que ha contribuido a que las políticas sean inestables y cambiantes. Hasta ahora, la gestión en el sector forestal ha carecido de una completa articulación de los tres órdenes de gobierno en la definición y aplicación de los programas forestales. Tal situación también se presenta en los procesos de definición de políticas, estrategias y proyectos entre la dependencia responsable de la administración de los recursos forestales y las instancias de gobierno federal, estatal y municipal vinculadas con el sector forestal.

Debido a políticas inestables, la operación del sector forestal es deficiente. Por ejemplo, la prestación de servicios técnicos no ha sido consolidada adecuadamente. De igual manera, la evaluación y seguimiento de los programas de manejo no han sido efectivos por los frecuentes cambios organizacionales de las dependencias de gobierno, intensificados en los últimos diez años, que derivaron en la insuficiencia de recursos humanos y materiales en las dependencias responsables de la supervisión.

Más allá de las confusiones o lagunas legales que pudieran existir en la documentación legal que rige la actividad forestal en México, la mayor problemática se encuentra en la aplicación de tales lineamientos. La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en su artículo 4º. describe que toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar. Más aún, el Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006 establece que el medio ambiente es prioritario para el Ejecutivo Federal, buscando el desarrollo sustentable de la Nación.

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, publicada en febrero del 2003, establece objetivos generales en donde destacan el impulso a la silvicultura y el desarrollo de bienes y servicios ambientales, cuyo fin principal es detener la acelerada deforestación en el territorio nacional. La misma ley busca promover los beneficios de preservar e incrementar la cobertura forestal, regular esta iniciativa y establecer las condiciones que propicien el manejo forestal (Diario Oficial de la Federación, Febrero 2003).

Punto importante de este decreto de regulación, en el Título Cuarto, donde se establecen los lineamientos del aprovechamiento de los recursos forestales, que implican en muchos casos el cambio de uso del suelo, así como las condiciones en que se nieguen, suspendan o limiten estos aprovechamientos, así como los sujetos facultados para realizar esta explotación, que en los artículos 117 y 118 del mismo documento detallan esta situación.

1.5 Cobertura Vegetal e inestabilidad

En la naturaleza cada elemento tiene una función de equilibrio en diversos aspectos, incluido el geomorfológico. Por ejemplo, la vegetación cumple su función como uno de los factores que mantiene el equilibrio en el paisaje entre las fuerzas endógenas y formadoras y los procesos exógenos erosivos, de tal forma, que la ocurrencia de movimientos gravitacionales o procesos de remoción se incrementa en gran medida cuando la cobertura vegetal es removida o alterada.

La inestabilidad del terreno es resultado de la interacción de diversos factores, que se deben de conjugar para que se presenten procesos de remoción en masa, entre los que destacan la pendiente, litología, cambio de uso de suelo, precipitación intensa, sismos,

actividad volcánica, etc. Asimismo, el peso específico en que cada uno de estos agentes interviene en la inestabilidad del terreno depende de las condiciones en que se suscite dicho fenómeno, es decir, en ciertos escenarios la pendiente puede condicionar la ocurrencia de un proceso gravitacional, mientras que en otro momento lluvias intensas pueden detonar un proceso de ladera o bien procesos paulatinos que actúan sobre la resistencia de los materiales. En otros casos, ciertas condiciones pueden acelerar la ocurrencia de procesos, tal es el caso de la construcción de carreteras, la actividad minera o la desecación de cuerpos de agua.

A pesar de que la influencia de arbustos, árboles y demás vegetación en la inestabilidad del terreno es compleja y difícil de analizar, numerosos trabajos han establecido una relación directa entre el cambio del uso del suelo y el incremento de procesos de remoción en masa. Por ejemplo, los que de forma cuantitativa relacionan las áreas deforestadas o en proceso de cambio de uso del suelo y la ocurrencia reciente de deslizamientos. Gerrard y Gardner (2002) elaboraron una investigación en las colinas de Nepal, donde establecen que existe una relación que muestra que los procesos de ladera se presentan preferencialmente en áreas deforestadas. Sin embargo, en el mismo estudio mencionan que esto puede depender del manejo del suelo que se lleve a cabo posterior a la tala. Por su parte, Glade (2003) refiere a trabajos de Cruden y Varnes y Dikau, además de varios estudios en Europa, donde se establece la relación deforestación-inestabilidad. Este autor concluye que desde el siglo XIX se ha intensificado esta correlación, que si bien se puede presentar por procesos propios de la naturaleza, la actividad antrópica ha acelerado la inestabilidad de laderas y concluye que existe una relación directa en el cambio de uso del suelo y la presencia de procesos de remoción en masa en Nueva Zelanda.

Son diversos los escenarios y las causas que se analizan en la inestabilidad con relación al cambio de uso del suelo, por ejemplo procesos de sedimentación (Grant, 1985; McFadgen, 1994; Eden y Page, 1998), las modificaciones en los sistemas de raíces (O'Loughlin y Ziemer, 1982; Phillips y Watson, 1994), modificaciones en la precipitación local (Phillips, *et al*, 1990), las actividades propias de comunidades o grupos autóctonos (Page *et al.*, 2004), incremento en la erosión fluvial (Marutani, *et al*, 2001) y en relación con lo anterior, la aceleración en el desarrollo de barrancos y cárcavas (Page *et al*, 2004; Reid y Page, 2003); todos ellos tienen como factor común la deforestación.

La vegetación protege a los suelos de los agentes erosivos, por ejemplo, del viento y los escurrimientos superficiales, así como de la intensidad del interemperismo, por la intervención de hojas y los tallos que absorben parcialmente la energía de dichos agentes erosivos, de tal manera, que la repercusión directa en el suelo se reduce. Por otro lado, el sistema de raíces define la resistencia mecánica del suelo, elemento primordial en la inestabilidad de laderas.

La importancia de los sistemas de raíces de la cobertura vegetal y su relación con la estabilidad de suelos, y en general del terreno, se ha incrementado en los últimos años. En específico, diversos autores han encontrado una relación entre la ausencia o disminución de estos sistemas, básicamente por deforestación, y el incremento del número de deslizamientos superficiales. Asimismo, se han establecido propuestas de reforzamiento de dichos sistemas y los resultados en la estabilidad han sido documentados en diversas regiones del mundo, con características de la vegetación diferentes (O'Loughlin y Ziemer, 1982).

Los estudios relacionados al reforzamientos de los sistemas de raíces y la estabilidad de laderas se han enfocado en cuatro lineamientos principales(*ibid*):

- ✚ mediciones de campo y en laboratorio de la importancia del reforzamiento de raíces en la preservación del suelo
- ✚ cálculos indirectos de la contribución de las raíces al reforzamiento, la densidad, la distribución y la generación de suelos
- ✚ desarrollo de análisis teóricos de estabilidad de laderas, a partir de un análisis retrospectivo o determinación de las condiciones previas del terreno, empleando propiedades físicas y mecánicas del suelo y datos estimados de la influencia de las raíces a través de modelaciones
- ✚ estudios de laboratorio de la resistencia que proveen diversos tipos de raíces de especies diversas de árboles y las consecuencias en la inestabilidad ante la deforestación

Son diversos los autores que han abordado en diferentes trabajos la correlación entre raíces y estabilidad del terreno, por ejemplo Endo y Tsuruta (1969) en Japón; Kitamura y Namba (1966) analizaron la reducción de la resistencia de los suelos después de la tala de los árboles locales; Bishop y Stevens (1964); Burroughs y Thomas estimaron entre 3 y 5 años la máxima pérdida de resistencia del suelo, después de la deforestación de la ladera (1977); asimismo, Gray (1970), Wu (1979), Waldron (1981) y Megahan (1983) han publicado artículos sobre la importancia de mantener los sistemas de raíces para conservar los suelos, evitar la reptación y no inducir la inestabilidad del terreno.

En los últimos años destacan los trabajos publicados por Robert Ziemer, Douglas Swantson y Colin O'Loughlin, quienes por separado o con otros autores se han abocado al análisis de las raíces, la pérdida de estos sistemas, el reforzamiento de laderas, la modelación de condiciones previas a la tala y los beneficios de la reforestación, así como de técnicas de cuantificación de los mecanismos cohesivos de árboles, arbustos y vegetación en general.

La profundidad de las raíces es un factor determinante en la estabilización de una ladera, pues éstas se vuelven más resistentes conforme son más profundas, así mientras los pastos alcanzan raíces de tan sólo 20 cms. de profundidad, algunos árboles tropicales pueden tener raíces de 30 m. bajo la superficie. Asimismo, la densidad y el tamaño de las raíces condiciona el grado de influencia de estos sistemas. Estudios de Tsukamoto y Kusakabe (1984) describen diferentes tipos de anclaje de las raíces al terreno, de acuerdo a la profundidad en que se ubique la roca sana no meteorizada (Greenway, 1987).

Las características de las raíces están en función de distintos factores, por ejemplo la especie vegetal, la edad, las propiedades del suelo, el ambiente, etc. Las raíces, por medio de diversos procesos biológicos, generan compuestos fibrosos que contienen propiedades de adhesión que influyen directamente en la retención del suelo, es decir en la cohesión, por lo tanto en el movimiento de reptación y consecuentemente reduce la inestabilidad del terreno (Greenway, 1987).

O'Loughin (1984) describe que las raíces entre 1 y 20 mm de diámetro tienen una influencia en el reforzamiento del suelo; sin embargo, raíces de mayor grosor no tienen un papel más importante en este aspecto. Otros trabajos concluyen que el reforzamiento por raíces, incluso con baja densidad de estas, es importante en la estabilización del suelo (Waldron, 1981).

Los problemas de estabilidad de suelos, relacionados a la ausencia o disminución de los sistemas de raíces no se presentan de forma inmediata, pues a pesar de la tala de la cubierta forestal, las raíces permanecen influyendo en la cohesión del suelo. De acuerdo con Ziemer (1981), después de dos años de despoblar de vegetación a una ladera, aún se mantiene el 50% del reforzamiento por raíces y la pérdida total se presenta alrededor de los 9 años, conclusiones similares a las dadas por Burroughs y Thomas (1997), previamente mencionadas. La reducción de la influencia de las raíces depende del tipo de vegetación, el tamaño de la raíz y de los microorganismos presentes en el suelo, entre otros. Sin embargo, en el caso de la reforestación es más lenta la recuperación del reforzamiento del suelo original, pues para conseguir el 50% de este reforzamiento se requieren en promedio 14 años y cerca de 23 para alcanzar las condiciones previas a la remoción de la cobertura vegetal. Los mecanismos a través de los cuales la vegetación influye en la estabilidad se clasifican en hidrológicos y físicos. Los primeros están en función de las distintas fases del ciclo hidrológico que se presentan con la vegetación existente, mientras que los físicos provienen de las interacciones mecánicas del follaje o del sistema de raíces de la vegetación en el terreno.

La influencia de la vegetación puede ser tanto benéfica como adversa a la estabilidad. Los mecanismos hidrológicos que conducen a una presión de los poros de agua menor son benéficos, mientras que aquellos que incrementan dicha presión son adversos. Cabe destacar que dentro de los mecanismos físicos, los que incrementan la resistencia de fijación de las raíces al terreno son benéficos, mientras que los que la disminuyen son adversos (Greenway, 1987). Es importante destacar que no todos los factores mencionados son aplicables a todas las laderas, ya que su grado de complejidad está determinado por las características de los materiales, además, de que el peso específico de cada factor puede indudablemente variar de un terreno a otro (Alcántara-Ayala *et al*, inédito). En la tabla 1.5 se especifican los mecanismos y su condición respecto a la inestabilidad y en la figura 1.3 se muestra un esquema de la acción de estos mecanismos.

Tabla 1.5 Mecanismos físicos e hidrológicos de la vegetación asociados a inestabilidad de laderas.

	Favorables a la estabilidad	Desfavorables a la estabilidad
Mecanismos hidrológicos	Intercepción de la precipitación a través del follaje, lo cual causa pérdida de evaporación y absorción y disminuye la cantidad de lluvia disponible para infiltración.	La rugosidad y permeabilidad del terreno se incrementa por la existencia de raíces y tallos, de tal manera, que también hay un aumento en la capacidad de infiltración del suelo.
	Las raíces extraen la humedad del suelo, la cual se pierde a través de la transpiración originando la reducción de presiones de poro.	La disminución de la humedad del suelo puede acentuar la desecación, y por lo tanto, el agrietamiento del suelo, lo que implica una alta capacidad de infiltración del suelo.
Mecanismos físicos	La sobrecarga del peso de los árboles en la ladera, incrementa la fuerza normal de los componentes en la pendiente.	
	Las raíces refuerzan el suelo, incrementando la resistencia.	La vegetación expuesta a la fuerza del viento transmite una fuerza dinámica a la ladera, favoreciendo un desequilibrio.
	Las raíces de los árboles pueden penetrar en estratos firmes, sujetándolos y promoviendo soporte a las capas de suelo de la parte superior de la ladera.	
	Las raíces sirven para la adhesión de partículas en la superficie del terreno por lo que la susceptibilidad a la erosión se reduce.	

Fuente: Greenway, 1987.

La vegetación con relación a la inestabilidad de laderas cumple con dos funciones principales; por un lado, es un factor determinante en el contenido de agua en la superficie, y por el otro, también influye en la consistencia del sistema de entramado mecánico de las raíces (Greenway, 1987).

La lluvia provee de agua a la ladera, líquido que es interceptado y absorbido por el follaje, o bien evaporado, lo cual reduce la cantidad infiltrada. En este contexto, el agua es considerada como una pérdida al regresar a la atmósfera. El consumo de agua por parte de la vegetación depende del tipo, tamaño y especie, el clima, la topografía (declive, orientación de la pendiente) y el tipo de suelo principalmente.

Por otro lado, los sistemas de raíces favorecen la infiltración y reducen el escurrimiento al incrementar la permeabilidad. Los canales asociados a las raíces favorecen la erosión a través de conductos internos en algunos suelos. Sin embargo, las raíces absorben agua disminuyendo la humedad del suelo por medio de la transpiración del follaje, lo que ocasiona en algunos casos, desecación y la formación de grietas, que pueden incrementar la permeabilidad y la capacidad de infiltración de los suelos. La infiltración es resultado de un proceso complicado, donde existe la influencia de la vegetación y otros diversos factores, por ejemplo, las características de la precipitación, las propiedades de los materiales, la topografía, el clima y el uso de suelo. El incremento de la capacidad de infiltración y permeabilidad de una superficie con vegetación puede atribuirse, entre otros factores, a la presencia de raíces y al aumento de la rugosidad de la superficie.

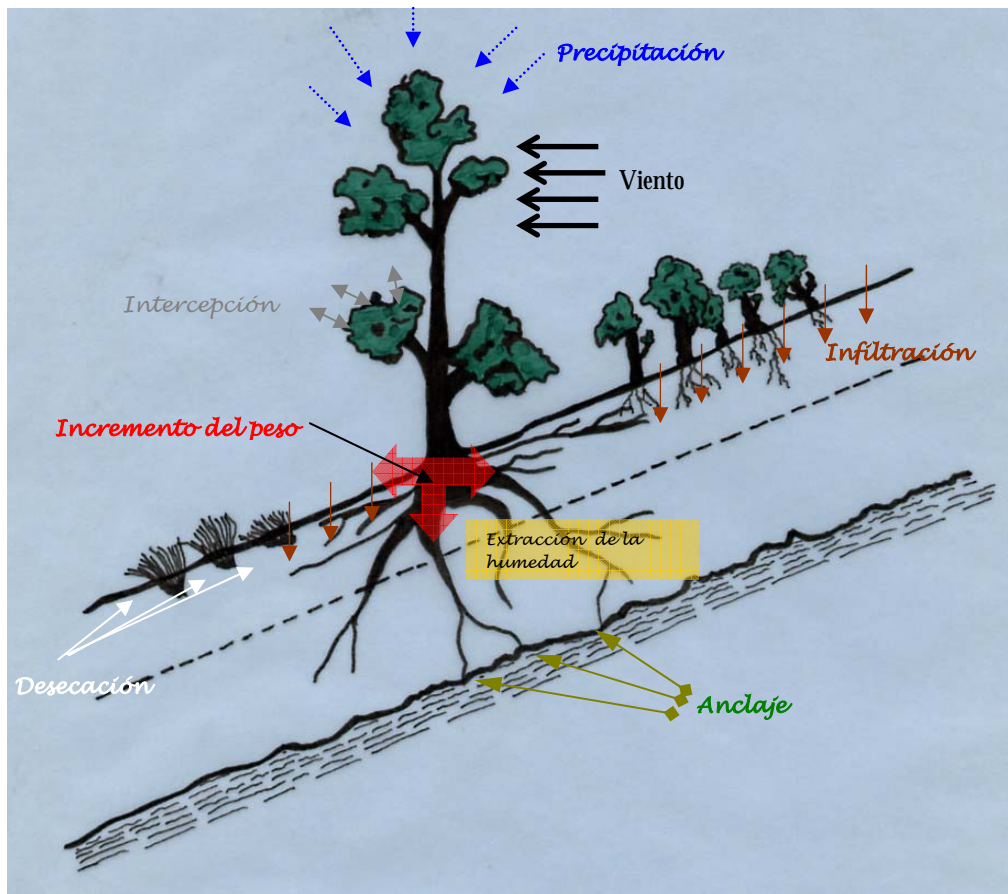


Figura 1.3 Interacción entre vegetación y estabilidad de laderas (Modificado de Greenway, 1987).

Un factor que puede ser negativo a la estabilidad de un ladera es el peso de los árboles, ya que es una carga adicional al terreno, e incrementa la componente normal de fuerza ladera abajo en potenciales superficies de falla. La vegetación expuesta sobre la superficie transmite fuerza dinámica a la pendiente, impulsada por energía eólica, y si la vegetación es desarraigada o vuelca, puede incrementar la erosión y la infiltración.

La susceptibilidad de laderas a la ocurrencia de procesos de remoción en masa puede disminuir por el correcto establecimiento de una cobertura vegetal. El uso sistemático de coberturas vegetales inducidas con el objetivo de prevenir deslizamientos se ha empleado durante siglos en diferentes culturas. Sin embargo, diversos estudios muestran que una ladera totalmente poblada de vegetación no siempre aporta estabilidad al terreno, por el sobrepeso que dicha cobertura puede generar, no así el caso de la deforestación, donde con mayor probabilidad es factible encontrar una ladera inestable (Collison y Anderson, 1996).

En la figura 1.4 se observan diferentes tipos de anclaje por parte de las raíces. La imagen A representa capas delgadas de suelo sobre roca firme, que no presenta fracturas e impide el anclaje; la figura B simboliza igualmente una capa delgada de suelo, pero la roca estable presenta fallas en su composición que permite que las raíces penetren y se sujeten, reteniendo la capa de suelo; diversas capas de suelo se muestran en la ilustración C, donde el sistema de raíces sólo se distribuye en el suelo, pero al ser más profundo retiene con mayor fuerza la vegetación; por último, el esquema D muestra un tipo de suelo de gran desarrollo y profundidad, pero que no logra anclarse a roca firme.

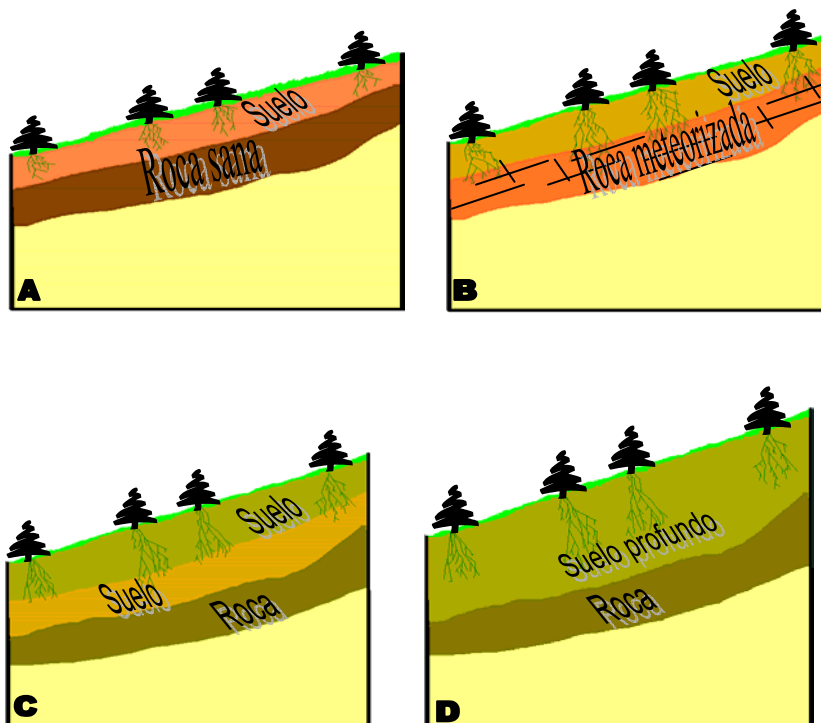


Figura 1.4 Diferentes tipos de anclaje del sistema de raíces (Fuente: Modificado de Greenway, 1987).

1.6 Cambio de uso de suelo e inestabilidad

La pendiente es quizás el factor clave relacionado a la ocurrencia de deslizamientos, sin dejar de lado las considerables combinaciones de los otros factores de inestabilidad. En ocasiones la litología, la cobertura vegetal o la influencia antrópica, etc., pueden tener un peso determinante en la ocurrencia de procesos.

Para establecer la importancia del cambio de uso del suelo en la inestabilidad de laderas en la Sierra Norte se han analizado de forma cualitativa, las condiciones de relieve (pendiente y principales cauces), litología, cobertura vegetal y red carretera de la carta topográfica Teziutlán. Cabe mencionar que estudios previos en la Sierra Norte de Puebla que reafirman la importancia de la deforestación en la inestabilidad de laderas y el consecuente incremento en la probabilidad de ocurrencia de procesos gravitacionales (Cuanalo y Melgarejo, 2002; Alcántara-Ayala *et al*, inédito; Esteban-Chávez, 2003; Sánchez-Titla, 2005; Borja-Baeza *et al.*, 2006).

Los procesos de ladera se ven influenciados por la litología de dos formas; por un lado, la superficie de falla se puede encontrar dentro del mismo estrato o la misma litología y la ruptura se deba a características propias del tipo de roca (propiedades mecánicas, cohesión, ángulo de fricción, etc); o bien la superficie de falla se pueda presentar entre contactos litológicos de rocas de distinto origen, edad o características litológicas. Las laderas que se encuentran casi paralelas a los estratos de materiales sedimentarios o en la misma dirección de contactos estratigráficos y/o fracturamientos de cualquier material, son más susceptibles a deslizamientos que aquellas que no tienen este arreglo estratigráfico. Esta característica se magnifica en materiales sedimentarios (figura 1.5).

De acuerdo con la litología de la región, misma que se describe con mayor detalle en el capítulo 2, los procesos de remoción en masa en el municipio de Tlatlauquitepec se distribuyen de la siguiente forma: de los 183 procesos registrados por la Secretaría de Protección Civil de Puebla y por recorrido de campo, 129 de ellos se presentaron en materiales volcánicos cuaternarios, mientras que 5 se ubican en materiales metamórficos del Paleozoico, 49 en materiales sedimentarios. Con la información digital de geología con que se cuenta es difícil establecer el área exacta ocupada por cada tipo de roca, por ejemplo para las rocas calizas, que están representadas por montañas, el área es mucho mayor a la que se representa en una imagen bidimensional o en plano. Sin embargo, y considerando áreas en una imagen bidimensional, es posible afirmar que existe una ocupación espacial mayor de los materiales volcánicos (52, 553 has en plano) en relación a las rocas sedimentarias (39,974 has), mientras que los afloramientos de rocas metamórficas son mínimos (3,127 has.).

La información del área ocupada por las rocas ígneas y las sedimentarias en la carta Teziutlán no es suficiente para argumentar que a mayor área equivale un mayor número de procesos, por lo que la causa principal de que se presentaran más procesos en rocas de origen volcánico se debe a que son materiales no consolidados, arenosos, muy vulnerables a la erosión fluvial y que de acuerdo con Cuanalo y Melgarejo (2002) presentan superficies de falla plana, que son típicas de suelos friccionantes. Adicionalmente, un agente determinante en la inestabilidad es la pendiente, misma que es en general suave o poco inclinada en los materiales ígneos, mientras que en las rocas sedimentarias frecuentemente supera los 12°, pues constituyen las sierras regionales, condición que reafirma a las rocas volcánicas y su baja consolidación como la causa litológica de ocurrencia de procesos de ladera.

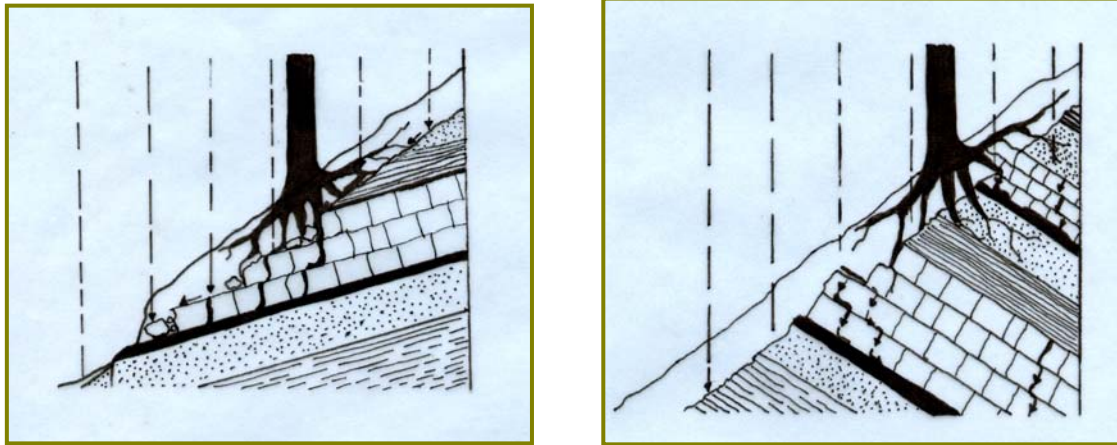


Figura 1.5 Flujo subsuperficial en diferente arreglo estructural. El flujo subsuperficial fluye en la dirección de la pendiente cuando los estratos están a favor de ésta; cuando los estratos son casi perpendiculares a la pendiente, el flujo subsuperficial fluye a favor de los estratos, incrementando la infiltración. En el primer caso, la litología favorece la inestabilidad pero la saturación es menor, y en el segundo caso, la litología favorece la estabilidad pero permite una mayor saturación con el consecuente incremento de peso en la ladera.

En cuanto a la pendiente, la mayoría de los procesos se distribuyen en declives entre los 10° y los 30° , que es el rango donde generalmente se presentan los deslizamientos en la mayoría de los materiales, lo que representa el 79% de los deslizamientos reconocidos en la carta Teziutlán (figura 1.6). El 9% de los procesos registrados ocurrieron en pendientes menores a los 10° , es decir en las planicies y en rampas de materiales piroclásticos. El 11% de los procesos gravitacionales se presentaron en pendientes superiores a los 32° , siendo la mayoría de estos en materiales sedimentarios y muchos de ellos por reactivación. Es importante recordar que ciertos procesos, como las expansiones laterales o el vuelco, se presentan en pendientes poco inclinadas, casi planas, o en el caso de los segundos en declives muy pronunciados casi en ángulos rectos. Estos porcentajes denotan una importancia de la pendiente determinante en la inestabilidad del terreno, lo cual es la constante en todos los estudios de procesos de remoción en masa en el mundo, independientemente del enfoque con que se aborde la temática.

Tomando como base la homogenización de los Inventarios Forestales Nacionales de 1994 y el año 2000, elaborada por Esteban-Chávez (2003) para la Sierra Norte de Puebla, las zonas consideradas como deforestadas abarcan aproximadamente el 19% (176 Km^2) del área de la carta Teziutlán (962 Km^2); ahí se registraron 78 procesos de remoción en masa en estas áreas, lo que corresponde a casi el 42.5 % del total de movimientos registrados. Es decir, en la quinta parte del área de la carta Teziutlán, que corresponde a las zonas deforestadas o alteradas, se presentaron poco menos de la mitad de los procesos de remoción en masa, lo que establece una relación importante deforestación-inestabilidad (figura 1.7).

Más aún, la pendiente mantiene la importancia en la incidencia de la inestabilidad que generalmente presenta, pero en las zonas deforestadas este peso específico disminuye. Por ejemplo, en pendientes inferiores a los 3° disminuye el área relativa en las áreas deforestadas respecto al total de la carta, pero se incrementa el porcentaje de procesos ocurridos. En declives superiores a los 32° casi se duplicó el número de procesos de ladera en zonas deforestadas, mientras que en el rango entre 12° y 18°, en el cual ocurrieron 20% de los deslizamientos en la carta, disminuye el porcentaje en las zonas deforestadas. Lo anterior, es una aproximación cuantitativa a la relación del porcentaje de procesos por pendiente en zonas deforestadas y en zonas con cobertura vegetal natural, donde se puede concluir que en las zonas alteradas este hecho influye, de forma importante, en la inestabilidad del terreno. Tales procesos ocurrieron principalmente en materiales volcánicos y únicamente 9 en sedimentarios; sin embargo, en los materiales metamórficos que sólo representan el 9% de las zonas perturbadas ocurrieron 17 procesos (21%), lo que evidencia una vez más el factor deforestación, puesto que rompe con la tendencia de la influencia litológica en los procesos gravitacionales (tabla 1.6).

Uno de los cambios de uso del suelo que mayor inestabilidad causan en el terreno son las carreteras, puesto que en ocasiones rompen con la pendiente y los cortes no siempre son los adecuados considerando el material, la anchura de la vía y la pendiente de la ladera. Para el caso de la Sierra Norte de Puebla, esto se acentúa por la topografía montañosa de la región. Por ejemplo, de las principales carreteras de la carta Teziutlán, cuya red recorre 362 Km., casi 32 km. (8.83%) se construyeron en declives superiores a los 24°, lo cual dificulta mantener la estabilidad del terreno, mientras que tan sólo 72 Km. (19.88%) se cimentaron en planicies menores a 3° (figura 1.8).

Tabla 1.6 Relación entre zonas deforestadas, pendiente y procesos de remoción en masa en la carta Teziutlán.

Pendiente (°)	Área en la carta Teziutlán (%)	Procesos ocurridos en toda la carta topográfica (%)	Área de zonas deforestadas en %	Porcentaje de procesos ocurridos en áreas deforestadas
< 1.5	4	2.73	2.00	2.56
1.5-3	6.9	3.82	5.45	8.97
3-6	14	14.75	12.09	12.82
6-12	25.7	19.67	26.55	15.38
12-18	18.2	20.25	19.79	17.94
18-24	13.1	13.11	12.44	12.82
24-32	11.1	14.2	11.93	15.38
>32	7	11.47	9.75	14.10

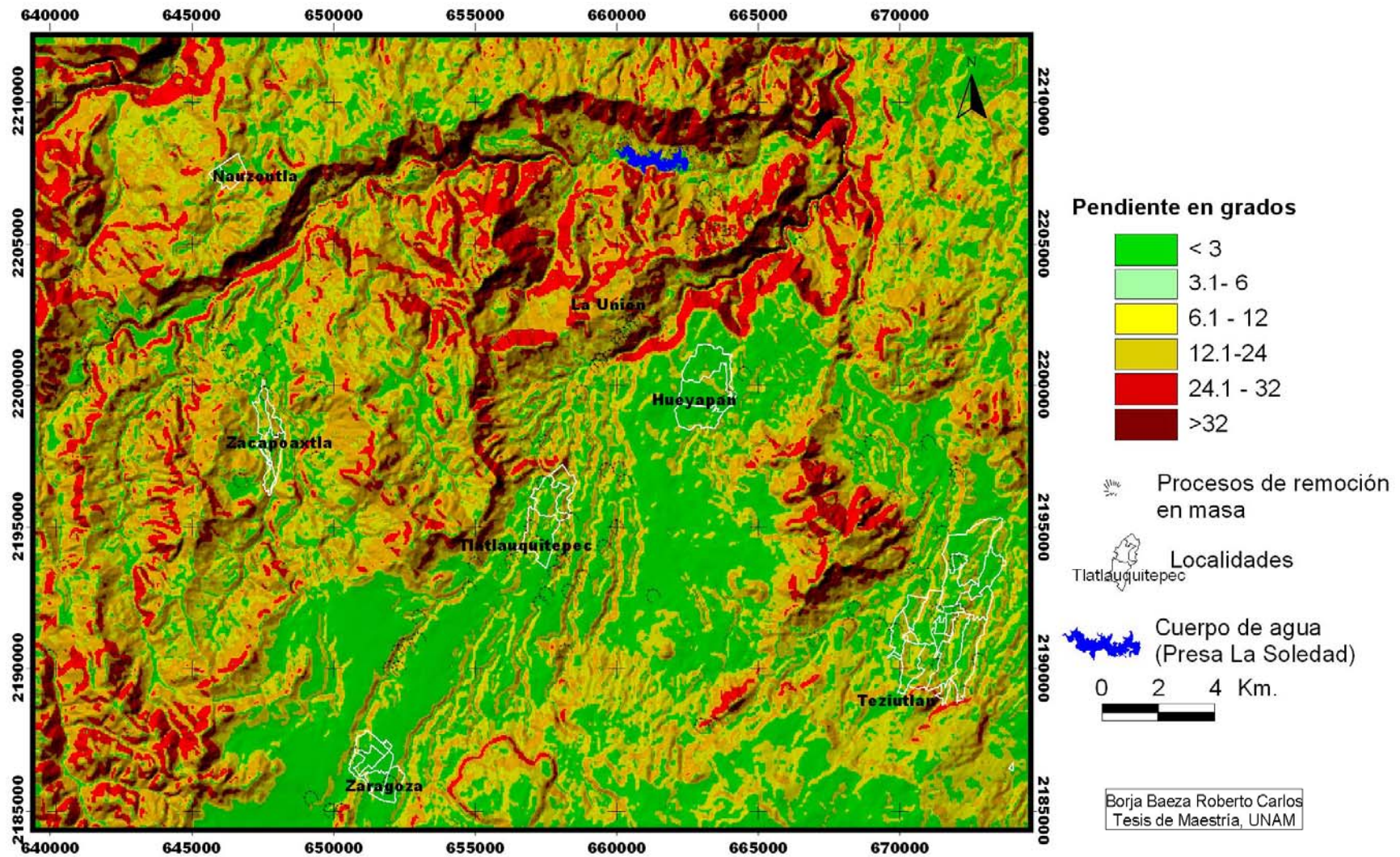


Figura 1.6 Mapa de pendientes de la carta Teziutlán

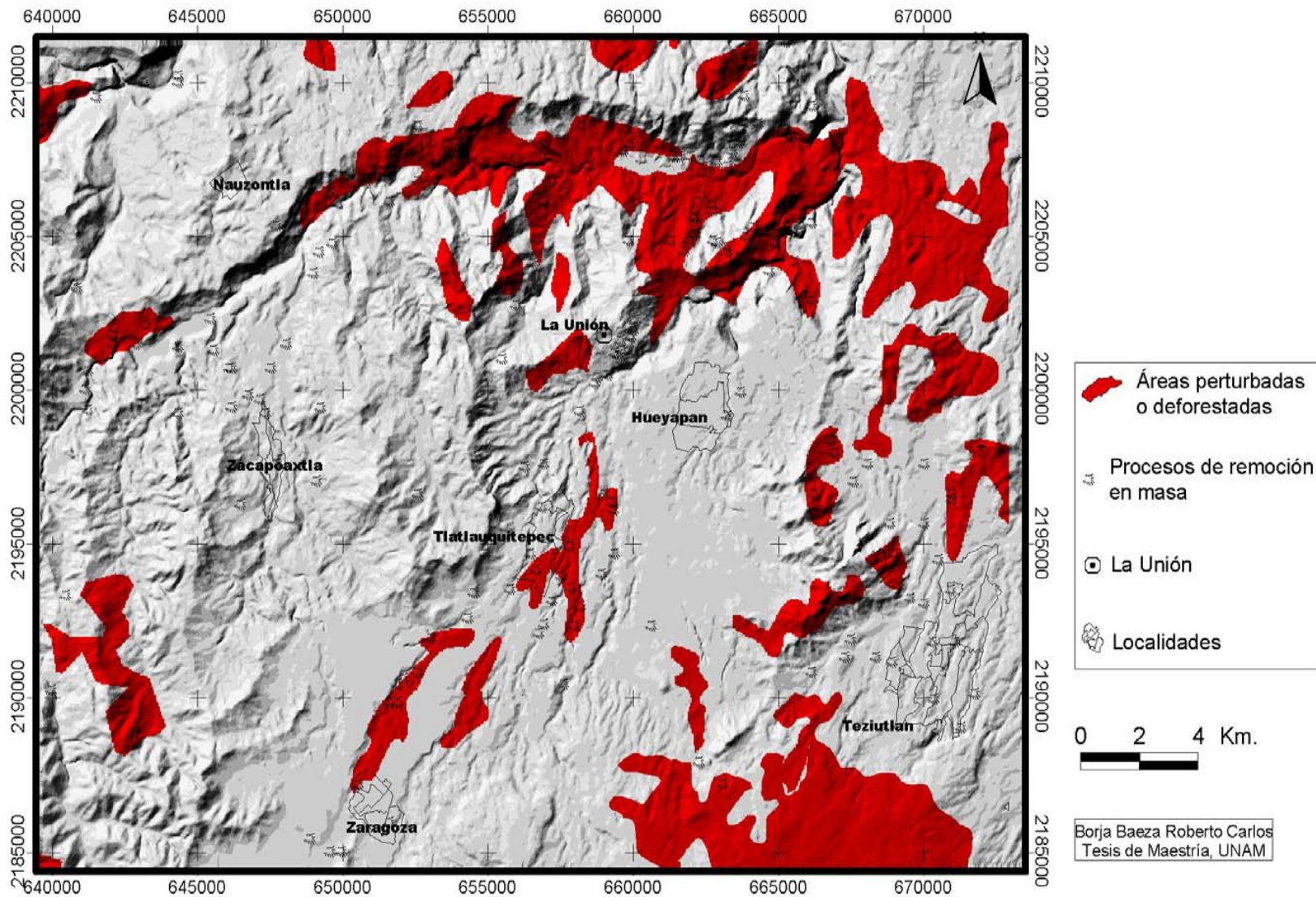


Figura 1.7 Áreas deforestadas o perturbadas de la carta Teziutlán (elaborado con información del Inventario Forestal 1994 e Inventario Nacional Forestal Periódico 2000)

Considerando una distancia máxima de 100 metros a partir de la carretera hacia los flancos, 28 de los procesos registrados se encuentran a 50 metros o menos de distancia y 17 entre 50 y 100 metros. En este factor de carácter antrópico, la pendiente de nueva cuenta pierde cierto peso específico, pues si bien entre los 6° y los 18° se presenta el 40% de los deslizamientos registrados, los procesos restantes se distribuyen casi uniformemente en los demás rangos del declive, es decir, la influencia de los cortes en el terreno por la construcción de carreteras tiene una influencia en la ocurrencia de estos procesos de ladera. Aún más, los procesos que se reconocieron a menos de 100 metros hacia los flancos de los cauces naturales o ríos fueron en total 53, lo que representa tan sólo 8 procesos más que los influenciados por la red carretera.

Tabla 1.7 Relación entre procesos de remoción en masa y su proximidad a carreteras y ríos.

Pendiente (°)	Kilómetros de carretera (%)	Número de procesos a menos de 100 m. de distancia de carreteras	Número de procesos a menos de 100 m. de distancia de ríos
< 1.5	8.84	0	2
1.5-3	11.34	1	2
3-6	20.50	8	9
6-12	27.63	9	11
12-18	15.11	9	10
18-24	8.31	4	7
24-32	5.98	7	7
>32	2.69	7	5

1.7 Conceptualización de los procesos de remoción en masa

A partir de la década de los años 70, se comenzó a dar una mayor importancia al estudio de los riesgos por fenómenos naturales, particularmente a los peligros geomorfológicos, entre los que se encuentran los procesos de remoción en masa, cuyo análisis sistemático se empezó a llevar a cabo a través de los especialistas en ciencias naturales. Algunos investigadores habían abordado el tema del riesgo por fenómenos naturales y los desastres del impacto de estos fenómenos, por ejemplo Gilbert White, Terry Cannon y Piers Blaikie, así como Andrew Maskrey, Allan Lavell, Gustavo Wilches-Chaux y el mexicano José Manuel Macías, por mencionar algunos (Oropeza, ms). Resultado de esta tendencia y como respuesta ante el incremento de las pérdidas económicas y de vidas humanas por desastres de origen natural, la década de los 90s fue declarada como “El Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (DIRDN), donde se introduce con mayor énfasis la gestión del riesgo y la importancia de la vulnerabilidad de la población (Wilches-Chaux, 1998).

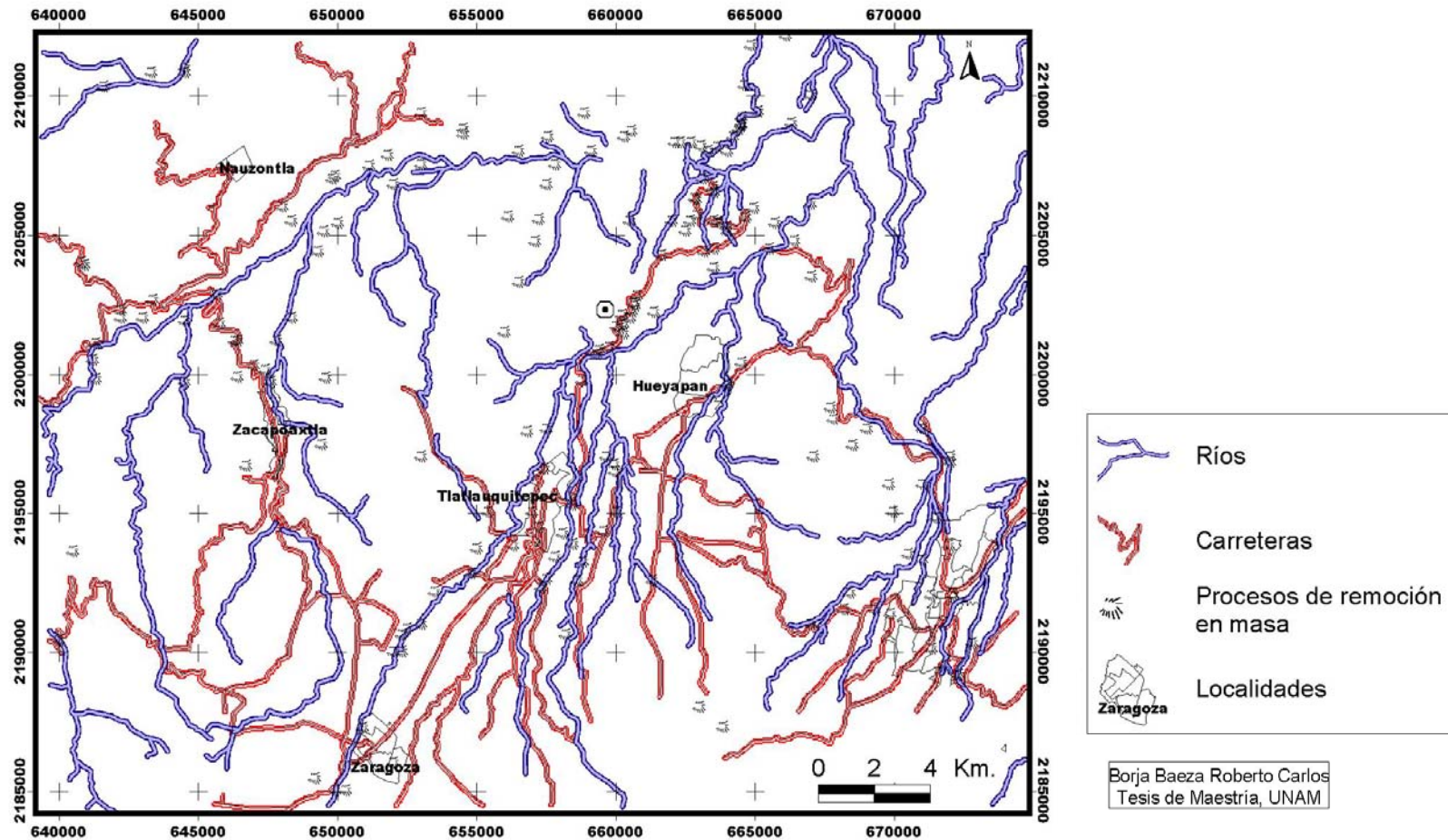


Figura 1.8 Carreteras y ríos de la carta topográfica Teziutlán y su proximidad a procesos de remoción en masa (las líneas representan una cobertura de 100 m. a cada lado de la carretera y del cauce).

Particularmente, el interés hacia los procesos de remoción en masa ha recibido una mayor atención por el incremento de los daños y costos que estos procesos representan en las últimas décadas y principalmente el aumento en el número de pérdidas humanas. Esta acentuación de los procesos de ladera se debe fundamentalmente a dos aspectos: el avance de las construcciones, principalmente vivienda, hacia las zonas susceptibles a los procesos gravitacionales, consecuencia del crecimiento poblacional y la generación o reactivación del proceso por la actividad humana, por ejemplo la construcción de carreteras (Lugo-Hubp *et al.*, 2001), es decir, la actividad antrópica se ha convertido en un agente causal importante.

Son diversas a las acepciones que el concepto de proceso de remoción en masa, proceso de ladera o proceso gravitacional tiene en el ámbito académico, hecho que puede tener su origen en que son diversas las disciplinas que abordan su estudio, y aún más las del lenguaje coloquial en el mundo. Tal situación dificulta el manejo de la información y los resultados de investigaciones, esencialmente cuando se presentan en diferentes idiomas. Esta condición no es exclusiva para el estudio de estos procesos y es inherente al intercambio de información científico y tecnológico. La complejidad se incrementa cuando se realizan detalles de estos procesos, particularmente en la clasificación y en su descripción.

Fenómeno conocido y estudiado desde la antigüedad (en el siglo XVI a.c. se registra el primer proceso en China –Macari, 2003, en Hernández-Madrigal, 2005- y en el siglo XVI ya se utilizaba la plantación de árboles para tratar de detener el avance del material que provenía de las montañas –Lee, 1985-) aunque tradicionalmente ligado a otros fenómenos de mayor extensión (sismos, erupciones volcánicas, huracanes), los movimientos de ladera han presentado diferentes definiciones, desde aquellas que lo describen como el movimiento en masa de material suelto o formador de la pendiente, el transporte de este material o el movimiento en las laderas, donde es constante la idea de desplazamiento de material, por diferentes agentes (gravedad, agua, hielo), definiciones generales y claras, aunque sin detallar los diversos tipos de desplazamiento que el material puede presentar, de acuerdo a las características litológicas, atmosféricas, de vegetación, edáficas, entre otras, (Penk, 1894; Sharpe, 1938).

Años antes de la segunda Guerra Mundial, Sharpe (1938) publicó lo que se considera como la primera clasificación de los procesos gravitacionales, destacando su orden por la velocidad del movimiento, aunque se tiene registro de otros intentos previos por agrupar los diferentes procesos, por ejemplo Howen (1909), Almajia (1910), Terzhagi (1925) y Ladd (1935), de acuerdo con Záruba y Mencl (1968, en García, 1995). Otro de los esfuerzos más reconocidos por ordenar estos movimientos es el de Varnes, quien presentó una clasificación en 1958, mismo que fue revisado en 1978 por el mismo autor, donde se detallan más tales procesos y hace alusión al material, las formas, velocidad y causas de los movimientos entre otras características, considerando la roca y el suelo como los principales materiales desplazados, misma que ha sido fundamental en estudios posteriores del tema.

A finales de los 60s, Hutchinson hacía notar la importancia de establecer una clasificación para los procesos gravitacionales, que permitiera tener un conocimiento más preciso de cada movimiento y de sus características particulares (Hutchinson, 1968), labor que años después fue realizada con mayor rigor, como se describe previamente por Varnes, y por el mismo Hutchinson donde involucra los materiales desplazados (*Ibidem*). Por su parte, Crozier (1986), hace notar el hecho de que en la literatura especializada de principios de

los ochenta, quizá como resultado de la iniciativa de Varnes, abundan las clasificaciones, con objetivos específicos y regionalistas, lo que complicaba un lenguaje común y los avances científicos del tópico. En México, García-Arizaga (1995) describía esta misma inquietud por realizar la estandarización de una terminología común de la temática de los procesos gravitacionales.

Las clasificaciones de Varnes (1978) y Hutchinson (1988) son la base de la clasificación propuesta por EPOCH (European Community Programme, 1993), publicados en el programa *La ocurrencia Temporal y Pronóstico de Deslizamientos en la Comunidad Europea*, donde se detallan 6 tipos de procesos de remoción en masa, con base en la diferenciación en el material involucrado y el tipo de movimiento. Originalmente en Inglés, Alcántara-Ayala (2000a) buscando solventar la problemática descrita al inicio de este apartado, realizó la adaptación al castellano de tal clasificación, donde los tipos de movimientos son: caída o desprendimiento (*fall*), vuelco o desplome (*topple*), deslizamiento (*landslide*) (rotacional, simple, translacional y planar), flujos (*flows*), expansión lateral o desplazamiento (*lateral spreading*) y movimiento complejo (*complex movement*). Los materiales involucrados son rocas, derrubios y suelos (tabla 1.8).

Tabla 1.8 Clasificación de los procesos de remoción en masa, EPOCH, 1993.

MECANISMO DE MOVIMIENTO	TIPO DE MATERIAL INVOLUCRADO		
	ROCA (<i>rock</i>)	DERRUBIOS (<i>debris</i>)	SUELO (<i>soil</i>)
TIPO			
Desprendimientos (<i>falls</i>)	Caída o desprendimiento de rocas (<i>rockfall</i>)	Caída o desprendimiento de derrubios (<i>debris fall</i>)	Caída o desprendimiento de suelos (<i>soil fall</i>)
Vuelco o desplome (<i>topple</i>)	Vuelco o desplome de rocas (<i>rock topple</i>)	Vuelco o desplome de derrubios (<i>debris topple</i>)	Vuelco o desplome de suelos (<i>soil topple</i>)
Deslizamiento rotacional simple (<i>rotational slide</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>múltiple</i>) Sucesivo (<i>sucesive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>múltiple</i>) Sucesivo (<i>sucesive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>múltiple</i>) Sucesivo (<i>sucesive</i>)
Deslizamiento translacional o de bloques no-rotacional (<i>translational slide, non-rotational</i>)	Deslizamiento de roca en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento de derrubios en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento translacional de suelos (<i>slab slide</i>)
Deslizamiento Planar	Deslizamiento de rocas (<i>rock slide</i>)	Deslizamiento de derrubios (<i>debris slide</i>)	Coladas de barro (<i>mudslide</i>)
Flujos (<i>flow</i>)	Flujo de rocas (<i>rock flow</i>)	Corrientes de derrubios (<i>debris flow</i>)	Flujos de tierra, arena o suelo (<i>soil flow</i>)
Expansión lateral (<i>lateral spreading</i>)	Expansiones laterales en rocas (<i>rock spreading</i>)	Expansiones laterales en derrubios (<i>debris spread</i>)	Expansiones laterales en suelos (<i>soil spreading</i>)
Complejo (<i>complex</i>)	Ejemplo: Alud de rocas (<i>rock avalanche</i>)	Ejemplo: Flujo deslizante (<i>flow slide</i>)	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras (<i>slump-earthflow</i>)

Fuente: Alcántara-Ayala, 2000a

Recientemente se han elaborado diferentes documentos donde se detalla la clasificación al español de Alcántara-Ayala y de cada uno de los movimientos de ladera establecidos en el documento original de *EPOCH* y en su adaptación al castellano (Flores-Lorenzo, 2002; Borja-Baeza, 2003; Marcos-López, 2003; Esteban-Chávez, 2003; Garnica-Peña, 2003; López-Mendoza, 2003; Ochoa-Tejada, 2004; Sánchez-Titla, 2005).

Caso similar a la clasificación de los procesos de remoción en masa, la definición del concepto adolece del mismo problema, desde su traducción al español del término *Landslide*, que en Inglés tienen un significado en dos sentidos: uno para describir un tipo de proceso y otro, aunque cada vez menos empleado, para describir al conjunto de movimientos de ladera, y que en Español generalmente se utiliza para definir a cualquier movimiento de remoción en masa, lo cual es incorrecto, atendiendo de nuevo a la clasificación propuesta por *EPOCH*, descrita previamente. Así, procesos de remoción en masa, procesos gravitacionales o procesos de ladera pueden ser empleados, en general, para describir los diferentes tipos de movimientos, aún cuando se pueden encontrar pequeños detalles a cada término, como lo es la influencia de la gravedad como agente principal de remoción o bien referirse como remoción en masa a la caída libre de una roca puede ser cuestionado, pero son casos muy específicos.

Generalmente, los mismos autores que han realizado intentos por establecer una clasificación de los movimientos de ladera, ha emitido una definición propia para estos procesos, que en su mayoría recurren al movimiento ladera abajo por influencia de la gravedad como base de su argumento. Penck (1894) hace énfasis en diferenciar entre el movimiento en masa (originado por gravedad) y el transporte de una masa (material removido por algún agente –agua, aire, hielo-); Sharpe (1938) introduce el término *landslide* puesto que detalla al movimiento a través de un mecanismo de deslizamiento o desprendimiento; Varnes (1958) acota que el material transportado puede ser tanto natural como artificial; Gary *et al.* (1972) detallan que el término *landslide* incluye un gran número de procesos de remoción en masa, aunque Coates (1977) menciona que el concepto representa sólo una categoría dentro de los fenómenos de remoción en masa. Una definición concisa y apropiada para el estudio de los procesos desde una perspectiva geomorfológica es la expresada por Brunnsden (1979) que define a estos procesos como los movimientos ladera abajo que no requieren el transporte de un medio como el agua, el aire o el hielo (Alcántara-Ayala, 2000a).

1.8 Importancia del estudio de los procesos de remoción en masa

La importancia de conocer la génesis, características y alcances de un proceso natural, como lo son los de remoción en masa, va más allá del valor académico implícito en la investigación, sino que la aplicación de los resultados alcanzados, ya sea en el corto o mediano plazo o de forma directa o indirecta, particularmente en la disminución del riesgo por estos movimientos, es un objetivo de igual valor, especialmente cuando las medidas aplicadas que se consideren con base en esta investigación y en otras similares, relacionadas o complementarias, logren evitar pérdidas humanas y daños a la sociedad en su conjunto.

Tabla 1.9 Ejemplos de procesos de remoción en masa.



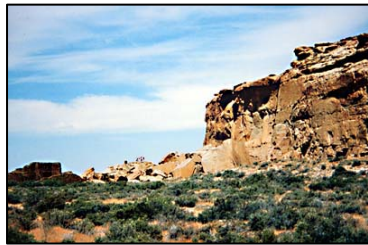

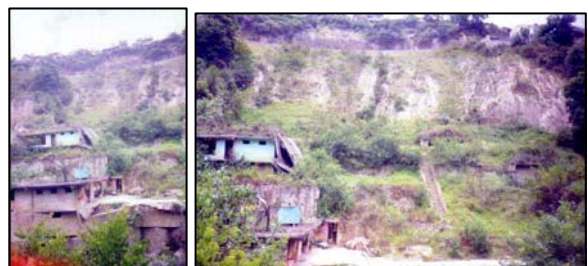










Caídas o desprendimientos	
<p>Zapotitlán de Méndez (Foto del autor)</p> 	<p>Poniente de la cabecera municipal de Zacapoaxtla (Foto del autor)</p> 
Vuelcos o desplomes	
<p>Vuelco en E.U.A. (Fuente: www.usgs.gov)</p> 	
Deslizamientos	
<p>Deslizamiento en la localidad de San José Chagchaltzin, Tlatlauquitepec (Foto: Marcos-López)</p> 	<p>Deslizamiento en ignimbritas en la localidad de Zacapoaxtla (Fotos del autor)</p> 
<p>Deslizamiento activo en la localidad de Zacapoaxtla (Foto del autor).</p> 	<p>Deslizamiento en la localidad de Zacatlan (Foto: Alcántara-Ayala)</p> 

Tabla 1.9 (Continuación)

<p>Flujos</p>	
<p>Flujo en materiales volcánicos en la carretera entre Teziutlán y Huajuapán (Fuente: www.nisee)</p> 	<p>Flujo al sur de Tlatlauquitepec (Foto del autor)</p> 
<p>Flujo en la colonia La Aurora, Teziutlán (Fotos: Mendoza <i>et al.</i>, 2000)</p>	
	
<p>Expansión lateral o desplazamiento</p>	
<p>Expansión lateral en San Fernando, Inglaterra (Fuente: www-civ.eng.cam.ac.uk)</p> 	<p>Desplazamiento en E.U.A. (Fuente: www.usgs.gov)</p> 
<p>Movimiento complejo</p>	
<p>Movimiento complejo en el municipio de Zapotitlán de Méndez, Puebla (Fotos: Alcántara-Ayala).</p>	
	

La existencia de desastres originados por fenómenos naturales representa un retraso significativo en el desarrollo de las poblaciones que se ven impactadas por estos fenómenos y una carga económica difícil de solventar para los gobiernos que respalden a estas comunidades. Esta condición se ve acentuada por la vulnerabilidad de naciones o regiones con un nivel económico limitado, independientemente de las causas de esta limitación, lo cual dificulta la rápida recuperación, en el caso de que ésta se pueda dar, e incluso la preparación necesaria para afrontar el desastre mismo. De acuerdo con la CEPAL, existen diversas metodologías para cuantificar las pérdidas materiales ocasionadas por un desastre, las cuales son analizadas desde los siguientes aspectos (Wilches, 1998):

~ Los efectos directos sobre los bienes o el patrimonio material de la población afectada, a nivel individual y colectivo (viviendas, infraestructura productiva, vial y de servicios, dotación comunitaria, materiales y equipos, cosechas, destrucción ambiental, etc.)

~ Los efectos indirectos resultantes de la reducción de la producción y la prestación de servicios (interrupción del transporte y las comunicaciones, interrupción de la prestación de servicios públicos, afectación al comercio, etc.)

~ Los efectos secundarios que puede generar un desastre a mediano y largo plazo, como pueden ser la disminución de la tasa de crecimiento y la alteración al desarrollo económico, por ejemplo, reducción del PIB y el ingreso *per capita*, reducción de importaciones, desabastecimiento de alimentos, entre otros.

Otro tipo de valoración de las pérdidas posteriores al impacto de un fenómeno natural, o inclusive social, que ocasionen un desastre se refiere a pérdidas tangibles o directas e intangibles o indirectas. Las pérdidas tangibles son aquellas que es posible expresar considerando los costos monetarios resultantes, ya que en ellas se incluye a los daños principales causados a infraestructura y vivienda, daños a los que se les puede calcular un costo económico más o menos preciso.

Las pérdidas intangibles son las que se refieren a las alteraciones causadas a las actividades económicas, básicamente a los modos de producción o acciones inherentes a los modos de vida, mismos a los que resulta difícil establecer un criterio económico, ya que son situaciones asociadas a secuelas de variación temporal, que se pueden presentar inmediatamente o bien perdurar por varios años. A partir de esta idea se entiende que las pérdidas de carácter tangible son estimadas de manera cuantitativa, en tanto que las intangibles son de carácter cualitativo, por lo que pocos casos son analizables en su totalidad a partir de un valor económico (UNDP-DHA, 1994).

Algunas metodologías para estimar estos costos son (Alcántara-Ayala *et al.*, inédito):

Costo Beneficio: establecido por la UNDP-DHA, este criterio surge de una concepción de tipo ingenieril, en él se pretende el desarrollo de cualquier tipo de proyecto a partir de estudios y técnicas que permitan determinar las posibilidades, alcances y limitaciones de aplicación de cualquier tipo de estrategia de mitigación, lo cual implica el tratar de reducir los costos de elaboración de cualquier proyecto, tanto en términos de construcción, como de mantenimiento y restauración asociados a la ocurrencia de un desastre natural.

¿Se paga ahora o se paga después?: de acuerdo con la UNDP-UNDRO, un criterio básico de este enfoque es que los gastos de preparación y mitigación tendrán que ser menores que el valor actual de las pérdidas estimadas y que se evitarán llevando a cabo las medidas para preparación/mitigación. Para este caso existirán diversos criterios para estimar las pérdidas y sus costos, ya que algunas son fáciles de asignar y otras carecen de algún criterio general para ser evaluadas.

Efectos directos e indirectos: A partir de la concepción de que existen daños tangibles e intangibles o bien directos e indirectos, la UNDP-UNDRO propone una caracterización de los mismos, sólo que en este caso son considerados como efectos, con la idea de efectuar una estimación económica del desastre a futuro.

Es indudable que los procesos gravitacionales tienen una presencia importante en el mundo, principalmente en regiones montañosas, condición que queda demostrada al observar que en Asia y América, cuya orografía destaca sobre los demás continentes, ocurren más del 75% del total de procesos registrados en el mundo, dato que representa el 5% de los fenómenos relacionados a desastres para el continente asiático y 8% para el continente americano, mismos continentes que se ven afectados por 7 de cada 10 fenómenos que originan un desastre en el mundo (Alcántara-Ayala, 2002). Si bien el porcentaje podría parecer bajo, es mayor en las 5 regiones continentales al porcentaje que representan las erupciones volcánicas, aunque no se puede omitir el hecho de que éstas abarcan una mayor extensión y es superior su impacto.

Los procesos de ladera llegan a representar el mismo costo económico y social que otros fenómenos comúnmente considerados más peligrosos, como sismos y huracanes. Sin embargo, frecuentemente los daños asociados a éstos procesos no se contabilizan o son desestimados ya que se presentan de manera paralela o como consecuencia inmediata de los eventos antes mencionados, aun cuando sus efectos son notables, incluso después de la acción del fenómeno paralelo.

En el mismo marco, Crosta *et al.* (2004) analiza un deslizamiento en Italia y menciona que el costo del mismo, considerando pérdidas y reconstrucción, se estimó en 400 millones de dólares, además de ser considerado uno de mayores desastres en las últimas décadas del siglo XX en el país europeo.

Highland y Brown valoran las pérdidas económicas por procesos de remoción en masa en Estados Unidos en más de mil millones de dólares (Lineback *et al.*, 2001). El desastre de 1999 en los estados de Veracruz, Hidalgo y Puebla, por las precipitaciones intensas, que ocasionaron inundaciones y numerosos procesos de remoción en masa, generó daños por más de 2,325 millones de pesos (Bitrán, 2000).

Tabla 1.10 Algunos desastres provocados por procesos de remoción en masa en el siglo XX en México, reportados por la prensa nacional.

Tipo de Fenómeno	Causas	Fecha	Localización	Coordenadas	Víctimas
Derrumbe – Flujo de agua**	Fuertes trombas en las estribaciones del Ajusco	4 de junio de 1935	San Pedro Actopan y San Gregorio Atapulco en la delegación Milpa Alta, D. F.	19° 12' y 99° 03'	150 muertos y 147 heridos
Flujo de lodo**	Rompimiento de la presa de residuos Los Jales del fondo minero Dos Estrellas	27 de mayo de 1937	Michoacán: Tlalpujahua y barrios La Cuadrilla, Del Carmen, La Hortaliza, Tlacotepec, Rayón, El Rastro, Alcantarillas	19° 49' y 100° 11'	176, pero pudo haber ascendido a 300 muertos; 200 familias sin hogar
Inundación por flujo de lodo**	Rompimiento de una presa (no se especifica)	25 de agosto de 1951	San Luis Potosí; Cárdenas y barrio La Planilla	22° 00' y 99° 39'	38 muertos, 3 heridos de gravedad, 30 con choques nerviosos, 20 golpeados y miles de personas sin hogar
Derrumbe-Flujo de lodo**	Fuertes lluvias que desgajaron una parte de un cerro	17 de octubre de 1955	Jalisco: Atentique	19° 32' y 103° 30'	Cerca de 60 muertos
Derrumbe-flujo de lodo*	Un huracán en las costas de Jalisco y Colima produjo el derrumbe en un cerro	29 de octubre de 1959	Colima: Minatitlán	19° 23' y 104° 03'	800 personas
Derrumbe*	Movimiento de arena en una mina	20 de octubre de 1969	Michoacán, Morelia, Teremendo		18 niños
Derrumbe**	Desgajamiento de una parte del cerro La Pinzona debido a fuertes lluvias producidas por el huracán Dolores, parte cayó sobre la avenida Adolfo López Mateos y la otra hacia la playa La Langosta	17 de junio de 1974	Guerrero: Acapulco	16° 50' y 99° 56'	11 muertos y 16 desaparecidos
Flujo de agua y lodo**	Desbordamiento del bordo de retención El Cajoncito por fuertes lluvias ocasionadas por el huracán Liza	1 de octubre de 1976	Baja California Sur: La Paz	24° 10' y 110° 18'	400 muertos y 1500 damnificados
Alud de rocas y lodo**	Desgajamiento de un cerro (no se especifica)	11 de agosto de 1983	Veracruz: Xicola	19° 06' y 97° 04'	32 muertos y 800 personas sin hogar
Derrumbe**	Desgajamiento de un cerro por fuertes lluvias	16 de agosto de 1983	Oaxaca: Sierra Triqui	18° y 97° (no se define un lugar preciso)	3 muertos y varios heridos
Derrumbe**	Desgajamiento de un cerro (no especifica nombre) por fuertes lluvias producidas por la tormenta Debby	4 de septiembre de 1988	Veracruz: Papantla	20° 27' y 97° 19'	6 muertos

Fuente: Oropeza-Orozco *et al.*, 1998. (Compilación realizada por Lugo y Flores, 1997).

* Fuente Excelsior

** Fuente Excelsior y El Universal

Tabla 1.11 Principales flujos de lodo registrados en México en la década de los 90s.

Fecha	Estado	Municipio	Descripción
10 Sept. 1990	Distrito Federal	Anillo periférico	Inundaciones, flujos de lodo y deslaves; decenas de vehículos dañados; provenientes de la zona montañosa, las aguas traían tierra y rocas que azolvaban el drenaje
27 Sept. 1990	Chihuahua	Chihuahua	15 derrumbes provocó una tromba en esta localidad, ocasionando 45 muertos, 200 desaparecidos y 5,000 damnificados
7 Enero 1993	Baja California	Tijuana	Durante el paso de avenidas, el agua alcanzo hasta 4 m. de altura, en 2 ½ hrs. La lluvia acumulada en 24 hrs. fue de 86.9 mm., correspondiente a un período de retorno de 50 años
8 Marzo 1993	B.C.S., Sinaloa	Cabo Sn. Lucas	Las lluvias registradas provocaron deslaves y derrumbes e inundaciones en carreteras. En Cabo San Lucas, una unidad habitacional fue sepultada por flujos de lodo
10 Enero 1997	Baja California	Tijuana	El volumen arrastrado por la avenida en la cuenca "Aguaje de la tuna" fue de 38,000m ³ . la profundidad del agua fue de 1.5m. y la inundación duro 2 hrs.
9 Sept. 1997	Jalisco	Chapala	Tromba en la rivera norte del lago. El fenómeno natural trajo consigo un arrastre de rocas y lodo
9-10 Nov. 1997	Guerrero	Acapulco	El Huracán <i>Pauline</i> generó lluvias que causaron flujos de lodo. Las aguas arrastraban cualquier cosa a su paso, ocasionando inundaciones
25 Feb. 1998	Baja California	Tijuana	2 muertos dejo la sexta tormenta provocada por el fenómeno de El Niño; la lluvia provocó caídas de rocas y flujos de lodo, ocasionando el cierre de la autopista Tecate-La Rumorosa
9 Sept. 1998	Chiapas	Motozintla, Villa Comaltitlán, Pijijiapan, Valdivia	Desbordamiento de los ríos Huixtla y Pijijiapan; avalanchas de lodo a causa de las fuertes lluvias, arrastrando todo a su paso
5 Oct 1999	Puebla	Teziutlán	Lluvias torrenciales ocasionan deslizamientos y flujos en la Sierra Norte de Puebla y en Veracruz, los daños más severos en Teziutlán. Aproximadamente 300 muertos entre las diferentes regiones

Fuente: CENAPRED, 2001.

El estudio de la dinámica, alcance, magnitud, intensidad, causas y consecuencias son algunos de los aspectos de análisis de los procesos gravitacionales, tanto para el conocimiento científico del fenómeno como en sus implicaciones en la evaluación de éste como peligro y su potencial impacto en las actividades humanas y en las áreas que abarcan, principalmente los costos humanos y económicos. Con certeza, el impacto de un desastre en que se impliquen procesos de ladera es uno de los escenarios de análisis de riesgo que mayor atención requiere en múltiples regiones montañosas del mundo, incluyendo México.

La importancia del estudio de los procesos de remoción en masa se resume en el interés de evitar los daños provocados por estos fenómenos en la sociedad. Para ello, el primer paso, ineludible, es el entendimiento del proceso en forma general, y particularmente de cada uno de los diferentes tipos, para entender posteriormente con más detalle las características y los escenarios que se requieren para que un proceso acontezca. De aquí se deriva el siguiente paso que es la prevención, lo anterior sin dejar de considerar la relación intrínseca entre los procesos naturales y la actividad humana.

El estudio de estos procesos, y su enfoque en la prevención de desastres causados por tales fenómenos es de reciente incursión al medio de investigación en México. Esto ha traído como resultado que no se cuente con una cultura de prevención de los procesos gravitacionales, además de que los estudios en el tema son escasos, como es el caso de la influencia de la deforestación en materiales sedimentarios en la ocurrencia de procesos de ladera, temática en la que se pretende tener una aproximación en este trabajo.

Cabe destacar que existen algunos antecedentes importantes, como es el estudio o referencias a procesos gravitacionales que se encuentran en los trabajos de Ezequiel Ordóñez, en estudios realizados en los escarpes formados en el volcán Popocatepetl por estos procesos, y de manera más puntual de un deslizamiento en la localidad de Huajuapán, Oaxaca (Lugo-Hubp, 2001). Dentro de la serie de trabajos más especializados en el tema en tiempos recientes, y el cual se considera como un referencia obligada por su análisis y aportación, está el desarrollado por Lugo-Hubp y Zamorano-Orozco para un deslizamiento en Meztlán, Hidalgo, del cual se desprenden artículos de divulgación científica en diversas revistas especializadas (*Geofísica Internacional* 32; *Ciencia y Desarrollo*, 121; *GEOUNAM* 2; *Zeitschrift fur Geomorphologie* 103), así como la tesis de Maestría de García (1995), donde se describe con detalle el origen y evolución de dicho deslizamiento. Por su parte, Cruz y Delgado (2000) también realizaron estudios acerca de procesos de ladera, cuyo origen se debió a la actividad sísmica, en Tijuana en los años 1967, 1976, 1995 y 1999 (López-Mendoza, 2003).

En cuanto a cartografía especializada, el Atlas Nacional de México, publicado por el Instituto de Geografía, en 1992, contiene un mapa de la susceptibilidad del terreno a hundimientos y corrimientos de tierras. En 1996, la misma institución, dentro del marco del Programa de Actualización del Ordenamiento Ecológico General del Territorio del País, desarrollo para el Instituto Nacional de Ecología los mapas sobre peligros geológicos y geomorfológicos, con un análisis a mayor detalle de los procesos de remoción en masa (Oropeza-Orozco *et al.*, 1998).

Posterior al desastre de 1999 en Hidalgo, Veracruz y Puebla se publicaron diversos artículos acerca del evento, donde se aborda el tema de los procesos de remoción en masa ocurridos principalmente en Puebla, el estado con mayores daños. Entre estos, Mendoza *et al.* (2000) detalla los deslizamientos acontecidos en Teziutlán, particularmente en la Aurora, el que mayor número de pérdidas humanas ocasionó; Capra *et al.* (2003a) analiza los movimientos en masa en materiales volcánicos en el mismo municipio, relacionándolos con el incremento de los peligros hidrogeológicos en México; Lugo-Hubp *et al* (2001) y Alcántara-Ayala (2004) desarrollan un análisis general del desastre en la Sierra Norte de Puebla, de las causas, condicionantes y consecuencias de los procesos gravitacionales. Otros trabajos que hacen referencia a los procesos de remoción en masa en la región son Vázquez *et al.* (2001), Cuanalo y Melgarejo (2002), Capra *et al.* (2003b), López-Mendoza (2003) y Ochoa-Tejeda (2004).

Los movimientos del terreno son un fenómeno global asociado directamente con el riesgo sobre el área de influencia. Como resultado, los estudios que se han llevado a cabo en torno al tema son múltiples y bajo diferentes perspectivas y metodologías, pero coinciden con un fin: el mitigar los daños y reducir el riesgo (Clerici, 2000). Como respuesta a las condiciones naturales y sociales del entorno, el riesgo puede ser reducido o sustituido, en algunos casos, por la prevención o bien por la mitigación del peligro, esto se logra al aplicar acciones que prevengan los daños posibles por la presencia del fenómeno natural. En resumen, el estudio de los procesos de ladera, y de todo fenómeno que represente un

peligro a la sociedad, pretende en su expectativa más ambiciosa reducir la ocurrencia de desastres.

1.9 Factores de inestabilidad

Los procesos de remoción en masa, como la mayoría de los procesos denudatorios, se deben a diversos factores. De acuerdo a Terzaghi (1950) y Selby (1993) los factores causantes de inestabilidad se clasifican en dos tipos: *internos* y *externos*; las causas externas se refieren a aquellas en que aumenta el esfuerzo o la tensión, sin que paralelamente aumente la resistencia del material; en cuanto a las causas internas, estas se manifiestan cuando disminuye la resistencia del material sin que se atenúen los esfuerzos externos (Alcántara-Ayala, 2000b). En ambos casos, el equilibrio entre esfuerzos internos y externos se interrumpe desestabilizando el terreno (figura 1.9). Complementando, Krinine y Judd (1957) agrupan a los factores causantes de inestabilidad en *inmediatos* y *reales*, los primeros representados por factores que actúan en un lapso de tiempo corto sobre la estabilidad del terreno (sismicidad, precipitación, actividad volcánica, etc), mientras los segundos incrementan la inestabilidad de manera constante pero lenta, durante un período de tiempo relativamente extenso, principalmente en las propiedades mecánicas de los materiales.

Entre los factores externos más importantes en la inestabilidad se encuentran la alteración de la geometría y la morfología del terreno, afectando preferentemente al declive y a otros cortes, tanto naturales como artificiales; la sismicidad y la actividad volcánica son fenómenos que pueden incidir directamente en la ocurrencia de procesos de ladera; cambios climáticos que modifiquen el régimen pluviométrico, los fenómenos térmicos e hídricos; la actividad biológica, la erosión y el intemperismo también son factores externos desestabilizantes (Terzaghi, 1950; Alcántara, 2000a). Son numerosos los ejemplos de esta relación causal en el mundo, las precipitaciones intensas (Sierra Norte de Puebla, 1999), sismos (Perú, 1970), la actividad volcánica (Indonesia, 1919) y en crecimiento porcentual el cambio en el uso del suelo (Hong Kong, 1966) que se considera un factor antrópico (Garnica-Peña, 2003).



Fig. 1.9 Factores internos y externos de inestabilidad. Los cortes artificiales, por ejemplo carreteras, pueden llegar a un factor externo de inestabilidad –imagen izquierda- (Libramiento en Zacapoaxtla; foto del autor); la litología es uno de los factores internos más importantes en la ocurrencia de procesos de remoción en masa – imagen derecha- (Sur de Tlatlauquitepec; foto del autor).

Las características de los materiales condicionan los principales factores internos (cohesión, ángulo de fricción interna, arreglo estructural, etc.) a través de la meteorización de la roca, fisuras, desecación y la saturación del suelo. La actividad antrópica puede influenciar tanto a las causas externas como internas, favoreciendo los procesos gravitacionales. Para que un proceso pueda presentarse es necesaria la presencia de diversos factores, el grado en que cada uno de éstos favorece el movimiento varía de acuerdo con las particularidades del material y la topografía y a la combinación de estos agentes causales, siendo la pendiente y sus características (inclinación, extensión, orientación, etc.) el que está presente con un peso específico importante en la mayoría de los casos.

En el presente trabajo, se consideran ambos tipos de causas, puesto que por un lado existe influencia en el cambio de uso de suelo, particularmente en la deforestación, en cambios externos; al mismo tiempo, la reducción en la capa vegetal, influye en los sistemas de raíces y en el comportamiento del subsuelo ante esta condición.

Además de los factores de inestabilidad, existen otras características de los procesos de remoción en masa, que permiten conocer más a fondo la actividad del proceso y establecer sus particularidades, para determinar su impacto, tales como sus características morfológicas (Skempton, 1953; Blong, 1973; Brunsden, 1973; Crozier, 1973; Varnes, 1978; Alcántara, 2000a); tipo de movimiento (Sharpe, 1938; Ward, 1945; Hutchinson, 1968; Zaruba y Mencl, 1969; Coates, 1977; Varnes, 1978); Grados de actividad (Erskine, 1973; Alcántara-Ayala, 2000a); velocidad del movimiento (Sharpe, 1938; Varnes, 1978; Alexander, 1993; Cruden *et al.*, 1996); mecanismos desencadenantes (Terzaghi, 1950; Zaruba y Mencl, 1969; Coates, 1977; Varnes, 1978; Brunsden, 1979); edad del movimiento (Zaruba y Mencl, 1969; Varnes, 1978) e indicadores de identificación (Brunsden, 1984; Crozier, 1986; Pedraza, 1996) por mencionar algunos (García-Arizaga, 1995; Flores-Lorenzo, 2002; Garnica-Peña, 2003).

1.10 Efectos de la ocurrencia de procesos de remoción en masa

Los efectos de los procesos de ladera, al igual que otros fenómenos naturales, pueden ser divididos en dos vertientes: modificaciones en el medio físico o natural y alteración en el medio social o humano, con diferentes grados de transformación, que pueden ser paulatinos (Meztlán, Hidalgo; Lugo-Hubp *et al.*, 1995) o súbitos (La Aurora, Teziutlán Puebla; Flores-Lorenzo, 2002) de impacto local (San José Chagchaltzin, Tlatlauquitepec, Puebla; Marcos-López, 2003) o generadores de desastres (Val Paola, Italia; Crosta *et al.*, 2004), así como también su impacto puede ser reducido (La Estrella, Zapotitlán de Méndez, Puebla; López-Mendoza, 2003) o latente por la posible reactivación del movimiento (La Concordia, Zacapoaxtla, Puebla; Borja-Baeza, 2003).

Los cambios que los procesos de ladera originan en el relieve son principalmente morfológicos, generalmente de poca extensión si se les compara con otros fenómenos (sismos, erupciones volcánicas, huracanes), aunque más constantes, con una mayor distribución en el planeta y un número de eventos, lo que implica que su impacto sea continuo. Aproximadamente el 80% de la superficie continental presenta laderas con un declive superior a los 2° (Lugo-Hubp, 1989), que es una de las características primordiales en el movimiento del terreno, lo que patentiza la posibilidad de que se presente inestabilidad.

En el momento en que un proceso de remoción en masa afecta a la estructura social de forma acentuada, puede presentarse lo que se denomina un desastre, de acuerdo con el impacto que genere en la población, que es el escenario más negativo que pueden presentar estos fenómenos gravitacionales, donde se incluye además de pérdidas económicas, vidas humanas y afectación en el equilibrio social, con consecuencias directas inmediatas y suelen ser base de secuelas, tanto o más dañinas (figura 1.10).



Figura 1.10 Daños en calles y casas habitación por procesos de remoción en masa. En la imagen izquierda se aprecian los daños en la vía de comunicación, pero el avance del circo de erosión puede alcanzar las construcciones cercanas (Zacapoaxtla; foto: Secretaría de Protección Civil de Puebla); la imagen derecha muestra una vivienda cubierta por material removido, misma que ha sido abandonada, aunque probablemente sea por un período corto de tiempo (Zapotitlán de Méndez; foto del autor).

La actividad antrópica se ha convertido en uno más de los factores causales de procesos de ladera. La cercanía de la actividad humana, convierte al fenómeno en su calidad de peligro natural, a riesgo natural, especialmente cuando se desarrollan asentamientos humanos en los depósitos de antiguos movimientos susceptibles a reactivarse, en laderas montañosas o de materiales no consolidados o que sobreyacen a materiales de distinto origen, que en ocasiones esta diferencia litológica permite que pueda deslizarse un material sobre otro (por ejemplo, rocas volcánicas sobre calizas).

Asimismo, el desarrollo de infraestructura es un fenómeno social que puede estar ligado al incremento de la inestabilidad, por ejemplo, en cortes de carreteras, actividad minera, deforestación, desecación de cuerpos de agua, modificaciones locales o regionales al ciclo hidrológico, etc.

En los últimos años, la ocurrencia de procesos de remoción en masa en México se ha incrementado de manera paralela al cambio de uso de suelo, afectando vidas humanas y causando un número impreciso de pérdidas materiales. Lo anterior se complica aún más por la carencia de estudios avanzados y constantes de monitoreo de zonas de alto riesgo y del impacto del cambio de uso del suelo como detonador de la inestabilidad, lo que resulta en una carencia o nula prevención ante estos fenómenos, los cuales cada vez son más frecuentes en zonas pobladas, y han dejado de ser exclusivos de zonas montañosas alejadas de los núcleos de población (López-Mendoza, 2003).

A lo descrito en el párrafo anterior se suma la presencia cada vez mayor de los asentamientos humanos en laderas inestables, lo cual está condicionado por la nula planeación del crecimiento, y por las características socio-económicas de la población,

combinación que se magnifica como un riesgo por procesos de ladera. Entre 1980 y el año 2000, la ocurrencia de los procesos de remoción en masa se incrementó considerablemente, así como el número de pérdidas humanas; esto ha sido más notorio en los últimos años de la década de los noventa.

Un claro ejemplo de lo mencionado en el párrafo anterior para México se presentó durante octubre de 1999. Lluvias extraordinarias que afectaron a los estados de Oaxaca, Hidalgo y Puebla que favorecieron la ocurrencia de fenómenos gravitacionales. Esta última entidad fue la que presentó más daños por deslizamientos, siendo 87 los municipios afectados, tales como Teziutlán, Totomoxtla, Zacapoaxtla, Zapotitlán de Méndez y Tlatlauquitepec. De acuerdo con datos oficiales, 263 personas perdieron la vida; hubo 56 desaparecidas y cerca de un millón y medio resultaron afectadas (casi una tercera parte del total de la población del Estado de Puebla). Fueron dañadas en distinto grado más de 16,500 viviendas y casi 200 escuelas, además de los daños en la infraestructura. Las pérdidas económicas por daños en infraestructura, vivienda, servicios, actividades productivas y otros se estimaron, para todo el estado, en más de 2,300 millones de pesos, y los costos de reconstrucción se estimaron en 1,836 millones de pesos, situaciones que determinaron que fuese considerado por el CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) como el “Desastre de la década” (Bitrán, 2000; Lugo *et al*, 2001; Cuanalo y Melgarejo, 2002; Alcántara-Ayala, 2004).

1.11 Precipitación e inestabilidad

Como se ha mencionado, la interacción de diversos factores origina la inestabilidad del terreno y el peso específico de cada factor es diferente y cambiante, de acuerdo al escenario en que se presente el evento. De esta forma, existen factores que por sí solos pueden ocasionar la detonación de procesos de remoción en masa, tal es el caso de la variación del régimen pluvial, que puede manifestarse a través de lluvias intensas durante un período corto de tiempo, o bien lluvias extraordinarias, como sucedió en octubre de 1999 en Puebla, por lo que es importante para la estimación y comprensión de la inestabilidad, realizar análisis de la precipitación de las zonas de interés (Borja y Alcántara, 2004).

De acuerdo con varios autores, el cambio climático global ha tenido gran influencia en la mayor ocurrencia de movimientos de ladera. Cassale y Margottini (2000) muestran que el régimen pluviométrico se ha modificado por este cambio, lo cual se presume es factor determinante en el aumento de procesos de remoción en masa. Asimismo, estos autores estiman que más del 50% de los movimientos de ladera ocurridos en Italia son directamente provocados por fenómenos meteorológicos, en especial por lluvias torrenciales, que saturan el suelo desestabilizando el terreno. Si a esta modificación de las condiciones meteorológicas se suma lo descrito del crecimiento poblacional y su consecuente extensión de áreas ocupadas, además de un registro más detallado en la ocurrencia de procesos de ladera en el mundo, se puede entender el porqué del incremento de pérdidas por deslizamientos, incluso sin mencionar otros factores como el incremento en la infraestructura y la deforestación.

El incremento de los procesos de remoción en masa en la temporada de lluvias es notable en todo el mundo, pero tal situación se refuerza cuando se presentan eventos extraordinarios, particularmente huracanes, ciclones, tifones, etc. en el caso específico de México, los registros de ocurrencia de procesos de ladera se remiten a la temporada de

mayores precipitaciones. Sin embargo, la inestabilidad se puede presentar a lo largo de todo el año, con movimientos milimétricos, y reactivarse con la presencia de lluvias.

Dai y Lee (2001) concluyen que las precipitaciones de corta duración pero intensas representan un factor de mayor influencia en la inestabilidad del terreno que las lluvias de mayor duración temporal pero menor intensidad relativa. Lo anterior se puede relacionar con la saturación rápida del subsuelo que incrementa la presión de los poros por la cantidad de agua suministrada, elevando el valor crítico para retener el material, mismo que se determina por otros factores como la litología, pendiente, cohesión, etc. Adicionalmente, la precipitación antecedente y la cobertura vegetal son factores muy importantes para considerar el tiempo necesario y la intensidad de las lluvias para desequilibrar la estabilidad del terreno. Estos autores refieren a Wieczorek (1987) quien es más específico al indicar que la precipitación antecedente determina en alto porcentaje sí se presentara un movimiento en masa, mientras que la intensidad y la duración de la precipitación condiciona donde se podría presentar tal movimiento.

En los últimos años, se ha presentado en el ámbito de investigación de inestabilidad una tendencia a incluir modelaciones del comportamiento hidrológico de la región en estudio y la relación de este ciclo regional con la ocurrencia de procesos de ladera, lo cual ha incrementado el conocimiento acerca de los mecanismos detonadores e incrementado el porcentaje de predicciones acertadas, destacando los trabajos elaborados por Collinson y Anderson (1996). Por su parte, Polemi y Sdao (1999) realizaron una modelación de la precipitación diaria, estimando su periodo de retorno para medio año (considerando datos de 70 años), y su relación con la ocurrencia, y principalmente la reactivación, de deslizamientos en Italia, empleando diferentes parámetros como tipo de suelo, precipitación diaria, máximas y mínimas, topografía, etc., donde concluyen que una precipitación intensa puede ser un detonador casi único de un procesos de remoción en masa y que la acumulación de agua por precipitaciones de menor intensidad, pero continuas también puede ser un factor importante en la inestabilidad del terreno, ambas como resultado de la variación de la presión del poro en el subsuelo.

Noriega-Rioja (2005) refiere a estudios de Brand (1985) en Hong Kong, donde las conclusiones son similares a las de los autores descritos en los párrafos anteriores. Este investigador concluye que lluvias cortas e intensas inducen un alto porcentaje de deslizamientos, la precipitación antecedente puede ocasionar deslizamientos de poca magnitud. Sin embargo, Brand describe que una precipitación de 70mm/hr. puede ser el umbral bajo el cual ocurre un porcentaje considerable de deslizamientos, el incremento de la precipitación a partir de este punto es directamente proporcional a la magnitud del proceso, sin dejar de considerar los demás factores condicionantes, tanto internos como externos.

Respecto a la presión de poro, es importante destacar que precipitaciones intensas y/o prolongadas ocasionan que se pierda la succión e incrementa la presión de forma positiva en el agua. Dicho aumento de presión de agua o presión de poro disminuye la resistencia o el nivel de esfuerzo efectivo, es decir se reduce la estabilidad del terreno. Sin embargo, a pesar de la reducción de la succión, ésta puede no eliminarse por completo y puede seguir contribuyendo a la estabilidad de la ladera (Noriega, 2005). La cohesión del suelo es importante en estimar la probabilidad de un movimiento en el terreno; generalmente, la cohesión se incrementa conforme los suelos presentan una textura más fina. Contrario a esta tendencia, la cohesión de los suelos con textura fina es sumamente reducida conforme aumenta la humedad del suelo.

1.12 Inestabilidad en el Municipio de Tlatlauquitepec

La Sierra Norte de Puebla históricamente ha sido escenario de la ocurrencia de procesos de remoción en masa, dadas sus condiciones de relieve, litología y morfología en combinación con los regímenes de precipitación, que llegan a ubicarse entre los más altos del país, situación que ha tomado relevancia en las últimas décadas por el incremento de la presencia humana en la región.

Ejemplos recientes de la ocurrencia de procesos de ladera que afectan a la población son los daños causados por la depresión tropical número 11 en el año de 1999, que afectó a los estados de Puebla, Veracruz, Hidalgo y Oaxaca, con daños económicos superiores a 2,300 millones de pesos sólo en el Estado de Puebla, mientras que alrededor de 400 personas perdieron la vida en los días que se presentaron las lluvias extraordinarias, que fue el factor desencadenante de cientos de procesos de remoción en masa en la región.

Este desastre puso en evidencia, como ningún otro, la vulnerabilidad física de la Sierra Norte a la ocurrencia de procesos gravitacionales e inundaciones, el impacto que pueden tener estos procesos en la población y la necesidad de contar con estudios de riesgo por deslizamientos y análisis más profundos acerca de los mecanismos causales de la inestabilidad.

Posterior a los sucesos de 1999, se han publicado numerosos artículos que abordan bajo diferentes perspectivas lo ocurrido (Bitrán, 2000; Mendoza *et al.*, 2000; Lugo-Hubp *et al.*, 2001; Cuanalo y Melgarejo, 2002; Borja y Alcántara, 2003; Capra *et al.*, 2003a; Capra, *et al.*, 2003b; Alcántara-Ayala *et al.*, 2004), se plantean diversos objetivos (analizar la vulnerabilidad de la población, elaborar mapas de riesgo, establecer las causas físicas y su grado de influencia, etc.), pero de forma directa o indirecta tienen como objetivo de fondo evitar que se presente de nuevo un desastre de tal magnitud, a través de la prevención de procesos de ladera en la región y su impacto en la población.

Durante el proceso de elaboración del presente trabajo el municipio de Tlatlauquitepec fue afectado, una vez más, por la ocurrencia de procesos de remoción en masa, cuyo agente causal fueron las intensas precipitaciones, en esta ocasión generadas por la huracán Stan. Los daños fueron numerosos, sin que fueran del nivel de los registrados en 1999, principalmente en las vías de comunicación.

El huracán Stan fue originado por una corriente tropical proveniente de las costas africanas, primero definido como la 18ª. tormenta tropical y posteriormente con la categoría de huracán (10o de la temporada) tuvo su punto de inicio por la madrugada del 2 de octubre, alcanzando su punto máximo de influencia al territorio nacional la madrugada del 5 del mismo mes y manteniendo altos niveles de precipitación hasta la noche del día 6.

Las regiones más afectadas en el Estado de Puebla fueron la Sierra Norte, la Sierra Negra y la Sierra Nororiental; específicamente, los municipios más afectados fueron Zacapoaxtla, Cuetzalan, Zapotitlán de Méndez, Huitzilán de Serdán, Zongozotla, Nauzontla y Tlatlauquitepec, especialmente en sus carreteras. Una estimación preliminar establecía que los daños económicos por el paso de este fenómeno meteorológico en el estado ocasionó daños de aproximadamente 913 millones de pesos, 3 habitantes perdieron la vida, más de 25 mil personas damnificadas, 474 caminos afectados por

deslizamientos e inundaciones y más de 8 mil casas dañadas por las intensas lluvias y sus consecuencias (www.lajornadadeoriente.com.mx).

Bibliografía

- Alcántara Ayala, I. (2000a). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Investigaciones Geográficas, *Boletín del Instituto de Geografía*. N° 41, UNAM, México, D. F., pp.9-25.
- Alcántara Ayala, I. (2000b). Índice de susceptibilidad a movimientos del terreno y su aplicación en una región semiárida. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 17, Num. 1, pp. 66-75.
- Alcántara Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, vol. 47, pp. 107-124.
- Alcántara Ayala, I. (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology* No. 61, pp 19-40.
- Alcántara-Ayala, I., López-Mendoza, M., Melgarejo-Palafox, G., Borja-Baeza, R. C., Acevo-Zarate, R. (2004). Natural hazards and risk communication strategies among indigenous communities. *Mountain research and development*, Vol 24, No. 4, 2004. pp 298-302.
- Alcántara-Ayala, I., Borja-Baeza, R. C., Marcos-López, J. (inédito). *Valoración Económica del Servicio de Ecosistemas (Prevención de Desastres)*. Convenio Instituto de Geografía, UNAM-Instituto Nacional de Ecología, pp 87.
- Alexander, D. (1993). *Natural Disasters*. Department of Geology and Geography, University of Massachusetts
- Álvarez, N. y Naughton-Treves, L. (2003). Linking national agrarian policy to deforestation in the peruvian amazon: a case study of Tambopata, 1986-1997. *Journal of the Human Environment*, Vol. 32, No. 4, pp 269-274.
- Bitrán-Bitrán, D. (2000). *Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana durante 1999*. Cuadernos de investigación Num. 50, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México, D. F., pp. 194-210.
- Bishop, D. M. y Stevens, M. E. (1964). Landslides on logged areas in southeast Alaska. *USDA Forest Service Research Paper*, pp 18-29.
- Blong, R. J. (1973). Relationships between morphometric attributes of landslides. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplement Band 18, pp. 66-77.
- Bocco, G., M. Mendoza y O. Masera. (2001a). La dinámica del cambio de uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F. 44: 18-38.
- Bocco, G., Mendoza, M. y Velásquez, A. (2001b). Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping - a tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology*, 39, pp. 211-219.
- Borja-Baeza, R. C. (2003). *Análisis de susceptibilidad y riesgos asociados a procesos de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla*. Tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, D. F., pp. 154
- Borja-Baeza, R. C. y Alcántara-Ayala, I. (2004). Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla. *Investigaciones geográficas*, No. 53, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, pp. 7-26.

- Borja-Baeza, R. C., Esteban-Chávez, O., Marcos-López, J., Peña-Garnica, R. J. y Alcántara-Ayala, I. (2006). Slope instability on pyroclastic deposits: landslide distribution and risk mapping in Zacapoaxtla, Sierra Norte de Puebla, Mexico. *Journal of Mountains Science*, 3, 1, pp. 1-19.
- Brookfield, H.C. (1972). Intensification and disintensification in Pacific agriculture. *Pacific Viewpoint*, 13, pp. 30-48.
- Brunsdon, D. (1973) *The application of systems theory to the study of mass movement*. Geológica Applicata e hidrogeologia. Univ. of Bari. 8, 1, pp.185-207.
- Brunsdon, D. (1984) *Mudslides*. In Brunsdon, D. y Prior, D. (eds) Slope instability, Wiley and Sons, Chichester, pp. 363-418.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., Borselli, L.. (2003a). Mass movements in tropical volcanic terrains: the case of Teziutlán (México). *Engineering Geology*, Vol. 69, No. 3-4, pp 359-379.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., y Dávila-Hernández, N. (2003b). 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*, Vol. 20, No. 2, pp. 95-106.
- Cassale, R. y C. Margottini (2000). *Floods and landslides: Integrated Risk Assessment*, Springer, Berlin.
- CENAPRED (2001). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*. Secretaría de Gobernación, México, pp. 225.
- Clerici, Aldo (2000). "Simulation of the Parma River blockage by the Corniglio landslide (Northern Italy)". *Geomorphology*, No. 33
- Coates, D. R. (1977). Landslides perspectives. En: Coates, D. R. (Ed) *Landslides*. Geological Society of America.
- Collison, A.J.C. y M.G., Anderson (1996). Using a combined slope hydrology/stability model to identify suitable conditions for landslide prevention by vegetation in the humid tropics, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 21, pp. 737-747.
- Cropper, M. y Griffiths, C. (1994). The Interaction of Population Growth and Environmental Quality. *American Economics Review*. 84,2, pp.250-254.
- Crosta, G. B., Chen, H., Lee, C. F. (2004). Replay of the Val Paola landslide, Italian Alps. *Geomorphology*, Vol 60, pp 127-146.
- Crozier, M. J. (1986) *Landslide: causes, consequences and environment*. Croom Helm, Londres.
- Cruden, D. y Varnes, D. (1996). Landslides types and process, en Turner, A. K. (edit) *Landslides: investigation and mitigation, transportation research board, Special Report 247*, National Academy Press, Washington, pp. 36-75.
- Cuanalo-Campos, O. A. y Melgarejo-Palafox, G. (2002). Inestabilidad de laderas. Sierras norte y nororiental del estado de Puebla. *Elementos*, No. 47, pp. 51-55.
- Dai, F. C. y Lee, C. F. (2001). Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology*, No. 59, pp. 253-266.
- Eden, D. N y Page, M. J. (1998). Palaeoclimatic implications of a storm erosion record from late holocene lake sediments, north island, New Zealand. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 139, 1, pp 37-58.
- EPOCH (European Community Programme; 1993) *Temporal occurrence and forecasting of landslide in the European Community*. Flageollet, J.C. (ed), 3 volúmenes, Contract no. 900 025
- Erskine, C. F. (1973) *Landslides in the vicinity of the first Randall Reservoir, S. Dakota.*, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 675, 64 p.
- Esteban-Chávez, O. (2003). *La deforestación como mecanismo detonador de la inestabilidad de laderas, estudio caso Sierra Norte de Puebla*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 156 p.

- FAO. 1993. *Forest Resources Assessment 1990: Tropical Countries*: Roma. FAO.
- Fernandes, R., Fraser, R., Latifovic, R., Cihlar, J., Beaubien, J. y Du, Y. (2004). Approaches to fractional land cover and continuous field mapping: a comparative assessment over the BOREAS study region. *Remote Sensing of Environment*, 89, pp. 234–251.
- Flores-Lorenzo, P. (2002). *Inestabilidad de laderas y riesgos asociados en Teziutlan, Puebla*. Tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM México. 119 p.
- Galván, A., Hernández, G., Vélez, H., Gómez, E., Becerril, A. y Luna, A. (1999). *Evaluación de impacto ambiental. Informe final de actividades Sierra Norte de Puebla*. Secretaría de Agricultura y Ganadería, Banco Mundial, Universidad Autónoma Metropolitana
- García-Arizaga, M. T. (1995). *Origen y evolución de un deslizamiento de tierras en Metztlán, Hidalgo*. Tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 133 p.
- Garnica-Peña, R. J. (2003). *Riesgos por inundaciones e inestabilidad de laderas en el municipio de Tecolutla, Veracruz*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México. 168 p.
- Gerrard, J. y Gardner, R. (2002). Relationships Between Landsliding and Land Use in the Likhu Khola Drainage Basin, Middle Hills, Nepal. *Mountain Research and Development*, Vol. 22, No. 1, pp. 48–55.
- Glade, T. (2003). Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *Catena*, No. 51, pp. 297-314.
- Greenway, D.R. (1987). *Vegetation and Slope Stability - Chapter 6*. En: *Slope Stability*. John Wiley and Sons Ltd.
- Hernández-Madrigal, V. M. (2005). *Caracterización de los procesos de remoción en masa en la Región de Zacapoaxtla, Sierra Norte de Puebla, México*. Tesis de Doctorado, Facultad de filosofía y Letras, UNAM, 142 p..
- Hutchinson, J. N. (1968) *Mass movement*. In Fairbridge, R. W. (ed) *Encyclopedia of Earth Sciences*, Reinhold, New York, pp. 688-695.
- Hutchinson, J. N. (1988) *General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrology*. In Bornnard, C. (ed), *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherland, vol. 1, pp. 3-35.
- Instituto Nacional de Ecología (INE)-Secretaría de Marina, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). (2000). *Ordenamiento ecológico general del territorio 2000*. México. D. F., 36 p.
- Jaramillo, C. F. y Kelly, T. (1999). Deforestation and property rights. En: *Forest Resource Policy in Latin America*. Eds. Kari Keipi. Ed. Inter-American Development Bank, Washington, D.C.
- Krinine, D. P. y Judd, W. R. (1957) *Principles of engineering geology and geotechnics*. Nueva York.
- Ladd, G. E. (1935). Landslides, subsidences and rockfalls. *Bulletin of the American American Railway Engineering Association*, 37, pp 1091-1162.
- Lambin, E.F. (1997). Modeling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography*, 21, 3, pp. 375–393.
- Lambin, E. F., Rounsevell, M.D.A. y Geist, H.J. (2000). Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82, pp. 321–331.
- Lambin, E.F., Turner, B.L., Helmut, J., Geist, S.B., Agbola, S.B., Arild, A., Bruce, J.W., Coomes, O.T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P.S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E.F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P.S., Richards, J.F., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G.D., Svedin, U., Veldkamp, T., Vogel, y Xu, C.J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11, pp. 261–269.

- Lineback-Gritzner, M., Andrew-Marcus, W., Aspinall, R., Custer, S. (2001). Assessing landslide potencial using GIS, soil wetness modeling and topographic attributes, Payette River, Idaho. *Geomorphology*, Vol. 37, pp. 149-165.
- 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, Puebla*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México. 208 p.
- Lugo-hubp, J. (1989). *Diccionario geomorfológico*. Instituto de Geografía, UNAM, 324 p.
- Lugo-Hubp, J., García-Arizaga, M. T., Zamorano-Orozco, J. J., Salas-García, O. y Gallegos, G. (1995). Deslizamiento de tierras activo en Metztlán, Hidalgo. *Ciencia y desarrollo*, Vol. 21, No. 121, pp. 53-60.
- Lugo-Hubp, J. (2001). Los conceptos geomorfológicos en la obra de Ezequiel Ordóñez (1867-1950). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 18, No. 1, pp. 89-102, México.
- Lugo-Hubp, J., Vázquez-Conde, M. T., Melgarejo-Palafox, G., García-Jiménez, F., Matías, G. L. (2001). Procesos gravitacionales en las montañas de Puebla. *Ciencia y desarrollo* 27, pp. 24-33, México, CONACYT.
- Marcos-López, J. (2003). *Distribución espacial de los procesos de remoción en masa y riesgos asociados en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla*. Tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Marutani, T., Kasai, M., Reid, L.M., Trustrum, N.A. (1999). Influence of storm-related sediment storage on the sediment delivery from tributary catchments in the upper Waipaoa River, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, pp. 881-869.
- Masera, O. R. (1996). *Deforestación y degradación forestal en México*. Documentos de trabajo, No. 19, México.
- Mass, J. F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, R. J., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., Castro, R., Fernández, T. y Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5, pp. 249-261.
- Megahan, W. F. (1983). Hydrologic effects of clearcutting and wildfire on steep granitic slopes in Idaho. *Water resources research*, No. 19, pp. 811-819.
- Mendoza, M. J., Noriega, I., Domínguez, L. (2000). Deslizamientos de laderas en Teziutlán, Pue., provocados por las lluvias intensas de octubre de 1999. *SEGOB, CENAPRED*, México.
- Mertens, B. y Lambin, E. F. (2000). Land-cover-change trajectories in southern Cameroon. *Annals of the association of American Geographers*, 90, 3, pp. 467-494.
- Myers, N. (1988). Tropical Deforestation and Climatic Change. *Environmental Conservation*, 15, 4, pp.293-298.
- Noriega-Rioja, I. (2005). *Deslizamientos de ladera ocasionados por lluvias intensas*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 104 p.
- Ochoa-Tejeda, V. (2004). *Propuesta metodológica para el estudio de inestabilidad de laderas a partir de los MDT y la percepción remota*. Tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, pp 213.
- O'Loughlin, C., y Ziemer R. (1982). The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steepland forests.. Workshop P.1.07-00 Ecology of Subalpine Ecosystems as a Key to Management. Agosto 2.3, 1982, Corvallis, Oregon. Universidad del Estado de Oregon pp.. 70-78.

- Oropeza-Orozco, O., Zamorano-Orozco, J. J. y Ortiz-Pérez, M. A. (1998). Peligros geomorfológicos en México: remoción en masa, en: *Los desastres en México, una perspectiva multidisciplinaria*, coord. Garza-Salinas, M. y Rodríguez-Velázquez, D. pp. 149-184, Universidad Iberoamericana, México.
- Page, M.J., Trustrum, N.A., Brackley, H.L., Baisden, W.T. (2004). Erosion-related soil carbon fluxes in a pastoral steepland catchment, New Zealand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103,3, pp. 561-579.
- Palacio, J.L., G. Bocco, A. Velásquez, J. F. Mas, F. Takaki, A. Victoria, L. Luna, G. Gómez, J. López, M. Palma, I. Trejo, A. Peralta, J. Prado, A. Rodríguez, R. Mayorga y F. González. (2000). La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del inventario forestal nacional 2000. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Num. 43: 183-203.
- Pedraza, J. (1996). *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. Ed. Rueda, Madrid.
- Penck, A (1894) *Morphologie der Erdoberfläche*, 2 vols. pp. 471-696.
- Polemi, M y Sdao F. (1999). The role of rainfall in the landslide hazard: the case of the Avigliano urban area (Southern Apennines, Italy). *Engineering Geology*, No. 53, pp. 297-309.
- Reid, L.M., y Page, M.J. (2003) Magnitude and frequency of landsliding in a large New Zealand catchment. *Geomorphology* 49,1-2, pp. 71-88.
- SARH.1994. Inventario Nacional Forestal Periódico. Memoria Nacional. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. México, D.F.
- Sala, O.E., Chapin, F.S., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomeld, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.M., Mooney, H.A., Oesterheld, M., Po, N.L., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M. y Wall, D.H., (2000). Biodiversity: global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287, pp. 1770-1774.
- Sánchez-Azofeifa, G., Harriss, R. C. y Skole, D. L. (2001). Deforestation in Costa Rica: A Quantitative Analysis Using Remote Sensing Imagery. *BIOTROPICA*, Vol. 33, No. 3, pp. 378-384.
- Sánchez-Titla, E. (2005). *Vulnerabilidad, deforestación e inestabilidad de laderas: una zonificación del riesgo en Zacatlán, Puebla*. Tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 182 p.
- Selby, M. J. (1993) *Hillslope materials and processes*. Oxford, Reino Unido, Oxford University Press, 451 p.
- Secretaría de Marina, Recursos Naturales y Pesca, SEMARNAP (1998). *Estudio diagnóstico de la deforestación en México*. Unidad del Inventario Nacional de Recursos Naturales, México.
- Secretaría de Marina, Recursos Naturales y Pesca, SEMARNAP (1999). Estadísticas del sector forestal. *Boletín de la Dirección Forestal General*, México.
- Sharpe C., F. (1938) *Landslides and related phenomena*. Columbia University Press, New York.
- Skempton, A. W. (1953) *Soil mechanics in relation to geology*. Proceeding of the Yorkshire Geological Society, 29, pp. 33-62.
- Sosa-Cedillo, V.E. y Medina-Bermúdez, R. (1978). *Dinámica de los recursos forestales de México y perspectivas para su fomento y conservación*. 4ª convención Nacional Forestal – Oaxaca.
- Southgate, D. (1991). Tropical deforestation and agricultural development in latin america. *Land economics*. 66, 1, pp. 93-101.
- Terzaghi, K. (1950) *Mechanism of landslides*, en Paige, S., Applications of geology to engineering practice. Boulder, Geological Society of America, Berkley, pp. 83-123
- Toledo, V. M., (1989). La diversidad biológica de México. *Ciencia y desarrollo* No. 14, pp. 17-30, México.

- Townshend, J. R. G., Justice, C. O. y Skole, D. (1994). The 1 km resolution global data set: needs of the International Geosphere Biosphere Programme. *International Journal of Remote Sensing*, 15, pp. 3417–3441.
- Turner, B.L., Moss, R.H. y Skole, D.L. (1993). Relating land use and global land-cover change: a proposal for IGBP-HDP core project. IGBP Report 24, HDP Report 5. IGBP, Estocolmo.
- UNDP-DHA., (1994). Vulnerability and Risk Assesment. *Disaster Management Training Programme*. 2a Edición.
- Varela-Hernández, S (1998). *Cifras sobre la deforestación en México*.
- Varnes, D. (1978) *Slope Movement. Types and Processes*. In Schuster, R (1978) *Landslides, Analysis and Control*. Special Report 176. National Academy of Sciences. Washington. D.C.
- Velázquez, A.; Mas, J. F. y Palacio, J. L. (2002a). *Mapas del análisis de cambio de uso del suelo*. Resumen ejecutivo, Convenio INE-Ig (UNAM).
- Velázquez, A, Mas, J. F., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ecurra, E. y Palacio, J. L. (2002b). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, Instituto Nacional de Ecología (INE)-Secretaría de Marina y Recursos Naturales (SEMARNAT) 62, México. pp. 21-37.
- Veldkamp, A. y Lambin, E.F. (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, pp. 1–6.
- Veldkamp, A. y Verburg, P.H. (2004). Modelling land use change and environmental impact. *Journal of Environmental Management*, 72, pp. 1–3.
- Viña, A., Echevarria, F. R. y Rundquist, D. C., (2004). Satellite Change Detection Analysis of Deforestation Rates and Patterns along the Colombia – Ecuador Border. *A Journal of the Human Environment: Vol. 33, No. 3*, pp. 118-125.
- Waldron, L. J. y Dakessian, S. (1981). Soil reinforcement by roots: calculation of incresed soil shear resistance from root properties. *Soil science*, No. 132, pp. 427-435.
- Wieczorek , G. F. (1987). Effect of rainfall intensity and duration on debris flor in central Santa Cruz Mountains, California. En: Costa, J. E. y Wieczorek, G. F. (eds), *Debris flow/avalanches: process, recognition and mitigation*. Reviews in Enginerring Geology, Vol VII, Geological Society of America, pp 93-104.
- Wilches-Chaux, G. (1998). *Auge , caída y levantada de Felipe Pinillo, mecánico y soldador o Yo voy a correr el riesgo*. La Red, Perú, 154 p.
- Wu, T. H., McKinnel, W. P. y Swantson, D. N. (1979). Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, No. 16.
- Zaruba, Q. y Mencl, V. (1968). *Landslides and their control*. Second edition Amsterdam: Edit. Elsevier, 1982, 324 p.
- Ziemer, Robert (1981). Root (Botany). *1981 McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology*. McGraw-Hill, New York, pp. 342-344.

Mesografía

www.conafor.gob.mx (acceso marzo 2005)

www.lajornadadeoriente.com.mx (acceso octubre 6-15 2005)

www.semarnat.gob.mx (acceso junio 2005)

www.usgs.gov (acceso febrero 2005)

CAPÍTULO 2 CARACTERÍSTICAS DEL ENTORNO FÍSICO

Para realizar un estudio de los procesos de remoción en masa es indispensable considerar diversos factores causales que juegan un papel diferencial en la ocurrencia de estos movimientos. En el capítulo uno se hizo mención de las causas internas y externas que influyen en la inestabilidad, lo que resulta en la necesidad de conocer las características y propiedades de los elementos del entorno físico para poder entender, en este caso el comportamiento de los procesos de ladera.

En el presente capítulo se realiza una descripción y análisis de las particularidades del medio físico regional del municipio de Tlatlauquitepec y en concreto, de la comunidad de La Unión. Así, el capítulo se compone de cinco apartados principales, estratigrafía, evolución geológica, morfogénesis, precipitación local y vegetación, con la finalidad de establecer la relación con la ocurrencia de procesos de remoción en masa en la región norte del municipio de Tlatlauquitepec, primordialmente del régimen pluvial local.

2.1 Estratigrafía regional

El Estado de Puebla, desde el punto de vista geológico, presenta una gran variedad de rocas pertenecientes a diversas eras geológicas. La Sierra Norte de Puebla es una zona de transición entre un sector de la Sierra Madre Oriental y el Cinturón Volcánico (CVTM) con una extensión aproximada de 70 Km. de largo y 40 Km. de ancho, que se extiende en la zona norte del Estado, desde Huauchinango hasta Teziutlán, limitando la gran llanura costera del Golfo de México.

La Sierra Norte es un complejo orográfico que se destaca por sus profundas depresiones, laderas inclinadas y numerosos escarpes, presentes en las sierras de Teziutlán, Tlatlauquitepec, Zacapoaxtla, Tetela, Chignahuapan, Zacatlan y Huauchinango. Existen varias fallas normales, escalonadas, así como largos anticlinales separados por sinclinales más o menos afallados. En las laderas orientales, dirigidas hacia el Golfo de México, se pueden observar muchas laderas escarpadas de falla inversa, en ocasiones abruptamente hacia la llanura costera (Fuentes-Aguilar, 1972). Estas rocas sedimentarias mesozoicas plegadas son cubiertas, casi en su totalidad, por rocas volcánicas pliocénicas y cuaternarias, destacando al sur de la región aquellas cuyo origen es la caldera de los Humeros.

Las rocas metamórficas de la región se formaron en el Paleozoico y están representadas principalmente por esquistos y, en menor proporción, por dioritas y conglomerados (López-Ramos, 1982) que conforman el basamento regional sobre el cual se asientan las rocas sedimentarias (Quezadas, 1961).

Particularmente el municipio de Tlatlauquitepec se caracteriza por presentar rocas sedimentarias en el norte, la mayoría plegadas, relacionadas con la Sierra Madre Oriental, cuyo origen se remonta al Mesozoico. Al centro y sur del municipio se presentan rocas ígneas cuaternarias del Sistema Volcánico Transversal, el cual sobreyace a las rocas sedimentarias, y cuyo espesor aumenta conforme se avanza hacia el sur. Esta disposición estratigráfica se presenta en gran parte de la Sierra Norte, con origen similar de las rocas sedimentarias (marino) y de diferentes fuentes de emisión de materiales volcánico.

Al finalizar el Cretácico se presentó la Orogenia Laramide, actividad que incrementó en 100% el territorio nacional, con lo que ascendió el fondo marino y dio origen a diversas formas continentales, destacando la Sierra Madre Oriental, conformada a finales del Eoceno, por lo que en la era Cenozoica, las formaciones sedimentarias de origen marino afloran en diferentes lugares entre los materiales volcánicos, particularmente al oriente del país (Ortega-Gutiérrez, 1992). Las formaciones cretácicas consisten esencialmente en calizas compactas, con fósiles poco abundantes y esquistos calcáreos y calcáreo-arcillosos, sin fósiles, que alternan con conglomerados (Fuentes-Aguilar, 1972).

Las diferentes formaciones que se presentan en la región se asientan sobre un complejo basal formado por rocas ígneas y metamórficas de composición granítica, granodiorítica y esquistos, que se remontan al Paleozoico, cubierto por formaciones del Mesozoico, particularmente del Triásico. Al norte de La Unión se presentan algunas afloraciones de esquistos, cerca de la presa La Soledad (Quezada, 1961; López-Ramos, 1982).

Las formaciones del Mesozoico se caracterizan por ser rocas sedimentarias de origen marino, que por movimientos orogénicos emergieron, compuestas principalmente por calizas, lutitas y areniscas y en menor proporción conglomerados y limonitas. Durante el Triásico se dio la formación Huizachal, compuesta primordialmente por lutitas y areniscas rojas (Quezada Flores, 1961; López-Ramos, 1982).

Durante el Jurásico se constituyeron diversas formaciones integradas por calizas y lutitas, cuyos colores y características varían entre las formaciones, rocas sedimentarias totalmente de origen marino que llegan a presentar fósiles y un alto grado de intemperismo, resultado de las presiones a las cuales están sometidas por los materiales cenozoicos que les sobreyacen. El orden cronológico de estas formaciones es Huayacocotla, Cahuasas, Tamán y Pimienta (Heim, 1940; Olivas, 1953; Congreso Geológico Internacional, 1956; López-Ramos, 1979; López-Ramos, 1982; Yáñez y García 1982).

Las rocas sedimentarias que se remontan al Cretácico inferior conforman las formaciones Tamaulipas Inferior, Tamaulipas Superior y Orizaba. Con un predominio de rocas calizas, intercaladas con lutitas y conglomerados, estas formaciones se dieron en ambientes de transgresión marina; sus estratos se pueden observar en algunos cauces de la región, por ejemplo en el río Apulco (López-Ramos, 1979; López-Ramos, 1982; Yáñez y García 1982).

La formación Agua Nueva se dio en la transición del Cretácico inferior al Cretácico superior, casi paralelamente a la formación Maltrata. Ambas formaciones presentan calizas, que se caracterizan por estar estratificadas en delgadas capas con una notable presencia de arcillas. Son poco notables en la zona de estudio, pero es parte fundamental de la columna estratigráfica de la región (López-Ramos, 1979; López-Ramos, 1982)

Las formaciones de rocas sedimentarias más recientes que se datan al Cretácico superior son en orden cronológico, Méndez, San Felipe y Mexcala, mismas que en algunos puntos son discordantes entre sí. Las rocas predominantes son calizas y lutitas, bien definidas en capas en la mayor parte de las formaciones, mismas que presentan el mayor espesor de las formaciones sedimentarias, aunque también son las menos resistentes a la erosión (Congreso Geológico Internacional, 1956; López-Ramos, 1979; López-Ramos, 1982)

La intensa actividad volcánica del Cenozoico en la región definió las formaciones que cubren a los materiales sedimentarios. Durante el Terciario destaca la formación Cruz Blanca, compuesta por arcillas, conglomerados y arenas, producto de la intensa erosión de los materiales sedimentarios mesozoicos. Las capas superiores de la formación presentan arenas volcánicas y arcillas interdigitadas con sedimentos lacustres, pómez y cenizas. La formación se remonta al Mioceno medio (García-Durán, 1982; Yáñez y García, 1982).

En el Mioceno Superior destaca la andesita Alseseca que se originó por la actividad volcánica regional. Está compuesta por productos lávicos andesíticos y tobas ácidas, que representan el inicio de las emanaciones de lava en el Terciario (Yáñez y García, 1982). Al final del Terciario, durante el Plioceno, se dio la formación Teziutlán constituida esencialmente por andesita y complementada con basaltos, cuyo origen se asocia a la caldera de Los Humeros, precursora de la actividad riolítica regional (Yáñez y García, 1982; Ferríz, 1985).

La actividad volcánica ha continuado durante el Cuaternario y se han dado diversas formaciones; en el inicio del periodo se formaron la Riolita Oyameles y la Ignimbrita Xáltipan; la primera está representada por capas de lavas riolíticas y domos riolíticos, actividad que se desarrolló en la periferia del centro volcánico. La ignimbrita Xaltipán es resultado de una serie de derrames ignimbriáticos y tobas, materiales asociados al colapsamiento de la caldera de Los Humeros (*Ibid*).

Las formaciones que sobreyacen a las descritas en el párrafo anterior son la San Antonio y la Ignimbrita Zaragoza, así como una serie de formaciones menores, por ejemplo la Toba Faby, la Toba Xoxoctic, la Toba Cuicuiltic, los derrames andesíticos de El Limón, Tepeyahualco y Sarabia, así como Andesita Xalapasco, todas ellas relacionadas a la actividad de la caldera de Los Humeros. Finalmente, la última etapa de actividad de la caldera dio origen a basaltos recientes, mismos que se concentran en las cercanías del centro volcánico (*Ibid*).

Como se ha establecido, diversas formaciones de la Sierra Norte de Puebla presentan lutitas entre los materiales que las representan, con mayor o menor presencia, después de las calizas, estas rocas son las más abundantes de la región en cuanto a los materiales sedimentarios y en menor proporción limolita y arenisca. Un alto porcentaje de las rocas calizas de la región presentan planos de estratificación que delimitan espesores de material variable entre 20 cm y 1 m (Cuanalo y Melgarejo, 2002). En la formación Huayacocotla, cuyo origen se remonta al Jurásico inferior, se presentan secuencias de lutitas formando bandas, combinadas con areniscas, con algunas intrusiones de esquistos; el origen de estas rocas sedimentarias se refiere a ambientes marinos subacuáticos (López-Ramos, 1982). En el mismo periodo, se conformó la formación Cahuasas, en la que destacan areniscas y conglomerados, con algunos fragmentos de cuarzo e intrusiones de lechos de lutitas rojas, mismas que llegan a alcanzar los 40 m. de espesor.

La formación Tamán, que está conformada por dos facies, presenta en su parte inferior lutitas negras y carbonosas, mismas que se entrelazan con calizas con tonalidades azul-grisáceas y con amonitas. La parte superior está integrada principalmente por calizas ordenadas en capas delgadas. Esta formación remite su origen al Jurásico Superior, resultado de ambientes de transgresión y regresión marina (Heim, 1940, en López, 1979), cuyos materiales se depositaron en la formación Santiago (compuesta por limolitas y

lutitas calcáreas –López-Ramos, 1982-). La formación Pimienta, que se conformó en el mismo período geológico, con litología sedimentaria con características arcillosa-calcárea, no presenta lutitas y está compuesta principalmente por calizas, con bandas de pedernal negro en algunas partes, cuyo origen se presentó en un ambiente fanerítico de aguas templadas (C.G.I., 1956; López-Ramos, 1982).

Particularmente, en las cañadas originadas por la actividad erosiva del río Apulco, se observan afloramientos de capas delgadas de lutitas paralelas a las capas mayores de calizas arcillosas, con algunos lentes y nódulos de pedernal gris de 2 a 8 cms. de espesor, pertenecientes a la formación Tamaulipas inferior, que sobreyace a la formación Pimienta, conformada en el Jurásico superior. Similar a otras formaciones del mismo tiempo geológico, el origen de esta formación se presentó en ambientes de transgresiones marinas, a principios del Cretácico temprano (C.G.I., 1956; Yáñez y García, 1982; López-Ramos, 1982). Las formaciones Tamaulipas Superior, Orizaba, La Guzmantla y Agua nueva, que también tienen presencia cerca de la zona de estudio, se caracterizan por contener calizas con diferentes características pero todas ellas de origen marino con algunos nódulos de pedernal (*op. cit.*). La formación Maltrata también presenta entre sus rocas representativas lutitas en capas muy delgadas, combinadas con margas, aunque destaca la presencia de calizas grises y pardas, con arreglo similar en capas delgadas.

Durante el periodo Triásico, se dio la formación de materiales de origen continental, conocidos como lechos rojos y por sus características litológicas principalmente lutitas, areniscas y conglomerados, lo que dio origen a la formación Huizachal que llega a alcanzar hasta 370 m. de espesor (Olivas, 1953; Benavides, 1956, en Garnica-Peña, 2003). La formación Huayacocotla, la cual sobreyace a la formación Huizachal, está compuesta por lutitas, areniscas, con algunas capas delgadas de esquistos (López-Ramos, 1982). De acuerdo con Ruiz (1965) los materiales sedimentados se depositaron en aguas someras, durante un proceso de transgresión en el Jurásico Inferior.

La formación Méndez sobreyace a la formación San Felipe (formada básicamente por calizas arcillosas, depositadas en mar abierto y con algunas evidencias de actividad volcánica (CGI, 1956; López-Ramos, 1982) tuvo su origen durante el Cretácico superior en ambientes marinos neríticos, presenta características arenosas y calcáreas; está constituida principalmente por margas grises y azules, estratificadas en capas de distinto grosor, desde algunos cms. hasta más de 1 m., además de contar con capas delgadas de lutitas calcáreas y calizas en su parte superior, con espesor entre 1 y 5 cms. (López-Ramos, 1982). Como última formación con contenido litológico sedimentario en la estratigrafía de la región, la formación Mexcala cuenta con capas interestratificadas de areniscas, limolitas y lutitas con espesores de 20 a 50 cms (López-Ramos, 1982).

Las formaciones regionales de materiales volcánicos están compuestas principalmente por rocas del Cuaternario, con excepción de las formaciones Cruz Blanca y Teziutlán, cuyos materiales, principalmente andesíticos con menor proporción de basaltos, se remontan al Terciario. Las demás formaciones, entre las que destacan la Ignimbrita Xaltipan, San Antonio, Temastepec y lahares de las derrumbadas, están compuestas por derrames andesíticos y basálticos y otros materiales piroclásticos. Por último, se encuentran en la región algunos sedimentos lacustres, cuyo origen se encuentra en la cuenca Libres-Oriental, por la erosión de calizas y otros materiales de origen ígneo, que se han combinado con materiales piroclásticos (Yáñez y García, 1982).

En resumen, las unidades litológicas predominantes en esta parte de la Sierra Norte de Puebla, correspondiente a la carta Teziutlán (figura 2.1) están representadas por materiales débiles no consolidados de origen volcánico (principalmente ignimbritas) que sobreyacen a rocas sedimentarias de origen marino (principalmente calizas y lutitas), las cuales determinan el grado de resistencia de los materiales que constituyen las laderas, que como se ha mencionado, en el capítulo uno, es factor esencial en la estabilidad del terreno (Borja y Alcántara, 2004).

En la figura 2.2 se muestra la geología local de la localidad de La Unión; en esta área las rocas metamórficas presentan una foliación intensa, bien desarrollada, en particular en las rocas metavolcánicas. Las secuencias sedimentarias del Jurásico-Neocomiano presentan plegamientos con formación de anticlinales y sinclinales, con ángulos cerrados junto con fallas inversas y cabalgaduras. Todas las unidades están afectadas por fallas normales, por ejemplo la que controla el cauce del río Apulco (Olivas, 1953; Segura, 1990; Ángeles-Moreno, 2002)

Algunos trabajos que hacen mención de la geología de la zona, particularmente la conformada durante la era Cenozoica, y su relación con los procesos de remoción en masa presentes son Flores-Lorenzo (2002), Borja-Baeza (2003), Marcos-López (2003), Garnica-Peña (2003) y Ochoa-Tejada (2004). Por su parte, Ángeles-Moreno (2002), realiza un estudio de la geología a detalle de la región norte del municipio de Tlatlauquitepec, con énfasis en la evolución geológica local y la milonitización de los complejos La Soledad y Xucayucan (figura 2.2); otro trabajo que detalla la geología de la región, específicamente la del municipio de Zacapoaxtla al oeste de Tlatlauquitepec, es Hernández-Madrigal (2005), quien realiza una fotointerpretación y detalla la estratigrafía y origen de la litología de dicha entidad y su estrecha relación con los procesos de remoción en masa al elaborar, incorporando otros parámetros, el mapa de peligro por inestabilidad municipal.

2.2 Evolución geológica

La secuencia estratigráfica de la región está constituida por rocas sedimentarias de origen marino (figura 2.3), que se remiten al Mesozoico, en ambientes de cuenca (de Oaxaca) y plataforma (Tamaulipas), complementadas por unidades del Terciario de origen continental e ígneo, que sobreyacen a las rocas mesozoicas, con escasos afloramientos de rocas metamórficas paleozoicas, todas estas cubiertas en la mayor parte por materiales volcánicos cuaternarios (figura 2.4). Las rocas más antiguas de la región se remontan a la era Paleozoica, con origen en depósitos sedimentarios clásticos que posteriormente sufrieron metamorfismo, formando esquistos y cuarzos. En toda la región se encuentra una marcada transición de materiales, respecto a su origen, composición y edad (figura 2.5).

Durante el Jurásico Tardío y el Cretácico, gran parte de la región oriental de México permaneció sumergida, siendo límites continentales la Plataforma de Tamaulipas y la Península de Oaxaca. Posteriormente, por esfuerzos tectónicos con origen en el suroeste, se inicio lo que se ha denominado como Orogenia Laramide. Esta última comenzo a fines del Mesozoico y se prolongó en el oriente del país hasta el Eoceno inferior. La secuencia estratigráfica de la cuenca del Golfo de México fue deformada estructuralmente por los esfuerzos comprensivos de este movimiento orogénico con convergencia hacia el nortoreste.

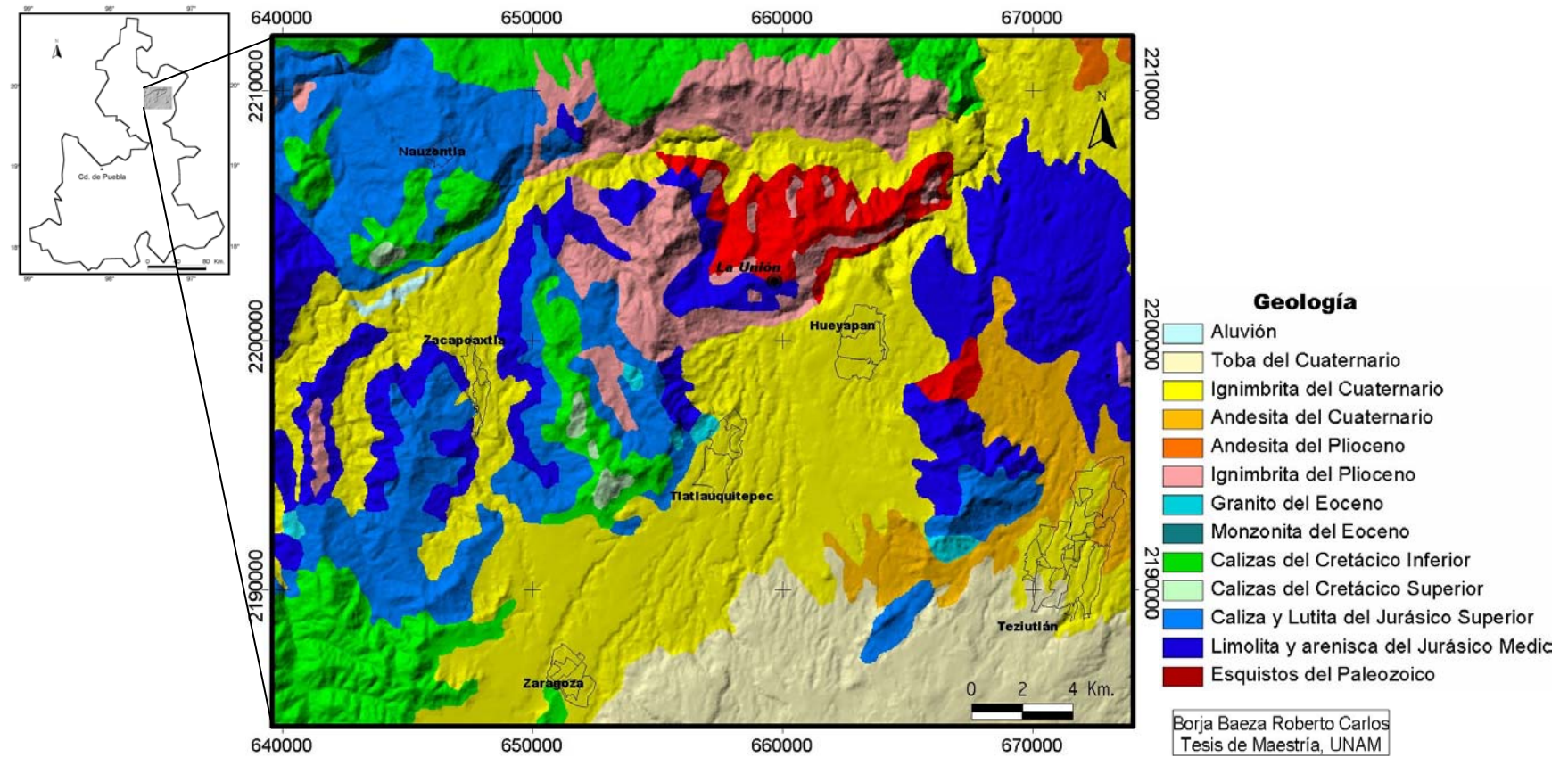


Figura 2.1 Geología de la Carta Teziutlán E14B15, a escala 1:50 000 (Fuente: INEGI, Carta Geológica Veracruz, escala 1:250 000, 1984).

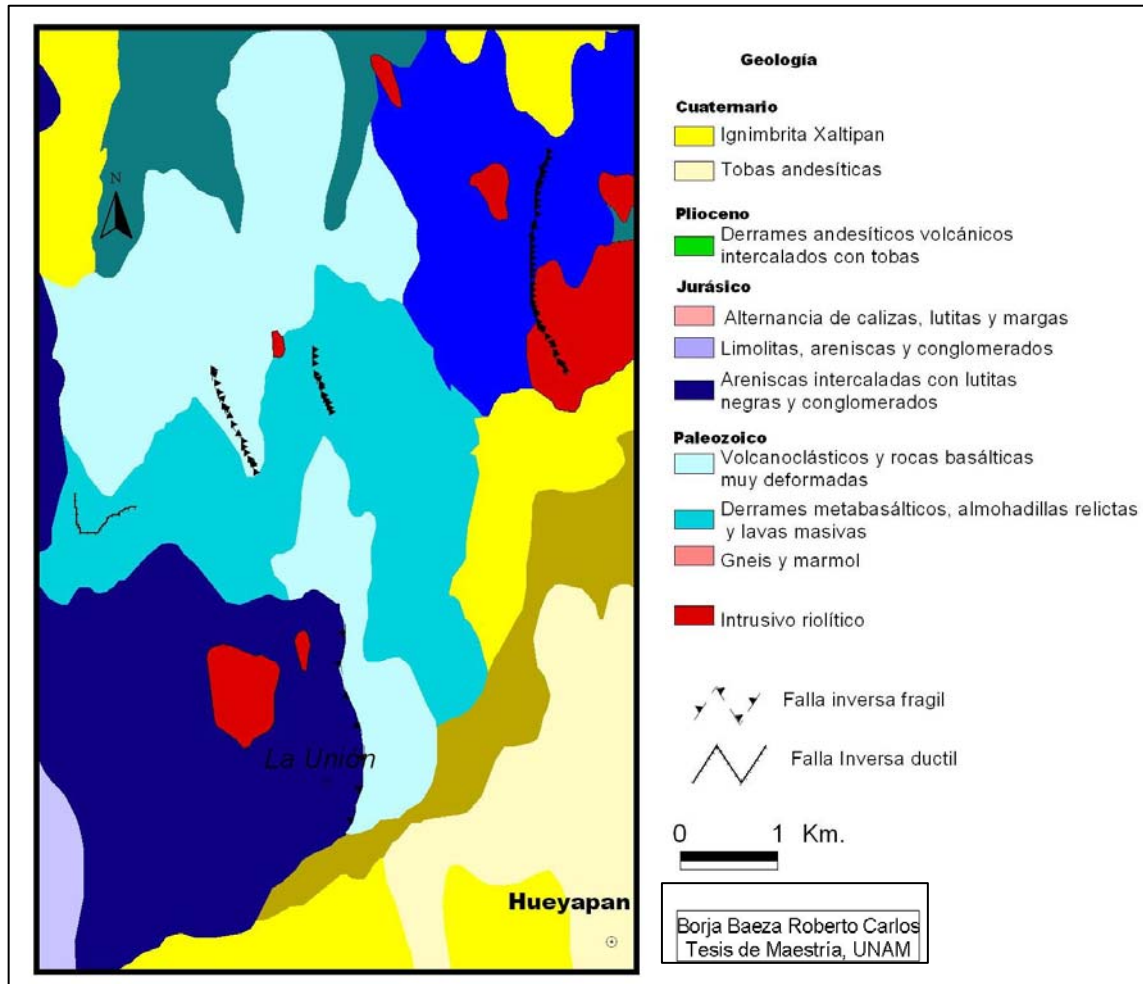


Figura 2.2 Geología regional (adaptado de Ángeles-Moreno, 2002)

La actividad tectónica sólo fue obstaculizada por paleoislas del Jurásico y por el Arco de Tamaulipas, evento que aumentó en 100% la extensión del territorio nacional, particularmente a la Sierra Madre Oriental, por lo que durante el Cenozoico las formaciones de origen continental son abundantes, junto con los depósitos marinos. Los bloques elevados formaron una unidad arqueada y plegada, dando origen a anticlinales, con ejes sinuosos y asimétricos (López-Ramos, 1979; Yáñez y García, 1982; Ortega-Gutiérrez, 1992; Aguayo-Camargo, 2005).

La actividad ígnea efusiva, relacionada al Sistema Volcánico Transversal, dio inicio en el Mioceno tardío, con derrames andesíticos que formaron el basamento sobre el cual se asentarían rocas volcánicas, como andesitas y basaltos. La emisión de ignimbrita en grandes cantidades proveniente de Los Humeros, cuya actividad se remonta a 250 000 años, se distribuyó en un área extensa, destacando las ignimbritas Xaltipan y Zaragoza, lo que provocó el colapso del techo de la estructura al vaciarse la cámara magmática, formando la Caldera de Los Humeros. Finalmente, emisiones de lava provenientes de la formación Tenamastepec, cuya composición va de intermedia a básica, representan el último acontecimiento eruptivo de la región en derrames andesíticos y basálticos. Cenizas

básicas y los conos de explosión, y de escoria que se observan en el área están asociados a estos derrames (López-Ramos, 1979 y 1982; Yáñez y García, 1982).



Figura 2.3 Rocas sedimentarias en la Sierra Norte de Puebla. En la imagen izquierda se aprecia parte de las montañas de rocas calizas de Zacapoaxtla, cuyo origen se remonta al Jurásico; en la imagen contigua un acercamiento a lutitas en la localidad de La Unión (Fotos del autor).



Figura 2.4 Rocas ígneas en la Sierra Norte de Puebla. La imagen al margen izquierdo muestra diferentes capas que muestran diferentes eventos de caída de ceniza, provenientes de la Caldera de los Humeros (sur de Tlatlauquitepec); en la imagen adjunta, un corte en el libramiento de Zacapoaxtla se aprecia material ignimbrítico que predomina en gran parte de la región, ambos materiales del Terciario (Fotos del autor).

2.3 Morfogénesis

La geomorfología se ocupa básicamente del relieve terrestre, de su descripción (origen, estructura, desarrollo, etc.) y de su dinámica actual e incluso futura por medio de modelaciones, a través del estudio de los procesos internos y externos, los cuales tienen su expresión en las formas del relieve. Uno de los objetivos primarios de esta disciplina es la aplicación de la información que se genera mediante sus técnicas de estudio (cartografía geomorfológica, morfogénética, morfométrica, morfoestructural, etc.) para solucionar diversos problemas o situaciones relacionadas con el relieve y con fines de beneficio para el hombre (planeación, obtención de recursos, reordenamiento, prevención, etc.).

Era	Sist.	SERIE	Edad (m.a.)	Formación		
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE		LOS HUMEROS-LAS DERRUMBADAS		
		PLEISTOCENO			Aluvi3n	
					Miembro Arenas (andesitas y dacitas)	
			FORMACION TERNASATEPEC		Miembro el Lim3n (andesitas, andesitas basálticas, basaltos)	
					Labares de Las Derrumbadas	
					P6mez, paleosuelos y tobas	
					Sedimentos lacustres	
			FORMACION SAN ANTONIO		Miembro La-Viola (andesitas basálticas vítreas)	
					Miembro Orilla del Monte (andesitas basálticas)	
					Riolita Oyameles (Riolita, riolita esferulítica, tobas riolíticas y riolacitas)	
					Brecha de la Caldera de explosi3n Buenavista	
				Escoria y basaltos		
				Ignimbrita Xáltipan		
		TERCIARIO	MIOCENO	Plioceno	10	Formaci3n Teziutlán (andesitas, andesitas basálticas y basaltos)
				Sup.		Andesitas Asesecá
Med.				Formaci3n Cruz Blanca (Conglomerado, arenas y arcillas)		
Inf.				Rocas ígneas intrusivas (microgranito, sienita, aplita y granodiorita)		
Oligoceno	25					
Eoceno	40					
Paleoceno	60					
	70					
MESOZOICO	CRETACICO	SUPERIOR		Formaci3n Méndez 250-300		
				Formaci3n Mexcala ± 250		
				Formaci3n San Felipe		
		INFERIOR		Formaci3n Agua Nueva ± 300		
				Formaci3n Maltrata ± 400		
	JURASICO	SUPERIOR		Formaci3n Orizaba ± 1200		
				Formaci3n Tamaulipas Superior 600-800		
		INFERIOR		Formaci3n Tamaulipas Inferior		
				Formaci3n Pimienta 20-80		
				Formaci3n Tamán 25-300		
TRIASICO	Sup.	166	Formaci3n Cahuascalas 200-1200			
	Med.	181	Formaci3n Huayacocotla ± 400			
PALEOZOICO	TRIASICO	Inf.		Formaci3n Huizachal		
			220	Rocas ígneas intrusivas y metam3rficas (granito, granodiorita y esquistos)		
			330			

Columna 1

Era	Sistema	Serie	Edad (m.a.)	Formación		
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE		Aluvi3n		
		PLEISTOCENO			P6mez, paleosuelos y tobas	
					Materiales de la caldera de explosi3n	
			FORMACION SAN ANTONIO		Miembro Orilla del Monte (andesitas basálticas)	
					Miembro La Viola (andesitas basálticas vítreas)	
					Riolita Oyameles (Riolita, riolita esferulítica, tobas riolíticas y riolacitas)	
					Ignimbrita Xáltipan	
					Formaci3n Teziutlán (Andesitas, andesitas basálticas y basaltos)	
			MIOCENO	Superior	10	Andesitas Asesecá
				Medio		Formaci3n Cruz Blanca (conglomerado, arenas y arcillas)
				Inferior	25	
		OLIGOCENO		40	Rocas ígneas intrusivas (microgranito, sienita, aplita y granodiorita)	
		EOCENO		60		
		MESOZOICO	CRETACICO	SUP.	82	Formaci3n Méndez
				INF.	110	Formaci3n San Felipe
JURASICO	SUP.		135	Formaci3n Agua Nueva		
	Medio		166	Formaci3n Tamaulipas Superior		
	INF.		181	Formaci3n Tamaulipas Inferior		
TRIASICO	SUP.		Formaci3n Pimienta			
	Medio		Formaci3n Taman			
PALEOZOICO	TRIASICO	SUP.		Formaci3n Cahuascalas		
		INF.		Formaci3n Huayacocotla		
			220	Rocas ígneas intrusivas y metam3rficas (granito, granodiorita y esquistos)		
			330	MACIZO DE TEZIUTLAN		

Columna 2

Figura 2.5 Columnas estratigráficas para Zacapoaxtla –Columna 1- (Borja-Baeza, 2003 compilada con base en Yáñez y García, 1982 y López-Ramos, 1982) y Teziutlán -columna 2- (Yáñez y García, 1982) que pertenecen a la regi3n.

Particularmente, la cartografía morfogenética tiene por objeto la representación de las formas del relieve de la superficie terrestre en relación con la historia de su desarrollo. Los mapas morfogenéticos tienen numerosas aplicaciones, siendo una de las más importantes la elaboración de mapas de peligro por procesos exógenos, incluidos los de remoción en masa (Lugo-Hubp, 1989; 1991). Flores-Lorenzo (2002), Borja-Baeza (2003) y Marcos-López (2003) han elaborado mapas morfogenéticos de una parte o de la totalidad de la carta topográfica Teziutlán, donde se asienta la mayor parte del municipio de Tlatlauquitepec y la localidad de la Unión. Estos autores describen que en esta zona de la Sierra Norte de Puebla destacan tres tipos de relieve: endógeno, estructural denudativo y exógeno erosivo (figura 2.6).

El relieve endógeno tiene influencia determinante de la actividad cuaternaria de la caldera de Los Humeros, tanto efusiva como explosiva. Los materiales volcánicos emitidos se asientan sobre un relieve preexistente, de origen sedimentario, mismo que condiciona la distribución de los flujos piroclásticos, derrames andesíticos, caída de cenizas y otros materiales ígneos extrusivos, con lo que se crearon nuevas formas superficiales. En este relieve destacan las rampas piroclásticas y los depósitos de flujos piroclásticos, junto con los derrames andesíticos y basálticos. Estos materiales cubren casi en su totalidad la región sur y una porción importante del oriente de la carta topográfica.

El relieve estructural denudativo, que abarca una considerable porción de la carta Teziutlán está constituido por complejos montañosos de rocas calizas, con presencia de lutitas y areniscas, materiales del Jurásico y del Cretácico, con notables pliegues con disección variable, mayor en el norte y poniente, por la influencia del río Apulco y sus afluentes y menor en el sureste. Estos complejos se encuentran alineados de sureste a noroeste, principalmente en el poniente de la carta topográfica. Tales elevaciones se ven modificadas por agentes erosivos, mismos que modelan sus laderas. Su configuración se remite posterior a la trasgresión marina, primero por distensión y después por una secuencia de pliegues. Asimismo, se encuentran algunas elevaciones aisladas de materiales sedimentarios y de rocas ígneas intrusivas.

Por último, el relieve exógeno erosivo está representado básicamente por valles intermontanos y valles erosivos, definidos por las corrientes fluviales, principalmente el río Apulco y el río Atexcaco, ya sea por la erosión remontante en laderas de rocas sedimentarias o por el acarreo de material volcánico reciente poco consolidado, formando en algunos casos depósitos aluviales.

La localidad de La Unión se encuentra en laderas montañosas de areniscas y limonitas correspondientes al Jurásico Medio (López-Ramos, 1982). Este tipo de relieve predomina entre los ríos Apulco y Atexcaco, en la región norte de la carta Teziutlán, representando una de las zonas más altas, además de caracterizarse por una alta densidad de disección. Esta morfología se encuentra discordante con rocas de origen volcánico del Plioceno y de la rampa de ignimbritas, que domina el territorio al sur (figura 2.6).

Otros trabajos, además de los descritos previamente, que presentan análisis de la geomorfología de la carta Teziutlán son los de Ochoa-Tejeda (2004) para la región cercana a la presa La Soledad y norte de Tlatlauquitepec y Hernández-Madrigal (2005). Este último realizó un estudio de los factores detonantes de los procesos de remoción en masa en la región de Zacapoaxtla, con énfasis en la geología regional.

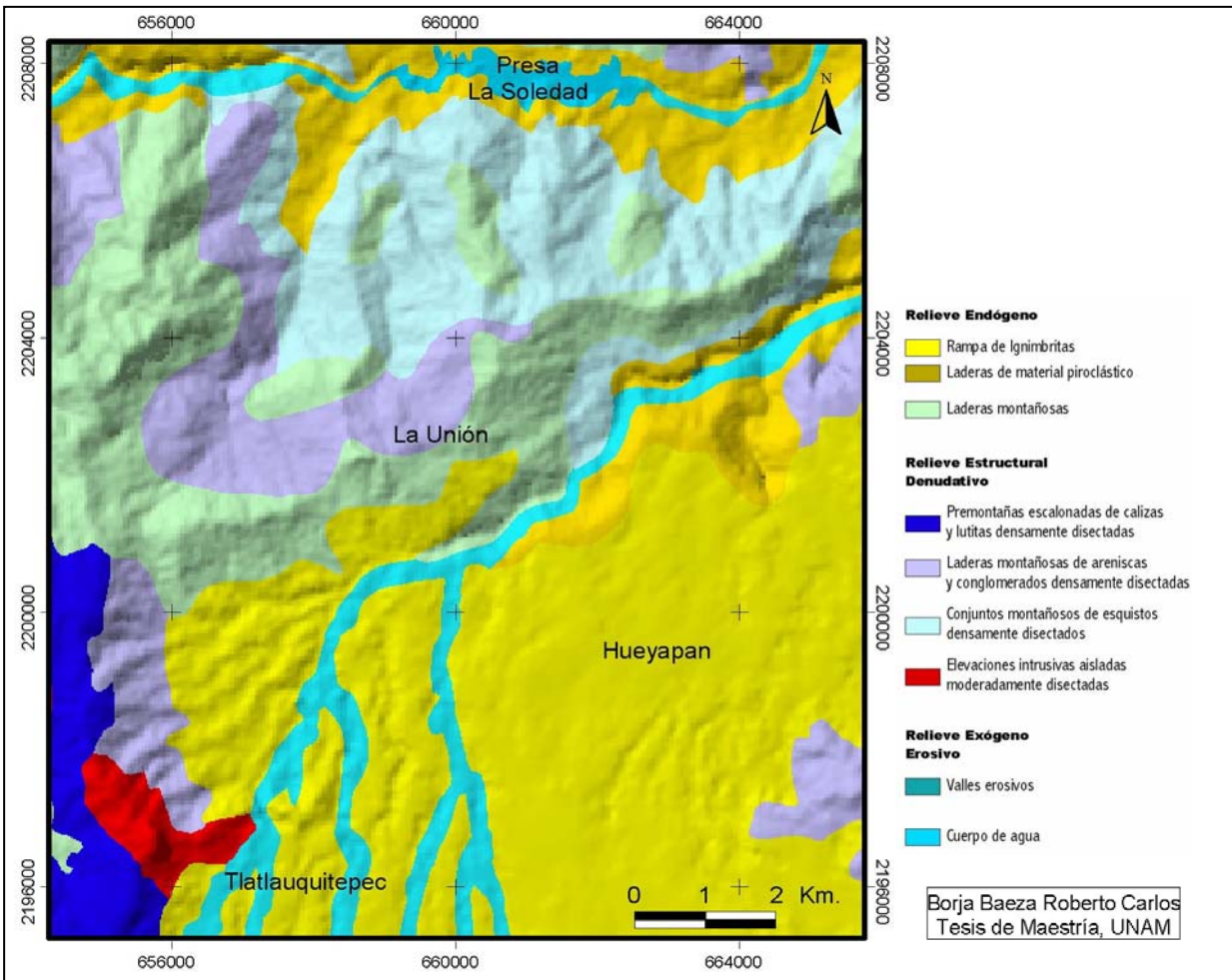


Figura 2.6 Mapa morfogénético del área localizada entre la cabecera municipal de Tlatlauquitepec y la presa La Soledad (Adaptado de Marcos-López, 2003).



Figura 2.7 Elevaciones de origen sedimentario de alta resistencia a los agentes erosivos del municipio de Tlatlauquitepec. La imagen izquierda muestra el Cerro el Cabezón, distintivo del municipio, a la distancia sobresaliendo a materiales volcánicos (ignimbrita); en la fotografía derecha se aprecia una mayor disección por la actividad fluvial en las elevaciones de calizas, cerca de la localidad de La Unión.

2.4 Régimen de precipitación

El clima de la Sierra Norte de Puebla está ligado directamente a la fisiografía, lo que tiene por consecuencia la existencia de dos grandes zonas climáticas: una húmeda que corresponde a la vertiente del golfo, por la acción directa de la humedad proveniente del Atlántico con clima subtropical húmedo, con rango de altitud de los 200 a los 1200msnm y temperatura media de 24°C; la otra zona bien diferenciada es una región semiseca que se ubica en la vertiente interior, con algunas franjas áridas, temperatura de 14°C y presencia de heladas (Galván, *et al.*, 1999). Entre ambas zonas se presenta una franja de transición de sur a norte. La existencia de microclimas es frecuente en la Sierra Norte, como efecto del relieve y la presencia de cambios altitudinales entre las cimas montañosas, cañadas y barrancos y las mesetas. De acuerdo con Vidal-Zepeda (2005) en esta región existe una oscilación de las temperaturas medias mensuales extrema que va desde 7° C hasta 14° C en oscilaciones extremas.

La distribución de los climas en el municipio de Tlatlauquitepec también está condicionada por los cambios altitudinales; en el sur existen climas de tipo templado subhúmedo con lluvias en verano y humedad media [C(w1)], en el centro se encuentra un clima templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad mayor [C(w2)]; en la zona norte, donde se ubica la localidad de la Unión y que es la que presenta los cambios altitudinales más marcados, llegándose a alcanzar altitudes de hasta 2000 msnm, se encuentran climas templado húmedos con abundantes lluvias en verano [C(m)], templado húmedo con lluvias todo el año [C(f)] y semicálido húmedo con lluvias todo el año [Acf] (INEGI, 1999).

La mayor parte de la Sierra Norte se asienta en tres cuencas principales, destacando la del río Tecolutla, junto con las cuencas de los ríos Cazones y Tuxpan. De los ríos que destacan en la Sierra por su caudal, longitud e importancia regional se encuentran el Necaxa, San Marcos, Jaloapan y Apulco (Galván, *et al.*, 1999), este último de gran influencia local en el municipio de Tlatlauquitepec y próximo a la localidad de La Unión.

La carta de precipitación media anual del Atlas Nacional del Instituto de Geografía muestra que la precipitación media anual de la región oscila entre 2000 y 2500 mm anuales, mientras que en la carta de precipitación histórica de la Comisión Nacional del Agua la precipitación media anual se calcula en 2000 mm.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua la localidad de La Unión, se ubica dentro de la región hidrológico-administrativa X Golfo Centro, que es una de las regiones con los mayores índices de precipitación, principalmente durante los meses de junio a octubre. La precipitación pluvial en la región tiene una media anual de 1 549 mm, variando desde menos de 500 mm en la porción occidental, en las zonas de Perote y Tehuacán, hasta más de 4 000 mm en sitios cercanos a Tuxtepec (Oaxaca), Cuetzalan (Puebla) y Catemaco (Veracruz) (CNA, 2001). En la región se distingue con claridad la temporada seca, que abarca desde noviembre al mes de abril, mientras que la temporada húmeda se presenta en los meses de mayo a octubre.

Otra regionalización donde se considera la precipitación de esta zona de la Sierra Norte, basada en aspectos climáticos, es la propuesta por Vidal-Zepeda (2005) quien considera una parte del norte y este de Puebla dentro de la región climática 7 Golfo de México; la autora menciona que la región se ve influenciada por los vientos Alisios con una dirección general de noreste a suroeste, transportando humedad del Golfo, la cual asciende sobre las laderas montañosas de la Sierra Madre Oriental y por procesos adiabáticos precipita

en forma de lluvia, misma que incrementa notablemente su volumen por las perturbaciones ciclónicas, particularmente durante los meses de septiembre y octubre. Vidal-Zepeda estima la precipitación de la región entre las sierras de Teziutlán y Zacapoaxtla, donde se ubica el municipio de Tlatlauquitepec y la localidad de La Unión, en áreas que alcanzan los 4000 mm anuales y paulatinamente disminuye el volumen precipitado hacia el sur.

Con el objetivo de entender con mayor detalle las condiciones hidrológicas de la localidad de la Unión, comunidad donde se localiza la parcela experimental, se realizó un análisis simplificado de la cuenca del río Xucayucan, subcuenca del río Apulco. Adicionalmente, se obtienen datos de escurrimiento superficial y de infiltración, información que no se tiene registrada y que fue necesario estimar con base en información cartográfica.

La cuenca Xucayucan se encuentra dentro de la región hidrológica Tuxpan-Nautla, en la cuenca del río Tecolutla y subcuenca del río Apulco (INEGI, 1999). Algunos de los ríos afluentes del Xucayucan son el Ateameza, Xochihuatzaloyan, Atemochicha, Acongo, Balastreta, Tochimpa, Acojotzingo, Camalco y Santiago y tienen como característica su orientación de sur a norte. La cuenca del río Xucayucan, que cubre gran parte del municipio de Tlatlauquitepec, tiene una forma peraltada, con su porción más ancha hacia el sur y desembocadura al noreste, cuyo cauce principal es afluente del río Apulco, el de mayor influencia en la Sierra Norte de Puebla. Tiene una longitud de poco más de 23 km y una anchura máxima de 12.5 km, lo que da como resultado un área aproximada de 204.324 km² y un perímetro de 71.27 km.

La Sierra Norte de Puebla se caracteriza por ser una de las zonas más lluviosas del país. Históricamente ha sido afectada por precipitaciones extraordinarias, tal es el caso de las lluvias de septiembre de 1954 que se presentaron como consecuencia de una depresión tropical; en 1955 por el ciclón Hilda; en 1967 por el huracán Beulah; en 1974 el huracán Fifi; en 1990 las causadas por el huracán Diana; el huracán Gert en 1993 y la depresión tropical número 11 en 1999 (Bitrán, 2000).

Los principales problemas en la región relacionados con el uso del agua son (CNA, 2001):

- bajas coberturas de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
- contaminación de las corrientes superficiales: este problema se presenta de manera generalizada en la región, debido a las descargas de aguas municipales e industriales sin tratamiento.
- infraestructura hidroagrícola desaprovechada: se relacionan con el uso ineficiente del agua, provocado por el mal estado de la infraestructura de distribución y drenaje, así como con prácticas inadecuadas de riego y baja eficiencia de los equipos de bombeo.
- daños por inundaciones: las abundantes precipitaciones concentradas en una parte del año, de junio a octubre, así como la insuficiencia de infraestructura de protección y control de avenidas, ocasionan severos daños por inundaciones en la totalidad de su territorio; la invasión de cauces por asentamientos humanos irregulares es otro factor adverso importante.

Puesto que una gran parte del área de la cuenca está cubierta por materiales volcánicos, principalmente ignimbritas, aunado a un clima húmedo en gran parte de la región, los suelos que cubren más del 80% de la cuenca son Andosoles órticos, y el resto Regosol

éutrico y Regosol éutrico en combinación con Andosol húmico, en la zona sur, por la influencia de depósitos aluviales cuaternarios.

Las zonas cubiertas por bosques de pino, combinadas con encino, ocupa una parte considerable de la cuenca, especialmente en la zona sur, mientras que en la región norte, el bosque de pino-encino ocupa las zonas adyacentes al cauce principal y cubre las montañas de rocas calizas. Las partes más altas de la cuenca, en el sureste, están cubiertas por bosque de pino, en suelos de materiales volcánicos cuaternarios y en algunos de origen fluvial, aunque con una baja densidad de cauces, resultado de pendientes menores a 8° y escurrimiento inferior al 5% en la mayor parte.

Las zonas de pastizales inducidos son heterogéneas; están al norte del río Xucayucan, en materiales sedimentarios, con alto porcentaje de escurrimiento en el piedemonte, mientras que otra parte se asienta en el oriente de la cuenca, en materiales volcánicos de baja pendiente y con menor índice de escurrimiento. Lo anterior demuestra que este tipo de vegetación tiene una marcada influencia antrópica.

El bosque mesófilo ocupa porciones menores al norte de la cuenca, en materiales metamórficos y sedimentarios, al pie de montañas, en algunos pequeños escalonamientos de estas elevaciones.

En el mapa de aguas superficiales (figura 2.8) se observa que el escurrimiento en la mayor parte de la cuenca se encuentra en el rango que va de 10 a 20%, como resultado de la pendiente que en la zona de estas características fluviales es casi en su totalidad inferior a 12°, siendo el rango menor a 6° el que mayor superficie abarca. La litología de la región esta compuesta por materiales volcánicos que cubren, casi en su totalidad, esta área de escurrimiento; sus características favorecen la infiltración por ser tobas e ignimbritas con alta permeabilidad, de edad cuaternaria y composición arenosa.

En el sur, en materiales volcánicos y rodeando las elevaciones bajas, se presenta un escurrimiento superficial inferior al 5%, por la alta infiltración que existe en la zona y la baja pendiente. Las zonas de mayor escurrimiento están en el norte, en las montañas de rocas sedimentarias, las cuales a pesar ser calizas permeables no permiten los volúmenes de infiltración de las tobas y las ignimbritas del sur y centro de la cuenca. Adicionalmente, el declive es mayor y limita el tiempo de infiltración, junto con una más abundante vegetación que incrementa la retención en las hojas y en el follaje en general.

La configuración de la red fluvial de la cuenca es dendrítica, con dirección hacia el noreste, en donde desemboca el cauce principal. La dirección es de tipo consecuente, es decir siguen la dirección de la pendiente en la mayoría de los casos, lo cual se comprueba con la sobreposición del sistema fluvial a un modelo sombreado del terreno.

De los cálculos de precipitación, escurrimiento y evapotranspiración-infiltración se realizaron estimaciones con las cuales se puede establecer que el 12.82% de la precipitación se desplaza superficialmente en forma de escurrimiento y el porcentaje restante (87.18) se distribuye entre la evaporación, transpiración y el agua infiltrada.

La localidad de La Unión se ubica entre las isoyetas de 2000 y 2200 mm de media anual, lo que significa que en promedio el 22% de la lluvia escurre superficialmente y el 77.56% se infiltra o regresa a la atmósfera. Sin embargo al ser el volumen de precipitación mayor

en la región, también se incrementa el volumen infiltrado en relación con las zonas del sur (figura 2.8).

En la tabla 2.1 se muestran los resultados de precipitación, escurrimiento y evaporación-infiltración estimados a partir de la carta de aguas superficiales de INEGI, a escala 1:250,000 y las isoyetas calculadas para la carta Teziutlán, complementadas con las correspondientes al norte de la carta Xonacatlán, a escala 1:50 000.

Tabla 2.1 Cálculo del escurrimiento en la subcuenca del río Xucayucan.

Región entre las isoyetas	Área	Precipitación total	Escurrimiento	Evapotranspiración-Infiltración
1000 – 1200	16.210 Km ²	17.831 x10 ⁶ m ³	2.674 x10 ⁶ m ³	15.156 x10 ⁶ m ³
1200 - 1400	65.558 Km ²	85.225 x10 ⁶ m ³	9.750 x10 ⁶ m ³	75.475 x10 ⁶ m ³
1400 – 1600	81.230 Km ²	121.845 x10 ⁶ m ³	11.094 x10 ⁶ m ³	110.750 x10 ⁶ m ³
1600 – 1800	14.251 Km ²	24.226 x10 ⁶ m ³	4.091 x10 ⁶ m ³	20.135 x10 ⁶ m ³
1800 - 2000	9.687 Km ²	18.405 x10 ⁶ m ³	3.206 x10 ⁶ m ³	15.198 x10 ⁶ m ³
2000 - 2200	17.388 Km ²	36.514 x10 ⁶ m ³	8.194 x10 ⁶ m ³	28.319 x10 ⁶ m ³
Total Cuenca	204.324 Km ²	304.046 x10 ⁶ m ³	39.009 x10 ⁶ m ³	265.037 x10 ⁶ m ³

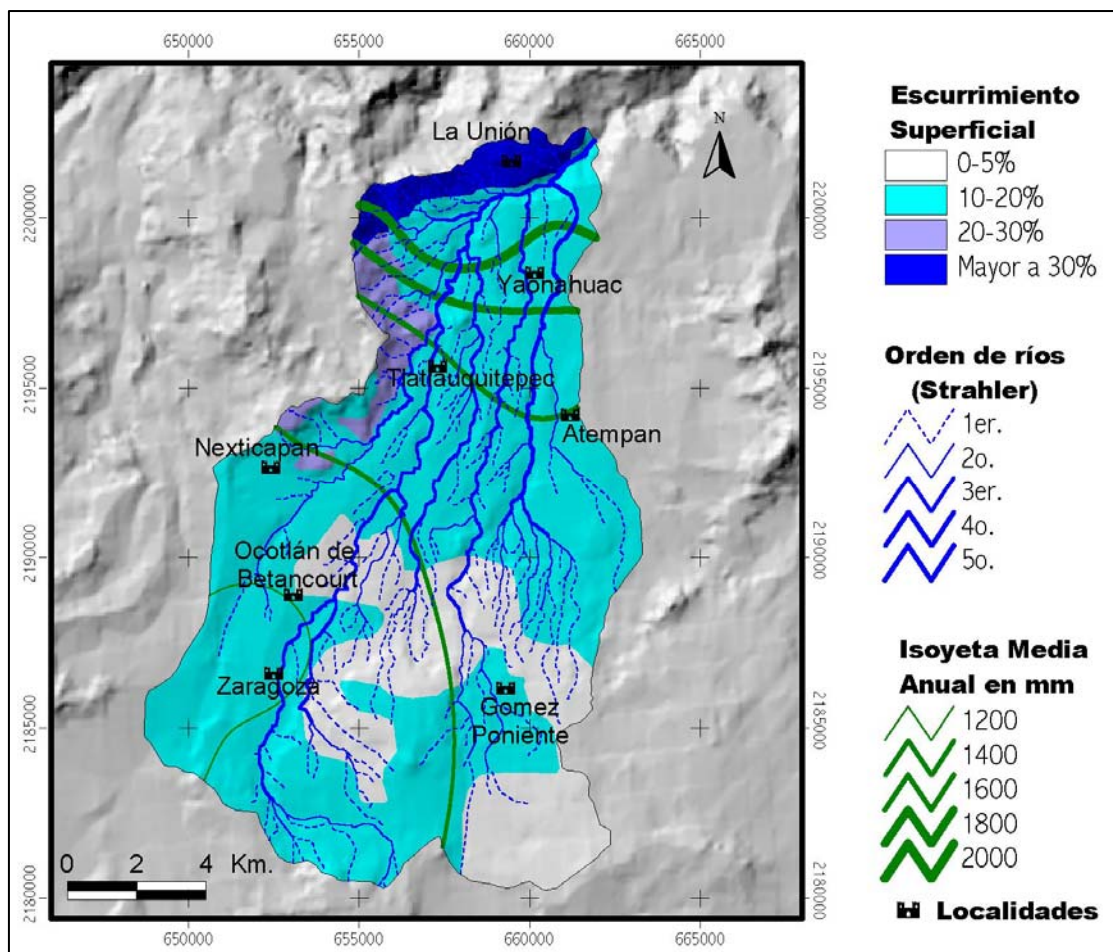


Figura 2.8 Escurrimiento superficial, orden de ríos e isoyetas de la cuenca del río Xucayucan.

Con la información de precipitación de 17 estaciones meteorológicas (tabla 2.2) cercanas a la localidad de La Unión, se elaboró de manera esquemática el escurrimiento superficial (figura 2.8). A partir del programa ERIC II (Extractor Rápido de Información Climática) se obtuvieron los datos de precipitación histórica y se calcularon las medias anuales para cada estación. Posteriormente, se interpolaron los datos de precipitación media anual de dichas estaciones y se muestran los resultados para el área de la carta Teziutlán. Esto se realizó para solventar la falta de información referente, por lo que los resultados son aproximaciones para establecer tendencias, pero es necesario realizar estas mediciones en campo para tener una mayor certidumbre en los datos. En esta imagen se puede apreciar con claridad el incremento de la precipitación con una orientación suroeste-noreste desde la región de planicie del norte de la cuenca de Libres, con medias de 1000 mm cerca de Zaragoza, hacia las sierras de mayor altura de la SNP, incrementándose notablemente en las cercanías de Hueyapan, donde supera los 3000 mm anuales. Para el caso de la localidad de La Unión, de acuerdo con la interpolación, la media anual corresponde con 1900 mm aproximadamente (figura 2.9).

Como se menciona en el párrafo anterior, la precipitación media anual en la localidad de La Unión es de alrededor de 1900 mm, y las estaciones meteorológicas cercanas a esta comunidad confirman lo anterior, lo cual se puede observar en la figura 2.10, misma que muestra la precipitación histórica de las estaciones 21104 (Zacapoaxtla, este), 21098 (Tlatlauquitepec, sur), 21055 (La Pagoda, oeste) y 21043 (Huahuaxtla, norte). En dicha gráfica se puede observar años en que las lluvias intensas se presentan de forma cíclica desde finales de los 70s y hasta cerca de 1990, eventos que son resultados de fenómenos meteorológicos de gran intensidad, en específico huracanes y tormentas tropicales. Asimismo, se puede ver en la gráfica la presencia de diversos eventos meteorológicos de gran magnitud, que sin duda y considerando el impacto de las precipitaciones en 1999, pudieron ocasionar numerosos procesos de ladera y otros fenómenos naturales, por ejemplo inundaciones.

Tabla 2.2 Estaciones meteorológicas empleadas para determinar las isoyetas de la carta Teziutlán y las condiciones pluviales históricas en la localidad de La Unión.

Estación	Clave	Longitud (UTM-14)	Latitud (UTM-14)	Media anual	Periodo	Altitud (msnm)
Huahuaxtla	21043	646551	2202880	1902	1954-1989	1625
Ayotoxco	21014	647673	2196283	2191	1965-1980	320
La Pagoda	21055	655476	2195250	2766	1962-1990	2235
San Juan Acateno	21074	671029	2208521	2255	1957-1990	1656
Teziutlán (CFE)	21090	672994	2191715	1334	1964-1978	2050
Teziutlán (SMN)	21091	671759	2191821	1313	1962-1995	1990
Zacapoaxtla	21103	650172	2197097	1370	1945-1990	2045
Zacapoaxtla	21104	650438	2196825	1118	1962-1990	2045
Zapotitlán de Méndez	21108	637452	2210016	1915	1962-1985	590
Zautla	21111	639641	2182979	606	1955-1990	1940
Atexcaco	21011	676512	2212212	3786	1965-1980	900
Tlatlauquitepec	21098	657021	2212298	1445	1954-1990	2025
Tetlilla	21144	665765	2202988	3662	1976-1985	900
Campo Exp. (Teziutlán)	21162	675091	2191946	2961	1979-1990	1600
Venustiano Carranza	21142	675228	2210031	1442	1975-1985	1200
Capuluaque	21021	651921	2187815	1033	1954-1990	2200
Ayotoxco	21215	667496	2212435	1257	1985-1990	366

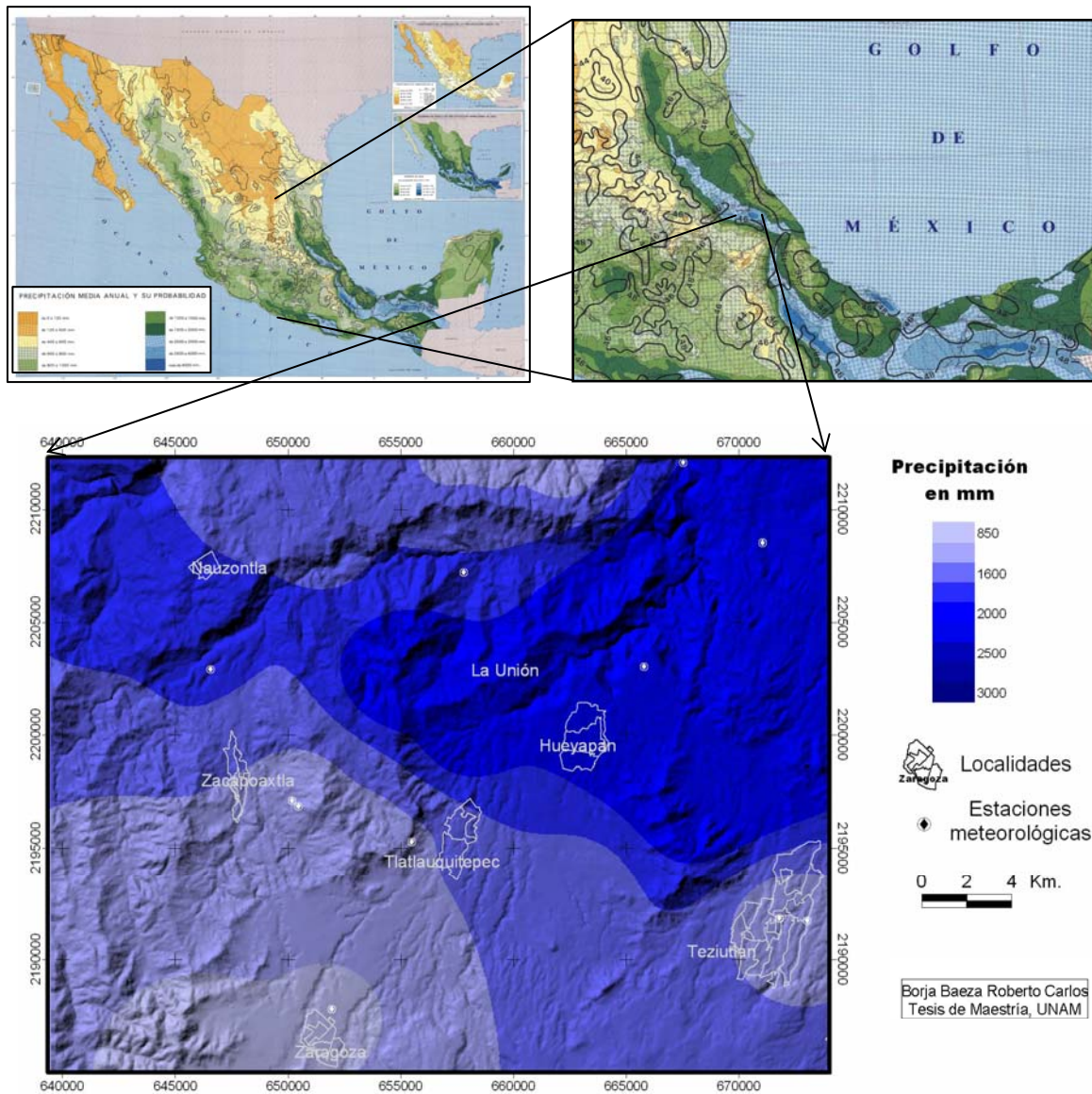


Figura 2.9 Precipitación media anual de la carta Teziutlán y su ubicación en las regiones de precipitación media anual en México (Fuente imágenes superiores: Atlas Nacional de México, 1990).

En la gráfica de la figura 2.11 se aprecia que las variaciones en la precipitación regional presentan contrastes anuales desde mediados de los setenta hasta la actualidad. Sin embargo, a pesar de estas variaciones, la tendencia es a mantener el mismo volumen de precipitación y su distribución espacial, pues en las estaciones al sur la precipitación media anual es notablemente menor a la de la estación del norte, cuyos niveles de lluvia están marcadamente por encima del volumen registrado en las otras estaciones.

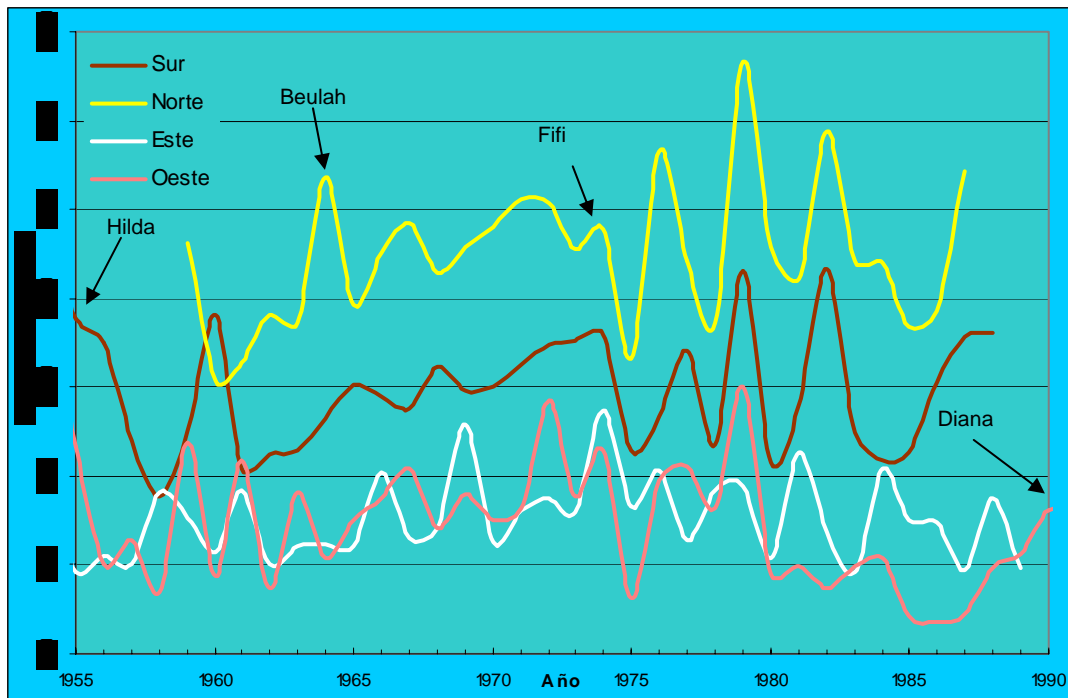


Figura 2.10 Precipitación histórica de las estaciones meteorológicas cercanas a la localidad de La Unión.

La figura 2.11 denota la gráfica de precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas descritas previamente, en un rango de 30 años en promedio. En la imagen es posible advertir con claridad la temporada seca y la temporada de lluvias en la región. La primera se extiende de diciembre a mayo, donde comienza un notable incremento de la lluvia registrada que disminuye muy ligeramente hasta septiembre, mes en que alcanza su punto máximo y que históricamente es uno de los meses en que se presentan las mayores precipitaciones en el país. Aún más, la gráfica de las estaciones cercanas a La Unión es similar en la tendencia de la distribución de la precipitación a lo largo del año en la República Mexicana (figura 2.12).

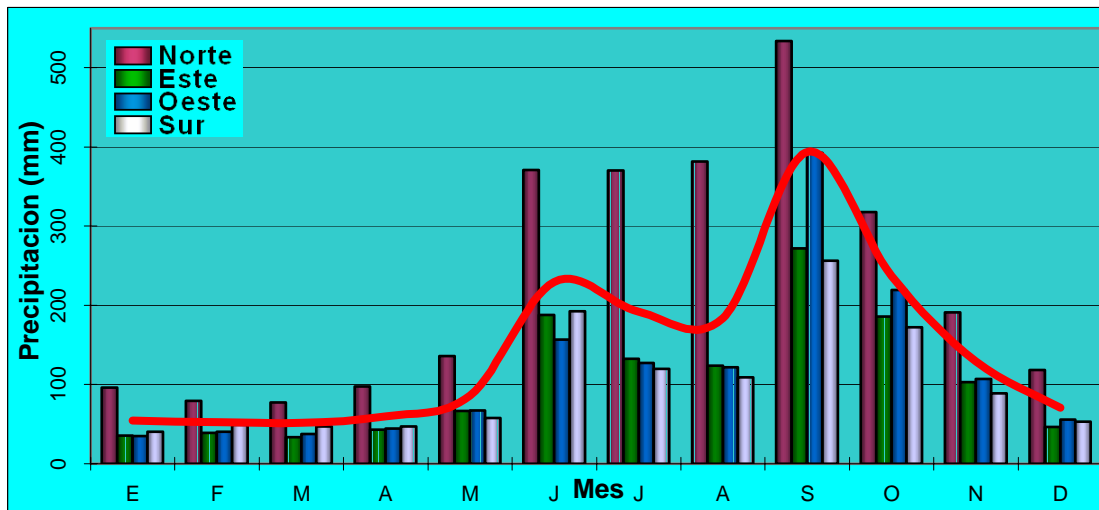


Figura 2.11 Precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas cercanas a la localidad de La Unión (período aproximado 30 años).

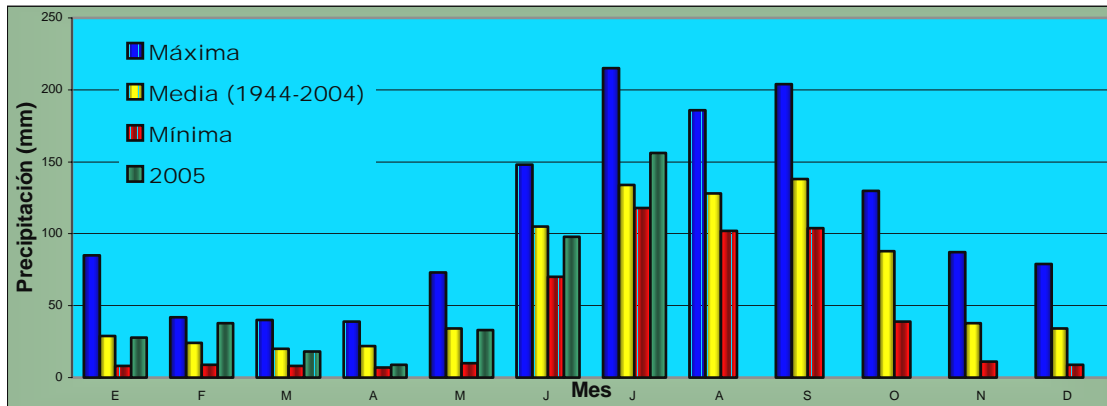


Figura 2.12 Precipitación media, máxima y mínima de la República Mexicana en el período 1941-2004 (Modificado de cna.gob.mx)

Como complemento de gran valor para obtener datos meteorológicos de La Unión, se instaló a 20 metros la parcela experimental una Estación Meteorológica *Vantage Pro Davis* (figura 2.13) en noviembre del 2004, parte esencial del proyecto PAPIIT IN310002 “Efectos espacio-temporales de la deforestación en la inestabilidad de laderas: un enfoque de prevención de desastres” misma que proporciona información de precipitación, humedad atmosférica, temperatura, características del viento (dirección, velocidad), presión atmosférica y humedad del suelo.

En la estación meteorológica instalada, se registró una precipitación acumulada anual durante el período noviembre 2004 a octubre 2005 de 1780.52mm, cifra que es muy cercana a la media anual estimada con información de estaciones meteorológicas próximas a la localidad. No se pretende establecer este dato como la media anual de la localidad, puesto que la información sólo corresponde a un año y es un período muy corto de tiempo, pero al ser información actualizada y de gran precisión, pues se tiene información meteorológica horaria, se considera como un argumento para corroborar las estimaciones del régimen pluvial local a través de información histórica de otras estaciones meteorológicas.



Figura 2.13 Estación Meteorológica *Vantage Pro Davis* instalada en la parcela experimental.

En la gráfica de información de precipitación y temperatura de la localidad de La Unión (figura 2.14) se puede observar la existencia de dos periodos de precipitación durante el año, una temporada seca que va de noviembre a abril y una temporada húmeda de mayo a octubre, con énfasis en la parte final de septiembre y la primera mitad de octubre, lo cual queda expresado con las precipitaciones intensas del 4 al 6 de octubre de 1999 y los eventos del año 2005 con lluvias fuertes durante los primeros días del mes de octubre, particularmente el 4 y 14, eventos relacionados con la histórica temporada de huracanes en México.

La gráfica de temperatura de La Unión permite observar que existen notables variaciones de temperatura, así del periodo de mayo del 2004 a octubre del 2005 la diferencia entre la temperatura mínima registrada (1.8°C, 02 febrero 2005) y la máxima (31.2°C, 30 abril 2005) es de 29.4°C. Sin embargo, sólo 15 de 519 días con registros presentaron temperaturas inferiores de 5°C y únicamente 7 días superaron los 30°C, lo que disminuye la variación térmica a 25°C en promedio durante el año. Asimismo, en la gráfica se puede observar que en La Unión la temporada de temperaturas más bajas es durante los meses de noviembre a febrero, este último mes punto inicial del ascenso de la temperatura hasta alcanzar su punto máximo durante el año en el mes de julio; en agosto inicia un descenso paulatino de la temperatura hasta alcanzar las mínimas temperaturas en los primeros días de enero.

Las condiciones de temperatura y humedad, en combinación con las diferencias altitudinales entre los cauces y las partes altas de las montañas tiene como consecuencia la frecuente formación de niebla de advección en La Unión, por el contacto del aire húmedo proveniente de las partes bajas de la región con el aire de las montañas, también con presencia de humedad pero más frío, niebla que se caracteriza por su alta densidad y su formación repentina (figura 2.15).

Al final del capítulo 1 se hizo mención del impacto del huracán Stan en el municipio de Tlatlauquitepec, fenómeno que también causó daños en la localidad de La Unión, donde ocurrieron numerosos procesos de ladera, que afectaron los caminos que les comunican con otras localidades y la cabecera municipal (figura 2.16). Particularmente, durante la noche del día 4 de octubre del 2006, ocurrió un proceso de remoción en masa en la parcela en estudio, la cual se había considerado como inestable después de diversos análisis de las propiedades físicas del terreno y la modelación de la ladera, mismos que se detallan en el capítulo 4.

La figura 2.17 corresponde a la precipitación horaria del día 2 al 8 de octubre, así como la acumulada en este período. En dicha gráfica es posible observar el notable incremento en la precipitación los días 4 y 5 de octubre, mismos en los que ocurrieron la mayoría de los procesos de acuerdo con habitantes de la localidad, particularmente la noche del 5, que es cuando se alcanza un incremento notable en la precipitación acumulada y, por lo tanto, un alto grado de saturación del suelo.

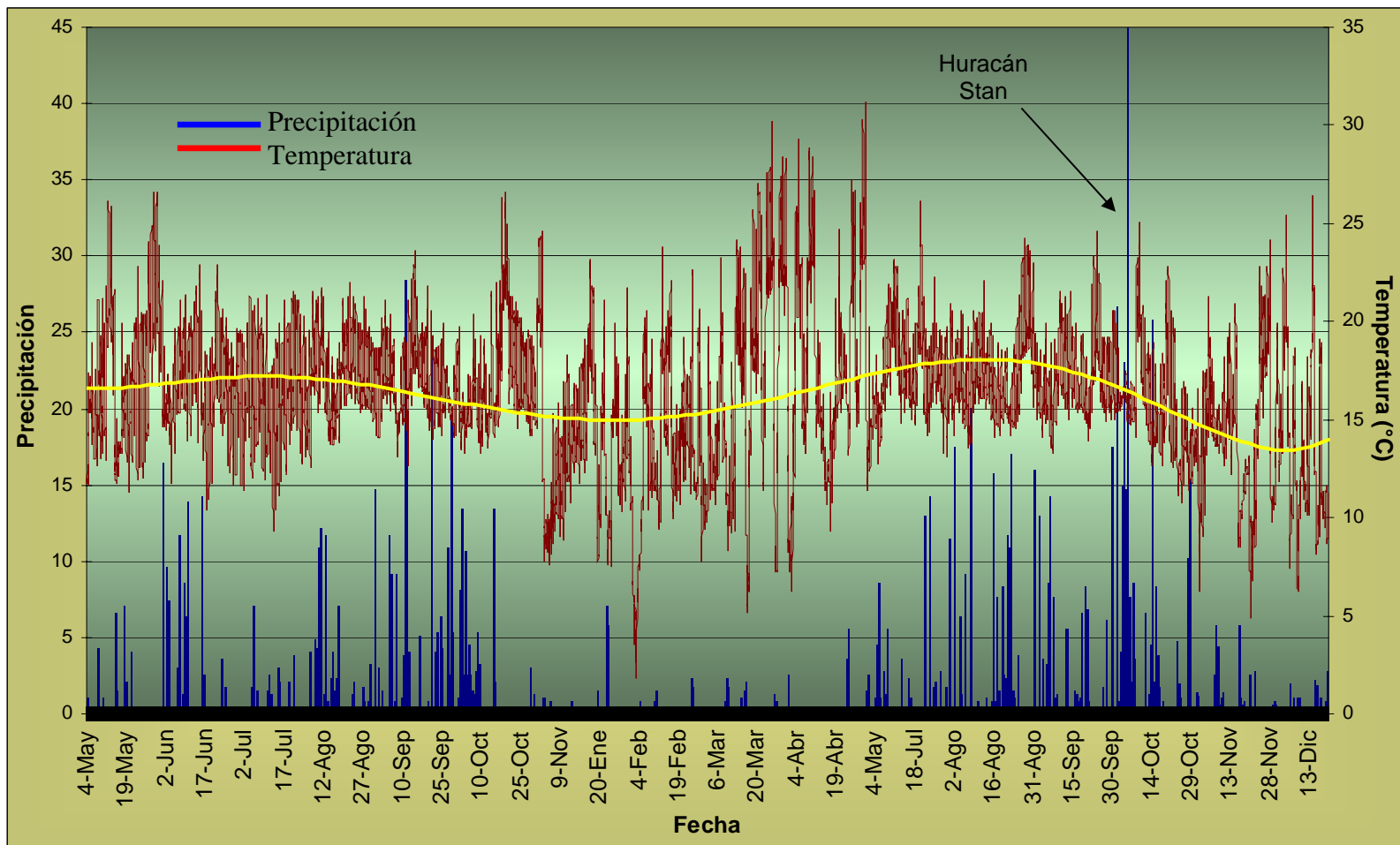


Figura 2.14 Gráfica de precipitación y temperatura horaria de la localidad de La Unión (período mayo 2004 - diciembre 2005)



Figura 2.15 La presencia de niebla en La Unión es frecuente.



Figura 2.16 Daños en el municipio de Tlatlauquitepec por el huracán Stan, cerca de la localidad de La Unión (Fotos a, b y c, cortesía Presidencia municipal; foto d, autor).

Durante el período de precipitación ocasionado por el huracán Stan se registró una precipitación acumulada de 666 mm en 7 días. En este breve período de tiempo la lluvia total representó el 35% de la media anual calculada en 1900 mm. De esta forma, se puede concluir que el factor detonante de este proceso, y muy probablemente de la mayoría de los ocurridos, fue la precipitación, en conjunto con los diversos factores que se han mencionado a lo largo del trabajo.

Los procesos de remoción en masa son comunes durante el año en toda la región. Sin embargo, en la temporada de lluvias se incrementa considerablemente la ocurrencia de éstos, principalmente en áreas donde existe cambio de uso del suelo, debido principalmente a la deforestación. Los estudios hidrológicos desarrollados hasta el momento son mínimos para esta región, a pesar de la importancia que tiene su análisis en la determinación de la inestabilidad de laderas y en la prevención de tales procesos, por lo

que fue necesario determinar estos parámetros, para lograr elaborar una modelación de la relación deforestación inestabilidad en la zona.

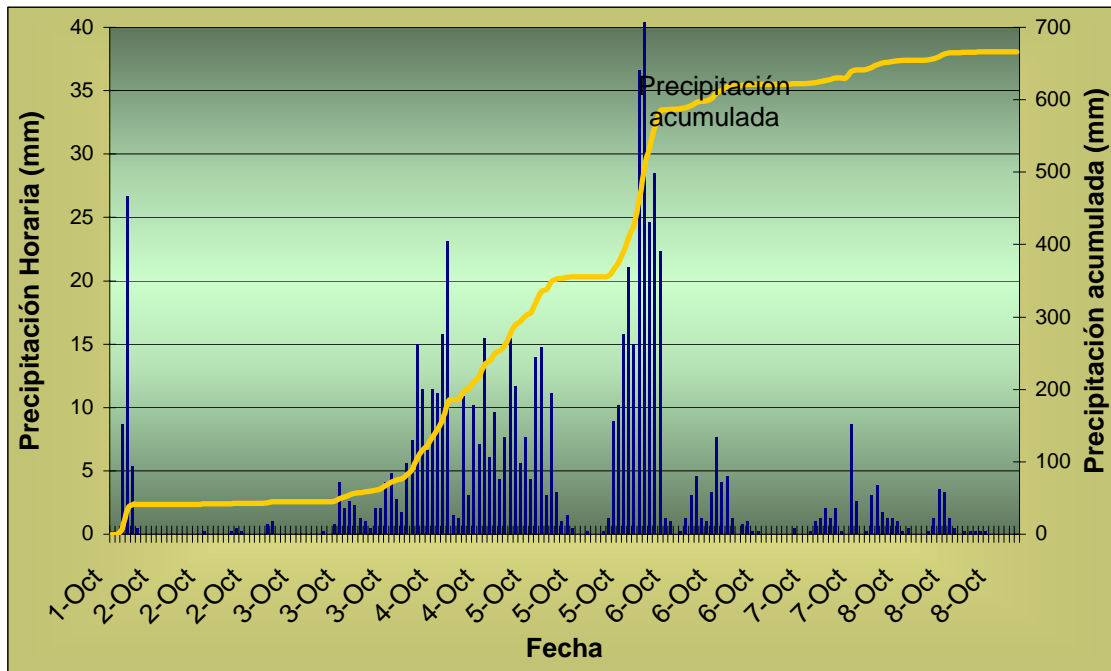


Figura 2.17 Precipitación horaria y acumulada durante la presencia del huracán Stan en la localidad de La Unión.

Ciertos factores pueden ser considerados como desencadenantes de procesos de remoción en masa, por ejemplo, lluvias intensas durante un período corto de tiempo, o bien lluvias extraordinarias, como sucedió en octubre de 1999 en la Sierra Norte de Puebla, por lo que es importante para la estimación y comprensión de la inestabilidad, realizar análisis de la precipitación de las zonas de interés. El régimen pluvial tiene una notable importancia en los estudios de inestabilidad, independientemente del objetivo primario del trabajo, tal y como se ha detallado en el capítulo uno.

2.5 Vegetación

La cubierta forestal de la Sierra Norte de Puebla había tenido un papel regulador en la erosión de los materiales de la región, pero a partir de la década de los 40s esta situación cambio cuando se incrementó el número de asentamientos humanos en las partes medias y altas de las montañas, población que ante sus necesidades de comunicación y hábitat modificaron el entorno, construyendo viviendas, carreteras y modificando el terreno con las actividades agrícolas y ganaderas. Este cambio del uso del suelo ocasionó una deforestación intensa, que continua hasta el momento, además de las modificaciones en la hidrología y la fauna regionales, junto con la consecuente aceleración de la actividad erosiva.

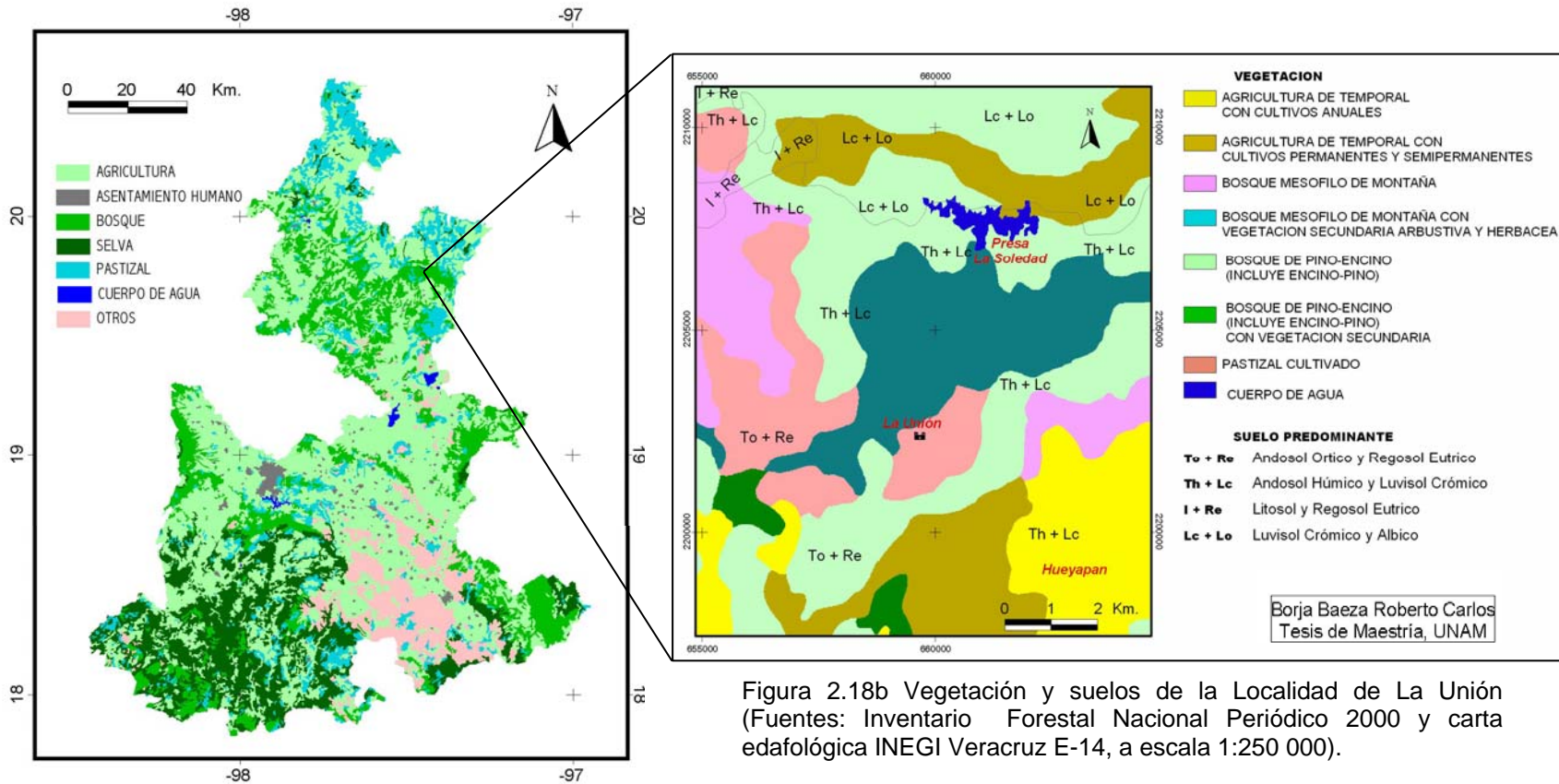
De acuerdo con el inventario forestal 2000 (figura 2.18b), la localidad de La Unión está asentada en la región de pastizales cultivados, y al norte, se presentan bosque mesófilo de montaña con vegetación arbustiva y herbácea, y al sur, bosque de pino encino. Una importante parte del bosque ha sido sustituida para la actividad agrícola de temporal, por lo que la deforestación se ha agudizado.

Las zonas de pastizales inducidos se ubican en la localidad de La Unión y al oeste hacia San José Chachaltzin y con dirección hacia el noroeste, siguiendo el curso del río Chalchihuapan. Este tipo de vegetación se encuentra también al norte del río Xucayucan, con notable presencia de gramíneas en materiales sedimentarios, con alto porcentaje de escurrimiento en el piedemonte. Son escasas las zonas de pastizales naturales, puesto que tales áreas han sido ocupadas por construcciones o para actividades productivas primarias. El pastizal inducido ha incrementado su presencia por la disminución de los bosques o bien su defragmentación, por la agricultura y la actividad forestal, tanto legal como ilícita, lo que da por resultado una fisonomía muy variada.

La distribución de bosques se concentra en la zona central de la región de la Sierra Norte y también con presencia importante en el suroeste (Figura 2.18a). Los bosques que se localizan al norte de la localidad y hasta el descenso hacia la presa La Soledad son de tipo mesófilo de montaña con vegetación secundaria arbustiva y herbácea, mismos que alcanzan alturas de alrededor de 30m y que aún son densos en las partes altas de las montañas de rocas calizas. Sin embargo, en el piedemonte se observan manchas desprovistas de vegetación, mismas que tienden a crecer hacia las partes altas de las elevaciones. Los caminos de terracería también presentan una notable influencia por la tala de árboles para abrir caminos. Por último, es parte implícita del paisaje local observar manchas claras en las partes altas y medias de las sierras, resultado de la presencia de procesos de ladera, mismos que implican la remoción de la vegetación y cerca de la carretera hacia Atotocoyan por la influencia en el cambio de uso del suelo.

Los bosques mesófilos de montaña se localizan hacia el oeste, donde se alcanza una altitud cercana a los 2000 msnm, serranía que divide físicamente a los municipios de Zacapoaxtla y Tlatlauquitepec, destacando los cerros Cuatetzin, Los Portales y Acamalota. En esta sierra nacen numerosos cauces intermitentes, destacando el Chalchihuapan. Esta zona es de las que presentan menores índices de deforestación local, por la ausencia de localidades cercanas y el relieve montañoso, con pendientes muy inclinadas, frecuentemente superan los 30° y llegan a presentar declives superiores a los 55°.

En la región norte, el bosque de pino-encino ocupa las zonas adyacentes a la presa La Soledad y cubre las montañas de rocas calizas y sólo es dividida en las partes bajas por la agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes. Asimismo, hacia el oeste, el bosque de pino-encino pudiera ser una zona de transición entre los bosques de montaña, de no ser por la implantación de pastizales por parte de la actividad humana. En el sur se presenta la misma situación; existe una franja horizontal de pino encino limitada por áreas de agricultura, a consecuencia de la presencia de comunidades, que además tienen un mayor número de habitantes respecto al norte, por ejemplo Hueyapan y Yaonahuac.



Las áreas cubiertas por bosques de pino-encino con vegetación secundaria son pequeñas con relación a las anteriores y se encuentran hacia el suroeste de La Unión; es una zona de transición entre los bosques mesofilos de montaña y los pastizales y áreas de agricultura. De acuerdo con una comparación entre los inventarios forestales de 1994 y el año 2000, estas zonas de bosques con vegetación secundaria tienden a convertirse en pastizales inducidos.

Las zonas dedicadas a agricultura de temporal se extienden hacia el sur donde las pendientes son menores y existe una rampa de materiales volcánicos, condiciones que son favorables respecto al norte, con materiales sedimentarios y relieve montañoso. Las zonas agrícolas están ubicadas principalmente en áreas de menos de 6°, aunque en algunas zonas superan los 25°, principalmente en las laderas y en las partes altas de las montañas en la región suroeste, cerca de Tlatlauquitepec. Aunado a esto existe una influencia de la población de Nexticapan, como centros de vivienda, proveedores y consumidores. El cauce del río Xucayucan está ocupado por la agricultura de temporal a consecuencia del acceso a estas fuentes de agua. Del mismo modo, los asentamientos humanos están rodeados por zonas agrícolas.

Los suelos que predominan en la Sierra Norte de Puebla son Vertisoles, Regosoles, Andosoles y Luvisoles, por mencionar los de mayor presencia en la región. La parte de la Sierra Norte correspondiente al Sistema Volcánico Transversal se caracteriza por tener suelos someros con texturas de medias a gruesas y bajo contenido de materia orgánica; el área correspondiente a la Sierra Madre Oriental presenta suelos de medios a profundos del tipo Cambisol preferentemente, asociados con Regosoles (Galván *et al.*, 1999).

En la periferia de la localidad de La Unión predominan los suelos Andosoles de textura media como consecuencia de la presencia de materiales volcánicos, particularmente piroclastos, y el clima húmedo que predomina en la región. Este tipo de suelos se encuentra en combinación con Regosoles y Luvisoles y es característico del Sistema Volcánico Transversal y de ciertas porciones de la Sierra Madre Oriental.

Los suelos de tipo Luvisol también se desarrollan en la Sierra Norte y en el caso de La Unión, se presentan al norte de la presa La Soledad como resultado de la presencia de arcillas sedimentarias, principalmente de limolitas y areniscas, y del régimen pluvial local que supera los 1500 mm anuales. Estos suelos poseen una textura media, pero su particularidad es la fertilidad, por lo que en esta región se presenta la agricultura como actividad económica.

En el caso de los Litosoles, éstos se encuentran en las cercanías de La Unión, concretamente en una relativamente pequeña área al noroeste. Estos suelos son característicos de montañas y se desarrollan sobre rocas compactas.

Por último, los Regosoles de esta región, se encuentran asociados a los Andosoles y a los Litosoles. Formados por la actividad fluvial de los cauces locales, principalmente provenientes de las montañas calizas del oeste de la comunidad de La Unión, que transportan y depositan materiales de las partes altas de la montaña hacia las regiones de menor altura, donde se intercalan con los suelos formados localmente.

De acuerdo con Esteban-Chávez (2003) el mayor porcentaje de procesos de remoción en masa ocurridos por las intensas precipitaciones de 1999 en la Sierra Norte se presentaron en suelos de tipo Andosol, seguidos por los suelos Litosoles y en menor proporción

Luvisoles. En el caso de los suelos volcánicos, la baja consolidación de los materiales fue determinante esta distribución de procesos.

Bibliografía

- Aguayo-Camargo, J. E. (2005). Neotectónica y facies sedimentarias cuaternarias en el suroeste del Golfo de México, dentro del marco tectono-estratigráfico regional evolutivo del sur de México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, Vol VI, No. 1, UNAM, México, D. F., pp 19-46.
- Ángeles-Moreno, E. (2002). *Geología, geoquímica y geología estructural de las rocas del basamento del Macizo de Teziutlán, Estado de Puebla*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Bitrán-Bitrán, D. (2000). *Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana durante 1999*. Cuadernos de investigación Num. 50, Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, México, D. F., 210 p.
- Borja-Baeza, R. C. (2003). *Análisis de susceptibilidad y riesgos asociados a procesos de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla*. Tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, D. F., 156 p.
- Borja-Baeza, R. C. y Alcántara-Ayala, I. (2004). Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla. *Investigaciones geográficas*, No. 53, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, pp. 7-26.
- Comisión Nacional del Agua (2001). *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*. Primera edición, Comisión Nacional del Agua, México, D. F.
- Congreso Geológico Internacional, CGI (1956). *"Estratigrafía y paleontología del Jurásico inferior y medio marino de la región central de la Sierra Madre Oriental"* Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, México, D. F.
- Cuanalo-Campos, O. A. y Melgarejo-Palafox, G. (2002). Inestabilidad de laderas. Sierras norte y nororiental del estado de Puebla. *Elementos*, No. 47, pp. 51-55.
- Esteban-Chávez, O. (2003). *La deforestación como mecanismo detonador de la inestabilidad de laderas, estudio caso Sierra Norte de Puebla*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 156 p.
- Ferriz, H (1985) Zonamiento composicional y mineralógico en los productos eruptivos del centro volcánico de Los Humeros, Puebla, México. En: Verma, S.P. (ed) Special Volume on México Volcanic Belt, Part 1, Vol. 24, *Geofísica Internacional*, pp 97-157.
- Flores-Lorenzo. P. (2002). *Inestabilidad de laderas y riesgos asociados en Teziutlán, Puebla*. Tesis-de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM México. 119 p.
- Fuentes-Aguilar, L. (1972). *Regiones naturales del Estado de Puebla*. Instituto de Geografía, UNAM, 141 p.
- Galván, A., Hernández, G., Vélez, H., Gómez, E., Becerril, A. y Luna, A. (1999). *Evaluación de impacto ambiental. Informe final de actividades Sierra Norte de Puebla*. Secretaría de Agricultura y Ganadería, Banco Mundial, Universidad Autónoma Metropolitana, México, D. F.
- García-Arizaga, M. T. (1995). *Origen y evolución de un deslizamiento de tierras en Metztlán, Hidalgo*. Tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 133 p.
- Garnica-Peña, R. J. (2003). *Riesgos por inundaciones e inestabilidad de laderas en el municipio de Tecolutla, Veracruz*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, D. F., 168 p.

- Heim, A. (1940) The front ranges of the Sierra Madre Oriental, Mexico from C. Victoria to Tamazunchale, *Eclog. Geol. Helvetiae* V. 33, pp. 313-362.
- Hernández-Madriral, V. M. (2005). *Caracterización de los procesos de remoción en masa en la Región de Zacapoaxtla, Sierra Norte de Puebla, México*. Tesis de Doctorado, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, D. F., 142 p.
- INEGI (1999). *Cuadernillo Estadístico Municipal, Tlatlauquitepec*. Estado de Puebla, México, D. F.
- López-Ramos, E. (1979). *Geología general de México*. Tomo III, 5ª. edición. México, D. F.
- López-Ramos, E (1982). *Geología de México*. Tomo II. 3ª Edición. Instituto de Geología.
- Lugo-hubp, J. (1989). *Diccionario geomorfológico*. Instituto de Geografía, UNAM, 324 p.
- Lugo-Hupb, J. (1991). *Elementos de geomorfología aplicada (Métodos cartográficos)*. Instituto de Geografía, UNAM, México, 109 p.
- Marcos-López, J. (2003). *Distribución espacial de los procesos de remoción en masa y riesgos asociados en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla*. Tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, D. F.
- Martínez-Serrano, R. (1994). Características geoquímicas de las rocas volcánicas del sistema geotérmico Los Humeros, Puebla y su relación con la mineralogía de alteración. *Geofísica Internacional*, Vol. 33, N° 4, pp. 585-605
- Ochoa-Tejeda, V. (2004). *Propuesta metodológica para el estudio de inestabilidad de laderas a partir de los MDT y la percepción remota*. Tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, pp 213 p.
- Olivas, R. (1953). Informe geológico de la provincia del Macizo de Teziutlán, Puebla. *Asociación Mexicana de Geólogos Vol. 5*.
- Ortega-Gutiérrez, F. (1992). *Texto explicativo de la 5ª. edición de la carta geológica de la Republica Mexicana*. Instituto de geología, UNAM.
- Quezadas, A. (1961). Las rocas del basamento de la cuenca de Tampico-Misantla. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros* 13, No. 9-10, pp. 375-387.
- SEMARNAT- Instituto de Geografía, UNAM (2000). Inventario Forestal Nacional Periódico 2000.
- Segura, C. H. (1990). *Estudio geológico de prefactibilidad del sistema hidroeléctrico Atexcaco, Puebla*. Comisión Federal de Electricidad, México, 124 p.
- Vidal-Zepeda, R. (2005). *Regiones climáticas de México*. Instituto de Geografía, UNAM, Colecc. Temas Selectos de Geografía de México. México, 207p.
- Yáñez-García, C. y García-Durán, S (1982). "Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz." Comisión Federal de Electricidad, 98 p.

Mesografía

INEGI (1984). Carta Geológica Veracruz, E-14-2, Escala 1:250 000. México, D.F.

www.cna.gob.mx

www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/ucscsM2.htm (acceso abril 2005)

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

Como se especificó en la introducción, el objetivo de la presente investigación se centró en la modelación de la dinámica hidrológica del suelo para entender la inestabilidad local de laderas. La metodología empleada para el cumplimiento de tal objetivo se resume en los siguientes puntos, mismos que se desarrollan de manera específica en el presente capítulo:

1. Definición y conceptualización del fenómeno a analizar. Localización de la parcela a modelar. Definición de los aspectos teóricos de deforestación y procesos de remoción en masa, para determinar la metodología adecuada, accesible y factible de aplicar en la zona definida de estudio. Paralelamente, justificación de la aplicación del estudio en La Unión.
2. Elaboración y preparación de cartografía a diversas escalas con el objetivo de establecer la relación entre los aspectos físicos, el uso de suelo y la inestabilidad de laderas presente en la zona.
3. Instalación y monitoreo de estaciones meteorológicas, para medir la precipitación y otros parámetros climáticos, de donde se obtuvieron datos que fueron utilizados para analizar la precipitación local a detalle, también considerando la precipitación histórica de la localidad.
4. Levantamiento topográfico a detalle mediante una estación total para obtener la información topográfica adecuada para la modelación.
5. Caracterización de materiales de campo, donde se calcularon los valores de conductividad hidráulica; determinación de la resistencia del suelo e identificación de estratos superiores, empleando equipos especialmente diseñados para determinar dichos parámetros.
6. Caracterización de materiales en laboratorio, punto en que fue necesario obtener diversas muestras de suelo para calcular sus propiedades plásticas (límite plástico, límite líquido, índice de plasticidad), contenido de agua, densidad (real y aparente), granulometría y dos parámetros determinantes en los análisis de estabilidad, cohesión y ángulo de fricción interna.
7. Modelación matemática de la relación vegetación-inestabilidad en dos aspectos básicos: establecer con precisión el factor de seguridad (FS) y analizar la dinámica hidrológica del suelo en función de las propiedades de los materiales.

3.1 Características de la parcela experimental

El punto de partida para definir la metodología a seguir para la modelación de la inestabilidad de una ladera influenciada por el cambio de uso, particularmente la deforestación, es la determinación de la parcela experimental o ladera en estudio, misma que requería de tener ciertas características que permitieran su análisis y que presentara condiciones de inestabilidad.

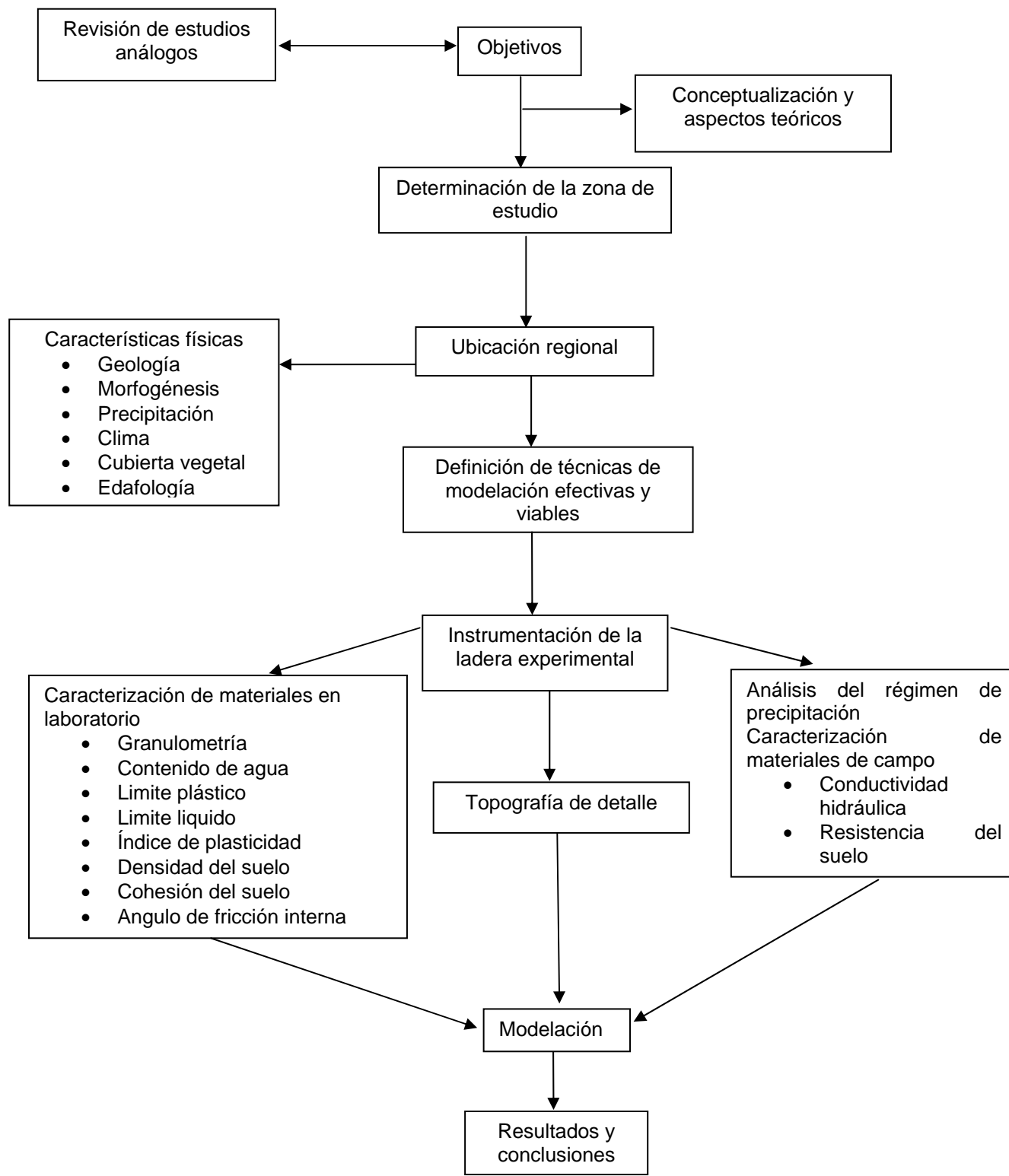


Figura 3.1 Esquema de la metodología empleada en la tesis.

La Sierra Norte de Puebla fue elegida como área de investigación, debido a tres factores determinantes: la frecuente ocurrencia de deslizamientos, flujos y otros procesos de remoción en masa y los daños que éstos procesos ocasionan en la población local; el incremento en la tasa de deforestación de la sierra, con el consecuente cambio de uso de suelo presente en la región, y por último, el conocimiento que se tiene de la región como resultado de la elaboración de trabajos relacionados a procesos de ladera, lo cual ha permitido tener una panorámica general de las causas que influyen en la inestabilidad del terreno de forma cualitativa y la necesidad de contar con estudios más específicos.

De manera particular, se eligió el municipio de Tlatlauquitepec, porque además de las razones expuestas en el párrafo anterior, fue factible contar con el apoyo de las autoridades locales, así como de encontrar una ladera adecuada para la experimentación requerida.

Con base en observaciones de sitio fue posible ubicar una ladera apropiada en la localidad de La Unión, al norte del municipio de Tlatlauquitepec. Las características que se buscaron implicaban la existencia de una ladera inestable, con un proceso reciente de deforestación, litología de rocas sedimentarias, no tener influencia antrópica y evidenciar antecedentes de ocurrencia de procesos de ladera en laderas con características semejantes y relativamente cercanas a la parcela experimental.

La estimación de la probable inestabilidad de la ladera se realizó por observaciones de campo y la búsqueda de indicadores, por ejemplo, rugosidad en el terreno, presencia de pequeños escarpes perpendiculares a la pendiente, abultamientos en el terreno y desarrollo de grietas en la parte superior de la ladera, por mencionar algunos rasgos indicativos.

Una forma inequívoca de establecer un proceso reciente de deforestación es la consulta con la población y ciertos rasgos en el terreno (por ejemplo, que la ladera esté rodeada de áreas cubiertas por vegetación natural, crecimiento diferencial de vegetación baja o arbustiva, suelos bien desarrollados, pero con coloración diferente, etc.). Con lo expuesto, es posible afirmar que en un tiempo reciente, la ladera de la localidad de La Unión contaba con vegetación arbórea que fue talada, aunque aún conserva ciertos rasgos naturales, es decir, no se utiliza para el cultivo, construcción u otros usos humanos. Aunado a ello la litología predominante en el área y específicamente en la parcela experimental es de lutitas del Jurásico Superior; dicho requisito fue definido en función de la escasez de trabajos de inestabilidad en este tipo de litología en México.

Si bien la ladera instrumentada se encuentra dentro de la localidad de La Unión, el terreno no es paso de personas, ni tiene la influencia de la actividad humana por medio de un uso definido. La construcción más cercana es la escuela primaria de la comunidad, cuya cercanía y apoyo por parte de los profesores fue importante en la conservación de la instrumentación y así poder evitar al máximo la alteración de la ladera.

Finalmente, Marcos-López (2003) realizó el cálculo del volumen de un deslizamiento de tipo translacional ubicado en la localidad de San José Chachaltzin, a 3 kilómetros al oeste de La Unión, presentado en materiales sedimentarios, específicamente areniscas intercaladas con lutitas; clima similar, con un ligero incremento en la precipitación media anual, cercano a 20 mm anuales. La ladera presentaba rasgos muy claros de deforestación y su inestabilidad fue desencadenada por intensa precipitación. Lo anterior

representa un referente en la región de la presencia de deslizamientos con características generales similares a la ladera elegida para modelar.

Una vez definida la parcela experimental, se procedió a aislar el terreno por medio de una malla protectora, para eliminar al máximo la posibilidad de que fuera alterada en sus condiciones, así como resguardar los equipos instalados. Para reforzar la acción previa se consideró el apoyo de las autoridades correspondientes, tanto a nivel municipal como comunal, además como se ha mencionado también se ha contado con el apoyo de los profesores de la escuela primaria de la localidad, misma que adicionalmente brindó la energía eléctrica para la estación meteorológica y la posibilidad de instalar en sus aulas el teclado receptor-colector de la información meteorológica.

Una vez aislada la parcela y definida la superficie de análisis, se realizaron paulatinamente las pruebas de mecánica de suelos, conductividad hidráulica, levantamiento topográfico e instalación de la estación meteorológica; en este tenor, fue necesaria la visita constante para la instalación del equipo, verificación de su funcionamiento y recolección de datos, así como para extraer las muestras de suelo acorde con los tiempos de laboratorio.

Las características básicas de la ladera se resumen en un área de 4,407.47 m² en plano y 4,779.7 m², considerando la rugosidad del terreno y un volumen aproximado de la masa aparentemente inestable de 7 665 253.57m³, con una pendiente media de 25° y orientada hacia el sur, con una altura relativa de 37 metros.



Figura 3.2 Parcela experimental en la localidad de La Unión. Los troncos ubicados a la derecha de la ladera fueron colocados delimitando un terreno particular, pero no forman parte de la vegetación natural original.

3.2 Topografía

La topografía del terreno es uno de los principales parámetros que se requieren para realizar estudios de inestabilidad de laderas, pues la pendiente es un factor de alto valor específico en la determinación del factor de seguridad. El detalle y la precisión que se requiere del relieve varían de acuerdo con los objetivos del estudio y el área a analizar.

En el caso específico del presente trabajo se realizó un levantamiento topográfico con el objetivo de contar con un modelo digital de elevación (MDE) de la parcela experimental que varía entre 5 y 10 cms de equidistancia entre curvas de nivel. de resolución, es decir fue necesario contar con una topografía a detalle del terreno, como requerimiento de la modelación y del tamaño de la parcela.

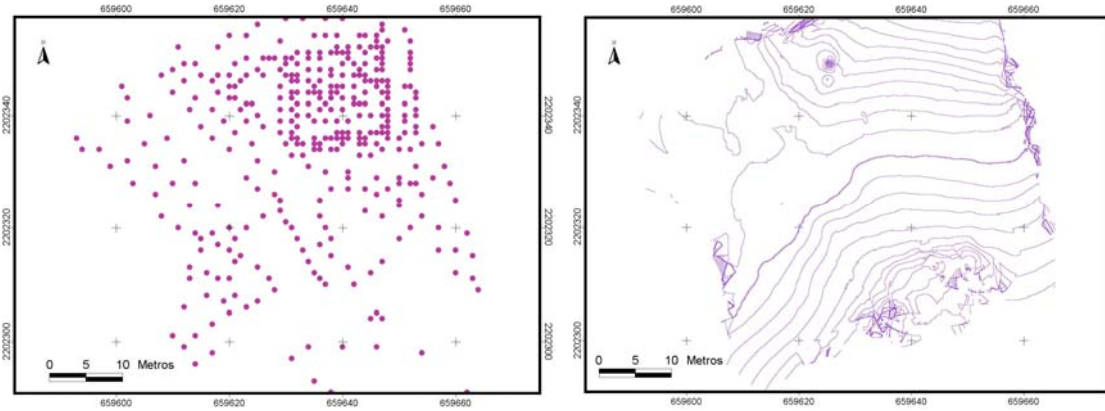
Para lograr el objetivo de contar con un levantamiento topográfico a detalle se empleo una Estación Total *Trimble 5600*, cuyas características permiten obtener la topografía del terreno con alto grado de precisión. Con la información topográfica obtenida se efectuaron perfiles de la ladera experimental, curvas de nivel, modelos tridimensionales, pendientes y mapa de vectores entre otras características, con un alto grado de certidumbre.



Figura 3.3 Estación Total Trimble 5600 empleada en el levantamiento topográfico

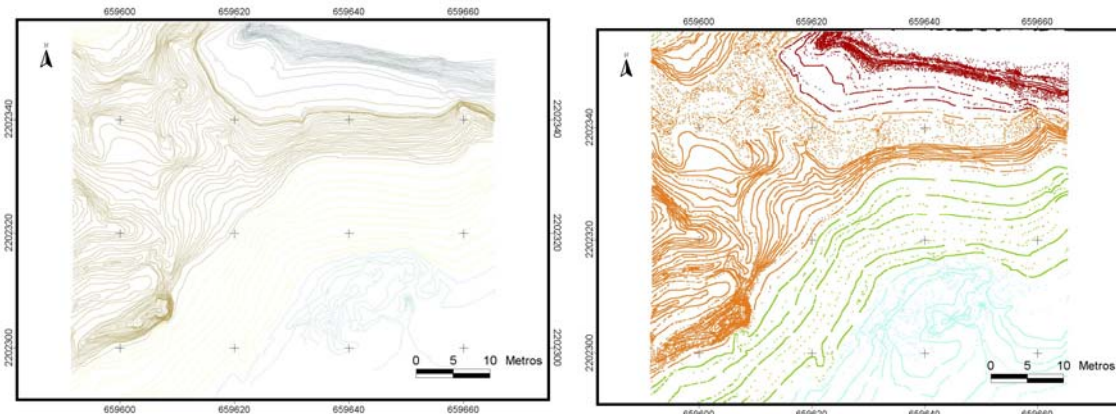
El procedimiento para calcular las curvas de nivel, que son la base para los modelos digitales de elevación, en síntesis fue el siguiente

Un levantamiento topográfico con la Estación Total *Trimble 5600*. A partir de este procedimiento se obtuvieron aproximadamente 400 puntos, con información de coordenadas; una vez con los puntos en la memoria de la estación total, éstos se pueden exportar en diversos formatos (.dat, .txt, .xls, .rew, etc.) para su manipulación en diferentes programas (con manejo de archivos CAD, así como algunos SIGs). Básicamente, el proceso consistió en la interpolación de la información de altitud de cada uno de los puntos, con lo que se genera un archivo raster, que se puede considerar como un modelo digital de elevación (MDE) preliminar, interpolación que se realizó en el programa *ILWIS (Integrated Water and Land Information System)*. Posteriormente, se convirtió este archivo raster a un archivo de segmentos, que resulta en la obtención de las curvas de nivel preliminares de la ladera en estudio (figuras 3.4a y b).



Figuras 3.4 a y b. Despliegue en pantalla de los puntos obtenidos con la Estación total (a) su interpolación y la obtención de las curvas de nivel preliminares (b).

Con las curvas de nivel estimadas, se complementaron los espacios sin información con curvas de nivel auxiliares, para lograr tener una densidad de líneas con información de altitud suficiente para cubrir toda el área levantada; en este paso fue necesario el reconocimiento del terreno, así como la complementación de fotografías de la parcela o ladera experimental. Una vez que se tuvo una densidad de curvas adecuada, se procedió a convertir la información contenida en las curvas en puntos, con una distancia máxima entre ellos de 5 cms, tanto en el eje de las x como de las y. Estos nuevos puntos, se exportaron en formato *shapefile* (.shp) para poder emplear la capa en el programa *ArcView* (figuras 3.5 a y b).

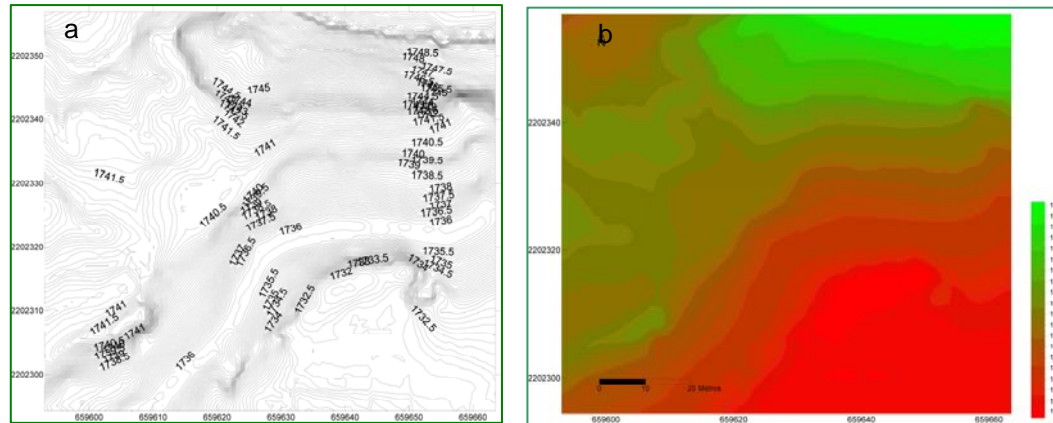


Figuras 3.5 a y b. Curvas de nivel finales (a) y su conversión a puntos (b)

Al exportar el archivo de puntos desde el programa *ILWIS* se conserva la georeferencia en la capa de puntos, pero se pierde la información de coordenadas en la base de datos. De tal forma, que una vez desplegada la capa en el programa *ArcView*, empleando una extensión o ejecución de comandos del SIG se añadió la información de coordenadas a cada uno de los puntos de la capa, mismos que se insertaron a la base de datos. Una vez realizado lo anterior, se exportó la base de datos en formato *.dbf*, el nuevo archivo con la

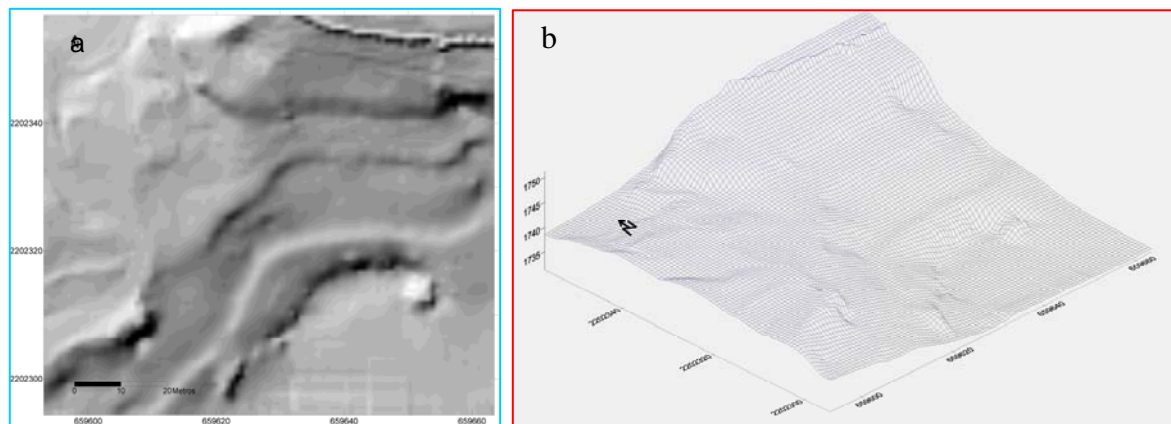
base de datos se desplegó en el programa *EXCEL* y se guardó con el formato raíz del programa (.xls).

Cuando se tuvo la base de datos de los puntos corregidos del levantamiento topográfico en formato .xls se importó dicha tabla de datos desde el programa *SURFER*, mismo que convierte la información contenida en la hoja de cálculo en un archivo *grid* (raster) con la extensión propia de este sistema de información geográfica (en formato .grid). A partir de este último proceso, se establecieron las curvas de nivel y se obtuvo un mapa topográfico simplificado de la parcela experimental, así como el modelo digital de elevación de la ladera (figuras 3.6 a y b).



Figuras 3.6 a y b. Visualización de curvas de nivel a detalle en el programa *Surfer* (a) y generación del Modelo Digital de Elevación de la parcela experimental (b)

Con el MDE fue posible obtener el modelo sombreado del terreno, la pendiente, el mapa de vectores y un modelo tridimensional de la ladera. De este modo, se contó con la información, tanto visual como en base de datos, de las características topográficas de la ladera experimental a detalle (figuras 3.7 a, b y figura 3.8).



Figuras 3.7 a y b Modelo sombreado de la ladera en análisis (a), modelo tridimensional de las curvas de nivel (b).

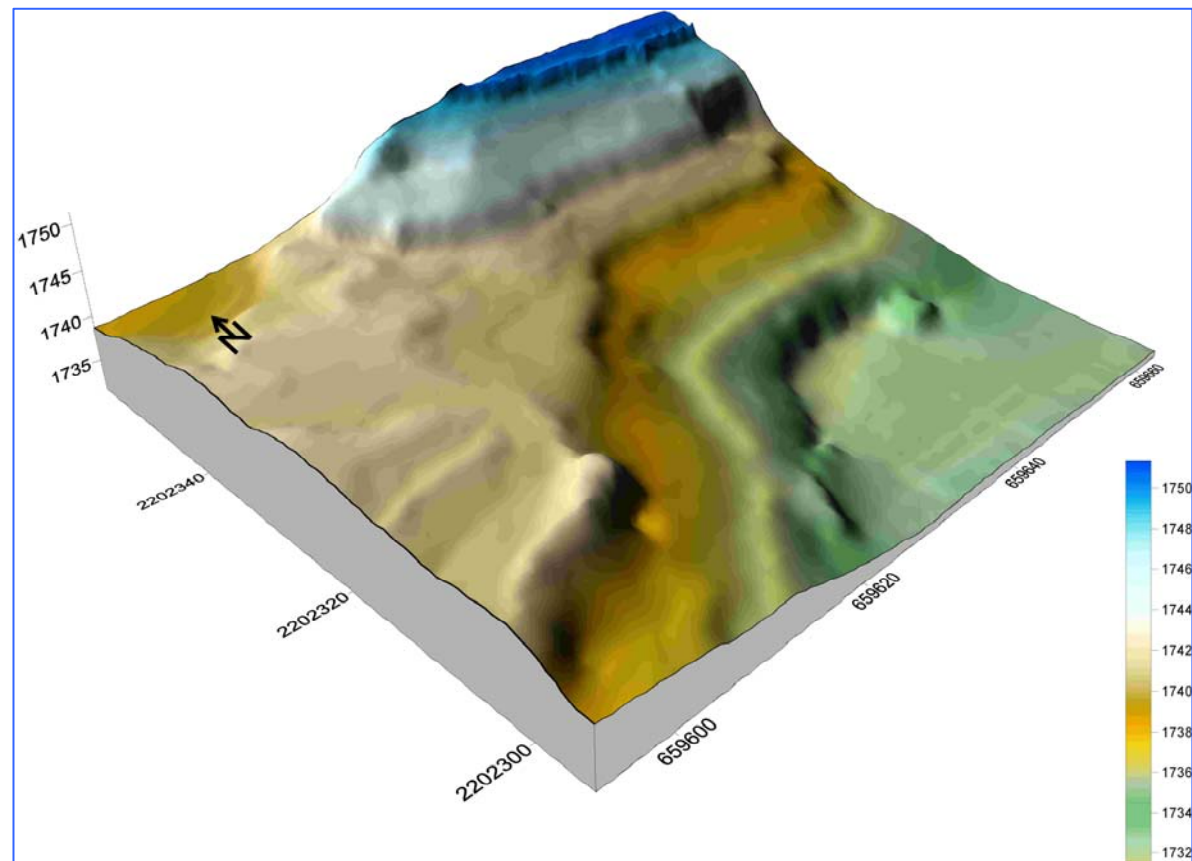


Figura 3.8 Imagen tridimensional del modelo digital de elevación.

3.3 Geotecnia

Con intención de conocer el comportamiento de los materiales es necesario conocer sus propiedades y reacciones bajo diferentes condiciones, para lo cual se realizaron estudios de mecánica de suelos. Este tipo de estudios proporcionan la información requerida en la elaboración de modelos de predicción de escenarios bajo condiciones cambiantes, lo cual se logra al modificar los valores de los parámetros del modelo.

Las pruebas de mecánica de suelos se pueden realizar, tanto en campo como en laboratorio, de acuerdo a los equipos con que se cuente y las condiciones en la zona de estudio, además de la exactitud que se requiera; así por ejemplo, es posible calcular el límite plástico para un material en campo y realizar pruebas para estimar este valor, sin embargo, las pruebas en laboratorio permiten tener mayor precisión en el resultado.

Para las pruebas de laboratorio fue necesario contar con tres tipos básicos de muestras: muestra cúbica de los estratos principales, muestras de suelos superficiales y a corta profundidad y muestra de suelos en perfil a profundidad media.

Es muy importante establecer que en la obtención de muestras de suelo, independientemente del objetivo del trabajo o estudio que se realice, es necesario ubicar un lugar que sea representativo de las condiciones del suelo, así como evitar perturbar las

muestras obtenidas. Obtener muestras de puntos no representativos, bajo procedimientos erróneos o bien alterar las muestras por su mal manejo y transporte puede derivar en información inexacta, que incide directamente en los resultados que se busquen, en este caso en particular los parámetros de mecánica de suelos que se requieren para la modelación.

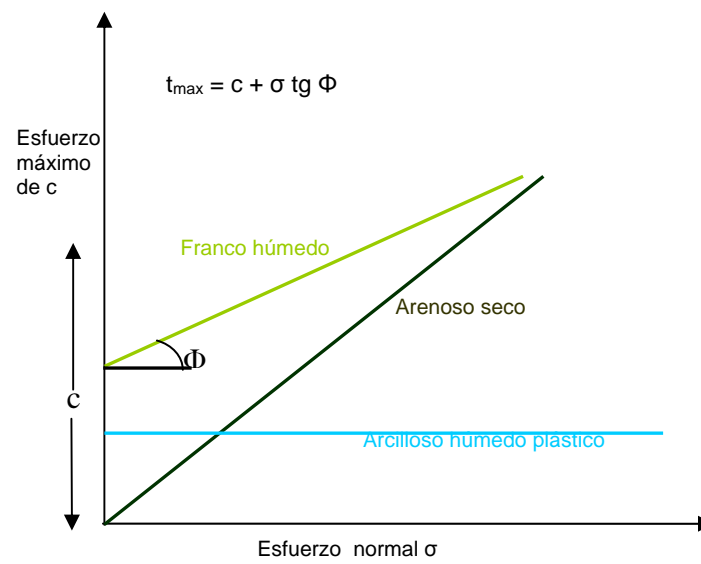
Algunos de los parámetros que se necesita calcular son la cohesión, ángulo de fricción interna, límites plásticos y líquidos, índice de plasticidad, granulometría, densidad (aparente y real) y contenido de agua, por mencionar los más importantes. Como complemento de estos parámetros se emplea la información litológica, descrita previamente, además de la modelación topográfica y los parámetros hidrológicos, que se detallarán posteriormente.

Cohesión y ángulo de fricción interna

La cohesión se define como la propiedad que permite, en el caso de una arcilla o de una mezcla moldeable, dar forma a una muestra que permanece unida, experimento evidentemente imposible con las arenas puras, que son prototipos de suelos sin cohesión (Graux, 1970); en resumen, la cohesión es la capacidad de las partículas para permanecer juntas de forma intragranular. La cohesión depende fundamentalmente de la humedad y la textura (Godwin, *et al*, 1987). Por otro lado, el ángulo de fricción interna se define como una constante de los materiales, resultado de la proporcionalidad entre el valor resultante de un esfuerzo cortante, condicionado por la fuerza necesaria para deslizar un cuerpo sobre una superficie rugosa, y el esfuerzo cortante de dicho material por unidad de área en el plano en que se presente (Juárez y Rico, 1996).

La importancia de la cohesión está relacionada con la succión de agua. Es conocido el hecho de que un suelo seco es más resistente que un suelo húmedo, el cual es más vulnerable a la compactación, puesto que a medida que disminuye la humedad del suelo aumenta la cohesión molecular. Cuando el nivel de humedad del suelo excede a la capacidad del mismo, la estabilidad disminuye en proporción directa al contenido de arcillas, situación en que puede desaparecer por completo la estabilidad del suelo, lo cual puede suceder particularmente después de una precipitación intensa (*ibid*).

Al analizar los valores de esfuerzo máximo de corte de un suelo en función del esfuerzo normal al mismo, es decir lo que ocurre normalmente cuando se introduce una herramienta o equipo en el suelo, con determinado peso o carga vertical y se introduce o arrastra a cierta velocidad se obtiene una relación que se puede graficar en función de una ecuación lineal. Tal ecuación fue determinada en el siglo XVIII por Coulomb y de acuerdo con dicha ecuación el esfuerzo máximo que puede soportar un suelo sin cortarse estará dado por la sumatoria de sus fuerzas cohesivas y las friccionales. De esta forma, se tiene la siguiente gráfica (Graux, 1970):



Donde:

- τ_{\max} Máximo esfuerzo de corte
- c Cohesión
- σ Esfuerzo normal
- Φ Ángulo de fricción interna

Figura 3.9 Gráfica ejemplo de la ecuación de Coulomb.

La cohesión del suelo y ángulo de fricción interna definen la línea de corte en el modelo de distribución de Mohr-Coulomb; esta curva describe la relación entre el estrés normal y el estrés de corte, y según la cual el estrés de corte representa la resistencia del suelo a la compresión o deformación. En la tabla 3.1 se muestran valores promedio de cohesión y ángulo de fricción interna para distintos tipos y estado de suelo.

Tabla 3.1 Valores promedio de cohesión y ángulo de fricción interna en diferentes tipos de suelo

Tipo de suelo	Estado	Ángulo de fricción interna	Cohesión (Kg/cm ²)
Arenoso	Compactado	38° - 40°	0
Arenoso	Suelto	32° - 35°	0
Arenoso fino	Compactado	25° - 30°	0
Arenoso fino	Suelto	18° - 22°	0
Franco arenoso	Friable	24° - 28°	0.20 - 0.25
Franco arenoso	Plástico	24° - 28°	0.10 - 0.15
Franco	Friable	22° - 26°	0.25 - 0.30
Franco	Plástico	15° - 19°	0.15 - 0.20
Arcilloso	Friable	17° - 19°	0.40 - 0.60
Arcilloso	Plástico	10° - 14°	0.25 - 0.30

Fuente: Juárez y Rico (1996).

Previamente se describió que para realizar las pruebas en laboratorio necesarias para determinar la cohesión y el ángulo de fricción interna se requieren muestras cúbicas

inalteradas, es decir que conserven las condiciones originales al máximo posible. Estas pruebas fueron ensayadas en laboratorio de suelos de CENAPRED a través de un equipo de prueba triaxial, que es la prueba más difundida y empleada actualmente.

En resumen, para obtener una muestra cúbica se realizan las siguientes acciones:

- Se ubica el lugar representativo de donde se extraerá la muestra y se recorta la vegetación y cualquier elemento ajeno a la condición original del suelo. Se labra la muestra cúbica de un tamaño adecuado para su transporte y para obtener diversas pruebas para procesarlas en la cámara triaxial.
- Una vez labrada la muestra, ésta es cubierta con una tela especial y recubierta con una capa de parafina sólida mezclada con cera virgen, para evitar que se dañe en el transporte y que conserve las características originales.
- En laboratorio, se procede a quitar la cubierta protectora a la muestra y se extraen muestras cilíndricas para procesarlas en el equipo triaxial.



Figura 3.10 Extracción de muestra cúbica para procesar en laboratorio.

Para la aplicación de esta prueba se requiere que a partir de las muestras cúbicas obtenidas en campo se modelen ejemplares cilíndricos, a los cuales se les aplicó presión de un líquido, por lo general agua pura; la muestra se introduce en una cámara cilíndrica, hermética, con bases metálicas; la presión que se ejerce con el agua es hidrostática, por lo que la presión es igual en todas las direcciones (axial y lateralmente). El objetivo primario de este tipo de pruebas es someter a las muestras a estados de esfuerzo y a deformación lo más similares a las presentadas *in situ*. Las pruebas de compresión triaxial se clasifican en dos grupos: de compresión y de extensión, cuya diferencia radica en la dimensión axial original de la muestra (Borja-Baeza, 2003; Noriega-Rioja, 2005).

Las pruebas de mecánica de suelos, incluyendo las pruebas triaxiales, de límites plásticos y líquidos, contenido de agua, granulometría y densidad se realizaron en el laboratorio de suelos del CENAPRED, departamento que cuenta con los instrumentos adecuados y las instalaciones idóneas para realizar dichas pruebas y obtener resultados lo más precisos posible.

Los principales parámetros que se obtienen de la prueba triaxial son cohesión y ángulo de fricción interna, los cuales determinan la resistencia al corte del material, por lo que su influencia en la inestabilidad del terreno es significativa. Paralelamente, se puede calcular el peso del suelo en condiciones normales, parámetro que también es empleado en la determinación del factor de seguridad.

Una vez efectuada la técnica descrita en campo y en el laboratorio de mecánica de suelos del CENAPRED, se obtuvieron los siguientes resultados:

Cohesión (c) : 21.3 kPa (Kilopascales)

Ángulo de fricción interna (Φ) : 8.20°

Peso del suelo en condiciones normales: 1.705 gr/cm³

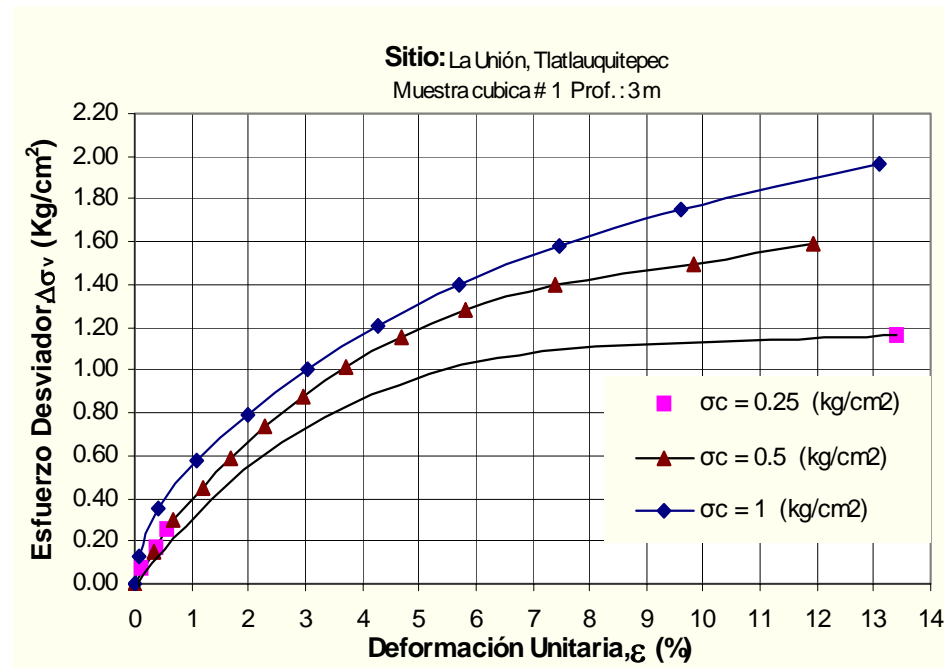


Figura 3.11 Curvas esfuerzo-deformación de la muestra cúbica obtenida en La Unión

Límites plástico y líquido

Otros parámetros de gran importancia para conocer el comportamiento de los materiales son el límite plástico, el límite líquido y el índice de plasticidad. Estos parámetros se definen de la siguiente manera:

El límite líquido es el contenido de agua, expresado en porcentaje, de un suelo en el límite entre los estados líquido y sólido (Graux, 1970). Este contenido es definido como el contenido de agua al cual se coloca en una copa estándar y cortado por un surco de dimensiones estándares, fluirá junto en la base del surco para una distancia de 13 m cuando está sujetado a 25 choques de la taza que se deja caer a 10 mm en un aparato estándar.

El límite plástico es el contenido en agua (en %) de un suelo en el límite entre los estados plásticos y frágil (Juárez y Rico, 1996). El total del agua en este límite es el contenido en agua, en el cual un suelo puede ser deformado en una tira cuya longitud es más o menos de la mitad de la palma de la mano, con un ancho aproximado de 3.2 milímetros sin desmenuzarse.

Índice plástico es la gama en la cual se encuentra un exceso del contenido de agua en que un suelo se comporta plástico. Numéricamente, es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

Para la determinación de estos parámetros, además del contenido de agua y la granulometría, se extrajeron muestras de suelo en un perfil representativo de los estratos superficiales de la parcela experimental, con una profundidad superior a los 4 metros, tomando muestras de suelo cada 15 centímetros y en cantidad suficiente para realizar diversas pruebas en laboratorio, con el fin de comprobar la información obtenida en las pruebas.

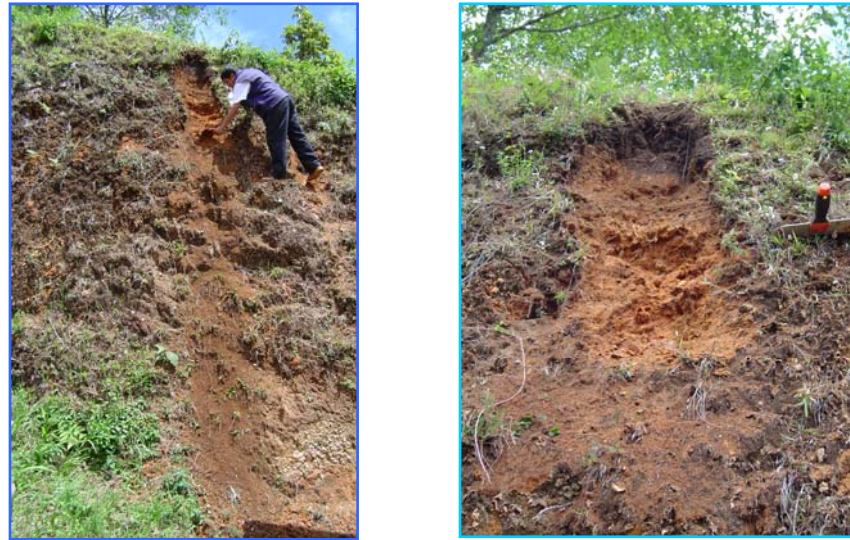


Figura 3.12 Perfil de la ladera de La Unión de donde se extrajeron las muestras de suelo para determinar los límites plástico y líquido, contenido de agua e índice plástico.

El procedimiento para determinar el límite líquido de un material es el siguiente:

1. Se obtiene la muestra de material, misma que se puede extraer a través de un pozo, de la utilización de una pala posteadora o bien de un perfil labrado, tal como se realizó para estas pruebas.
2. Se clasifica el material por su profundidad y por sus características de primera impresión, como es el contenido de raíces, color, textura, etc.
3. Una vez en laboratorio, manualmente se procesa el material hasta determinar si es posible calcular el límite plástico para esta muestra; en caso afirmativo es posible precisar el límite líquido.
4. El primer paso, ineludible para este tipo de pruebas, es el remoldeo del material, para homogeneizarlo, con la suficiente cantidad para realizar las pruebas en la copa de Casagrande y las correspondientes al límite plástico, misma que puede ser de poco más de 100 grs. Es recomendable hacer pasar el material a través de la malla 40,

- para separar las gravas y raíces que puedan estar contenidas en la muestra y que impiden el remoldeo.
5. Una vez remoldeado el material, se coloca uniformemente en la Copa de Casagrande (figura 3.13) y se procede a realizar la prueba.
 - 5.1 El equipo debe de estar ajustado a ciertas condiciones. Confirmar que la altura que alcanza la taza sea de 10 mm.; que no se produzca juego lateral de la taza por desgaste del pasador que la sostiene; verificar el desgaste propio de la taza y de la base fija, así como de soportes y otros componentes del instrumento.
 - 5.2 Se coloca el material en la taza; una vez colocado el material en la copa, se separa por un acanalador a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la taza, de modo que se forme una ranura clara y bien delineada.
 - 5.3 Es necesario colocar el aparato sobre una base firme, se gira la manivela del instrumento, misma que por un mecanismo mecánico levanta la campana a 1 cm. de la superficie y la deja caer estimando un par de golpes por segundo, transmitiendo la vibración al material que tenderá a unirse tras un número de golpes, siendo ideal detener la prueba cuando la unión tenga un largo entre 10 y 12mm.
 - 5.4 Se retira parte del material y se coloca en un recipiente, al cual previamente se le ha determinado su peso sin material, y se procede a pesar el material junto con el recipiente. Se introduce en el horno para su secado durante 24 hrs.
 - 5.5 Una vez secado el material se repite la operación de pesaje, cuyo resultado es el peso de la muestra en seco más el del recipiente. Posteriormente se realizan las operaciones matemáticas lógicas para determinar el peso de la muestra seca y el peso del agua, expresado en porcentaje en relación al peso de la muestra húmeda.
 6. Se elabora una gráfica que relaciona el número de golpes en el eje de las x y el porcentaje de agua en el eje de las y. Se traza la recta que une a los puntos y se determina el valor que cruza a la línea que marca 25 golpes y dicho valor es el correspondiente al límite líquido.



Figura 3.13 Copa de Casagrande empleada en la determinación de los límites plásticos.

Los resultados de límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y la clasificación SUCS (Soil Universal Classification System) para el perfil de La Unión se muestran en la tabla 3.2

Tabla 3.2 Resultados de límite plástico, límite líquido, índice de plasticidad y su clasificación SUCS (Soil Universal Classification System).

PROFUNDIDAD (M)	LÍMITE LIQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD	CLASIFICACIÓN SUCS
0-.30	92.3	60.34	32.46	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.
.30-.60	220	122.5	97.5	
.60-.90	187.5	123.75	63.758	
.90-1.20	205	100	105	
1.20-1.50	234	130	104	
1.50-1.80	181	91.65	89.35	
1.80-2.10	158.8	91.5	67	
2.10-2.40	81.8	49.43	32.37	
2.40-2.70	67	42.46	24.54	
2.70-3.00	72	27.8	44.5	
3.00-3.30	54.5	34.16	20.36	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.
3.30-3.60	56.8	34.67	22.13	
3.60-3.90	37	27.61	9.39	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillas ligeramente plásticas; limos orgánicos y arcillas limosas de baja plasticidad.
3.90-4.20	59.5	30.76	28.74	

Uno de los parámetros más simples de estimar es el contenido de agua en porcentaje. Se designa al contenido de agua como la relación entre el peso del agua comprendida naturalmente entre las partículas sólidas de una muestra y el peso de los materiales secos. En esta relación no se incluye el agua de composición de las partículas sólidas (Graux, 1970). Este porcentaje se determina al comparar el peso de una muestra de suelo en condiciones originales (suelo húmedo) y la misma muestra después de un 24 horas en un horno, el cual elimina toda la humedad de la muestra (suelo seco); la diferencia entre el suelo húmedo y el suelo seco, en relación con el peso total, se considera como el contenido de agua en porcentaje. Los datos de esta prueba para el perfil de la ladera se detallan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Contenido de agua en porcentaje del perfil analizado.

PROFUNDIDAD (METROS)	PORCENTAJE DE AGUA	PROFUNDIDAD (METROS)	PORCENTAJE DE AGUA
0 - .15	65.94	2.10-2.25	31.72
.15 - .30	69.87	2.25-2.40	36.48
.30 - .45	104.2	2.40-2.55	40.77
.45 - .60	110.12	2.55-2.70	51.29
.60 - .75	91.97	2.70-2.85	41
.75 - .90	102.45	2.85-3.00	38.33
.90-1.05	148.43	3.00-3.15	36.56
1.05-1.20	157.75	3.15-3.30	35.71
1.20-1.35	149.01	3.30-3.45	28.65
1.35-1.50	120.5	3.45-3.60	29.74
1.50-1.65	107.88	3.60-3.75	19.79
1.65-1.80	119.12	3.75-3.90	20.14
1.80-1.95	128	3.90-4.05	46.9
1.95-2.10	62.72	4.05-4.20	30.28

De las pruebas de contenido de agua, límites (plástico y líquido) e índice de plasticidad, se elaboró la gráfica correspondiente, misma que se muestra en la figura 3.14. En dicha gráfica se puede apreciar con claridad la existencia de dos estratos bien diferenciados.

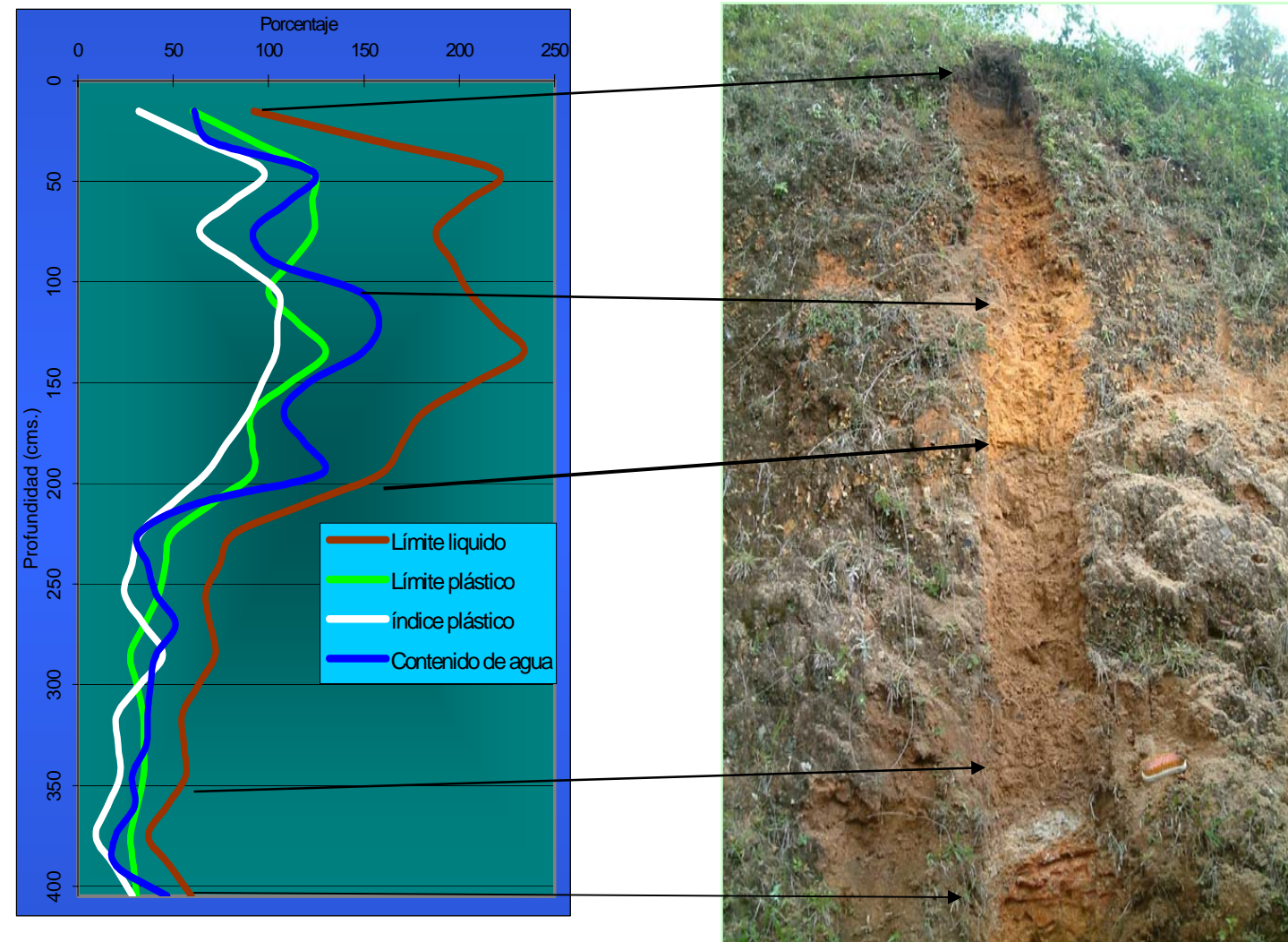


Figura 3.14 Gráfica de límite plástico, límite líquido, índice de plasticidad y contenido de agua del perfil de la ladera en estudio. La foto a la derecha muestra el perfil representativo de la ladera de La Unión

Granulometría

Una prueba básica e importante es la granulometría, la cual consiste en determinar, en porcentajes, los diámetros de las partículas que conforman un determinado suelo. Estos diámetros pueden variar desde 100mm a menos de 0.001 mm. Las normas internacionales especifican los rangos para la clasificación, empleando los términos arcillas, sedimentos, arenas, gravas, cantos y guijarros; complementando, los sedimentos, arenas y gravas pueden subdividirse en finos, medianos y gruesos.

El procedimiento para establecer los porcentajes granulométricos comienza en la obtención de muestras de un perfil deseado, especificando la profundidad de cada muestra; se extrae una porción y se procede a eliminar por completo su contenido de agua, bien por secado al sol o al horno, este último más eficaz y rápido. Una vez conseguido el suelo seco, se eliminan por completo los grumos o terrones formados, se emplea el método de tamizado, el cual consiste en pasar la muestra de suelo a través de mallas de diferentes aberturas, desde 2'' hasta un diámetro de 0.001 mm y contabilizar el peso relativo retenido en cada uno de los cedazos o mallas. Los porcentajes del diámetro de partículas del perfil de La Unión se muestran en la tabla 3.4.

Los resultados muestran que el suelo está compuesto básicamente de arcillas orgánicas y limos orgánicos de media plasticidad en la superficie y los primeros 2 m de profundidad, mientras que en la parte inferior está integrado por arcillas inorgánicas de alta plasticidad. Así, a los 2 metros de profundidad disminuye el contenido natural de agua por debajo del 50% y la granulometría indica un aumento en el porcentaje de arenas considerable, así como también de los finos, lo cual indica un cambio de estrato bien definido (figura 3.15).

Tabla 3.4 Resultados de granulometría de la parcela experimental.

Profundidad (m)	Tamaño de la malla											
	1''	¾''	½''	⅜''	.187	10	20	40	60	100	200	Más de 200
0-.30	0	0	0	0	.7	3.6	15.1	24.8	17.8	11.8	14.89	11.19
.30-.60	0	0	0	0	0	.16	16	29	20	12.7	12.97	9.07
.60-.90	0	0	0	0	0	0	.39	12.2	34.1	27.7	11.06	14.45
.90-1.20	0	0	0	0	.49	.65	7.4	30.5	23.2	14.4	10.16	13.25
1.20-1.50	0	0	0	0	0	.83	10.1	26.2	28.2	8.43	8.43	17.78
1.50-1.80	0	0	0	0	.34	2.37	6.63	23.7	29.5	13.4	12.87	11.22
1.80-2.10	0	0	0	0	9.52	16.81	29.86	20.65	10.08	4.88	2.4	5.76
2.10-2.40	0	0	0	0.89	1.18	13.55	33.3	24.55	11.47	5.22	2.82	7.02
2.40-2.70	0	0	0	0	2.2	5.75	32.21	29.56	12.45	6.3	2.6	8.9
2.70-3.00	0	0	0	0	0.47	1.86	21	31.18	16.84	9.83	2.67	16.15
3.00-3.30	0	0	0	0.65	0	3.18	24.65	25.61	14.34	11.67	0.86	19.04
3.30-3.60	0	0	0	0	0	1.71	14.09	25.26	19.99	15.17	18	5.78
3.60-3.90	0	0	0	0	0.16	1.48	21.1	31.8	18.27	9.61	13.2	4.38

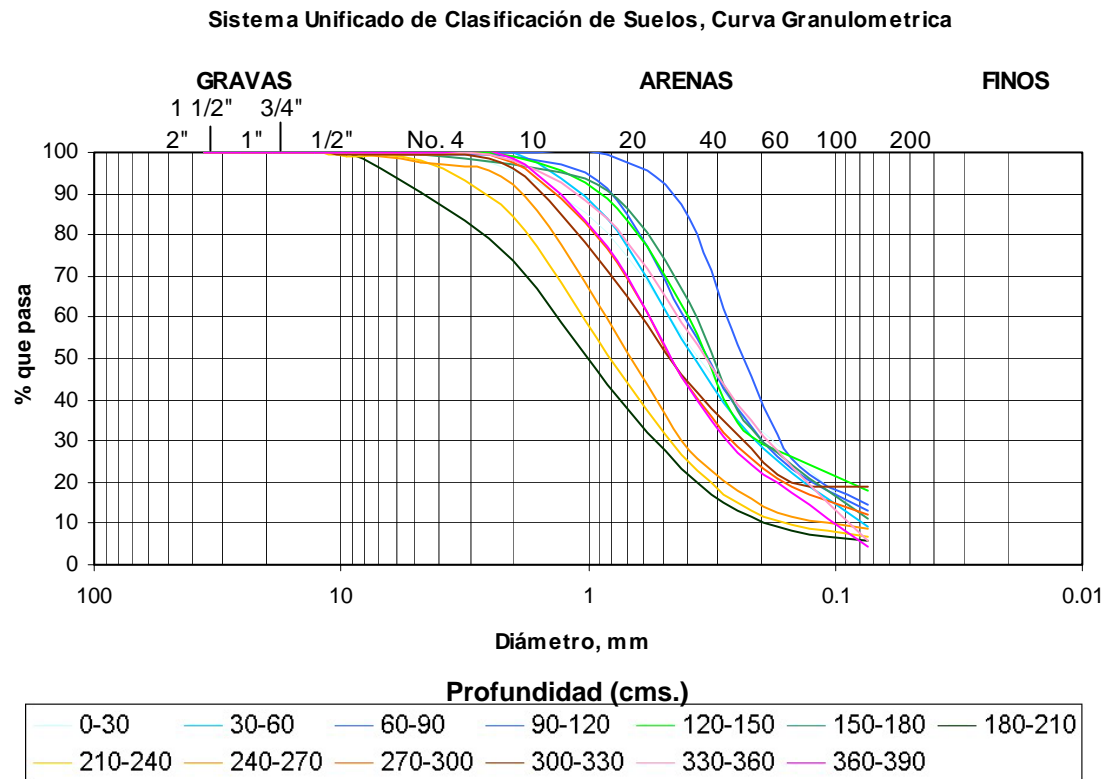


Figura 3.15 Curva granulométrica de los materiales a diferente profundidad del perfil de La Unión.

Densidad del suelo

Dado que el suelo es un medio poroso, es decir existen espacios entre las partículas sólidas, se puede establecer una relación masa-volumen. En el suelo, como en cualquier otro cuerpo físico, la densidad se define como la masa por unidad de volumen. En el caso de los suelos, cuanto más denso es un suelo tanto más sólido es el mismo, aunque existen arcillas densas con hinchamiento las cuales para el estado de saturación pierden la solidez y su resistencia a la erosión.

Ahora bien, dado su carácter poroso, conviene distinguir entre la densidad de sus componentes sólidos y la del conjunto del suelo, incluyendo los poros, por esto existen dos tipos de densidades: densidad real y densidad aparente.

El término densidad real se refiere a la relación entre la masa de las partículas sólidas del suelo y el volumen que ocupan estas partículas, excluyendo a los poros. La densidad real de un suelo depende principalmente de la composición y cantidad de minerales y de la proporción de materia orgánica e inorgánica que contiene (Juárez y Rico, 1996).

En concreto, la densidad real queda definida como:

$$Dr = \text{Masa sólidos} / \text{Volumen de sólidos}$$

De esta forma, la densidad real se calcula pesando el suelo en condiciones naturales y dividiendo este valor entre el volumen del mismo, que está representado por el volumen de los cilindros empleados para extraer el material.

La densidad aparente corresponde a la masa de sólidos (partículas) de un volumen total conocido de suelo, volumen que incluye el espacio ocupado por las partículas sólidas y por los poros, también expresada en g/cm^3 . Esta densidad, al igual que la textura, influye en la retención de agua del suelo. En un suelo arenoso la densidad aparente es alta, mientras que en un suelo arcilloso es baja, siempre que este último no se encuentre compactado.

La densidad aparente varía en función de la textura, del estado de agregación, del contenido de materia orgánica, del manejo que recibió el suelo, del contenido de humedad. Esta densidad influye en la elasticidad, conductividad eléctrica, conductividad térmica, en la capacidad calorífica a volumen constante y en la dureza. Así, la densidad aparente queda definida como (Juárez y Rico, 1996):

$$D_a = \text{Masa sólidos} / \text{volumen total (Volumen de sólidos + Volumen de poros)}$$

La obtención de muestras de suelo se realiza empleando un cilindro metálico, mismo que está diseñado para introducirlo sin alterar en lo posible las condiciones del suelo; una vez clavado completamente, se extrae y se elimina el material sobrante de ambos extremos, para obtener una muestra de volumen conocido y se resguarda en material aislante para conservar al máximo sus propiedades y el contenido total (figura 3.16).

La determinación de la densidad aparente puede efectuarse por diversos métodos pero se utilizan dos preferentemente. El mejor modo de determinar la densidad aparente es tomar un volumen fijo de suelo sin perturbar y pesarlo una vez seco, por calentamiento a 105°C hasta peso constante. El principal inconveniente de este sistema es la presencia de piedras. Sin embargo, de acuerdo con el análisis granulométrico, las gravas son escasas y por lo tanto los resultados se ven poco influenciados por esta circunstancia.



Figura 3.16 Extracción de muestras de suelos para calcular la densidad real y la aparente.

Generalmente la densidad aparente es mayor en suelos con menor porosidad, arenosos, compactados y profundos, mientras que es menor en suelos con mayor porosidad, arcillosos, superficiales y menos compactados. La tabla 3.5 muestra los resultados de densidad real y aparente, mismos que se representan en la gráfica de la figura 3.17. En esta gráfica se aprecia que la densidad del suelo presenta variaciones, particularmente cerca de un metro de profundidad, donde de acuerdo con la granulometría disminuye el contenido de arenas gruesas y se incrementa el contenido de agua. Posteriormente a esta franja de transición, la densidad se mantiene constante, aunque con valores superiores a los estimados cerca de la superficie.

Tabla 3.5 Densidad aparente y real de la parcela experimental.

Profundidad	Densidad Real (gr/cm ³)	Densidad Aparente (gr/cm ³)
0-10	1.147	0.586
10-20	1.1725	0.585
20-30	1.289	0.6195
30-40	1.3165	0.5915
40-50	1.235	0.539
50-60	1.455	0.6685
60-70	1.45	0.7395
70-80	1.3385	0.639
80-90	1.2075	0.57
90-100	1.58	0.7895
100-110	1.488	0.7145
110-120	1.433	0.7025
120-130	1.4075	0.688

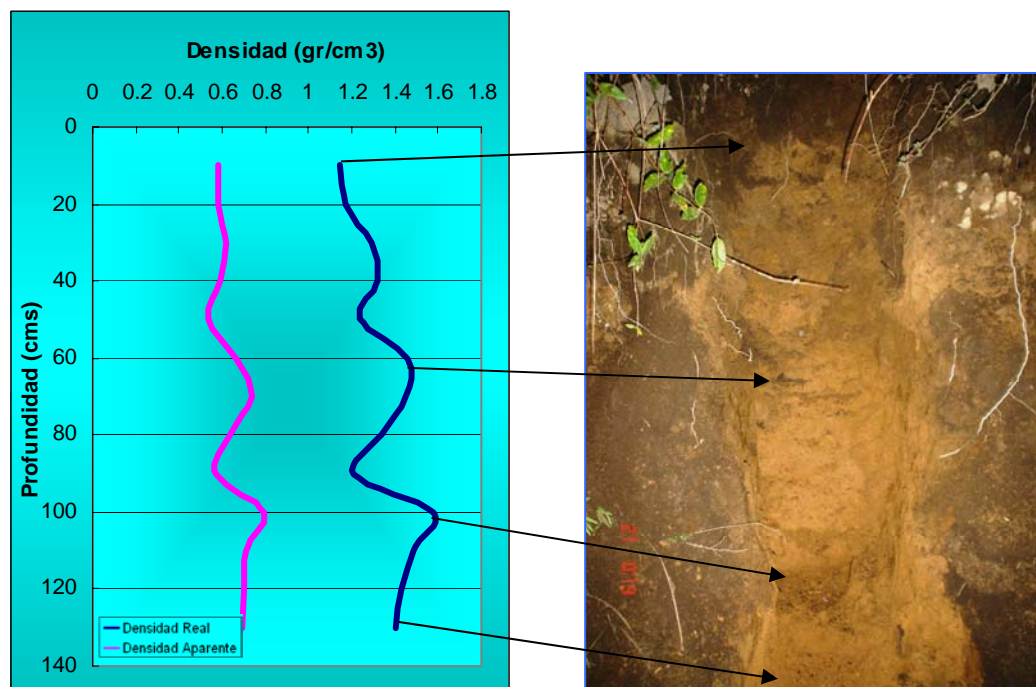


Figura 3.17 Gráfica de densidad real y aparente de la parcela experimental.

Conductividad hidráulica

La determinación de los parámetros hidráulicos en suelos de texturas extremas, arcillosas y arenosas, presentan problemas de difícil resolución. Tres de los más importantes factores que controlan la transmisión de líquidos en suelos no saturados son la conductividad hidráulica, la matriz de flujo potencial y la absorción; sin embargo, el parámetro de mayor influencia es la conductividad hidráulica. Además, dicha conductividad hidráulica es uno de los parámetros más importantes para modelar el comportamiento de los suelos, con la consecuente influencia directa en la estabilidad del terreno (Soilmoisture, 1991).

La conductividad hidráulica es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico, es decir el índice de infiltración del agua a través de los poros del suelo saturado, mismo que generalmente se expresa en cm/seg. En este aspecto se deduce que la velocidad del flujo es directamente proporcional a la conductividad hidráulica y a la gradiente hidráulica, es decir entre mayor sea el valor de la conductividad hidráulica, la velocidad de infiltración será mayor (Reynolds y Elrick, 1991).

En general puede decirse que la velocidad con que circula el agua subterránea es proporcional a una potencia del gradiente hidráulico, multiplicada por una constante de proporcionalidad denominada conductividad hidráulica. La conductividad hidráulica representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo. Asimismo, esta constante es la característica determinante de la impermeabilidad del material, ya que determinará el flujo de líquidos a través de la arcilla (Schoeneberger y Amoozegar, 1990).

La conductividad hidráulica depende de la granulometría, la estructura de la matriz y la porosidad, propiedades del suelo que influyen directamente en el valor de la conductividad, por ejemplo es mayor el valor en arcillas que en los suelos con gravas bien clasificadas (tabla 3.6); ésta varía de acuerdo con el tipo de roca y su origen (tabla 3.7).

Tabla 3.6 Rangos promedio de conductividad hidráulica considerando la granulometría de los suelos.

Material	Conductividad hidráulica
Arcillas	10^{-9} -- 10^{-6}
Sedimentos, sedimentos arenosos, arcillas arenosas, cultivos	10^{-6} -- 10^{-4}
Arenas, finos	10^{-5} -- 10^{-3}
Arenas bien clasificadas,	10^{-3} -- 10^{-1}
Gravas bien clasificadas	10^{-2} -- 1

Fuente: Hsin-Yu y Yen-Jing (2002).

Tabla 3.7 Rango de conductividad hidráulica en varios materiales de suelos y en rocas.

Material del suelo	conductividad hidráulica (m/año)
Gravas	$1 \times 10^4 - 1 \times 10^7$
Arenas	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^5$
Arenas arcillosas	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^4$
Sedimentos	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^2$
Arcillas de origen marino	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-2}$
Rocas metamórficas e ígneas no fracturadas	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$
Areniscas	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^1$
Calizas	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^1$
Rocas metamórficas e ígneas fracturadas	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^3$
Basaltos permeables	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^5$
Calizas kársticas	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^5$

Fuente: Freeze y Cherry, 1979.

Para estimar el valor de la conductividad hidráulica se emplea la ley de Darcy, la cual describe la velocidad del flujo de un líquido a través de un material poroso. La ley de Darcy asume que el coeficiente de permeabilidad es independiente de la gradiente hidráulica lo cual ocurre principalmente en materiales arenosos. Por lo tanto, se puede observar que si se reduce la conductividad hidráulica en un orden de magnitud, el volumen de líquido que pase por el suelo en un tiempo determinado también se reducirá en un orden de magnitud (Díaz *et al.*, 2003).

Sin embargo, dentro de los suelos con gran contenido de arcilla, la ley de Darcy deja de ser del todo aplicable, ya que en este punto la conductividad hidráulica depende de la presión hidráulica. Por debajo de un valor límite de la gradiente hidráulica, la permeabilidad se acerca a cero en la denominada área prelineal de la ley de Darcy (Reynolds y Elrick, 1991). La gradiente límite depende del tipo de suelo y en el caso de La Unión, si bien son arcillas predominantemente, el contenido de arenas permite realizar las pruebas y obtener el valor de la conductividad.

La determinación de los parámetros hidráulicos en el suelo puede presentar diversas dificultades para su cálculo, pero son parámetros de gran utilidad para entender el comportamiento del flujo del agua en el suelo, particularmente la conductividad hidráulica. Establecer esta conductividad se puede obtener directamente en campo, para lo cual existen diversos equipos, con características propias y particularidades en funcionamiento, costo, precisión y limitaciones de medición (Reynolds y Elrick, 1985).

La conductividad hidráulica se puede calcular tanto en laboratorio como *in situ*, para lo cual se emplean diversos métodos y se pueden utilizar diferentes equipos y en ambos casos el objetivo es calcular el valor numérico (K) para el coeficiente en la ecuación de Darcy. Establecer el valor de dicho coeficiente en laboratorio implica un manejo cuidadoso del material para evitar alterar las condiciones naturales y únicamente se puede obtener valores aproximados, por lo que establecer el valor de K en campo es el método más recomendable, pues permite realizar diversas pruebas en un mismo sitio, a diferente profundidad y las veces necesarias para obtener datos precisos, considerando las limitaciones del equipo utilizado para dicho fin.

Algunos de los equipos que se utilizan para estimar la conductividad y otros parámetros hidráulicos del suelo son:

- ❖ Two-stage borehole test
- ❖ Pororus probe
- ❖ Air entry permeameter
- ❖ Constant-Head Borehole Permeameter
- ❖ Ring infiltrometer
- ❖ Open, single ring infiltrometer
- ❖ Open, double ring infiltrometer
- ❖ Sealed, single ring infiltrometer
- ❖ Sealed, double ring infiltrometer SDRI

Para realizar las pruebas de determinación de la conductividad hidráulica en la parcela experimental se optó por emplear el permeámetro Guelph 2800KI, mismo que presenta ciertas características favorables para su empleo en el presente trabajo y en relación con el objetivo de establecer el valor de la conductividad hidráulica (figura 3.18); por ejemplo la relativa facilidad de su manejo e interpretación de la información obtenida; un período de prueba en campo corto en comparación con otros, de aproximadamente un par de horas por prueba, tiempo que varía por las condiciones del suelo; precisión en la obtención de datos verticales (información de un perfil); diseñado para mediciones de suelos poco profundos, característicos de la zona de estudio.

Por el contrario, el equipo presenta algunas limitaciones respecto a otros equipos, pues no es posible realizar mediciones horizontales; su diseño no puede medir conductividades mayores a 10^{-7} cm/seg; el volumen de suelo que se puede medir es pequeño. Sin embargo, estas condiciones no afectan al objetivo de análisis de la tesis, pues no se requieren mediciones horizontales (no hay estratos superficiales plegados), los suelos no son totalmente arcillosos, por lo que se podían esperar datos de conductividad con rangos de 10^{-6} a 10^{-3} cms/seg y por ser un estudio a detalle, donde no se requiere información de grandes áreas, el alcance de las pruebas es suficiente para obtener los datos necesarios para la modelación.

Con el fin de incrementar la certidumbre en los datos obtenidos en el área en análisis, es necesario realizar diversas pruebas para obtener el o los valores más cercanos a los reales, puesto que debido a diversas razones, el valor de la conductividad hidráulica no es constante en toda el área que abarca el suelo donde se realizan las pruebas, aunque las variaciones son menores. Algunas de las causas de estas variaciones son interacciones entre el medio poroso y el líquido (expansión de arcillas, deterioro debido al riego con aguas salinas, etc), cierre de los poros, anisotropía (cambio de las propiedades según la dirección considerada) y la influencia antrópica (Díaz *et al.*, 2003).

Para estimar el valor de K se prepara e instala el equipo en un punto representativo de la parcela, se llevan a cabo las pruebas necesarias y algunas extras para comparar los resultados, se registran los datos y se traslada el equipo a otros puntos de la parcela, incluyendo el perfil del cual se obtuvieron las diversas muestras ya detalladas previamente.



Figura 3.18 Instalación del permeámetro Guelph en la parcela experimental.

Los datos de conductividad hidráulica calculados permiten establecer que la infiltración entre los poros del suelo es mayor cerca de la superficie, en la parte central de la parcela instrumentada, donde se determinaron valores de 9.02×10^{-4} cms/seg y disminuye a los 50 cms. de profundidad. El valor mínimo de 3.25×10^{-5} cms/seg se registró en la parte central de la parcela experimental a 50 cms de profundidad. En la tabla 3.8 se muestran los valores de conductividad hidráulica obtenidos de las pruebas realizadas en La Unión.

Tabla 3.8 Resultados de conductividad hidráulica de la parcela experimental.

Ubicación en la parcela	Profundidad (cms)	Ksat (cms/seg) (conductividad hidráulica)
Parte alta	20	4.15×10^{-4}
Parte alta	50	1.77×10^{-4}
Parte central	20	9.02×10^{-4}
Parte central	50	3.25×10^{-5}
Parte baja	20	1.25×10^{-4}
Parte baja	50	3.30×10^{-4}

De las diferentes pruebas realizadas en la parcela experimental y en laboratorio con material extraído de la misma, se determina que hay en la parte superficial de la zona tres niveles de comportamiento similar; el primero de ellos tiene una profundidad de 70 cms, el siguiente entre los 70 y los 200 cms y un tercero a partir de los 2 metros, el cual aparentemente mantiene las mismas condiciones aún más allá de los 4 metros.

El nivel superficial está integrado por arcillas orgánicas plásticas y en menor proporción limos, con un contenido de agua muy variable, suelo con altos valores de plasticidad. Con

un predominio claro de las arenas, la infiltración es la más alta registrada en los estratos, resultado de la baja compactación y densidad del material.

Un nivel de transición es el segundo definido en el perfil, en el cual se incrementa notablemente la plasticidad de los materiales al disminuir el porcentaje de arenas gruesas y la completa ausencia de gravas; el contenido de agua también aumenta, lo que influye en la plasticidad, resultado de la alta infiltración del nivel superior; por el color del suelo, se puede asegurar que el contenido de materia orgánica disminuye considerablemente. Estas condiciones tienen por consecuencia un ligero incremento en la cohesión del material.

Finalmente, el tercer estrato identificado presenta un límite bien definido en color, plasticidad y granulometría; el estrato se muestra como semipermeable, pues además de disminuir el contenido de agua por la retención en los estratos más superficiales, el incremento de los sedimentos finos disminuye la infiltración, aunque el porcentaje de arenas es menor y la cohesión tiende a disminuir por esta razón y por el incremento de arenas gruesas; complementando, la densidad del suelo se incrementa, disminuyendo la porosidad.

La diferencia entre los primeros dos estratos y el tercero puede ser un indicativo para ubicar una posible superficie de falla y un comportamiento diferencial de la dinámica hidrológica conforme se incrementa la profundidad del perfil.

En conclusión, los resultados de las diversas pruebas realizadas en la parcela experimental aportan la información para establecer que las propiedades de los materiales del suelo favorecen la inestabilidad de la ladera. Por ejemplo, la conductividad hidráulica es alta, lo que favorece la infiltración y como consecuencia la saturación del suelo se puede presentar relativamente rápido con niveles de precipitación alto, lo que implica el incremento del peso en la ladera.

De las pruebas de granulometría se obtuvieron datos que demuestran un alto contenido de arenas finas en la parte superficial y arenas finas y gruesas en los niveles inferiores, por debajo de los dos metros de profundidad; dicho cambio del nivel se refleja también en las propiedades plásticas, pues el nivel superficial es más plástico en comparación con los ubicados a menos de 2 metros de profundidad, lo cual puede ser considerado como una potencial superficie de falla.

Bibliografía

Borja-Baeza, R. C. (2003). *Análisis de susceptibilidad y riesgos asociados a procesos de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla*. Tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, D. F., 156 p.

Díaz, E., Duarte, O., Cerana, J., Fontanini, P. (2003). Ajuste metodológico en la medición de la conductividad hidráulica saturada "in situ" en suelos vertisoles y entisoles de la República Argentina mediante el

permeámetro de Guelp. En Álvarez, B. y Marinero, P. *Estudios de la zona no saturada del suelo Vol. VI*, Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina.

Freeze, A. y Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Londres.

Godwin, R. J., Seig, D. A. y Allot, M. (1987). Soil failure and force prediction for soil engaging discs. *Soils use and management*, No.3, pp. 106-114.

Graux, D., (1970). *Fundamentos de mecánica de suelo, proyecto de muros y cimentaciones*. Editores Técnicos Asociados, Barcelona, 404 p.

Juárez-Badillo, E. y Rico-Rodríguez, A. (1996). *Mecánica de suelos*. Tomo I, Edit. Limusa, México.

Marcos-López, J. (2003). *Distribución espacial de los procesos de remoción en masa y riesgos asociados en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla*. Tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México., D. F.

Marrón, G. (n. d.). *Maquinaria Agrícola y Labranza*. Curso de capacitación, Departamento de Agronomía, UNS, Altos de Palihue.

Noriega-Rioja, I. (2005). *Deslizamientos de ladera ocasionados por lluvias intensas*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D. F., 104 p.

Reynolds, E. D. y Elrick, D. E. (1985). Measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship using the Guelph permeameter. Proceedings, National Water Well Association Conference on: Characterization and Monitoring of the

Vadose (Unsaturated) Zone. Denver, Colorado.

Reynolds, E. D. y Elrick, D. E. (1991). Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Journal of Soil Science*. 55, pp 633-639.

Sánchez-Titla, E. (2005). *Vulnerabilidad, deforestación e inestabilidad de laderas: una zonificación del riesgo en Zacatlán, Puebla*. Tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 182 p.

Schoeneberger, P. y Amoozegar, A. (1990). Directional saturated hydraulic conductivity and macropore morphology of a soil-saprolite sequence. *Geoderma*, Vol. 46, No.1, pp. 31-49.

Shin-Yu, S. y Yen-Jing, L. (2002). Effect of hydrating liquid on the hydraulic properties of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and geomembranes*, Vol 20, No. 1, pp. 19-38.

Soilmoisture Equipment Corp. (1991). Guelph permeameter 2800KI operating instructions.

Villareal-Lugo, P. A. (En Preparación). *Evaluación del peligro por inestabilidad en laderas de la colonia Morelos del municipio de Zaragoza, Pue.* Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Estudios de Posgrado e Investigación, 109 p.

CAPÍTULO 4 MODELACIÓN

4.1 Introducción

En los últimos años la modelación ha adquirido un papel importante en el estudio de los posibles efectos de los fenómenos naturales y su impacto en la sociedad. Lo anterior tiene como factores determinantes: el avance de los sistemas de computo que permiten generar diferentes escenarios del comportamiento del fenómeno estudiado; el desarrollo de los equipos diseñados con objetivos específicos para obtener información de los parámetros que influyen en la naturaleza y como punto determinante, el progreso en los aspectos teóricos de los diferentes procesos naturales, mismos que son complementados y redefinidos con los resultados de las modelaciones.

En síntesis un modelo, desde el punto de vista de las Ciencias de la Tierra, es una visión abstracta y simplificada de representar las características y comportamiento de una parte de la superficie terrestre debajo de ésta, con el fin de contar con una aproximación del comportamiento de los elementos de la naturaleza, mismo que aplica para un momento preciso o bien un lapso de tiempo en que las condiciones de los diversos parámetros que controlan el fenómeno se mantengan constantes (Chorley, 1967; Harvey, 1967).

El grado de certidumbre de los resultados de las modelaciones está condicionado por el conocimiento que se tenga del fenómeno analizado; el número de parámetros que interactúan en la ocurrencia de dicho fenómeno; la veracidad de la información que se recopile, obtenga o estime, su manejo y procesamiento óptimo; el diseño, operatividad y precisión de los programas y modelos empleados, y principalmente la base teórica indispensable para elegir la técnica o metodología adecuada para el tipo de estudio a realizar, poder así adaptar, modificar y aplicar el modelo elegido de forma correcta, reduciendo al mínimo el factor de incertidumbre o error.

En este último aspecto, cabe recordar que los modelos son tan solo aproximaciones de la realidad, acercamientos al comportamiento de un fenómeno o proceso, cuya variabilidad es proporcional al número de parámetros que influyen en su ocurrencia, es decir a mayor número de parámetros (y su complejidad), mayor será el número de posibles escenarios. Asimismo, los estudios previos, junto con la recopilación de información relacionada a la ocurrencia de los fenómenos, son importantes en la discriminación de los resultados y en su interpretación.

Independientemente del modelo a desarrollar, diseñar o emplear en los trabajos de investigación, existen ciertos puntos que son parte fundamental de la investigación: la interpretación, que requiere experiencia por parte del investigador; conocimiento del proceso en estudio y de los factores que inciden en él; comprensión de los aspectos físicos, sociales y cualquier otro que incida en el proceso; el manejo correcto de las pruebas necesarias para obtener la información de los parámetros que requiera el modelo y su manejo apropiado y, por último, claridad en las conclusiones que se generen a partir de la modelación.

4.2 Tipos de modelos

La modelación es una parte integral de los estudios geomorfológicos y, en general, de las Ciencias de la Tierra y, por lo tanto, en los estudios de la inestabilidad de laderas. Los métodos empleados y las propuestas de perfeccionamiento son numerosas, sin embargo, existen tipos de modelos ampliamente utilizados, ya sea por la precisión de sus resultados o por el objetivo por el cual fueron diseñados (Anderson y Sambles, 1988).

Durante años se han realizado intentos por clasificar los modelos de análisis de procesos geomorfológicos, desde diferentes puntos de vista, siendo una de las clasificaciones más convencionales la que divide a éstos en determinísticos, probabilísticos y modelos de optimización (Haines y Petch, 1986). En las primeras fases de una investigación es conveniente establecer en cuál de estos tipos se ubica el modelo a emplear, con el fin de establecer una base teórica adecuada a los objetivos planteados.

Los avances tecnológicos y el empleo y mejoramiento de nuevos sistemas computacionales, así como de equipos especializados y el perfeccionamiento de las pruebas de laboratorio han acelerado la creación de nuevos modelos, diversificando y especializando sus objetivos y métodos, lo que ha dificultado su ordenamiento en una clasificación universalmente aceptada.

Un punto importante a considerar en la modelación es su carácter temporal, es decir, si se recrean escenarios previos o pasados, con el objetivo de entender procesos antiguos o bien su influencia en los actuales, o bien modelos de predicción de situaciones futuras, con objetivo de preparación, mitigación o prevención, por ejemplo de fenómenos potencialmente peligrosos o que representen una amenaza.

El perfeccionamiento de los modelos existentes o bien el diseño de nuevas propuestas es una tarea permanente, con objetivos de mejorar los resultados obtenidos. Ante este hecho, Leimkuhler (1982) ha destacado que son necesarias tres condiciones: a) los modelos tienen que ser transparentes en su estructura y en la información empleada; b) deben de contar con un nivel de detalle acerca de sus técnicas y, en general, de la metodología empleada clara, con el fin de poder incorporar parámetros o elementos faltantes; y c) si bien deben de considerar procesos en particular, su objetivo a largo plazo es poder aplicar tales modelos, con las adecuaciones necesarias, en otras zonas y en diferentes períodos.

La elección o diseño de un modelo a aplicar en estudios específicos debe de considerar algunos aspectos básicos, con el fin de obtener los resultados que se pretenden, en el período estimado y que cubran las expectativas de detalle y certidumbre previstas. Por ejemplo, es importante establecer el grado de precisión que se desea en los resultados, pues generalmente a mayor detalle, mayor complejidad del modelo a emplear e incluso aumenta el tiempo destinado al estudio. Un punto esencial es el tipo de procesos a modelar, pues cabe recordar una característica de los procesos naturales: a mayor frecuencia de éstos, menor magnitud y viceversa; además, es requisito tener un conocimiento amplio del proceso a estudiar y de los factores que inciden en él, pues la distribución, frecuencia y magnitud de otros procesos inciden directamente en el comportamiento del evento a modelar (Anderson y Calver, 1977).

Otro punto fundamental en la elección del modelo adecuado a emplear en el estudio de un proceso, en particular, es considerar el tiempo base necesario para lograr obtener

resultados apropiados, todo ello acorde con las características del fenómeno o procesos en estudio, pues estos tiempos pueden variar desde algunos minutos hasta años. Un ejemplo del primer caso es el modelo propuesto por Iverson (1986) para el comportamiento del material removido durante un flujo de lodo, mientras Andrews y Mahaffy (1976) desarrollaron un análisis de las variaciones en el espesor de una capa de hielo en un témpano en diferentes años, lo cual es un claro ejemplo de un estudio de período largo de investigación.

4.3 Modelación de inestabilidad de laderas

En el caso concreto de los procesos de remoción en masa, Harvey (1967) consideró que un modelo es la representación temporal de algunas características del terreno, para ser estudiadas y poder obtener una aproximación de la realidad. Los modelos empleados en la inestabilidad de laderas tienen diversas bases teóricas, pero el uso del modelo infinito de laderas es uno de los más empleados, aunque bajo diferentes métodos y objetivos.

Brunsdén (1999) realizó una recopilación de los tipos más frecuentes de modelos empleados en los estudios de inestabilidad de laderas, donde destaca en primer término los modelos de estabilidad de laderas y los divide en modelos estocásticos y modelos dinámicos. De manera particular destaca los modelos hidrológicos, en los cuales las propiedades hidrológicas de los materiales adquieren un papel fundamental en la estabilidad del terreno, por ejemplo, la conductividad hidráulica, la infiltración y la presión de poro. Otro tipo de modelos utilizados para comprender el comportamiento de los materiales son los modelos reológicos; sin embargo, son poco difundidos entre los geomorfólogos y básicamente son empleados en análisis de ingeniería.

Existen tres aspectos generales a considerar en la modelación de la inestabilidad de una ladera: a) considerar el límite de equilibrio natural del terreno, determinado por las características físicas, las propiedades de los materiales y otros factores externos, por ejemplo, la influencia antrópica; b) el aspecto temporal, pues la ocurrencia, reactivación e incluso el desarrollo de un proceso de remoción en masa presenta diferente velocidad de avance, acorde a las condiciones que detonaron su inicio y su duración puede ser de algunas horas, días e incluso años hasta detener su avance de forma permanente o temporal; y c) los factores que inciden directamente en su ocurrencia o reactivación, por ejemplo un proceso puede acelerar su avance en la temporada de lluvias y reducirlo en el período de estiaje, o bien acelerar permanentemente su desarrollo, como en el caso de la actividad sísmica o la influencia del hombre (Anderson y Richards, 1987).

Desde otra perspectiva complementaria, Brunsdén (1999) también señala que existen dos tipos de clasificación para los modelos que analizan la inestabilidad de las laderas: los modelos estáticos y los modelos de procesos dinámicos. Los primeros consideran a los deslizamientos en su estado de reposo o sin movimiento y analizan las posibles causas que pueden ocasionar su reactivación. Ejemplos de trabajos de estas modelaciones son los desarrollados por Skempton y Delory (1957), quienes emplearon el modelo infinito de laderas para modelar deslizamientos con superficies de falla planas; por su parte, Bishop (1955) y Janbu (1957) utilizaron el mismo modelo pero en deslizamientos rotacionales simples. En cuanto a los modelos de procesos dinámicos, que son los que se encuentran activos independientemente de su velocidad de desplazamiento, destacan los trabajos de Dikau *et al.* (1996) quienes consideraron el cambio climático y su incidencia en la inestabilidad; Moore y Brunsdén (1996) realizaron modelaciones tomando en cuenta la

presión de poro en la superficie de falla; Bromhead (1996) analiza los procesos erosivos modificados por la actividad antrópica y Dietrich *et al.* (1992) basaron sus modelos en la topografía predominante.

En un sentido estricto, la modelación de la estabilidad del terreno que considera los factores hidrológicos que la controlan no ha sido tan difundida y aplicada como otras (como por ejemplo el factor de seguridad topográfico, Anderson y Richards (1987)). Este tipo de modelaciones considera tres diferentes casos: a) cuando se desconocen o no es posible acceder a la información de los parámetros hidrológicos; b) cuando es necesario simular el comportamiento interno de los materiales con base a información estimada o calculada indirectamente; y por último, c) cuando se tiene la información para modelar diferentes escenarios futuros (Anderson y Kneale, 1984).

Entre los trabajos que han considerado la modelación de la dinámica hidrológica y su influencia en la inestabilidad se encuentra el de Angeli *et al.* (1998) que integran información de los niveles freáticos en diferentes puntos de un deslizamiento en Italia a distintas profundidades para relacionar la dinámica de infiltración con la reactivación del proceso; un estudio análogo es realizado por Van Asch *et al.* (1996). Posteriormente, Lida (1999) elaboró una predicción de deslizamientos rotacionales considerando factores determinísticos (topografía, tipo y profundidad del suelo, propiedades de los materiales, etc.), pero incluyendo en su modelo los eventos de precipitación, su recurrencia e intensidad para realizar sus estimaciones.

De manera más sistemática, Burton y Bathurst (1998) aplicaron un modelo de probabilidad de ocurrencia de deslizamiento dentro de una cuenca en Escocia, aplicando el programa SHETRAN (sistema de modelado de la distribución espacial, hidrología y transporte de sedimentos), el cual considera la precipitación (lluvia y nieve) para delimitar las zonas de mayor susceptibilidad a deslizamientos rotacionales, aunque no realizan mediciones de la dinámica hidrológica interna y sólo realizan estimaciones de la saturación del suelo. Por otro lado, Crozier (1999) detalla un modelo de predicción de ocurrencia de deslizamientos considerando a la lluvia como el factor desencadenante, pero actuando bajo la influencia de las condiciones antecedentes de saturación del suelo y las propiedades de los materiales que conforman la ladera en estudio; todo ello tendiendo como base un modelo de la condición del agua antecedente (AWSM-Antecedent Water Status Model). Otros trabajos similares son los realizados por Montgomery y Dietrich (1994), Wu, *et al.* (1995), Hughes, *et al.* (1998), Crosta y Dal Negro (2003), Crosta y Frattini (2003), Guimaraes, *et al.* (2003), entre otros.

Una metodología novedosa y reciente involucra la combinación de modelos del comportamiento hidrológico con modelos de análisis de estabilidad, con la finalidad de efectuar una simulación entre la dinámica hidrológica y la predicción de futuros escenarios de estabilidad. Entre estos cabe destacar el CHASM (Combined Hydrology And Stability Model), desarrollado en la Universidad de Bristol, el cual integra un modelo hidrológico con el modelo de estabilidad rotacional de Bishop (figura 4.1). CHASM es un modelo bidimensional hidrológico finito de ladera, que permite predecir las presiones de poro transitorias, considerando distintas cubiertas de vegetación. El uso de este modelo permite deducir la interacción vegetación-inestabilidad, tanto para condiciones al momento de su aplicación como para modelar escenarios futuros. Dicho modelo ha sido empleado para diversas investigaciones (Wu, *et al.*, 1979; Waldron y Dakessian, 1981; Collison y Anderson, 1996; Ibraim y Anderson, 2002). Del mismo modo, el modelo ha sido

complementado por Wilkinson *et al.* (2002) con una extensión del programa que permite interpretar los efectos de la vegetación en la inestabilidad de la ladera en análisis.

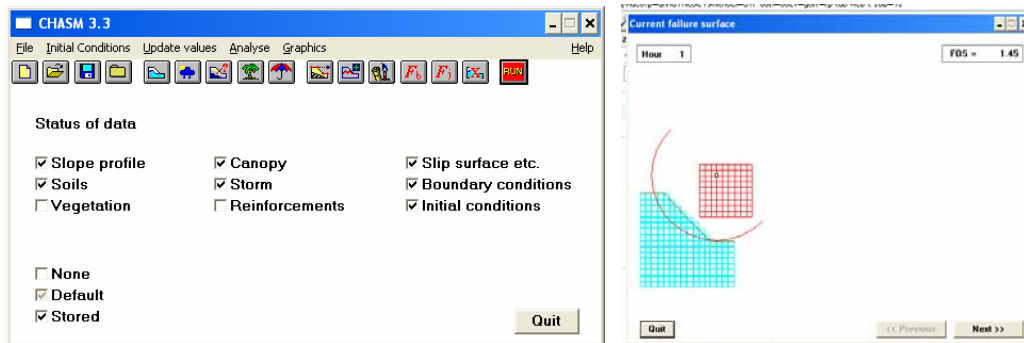


Figura 4.1 Pantalla principal del programa CHASM.

Un modelo que realiza una vinculación similar a CHASM y permite elaborar diversos modelos de comportamiento futuro y simulaciones de respuesta ante ciertas variaciones, principalmente de tipo hidrológico es SLOPE/W (GEO-SLOPE, 1994), el cual utiliza diversos modelos de estabilidad (modelo infinito de laderas, modelo simple de Janbu) y un modelo de la dinámica hidrológica (SEEP/W) (Figura 4.2). Dicho modelo requiere de información de parámetros hidrológicos y de información para determinar el factor de seguridad.

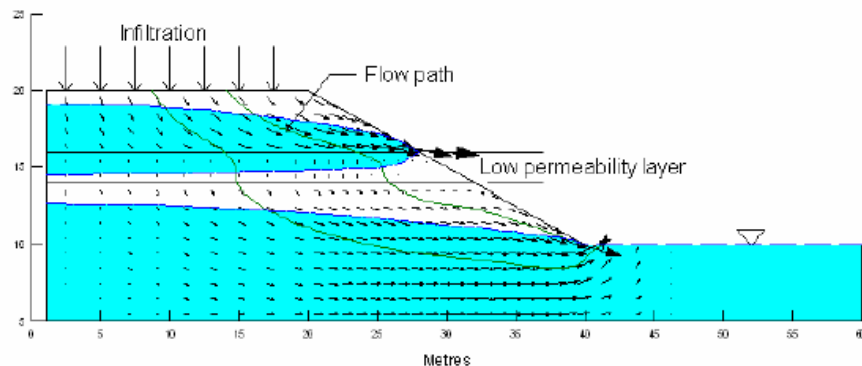
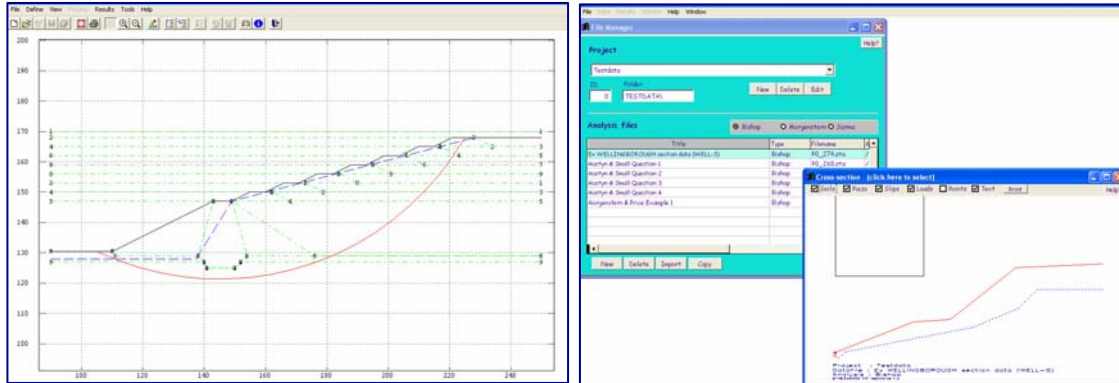


Figura 4.2 Ejemplo de modelación realizada con el programa SEEP/W (GEO-SLOPE, 1994).

Otros modelos empleados en la modelación de laderas y aceptados por su funcionalidad son GALENA (figura 4.3a), que emplea las ecuaciones de Bishop y Sarma para realizar modelos bidimensionales, considerando básicamente las variaciones en el nivel freático y los cambios en la pendiente; el programa GFA2D realiza un análisis de falla en dos dimensiones y con base en la ecuación de Mohr, puede estimar el factor de seguridad a diferentes profundidades, pero sin que varíen las propiedades de los materiales; el *software* STABLE (figura 4.3b) incluye un análisis de estabilidad con la fórmula propuesta por Morgenstern-Price, donde la granulometría del suelo es determinante en la probabilidad de falla, así como la geometría y la presión de poro.

Además de los programas descritos en los párrafos anteriores, existen otros que realizan funciones similares, parciales o que se pueden complementar para estimar la estabilidad de laderas, de los cuales también se pueden mencionar a GEOSTAB, SHALSTAB, SLIDE, SLOPE y TSLOPE (Tabla 4.1) junto con los programas a emplear en el presente estudio DLISA y LISA cuyas particularidades de describen más adelante.



Figuras 4.3 a y b. La imagen izquierda (a) ejemplo de modelación con el programa GALENA; la figura derecha (b) se muestra el cálculo del factor de seguridad del programa STABLE.

Tabla 4.1 Modelos para calcular la estabilidad de una ladera utilizando ecuación infinita de laderas

Programa	Sistema Operativo Base	Programa	Sistema Operativo Base
CADS	Win95/98, WinNT, Win2000,	Slope (ejeSoft)	Win3x, Win95/98
CHASM	Win3x, Win95/98, WinNT, UNIX	Slope (Oasys)	DOS, Win95/98, WinNT
CLARA-W	Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP	SLOPE 12	Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP
DC-Slope	Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP	Slope 2000	Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP, Linux
DLISA	DOS	SLOPE 8R	DOS
ESAU	DOS, UNIX, HP	SLOPE STABILITY	Win95/98, WinNT, WinXP
FLAC/Slope	Win95/98, WinNT, Win2000	Slope stability analysis	Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP
Galena	Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP	SLOPE/W Basic Edition	Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP
GEOSTAB	Win95/98, WinNT	Slope-W	Win95/98, WinNT y XP
GeoStar	DOS	SLOPNC	Win95/98, WinNT,
Geo-Tec B	Win95/98, WinNT, Win2000, Mac,	Stabl for Windows	Win95/98, WinNT,
GFA2D	DOS, Win3x, Win95/98	STABLE	DOS, Win3x, Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP
GGU-SLICE	Win95/98, WinNT, Win2000	STABLEPRO for Windows	Win3x, Win95/98
GGU- STABILITY	Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP	STB	Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP
GSlope	Win3x, Win95/98, WinNT	STEDwin 2.6	Win3x, Win95/98, WinNT
GSTABL7	Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP	SVDynamic	Win3x, Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP
I.L.A.	Win95/98, WinNT, Win2000 y XP	SWASE	DOS
LISA	DOS	TALREN 4	Win95/98, NT, 2000 y XP
MStab	Win95/98, WinNT, Win2000	Taylor	PocketPC Windows
PCSTABL 6	DOS	TSLOPE	Web/Java, Java client
QSIM	Win95/98, Win2000, WinXP	TSLOPE3	DOS, UNIX
REAME2004	Win95/98, WinNT, Win2000 y XP	TSTAB	DOS, UNIX
Sarma	DOS	UTEXAS3	DOS
SHALSTAB	Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP, ArcView	WinStabl	Win3x, Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP
Slide	Win95/98, WinNT, Win2000, WinXP	XSLOPE for Windows	Win3x, Win95/98
SLIP	DOS	XSTABL	DOS

Índice de estabilidad

El índice de estabilidad se define como la probabilidad de que un punto o zona sea estable, al asumir una distribución uniforme de los parámetros que determinan la estabilidad del terreno. El grado de resistencia a la falla o índice de estabilidad de una ladera se expresa generalmente por medio del Factor de Seguridad (FS), que es el cociente resultante de la resistencia al corte del suelo y los esfuerzos de corte que pueden generar del terreno sobre una superficie de falla. Los rangos que se obtienen oscilan con valores entre cero (inestable), 1 (límite de estabilidad) y más de 1 (estable) (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Ejemplo de definición de clases de estabilidad, elaborado por Pack *et al.*, 2001.

Condición	Clases	Estado de predicción	Rangos del parámetro	Rango de estabilidad	Posible influencia de Factores
$IE > 1.5$	1	Zona de ladera estable	Rango del modelo donde no hay inestabilidad	ESTABLE	Factores desestabilizadores mayores son requeridos para crear inestabilidad
$1.5 > IE > 1.25$	2	Zona moderadamente estable	Rango del modelo donde no hay inestabilidad		Factores desestabilizadores moderados son necesarios para la inestabilidad
$1.25 > IE > 1.0$	3	Zona de ladera casi estable	Rango del modelo donde no hay inestabilidad	INESTABLE	Factores desestabilizantes menores pueden provocar inestabilidad
$1.0 > IE > 0.5$	4	Límite inferior de inestabilidad	Rango desfavorable requerido para la inestabilidad		No se requiere de factores desestabilizantes
$0.5 > IE > 0.0$	5	Límite superior de inestabilidad	Rango en el cual se requiere estabilidad		
$0.0 > IE$	6	Zona de mayor inestabilidad	Rango del modelo donde no hay estabilidad		Se requiere de factores de estabilidad

De forma sintetizada, el factor de seguridad (FS) usualmente se expresa desde el enfoque de un análisis de estabilidad como el cociente mínimo entre la resistencia media al esfuerzo cortante (T_f) y el esfuerzo cortante medio actuante (t) en una ladera (Noriega-Rioja, 2005). Lo anterior tiene por resultado matemático lógico que cuando $T_f > t$, el cociente, y por lo tanto el FS, es mayor a la unidad. Cuando $T_f = t$ indica un FS =1, es decir existe un equilibrio entre el esfuerzo cortante medio y la resistencia media al esfuerzo cortante.

El cálculo del factor de seguridad se determina empleando el modelo infinito de estabilidad de laderas (figura 4.4), cuya ecuación es la siguiente:

$$FS = \frac{C_r + C'_s + \cos^2 \alpha [q_o + \gamma(D - D_w) + (\gamma_{sat} - \gamma_w)D_w] \tan \phi'}{\sin \alpha \cos \alpha [q_o + \gamma(D - D_w) + \gamma_{sat} D_w]}$$

Donde,

- FS = Factor de seguridad
 α = Pendiente (en grados)
 D = Profundidad del suelo (metros)
 C_r = Cohesión de las raíces (gr/cm^2)
 q_o = Carga del peso de vegetación (gr/cm^2)
 C'_s = Cohesión efectiva del suelo kPa (Kilopascales)
 ϕ' = Ángulo de fricción interna (en grados)
 γ = Peso del suelo en condiciones naturales (gr/cm^3)
 γ_{sat} = Peso del suelo saturado (gr/cm^3)
 γ_w = Densidad del agua (gr/cm^3)

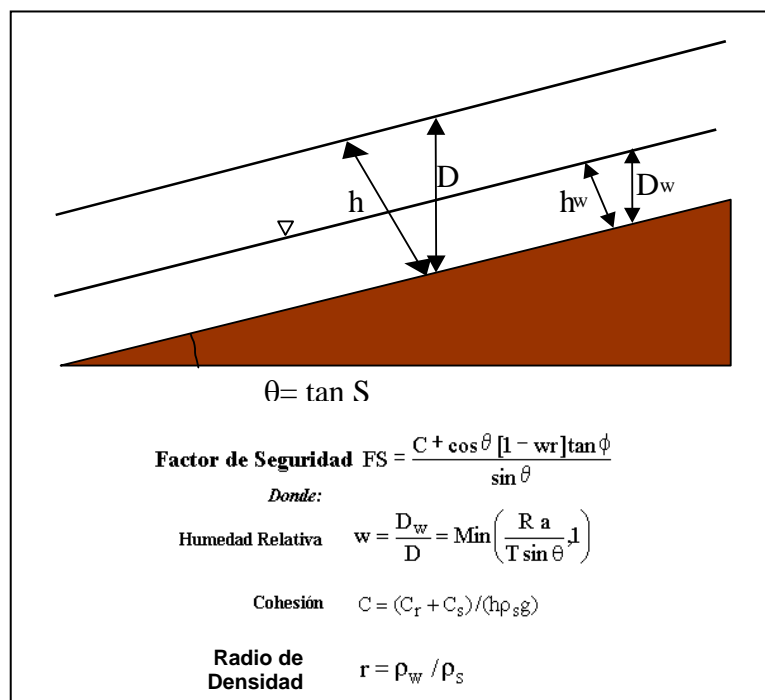


Figura 4.4 Modelo infinito de estabilidad de laderas (Pack *et al.*, 2001)

El análisis de la estabilidad de una pendiente se puede realizar para dos distintos escenarios: *análisis previo a la ruptura*, en donde se aplican cálculos de seguridad en un sentido global que muestre cómo la pendiente se puede comportar en el momento de la ruptura de la cohesión. En un *análisis posterior a la ruptura*, se recopila suficiente información para predecir los procesos de remoción latentes en el declive y actuar conforme a las condiciones que la situación requiera (Cassale y Margottini, 2000). Lo

anterior puede ser transportado al marco de los riesgos, considerando que el primer ubicarse en el proceso de la prevención, en tanto que el segundo sería de tipo reactivo. Los datos que se requieren para interpretar la estabilidad de una ladera son su geología, resistencia de los materiales, las condiciones hidrológicas, la porosidad y su permeabilidad, entre las más importantes.

4.4 Modelación de laderas en la localidad de La Unión, Tlatlauquitepec

La Sierra Norte de Puebla históricamente ha sido escenario de la ocurrencia de procesos de remoción en masa, dadas sus condiciones de relieve, litología y morfología en combinación con los regímenes de precipitación, que llegan a ubicarse entre los más altos del país. Estas han tomado gran relevancia en las últimas décadas por el incremento de la presencia humana en la región.

Una breve descripción física del municipio de Tlatlauquitepec ofrece una panorámica general de la interacción de factores que favorecen la inestabilidad: relieve montañoso con pendientes abruptas y barrancos originados por la alta disección, además de valles profundos con erosión fluvial intensa; complejidad litológica con numerosas áreas de contacto entre materiales con diferentes propiedades; altos niveles de precipitación y acelerado proceso de deforestación, que incide directamente en la infiltración y la saturación del suelo, son condiciones que combinadas condicionan la inestabilidad regional, misma que es acelerada o detonada por otros factores como fenómenos meteorológicos extraordinarios y la actividad antrópica.

Ejemplos recientes de la ocurrencia de procesos de ladera que afectan a la población son las consecuencias causadas por la depresión tropical número 11, en el año de 1999, que afectó a los estados de Puebla, Veracruz, Hidalgo y Oaxaca, con daños económicos superiores a 2,300 millones de pesos sólo en el Estado de Puebla, mientras que alrededor de 400 personas perdieron la vida en los días que se presentaron las lluvias extraordinarias, este último factor desencadenante de cientos de procesos de remoción en masa en la región (Bitrán, 2000). Dicho desastre puso en evidencia como ningún otro la vulnerabilidad física de la Sierra Norte a la ocurrencia de procesos gravitacionales e inundaciones, el impacto que pueden tener estos procesos en la población y la necesidad de contar con estudios de riesgo por deslizamientos y análisis más profundos acerca de los mecanismos causales de la inestabilidad. Más recientemente, en octubre del 2005, el impacto del huracán Stan causó también numerosos daños aunque éstos no fueron tan trágicos como los de 1999.

Durante la etapa de selección de la parcela a instrumentar y modelar, se buscó que la misma presentara condiciones de inestabilidad y una vez establecida la ladera a modelar, se obtuvieron diversas muestras representativas de los materiales, con el fin de obtener información de las propiedades de los mismos. Cabe destacar que posterior a la realización de estas actividades de campo y de procesar las muestras en laboratorio y determinar el factor de seguridad de la parcela, a consecuencia del impacto del huracán Stan, se presentó un movimiento de remoción en masa en la ladera. Este hecho permitió validar la modelación realizada y el cálculo del factor de seguridad.

Diversos investigadores han aplicado la ecuación infinita de laderas para evaluar la posibilidad de que se presente un proceso de ladera en diferentes condiciones, siendo frecuentes los trabajos que consideran la influencia de los sistemas de raíces y la carga

de la vegetación (Swanston, 1982; Burroughs, 1984; Dietrich et al., 1986; O'Loughlin, 1974; Swanston, 1974; Ziemer and Swanston, 1977; Burroughs and Thomas, 1977; Ziemer, 1981; O'Loughlin and Ziemer, 1982; and Greenway, 1987). Como resultado de algunos de estos trabajos, se han propuesto modelos para determinar la probabilidad de falla de una ladera, cada uno con características particulares, objetivos específicos y manejo de parámetros por cada programa.

Entre los modelos de mayor aceptación se encuentran los diseñados por USDA Forest Service: DLISA y LISA (Figuras 4.5). Su plataforma matemática está conferida a una simulación estocástica basada en el método de Monte Carlo, considerando la ecuación infinita de laderas. Los modelos DLISA (Deterministic Level Stability Análisis) y LISA (level stability analysis) son de tipo bidimensional; utilizan la información de las características físicas del terreno y de las propiedades de los materiales para un análisis de estabilidad de la ladera en función de la ecuación infinita de laderas. Los valores de los diferentes parámetros que indican las propiedades mecánicas y características físicas del suelo son procesados por estos programas para determinar la probabilidad de falla de una ladera, es decir, calculan su factor de seguridad y la posibilidad de que se presente un proceso de remoción en masa en la misma.

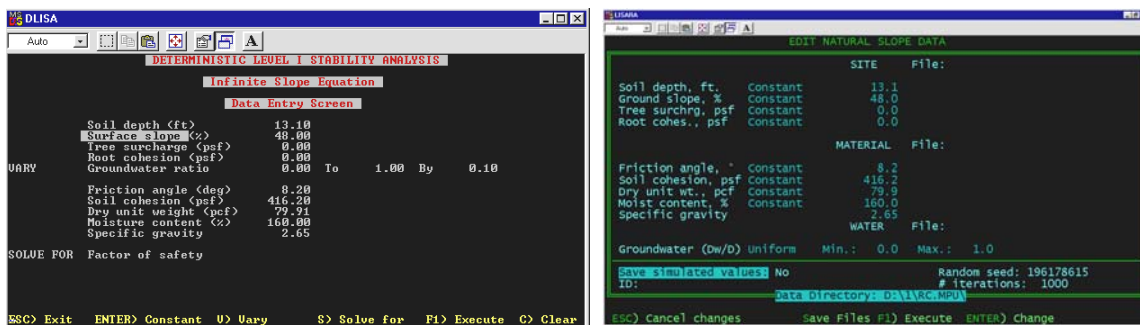


Figura 4.5 Pantallas de los programas DLISA y LISA.

Una de ventajas principales del programa DLISA es que puede estimar el valor de algunos parámetros, en el supuesto de no se contar con el valor de una propiedad o característica particular; por ejemplo, profundidad de suelo, pendiente, la cohesión de las raíces, la carga de la vegetación (el peso de árboles aplicados uniformemente sobre la ladera), el ángulo de fricción interna y la cohesión del suelo. Todo ello en función de las interacciones de las variables conocidas, de tal manera que con frecuencia se emplean los programas DLISA y LISA para realizar un análisis de sensibilidad para identificar las variables más importantes en la ecuación infinita de laderas y el peso específico de cada una de ellas.

El programa LISA calcula la probabilidad de falla en una ladera hasta para 1000 interacciones de los parámetros, mostrando los valores del factor de seguridad más frecuentes y representativos. El programa puede ser adaptado a las necesidades u objetivos del trabajo en desarrollo, por lo que se pueden introducir rangos de valores de un parámetro y el programa realiza los cálculos del factor de seguridad para cada valor. Por ejemplo, si existen variaciones en la pendiente, el programa calcula el FS para cada una de estas variaciones.

Los pasos a seguir para emplear el programa LISA son los siguientes:

1. Introducir los valores de cada parámetro, bien sean los valores reales o el valor estimado para un parámetro en específico. En el caso del presente trabajo, fue necesario convertir los valores obtenidos del sistema métrico o sistema internacional, al sistema inglés pues este último es el empleado por DLISA y LISA.

2. Seleccionar un tipo de distribución para cada parámetro, donde el valor se puede considerar constante o variable. Posteriormente, el programa realiza las combinaciones en función del tipo de distribución especificado. Una vez realizadas las combinaciones, el *software* calcula el factor de seguridad para cada una de éstas, así como algunos datos estadísticos relacionados a estos resultados, por ejemplo la media, valores mínimo y máximo y desviación estándar. De esta forma, el programa finalmente determina la probabilidad de falla de la ladera, es decir la posibilidad numérica de que bajo las condiciones introducidas en cada parámetro, se presente un proceso de ladera.

El cuadro 4.3 muestra los valores de los parámetros obtenidos a partir de pruebas de laboratorio y de campo que fueron utilizados para la modelación con el programa DLISA con la finalidad de estimar el factor de seguridad y la probabilidad de falla.

Tabla 4 .3 Valores de las propiedades físicas y del suelo de la ladera (en cursivas se anotan los valores en el sistema inglés, empleado por el programa DLISA).

PARÁMETRO	VALOR
Profundidad del suelo	34metros (13.1 pies)
Pendiente	25° (48%)
Carga de los árboles	0 Kg/m ² (psf libras por pie cuadrado)
Cohesión de las raíces	0 Kg/m ² (psf libras por pie cuadrado)
Ángulo de fricción interna	8.2°
Cohesión del suelo	20.81kilopascales -212.20 gr/cm ² - (416.2 psf)
Peso del suelo en condiciones normales	1.705 gr/cm ³ (106 pcf libras por pie cúbico)
Contenido de humedad	160%
Fuerza específica de gravedad (valor constante)	2.65
Tabla de agua (Nivel freático)	0-1

Los datos de los parámetros introducidos en los programas DLISA y LISA para modelar el comportamiento de la ladera en estudio, calcularon un factor de seguridad de .93 en condiciones normales. Esto significa que la ladera presenta una condición cercana o en el límite del equilibrio, pero que puede ser desestabilizada la variación de uno o más de los factores que regulan su estabilidad, por ejemplo la precipitación.

Como resultado de la misma modelación, pero considerando que la ladera se encuentre saturada, por ejemplo durante una precipitación intensa, el factor de seguridad es de .79, es decir cuando el nivel freático alcanza la superficie y la infiltración ha llegado a su máximo posible, los cambios en la presión de poro, el peso del suelo y la cohesión del material varían desestabilizando la ladera, con lo que la posibilidad de falla se incrementa notablemente. En el cuadro 4.4 se muestra la variación del factor de seguridad en relación con el cambio del valor de los parámetros que rigen la estabilidad, tanto en condiciones normales como bajo saturación de la ladera. Estos resultados permiten establecer algunas tendencias, pero son insuficientes para realizar una comparación del peso específico de cada parámetro, por lo que fue necesario realizar un análisis de sensibilidad con mayor detalle, el cual se describe más adelante.

Tabla 4.4 Variación del factor de seguridad en función de los cambios en el valor de cada parámetro

Profundidad del suelo (metros)	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6	6.3
FS **	6.05	3.96	2.98	2.42	2.05	1.79	1.60	1.45	1.33	1.24	1.16	1.09	1.04	0.99	0.95	0.92	0.88	0.85	0.83	0.80
FS (con suelo saturado)	4.9	3.18	2.37	1.90	1.60	1.39	1.23	1.10	1.01	0.93	0.86	0.81	0.76	0.72	0.68	0.65	0.60	0.58	0.55	0.54
Pendiente (grados)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
FS **	1.99	1.85	1.74	1.63	1.54	1.46	1.39	1.33	1.27	1.22	1.17	1.13	1.09	1.06	1.02	0.99	0.97	0.94	0.92	0.90
FS (con suelo saturado)	1.45	1.35	1.27	1.19	1.13	1.07	1.02	0.97	0.93	0.90	0.86	0.83	0.80	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68	0.65
Cohesión de las raíces (gr/cm ²)	102	96.9	91.8	86.7	81.6	76.5	71.4	66.3	61.2	56.1	51	45.9	40.8	35	30.6	25.5	20	15.3	10.2	5.1
FS **	1.24	1.22	1.21	1.19	1.18	1.16	1.15	1.13	1.12	1.10	1.09	1.07	1.06	1.04	1.03	1.01	0.99	0.98	0.96	0.95
FS (con suelo saturado)	1.09	1.08	1.06	1.05	1.03	1.02	1	0.99	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.88	0.86	0.85	0.83	0.82	0.80
Fricción interna (grados)	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
FS **	1.39	1.35	1.31	1.27	1.23	1.19	1.15	1.11	1.08	1.04	1	0.97	0.93	0.90	1.87	0.83	0.80	0.77	0.74	0.70
FS (con suelo saturado)	10.2	1	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.88	0.86	0.84	0.82	0.81	0.79	0.77	0.75	0.72	0.70	0.69	0.67	0.65
Cohesión (gr/cm ²)	303.5	295.8	288.1	280.5	272.8	265.2	257.5	249.9	242.2	234.6	226.9	219.3	211.6	204	196.3	188.7	181	173.4	165.7	158.1
FS **	1.21	1.18	1.16	1.14	1.11	1.09	1.07	1.05	1.02	1	0.98	0.96	0.93	0.91	0.89	0.86	0.84	0.82	0.80	0.77
FS (con suelo saturado)	1.08	1.06	1.04	1.01	0.99	0.97	0.95	0.92	0.90	0.88	0.85	0.83	0.81	0.79	0.76	0.74	0.72	0.69	0.67	0.65

* El sombreado en gris claro resalta los valores inferiores a 1, que representan un desequilibrio entre fuerzas internas y externas y, por lo tanto, inestabilidad en la ladera

** Factor de seguridad en condiciones normales

Un punto importante a determinar en el presente trabajo es la influencia en el cambio de uso de suelo en la inestabilidad de laderas y una forma adecuada de establecer esta relación deforestación-inestabilidad fue aplicar el modelo DLISA y LISA para una ladera que tuviera condiciones similares a la parcela en estudio en cuanto a pendiente, litología, orientación del declive y tuviera el mismo contexto en cuanto a clima, es decir, no se encontrara lejos de la ladera en análisis, pero que tuviera una cobertura de vegetación poco alterada; dicha ladera fue ubicada dentro de la localidad de La Unión, aproximadamente a 400 metros de distancia (figura 4.6).



Figura 4.6 Ladera de Control

La ladera de control o de referencia está cubierta por bosque de pinos con una altura promedio de 20 metros, así como sotobosque que la cubre en su totalidad. Para poder aplicar la ecuación infinita de laderas, empleando los programas ya descritos, se realizaron pruebas similares a la parcela experimental con la metodología detallada previamente, para posteriormente calcular el factor de seguridad. Los parámetros empleados se especifican en el cuadro 4.5.

Tabla 4.5 Valores de las propiedades físicas y del suelo de la ladera de control.

PARÁMETRO	VALOR
Profundidad del suelo	3 metros (9.8 <i>pies</i>)
Pendiente	29° (58)
Carga de los árboles	15.3 Kg/m ² 1.5 kPa (30 <i>psf</i> libras por pie cuadrado)**
Cohesión de las raíces	89.2 Kg/m ² 8.75 kPa (100 <i>psf</i> libras por pie cuadrado)**
Ángulo de fricción interna	8.12°
Cohesión del suelo	20.42 kilopascales -208.82 gr/cm ² - (408 <i>psf</i>)
Peso del suelo en condiciones normales	1.705 gr/cm ³ (106 <i>pcf</i> libras por pie cúbico)
Contenido de humedad	50 %
Fuerza específica de gravedad(valor constante)	2.65
Tabla de agua (Nivel freático)	0-1

** Valores obtenidos de literatura especializada (Waldron y Dakessian, 1982; Cofie *et al.*, 2000).

De acuerdo con los resultados obtenidos por los modelos DLISA y LISA, el factor de seguridad de la ladera de control en condiciones normales es de 1.2, es decir la ladera es estable y sería necesario que un factor externo de gran magnitud impactara en la misma

para desestabilizarla, por ejemplo una serie de precipitaciones por demás extraordinarias; en este último caso, es decir un escenario en que la ladera se encontrara saturada, su factor de seguridad calculado sería de 1.06, lo que significa que se encontraría en el límite de la estabilidad

4.5 Validación de los resultados de modelación

Previamente se estableció que durante el proceso de elaboración del presente trabajo y posterior al cálculo del factor de seguridad de la ladera en estudio, el Huracán Stan impactó en el territorio nacional y particularmente en la Sierra Norte de Puebla, causando daños en la población y cuantiosas pérdidas económicas en diferentes municipios de la sierra, entre ellos el municipio de Tlatlauquitepec. Particularmente en la localidad de La Unión, Stan originó lluvias extraordinarias, mismas que fueron las más intensas durante el año 2005, que tan sólo en tres días superaron los 500 mm de precipitación acumulada (del 4 al 6 de octubre), lo cual supera en más del 50% la media anual del mes de octubre (figura 4.7). Este hecho tuvo como consecuencia la saturación de la ladera, con cambios en las propiedades físicas (peso del suelo) y mecánicas de los materiales (cohesión, presión de poro) y el consecuente incremento de la inestabilidad.

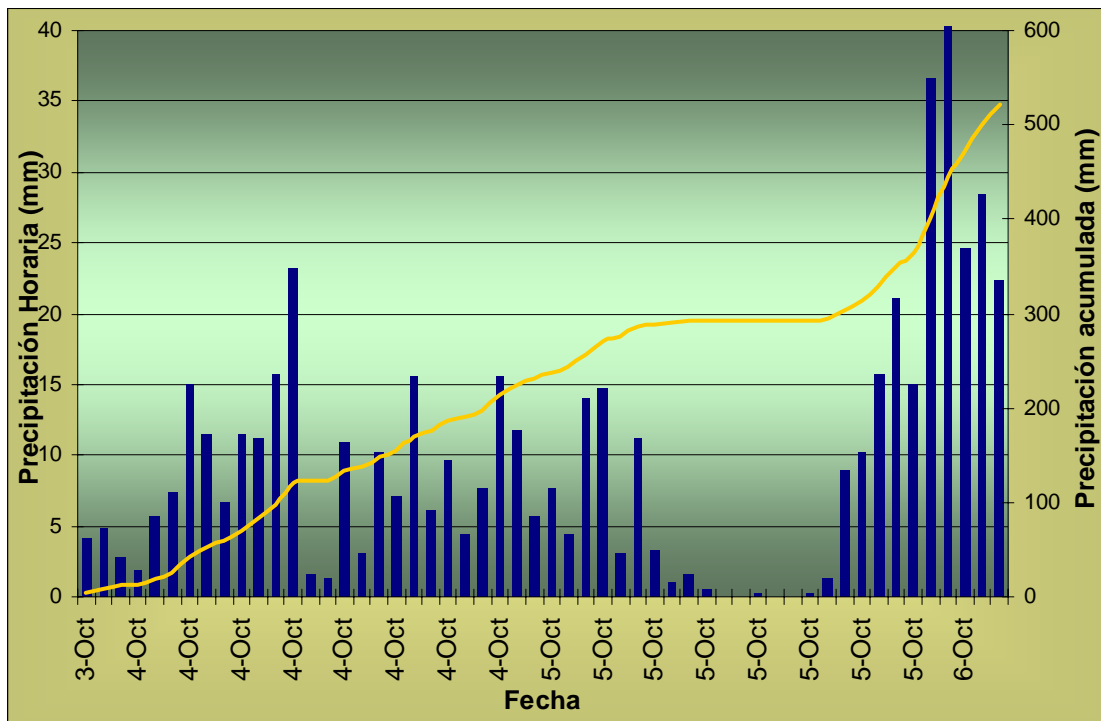


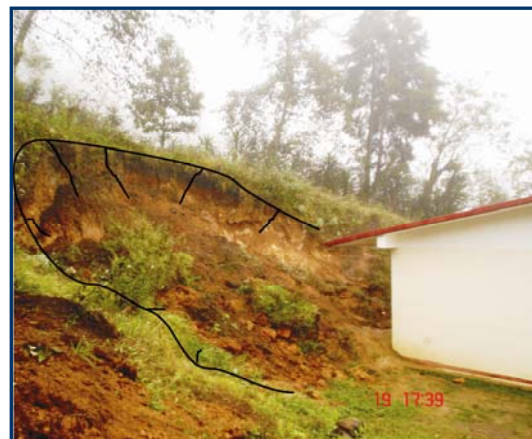
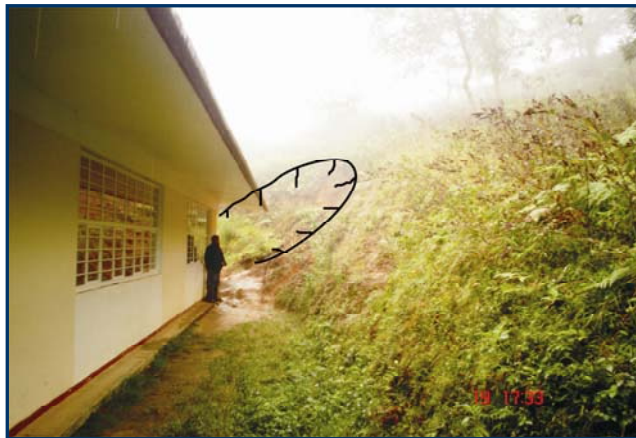
Figura 4.7 Precipitación horaria registrada durante los días de mayor impacto del huracán Stan en La Unión.

De acuerdo con las versiones de los habitantes de la comunidad de La Unión y de las autoridades municipales de Tlatlauquitepec, la noche del 4 de octubre se presentó un proceso de remoción en masa en la ladera en estudio (figura 4.8) o derrumbe como localmente se le conoce a estos movimientos del terreno, hecho que valida los resultados

obtenidos con la modelación realizada con los programas DLISA y LISA, con los cuales se calculó un factor de seguridad de .73 en condiciones de saturación (figuras 4.9).



Figura 4.8 Ladera en análisis antes del impacto del huracán Stan.



Figuras 4.9 Proceso de remoción en masa ocurrido en la ladera en estudio durante el impacto del huracán Stan en localidad de La Unión, posterior al cálculo del factor de seguridad.

Sin duda, la precipitación fue el factor detonante del proceso de ladera ocurrido en la parcela experimental, pues es indudable la influencia que el volumen de agua infiltrado tiene en las propiedades mecánicas y físicas de los materiales que componen la ladera en estudio. El volumen infiltrado incrementa notablemente el peso del suelo, lo cual es una carga adicional para el equilibrio del terreno; al mismo tiempo, la cohesión del suelo disminuye por el cambio en la presión de poro, cambios internos que disminuyen la resistencia de los materiales, ocasionando que éstos sean removidos por efecto de la gravedad.

Aún más, durante las primeras horas del día 6 de octubre, cuando se registraron los datos de precipitación horaria más altos, alcanzando los 40 mm, además de una precipitación acumulada en tres días de más de 500 mm, se presentó un proceso de ladera a aproximadamente 50 metros de la parcela experimental (figura 4.10), en condiciones muy parecidas a las de la ladera experimental, sólo variando en la pendiente y en la orientación del terreno, lo cual es posible considerar como referencia de los resultados del cálculo del factor de seguridad.



Figura 4.10 Proceso de ladera ocurrido a 50 metros de la parcela en análisis durante el impacto del huracán Stan.

4.6 Análisis de sensibilidad

Complementando la modelación, se realizó un análisis de sensibilidad con la finalidad de identificar el o los parámetros de mayor influencia en la estabilidad de la ladera en análisis. El procedimiento de acuerdo con Sidley *et al.* es introducir valores reales en cada parámetro, calcular el factor de seguridad empleando el valor promedio de cada variable y, por último, modificar los valores introducidos en cada parámetro, sin alterar los demás valores. Posteriormente, se realiza la comparación de la variación del factor de seguridad en función del cambio del valor de cada parámetro, todo ello en porcentaje, pues no es posible comparar los valores directamente por ser diferentes unidades de medida. Cabe

destacar que la descripción de la relación FS-Parámetro se realiza considerando los valores reales de la parcela experimental, de los cuales se estimaron 1000 combinaciones posibles para cada parámetro, con la finalidad de establecer una relación precisa.

Sensibilidad de parámetros individuales

La figura 4.11a muestra la gráfica donde se registra la relación entre la variación del valor de la pendiente y el cambio del factor de seguridad. En dicha gráfica se puede ver que si la pendiente estuviera por debajo de los 10° la variación en el factor de seguridad sería notable y favorable para el FS, es decir, debajo de este valor de la pendiente la ladera tiende a ser muy estable; sin embargo, después de este límite la pendiente comienza a tener influencia negativa en el factor de seguridad cada vez que se incrementa su valor; en este caso en particular, el valor de la pendiente de la ladera en estudio es de 25° y sería necesario que su valor fuera de 22° para que se encontrara en el umbral de la estabilidad e inferior a 17° en condiciones de saturación. En la ladera de control o con cubierta vegetal natural el factor de seguridad es mayor, tanto saturada como no saturada y el comportamiento en la relación pendiente-FS es similar.

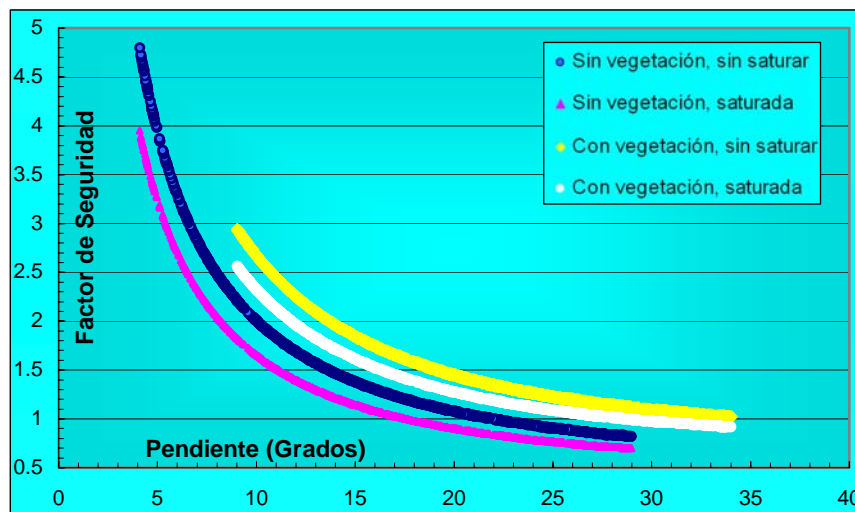


Figura 4.11a. Gráfica de la relación entre la variación de la Pendiente y el FS.

La figura 4.11b es un acercamiento a la gráfica de la relación pendiente-FS, donde es posible observar con mayor claridad los valores de la pendiente que se ubican en la zona de límite de estabilidad, es decir entre los valores 0.9 y 1.1 del FS y como la distancia entre las líneas que representan la variación de la pendiente se reduce conforme aumenta la pendiente aunque, como se esperaba, en todo momento la saturación del suelo influye en la inestabilidad. Cabe recordar que la pendiente observa un comportamiento peculiar en esta relación, pues después de un incremento considerable, que en este caso se ubicaría por encima de los 65° , conforme aumenta el valor es cada vez mayor el FS, esto como resultado de que un terreno que alcanza esos valores de declive generalmente es roca firme y no presenta un proceso de remoción como el calculado con la ecuación infinita de laderas, aunque podría ser factible otro tipo de proceso gravitacional, como la caída libre o el vuelco. En estas condiciones, la ladera de control permanece cerca del umbral de estabilidad, por lo que en ésta la pendiente juega un papel moderado en la variación del factor de seguridad y, por lo tanto, en la estabilidad del terreno.

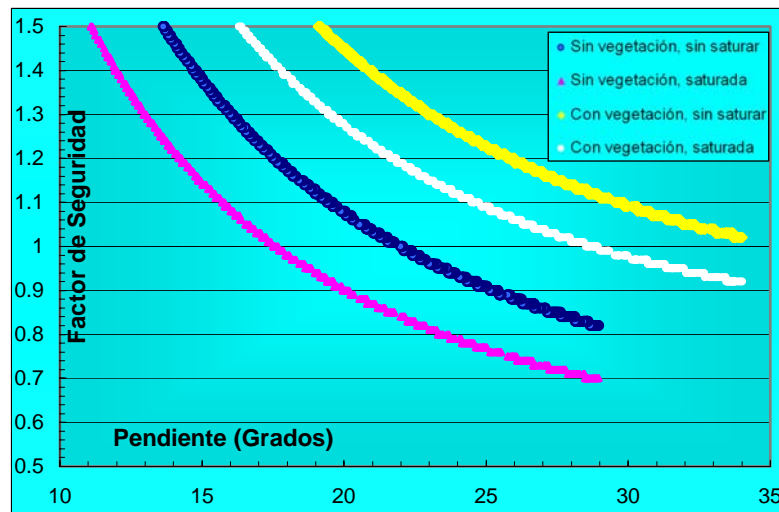


Figura 4.11b Gráfica de la relación entre la variación de la Pendiente y el FS a detalle.

Un factor importante en el análisis de la estabilidad de una ladera, es la profundidad de la superficie de falla o profundidad del suelo, que en el caso de la ladera en estudio es de 4 metros. La variación de este parámetro es similar a la pendiente, es decir entre menor es su valor mayor influencia positiva en la estabilidad y el incremento en la profundidad de la superficie de falla es directamente proporcional a su influencia en la variación del factor de seguridad (figura 4.12a). De acuerdo con los datos calculados y graficados en ésta figura la variación entre una ladera con vegetación natural y una deforestada es, en general, similar.

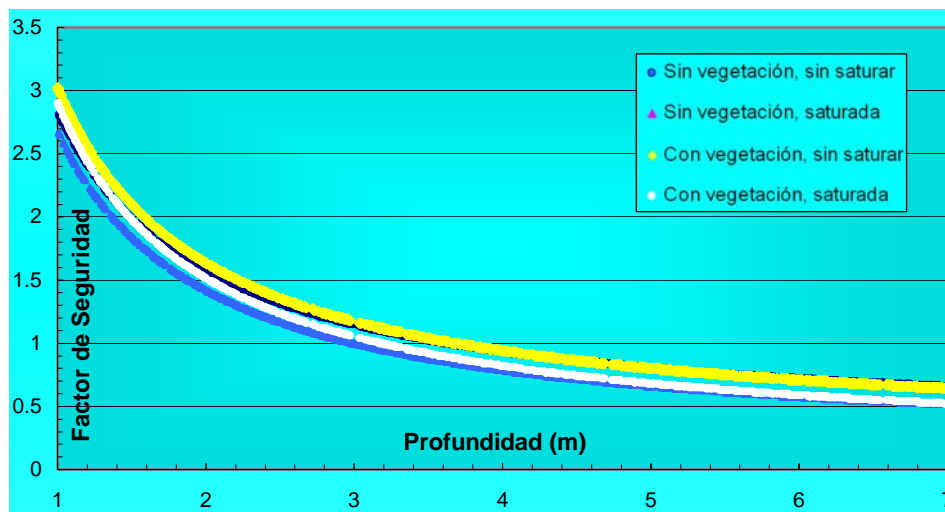


Figura 4.12a Relación entre la profundidad del suelo y el factor de seguridad.

En la gráfica de la figura 4.12b se representa la relación entre la profundidad de falla y el cambio en el factor de seguridad entre 0.5 y 1.5; en dicha figura se puede apreciar que las líneas que simbolizan el comportamiento de esta relación en condiciones de saturación y en condiciones normales se separan, esto se debe que al ser mayor la profundidad del

suelo, mayor es el volumen potencial de agua que retiene cuando el nivel freático alcanza la superficie y el peso se incrementa considerablemente respecto a suelos menos profundos. En el caso específico de la ladera de estudio, la profundidad del suelo que podría estabilizarla, sin modificar los demás factores en condiciones normales se encontraría en 3.6 metros, mientras que en un estado saturado necesitaría ser del orden de 2.9 metros para ubicarse en el umbral de la estabilidad.

En cuanto a ladera de referencia o con cubierta vegetal inalterada, la influencia en el cambio del FS respecto a la profundidad del suelo es similar a la parcela sin cobertura vegetal. Además, destaca en la gráfica que en condiciones de saturación una ladera con vegetación tiende a ser más estable, pero conforme es mayor la profundidad de la superficie de falla, esta cobertura vegetal comienza a tener un peso específico menor.

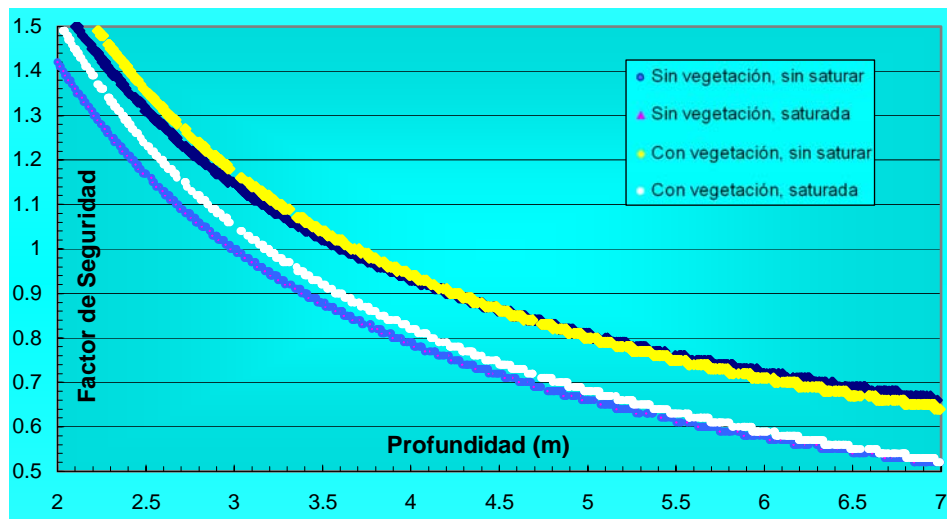


Figura 4.12b Relación entre la profundidad del suelo y el factor de seguridad a detalle.

El peso del suelo en condiciones naturales es otro de los parámetros que se emplea en el cálculo del factor de seguridad, el cual representa la cantidad de sólidos en el suelo en relación con el volumen; en este aspecto es relevante señalar que a mayor porcentaje de sólidos más resistente será el suelo y menor la probabilidad de ser removido. En la figura 4.13a se muestra la relación entre la variación del peso del suelo en condiciones normales y el factor de seguridad para la ladera en análisis. Cuando el valor del parámetro es menor a los 0.5 gr/cm^2 se puede establecer que la ladera tiende considerablemente a la estabilidad, pero superando este valor, conforme aumenta el peso del suelo disminuye la estabilidad de forma constante, aunque de forma menos determinante que otros factores. En el caso del valor del peso del suelo en condiciones de saturación, en todo momento se ubica en rangos cercanos al límite de estabilidad.

Esta relación entre el peso del suelo y el FS es similar en una ladera con cubierta vegetal, aunque el factor de seguridad se mantiene por encima de la unidad, es decir tiende a la inestabilidad y sólo cuando el material presenta valores altos de peso del suelo, superiores a los 1.9 gr/cm^2 , rebasa el límite de la inestabilidad.

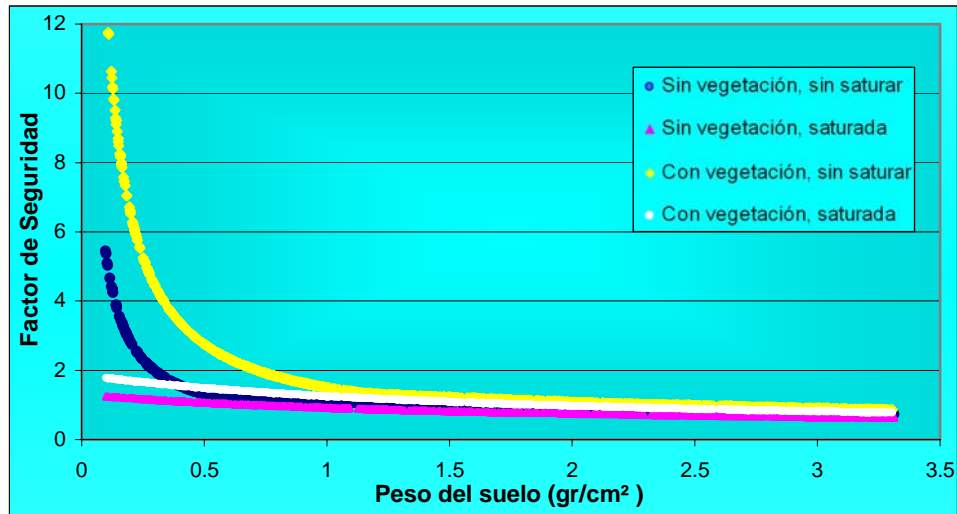


Figura 4.13a Variación del factor de seguridad en función del peso del suelo.

La gráfica de la figura 4.13b indica la relación entre la variación del factor de seguridad en función del cambio en el peso del suelo correspondiente a un rango cercano al límite de la estabilidad, donde se puede apreciar que el comportamiento de las líneas que representan esta relación tiende a ser el mismo, aunque en condiciones de saturación el factor de seguridad disminuye, esto debido a que el peso del agua se manifiesta como una fuerza interna adicional de desequilibrio. En cuanto a la parcela de control, la tendencia es similar en escenarios de condiciones naturales como de saturación; en ambos casos, el factor de seguridad es mayor que en una ladera deforestada.

El valor del peso del suelo adecuado para que la ladera en análisis estuviera en el rango de estable, debería ser inferior a los 0.7 gr/cm² en el supuesto de que no variara el valor de ninguno de los demás parámetros considerados en el análisis de estabilidad.

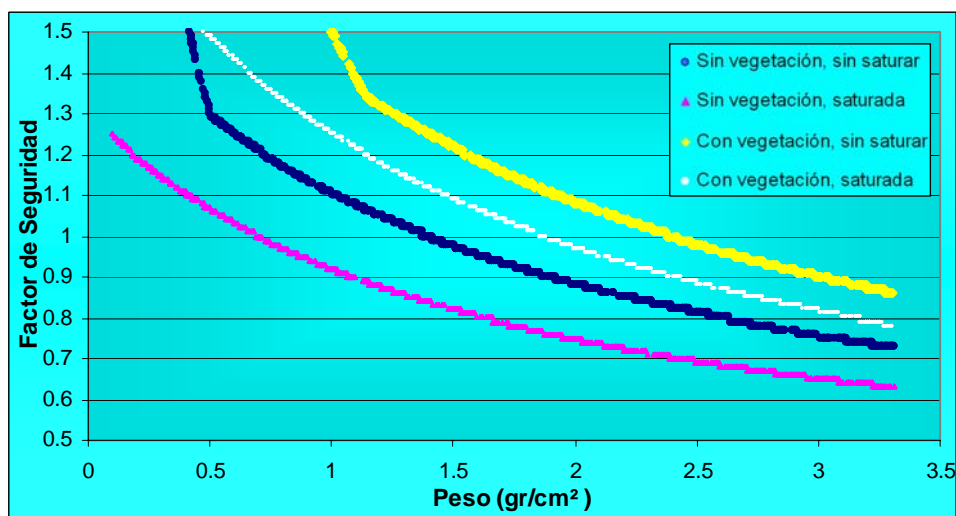


Figura 4.13b Variación del factor de seguridad en función del peso del suelo a detalle.

El incremento del agua en grandes cantidades y de forma repentina al suelo en una ladera, tal como se experimenta frecuentemente durante la época de lluvias de la Sierra Norte, puede disminuir la cohesión del suelo y reducir la estabilidad del mismo. El lecho rocoso subyacente puede entonces adquirir un papel determinante, pues su superficie puede ser un plano por el que deslice el material saturado.

En las figuras 4.14a y 4.14b se grafica la relación del aumento de la cohesión y su influencia en el factor de seguridad; en ambos casos se puede notar que la relación es lineal y directamente proporcional, es decir a mayor cohesión efectiva del suelo aumenta el factor de seguridad, y por lo tanto la estabilidad de la ladera es mayor. Esta característica permite inferir que la cohesión tiene un alto grado de influencia en la estabilidad de la ladera, pues en todo momento una variación del parámetro influye en el factor de seguridad. En una ladera con cubierta vegetal natural el impacto de la cohesión en el FS es similar en tendencia al de una ladera sin vegetación, aunque en valores reales los sistemas de raíces juegan un papel importante para que la cohesión tenga que ser muy baja para desestabilizar una ladera cubierta de vegetación.

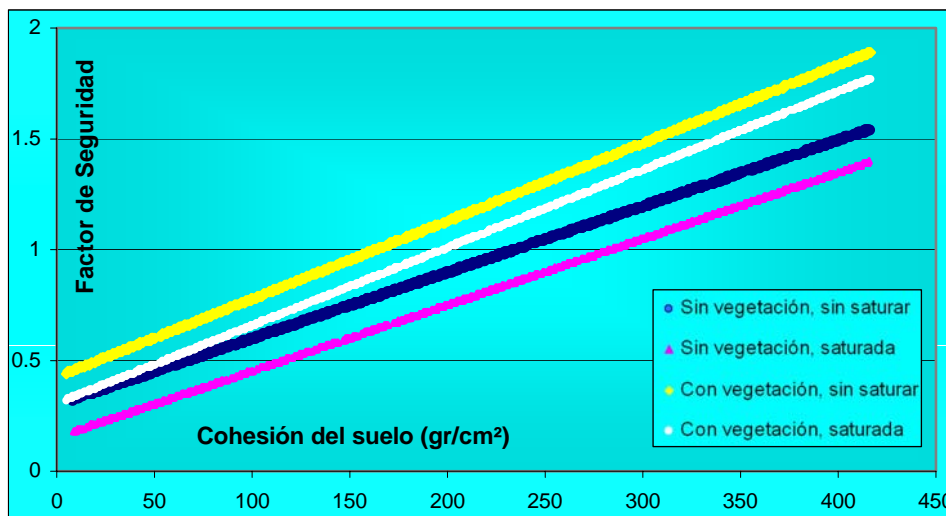


Figura 4.14a Relación en la variación de la cohesión del suelo y su influencia en el FS.

El ángulo de fricción interna es uno de los parámetros necesarios para calcular el factor de seguridad de mayor dificultad de obtener por las pruebas que se requieren para estimar dicho valor. Para el caso de la ladera en estudio, se estimó un valor de 8.2° en los materiales sedimentarios que integran la ladera en análisis. En la gráfica de la figura 4.15a se puede apreciar que al comportamiento del ángulo de fricción interna es muy distinto en condiciones normales respecto al momento en que se encuentre saturado el suelo; en ambos casos, el incremento en el valor de este parámetro es favorable para la estabilidad, pero en específico dicha influencia positiva es mayor en condiciones naturales, pues cuando el terreno está saturado por la infiltración el cambio en el FS es menor.

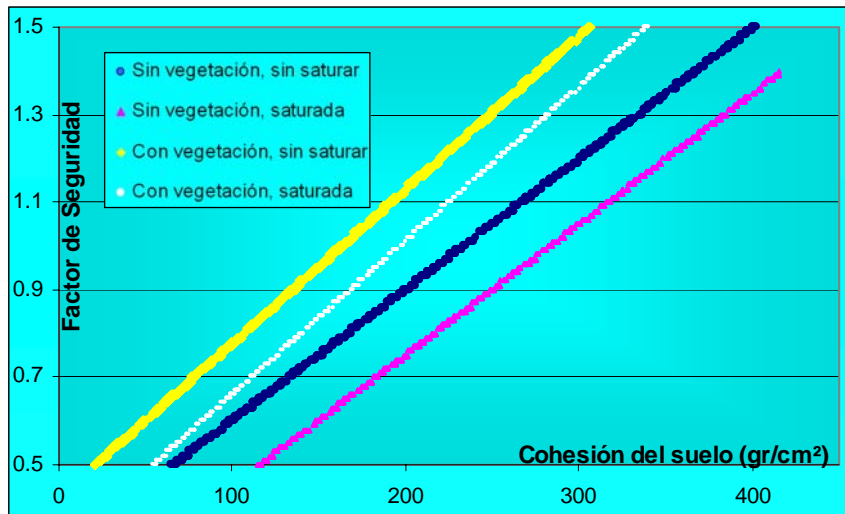


Figura 4.14b Cambio del FS en función de la cohesión en el umbral de la estabilidad.

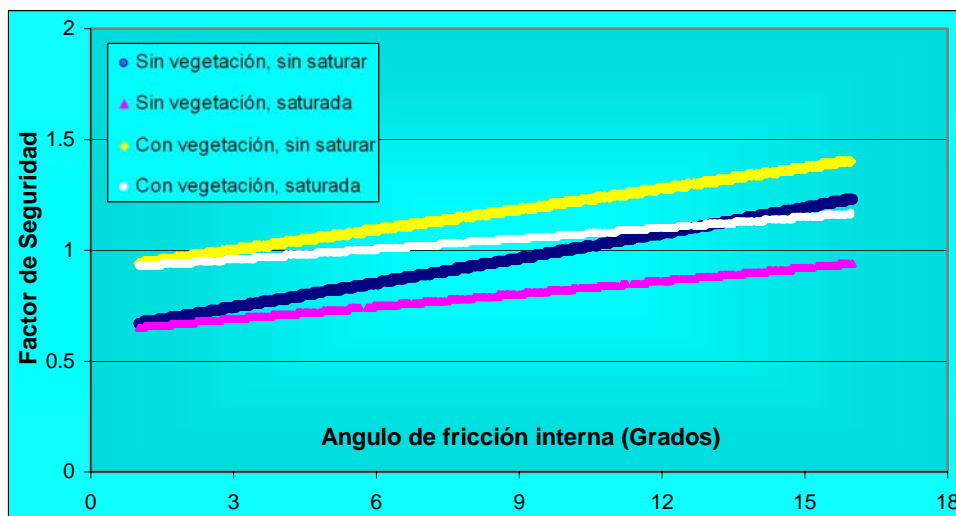


Figura 4.15a Relación entre el ángulo de fricción interna y el factor de seguridad.

En una gráfica a detalle de la relación del cambio del ángulo de fricción interna y su incidencia en el factor de seguridad, es posible observar que cuando el valor del ángulo se aproxima a cero, tanto en condiciones normales como en un estado de saturación, el factor de seguridad es muy parecido, y en el caso de la ladera en estudio establece que la misma es inestable, esto como consecuencia de que al ser un valor muy bajo en el ángulo, la fricción entre los materiales casi se nulifica, disminuyendo su resistencia al corte y en este caso a ser removido. Asimismo, destaca el hecho que cuando el nivel freático alcanza la superficie y el ángulo de fricción interna se incrementa considerablemente, la ladera continua siendo inestable. El valor mínimo del ángulo de fricción interna que estabilizaría la ladera no saturada sería de 10° (figura 4.15b).

Al igual que en los análisis de los otros factores que influyen en la estabilidad, la ladera de referencia presenta valores superiores del factor de seguridad, es decir cuando el valor del ángulo de fricción interna es igual al de la parcela deforestada, es más estable la que posee un sistema de raíces por la presencia de vegetación

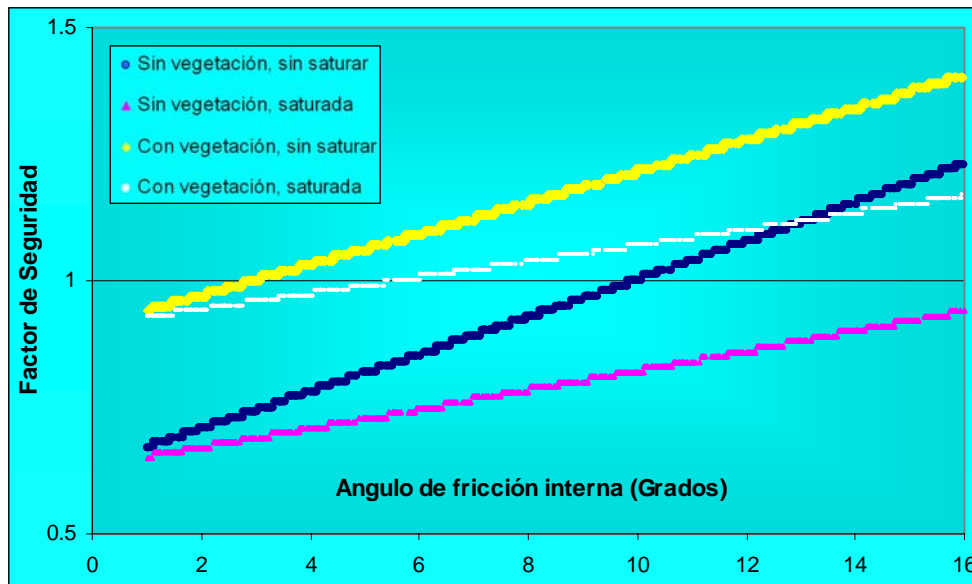


Figura 4.16b Detalle de la relación entre la variación del ángulo de fricción interna y el factor de seguridad.

La cohesión de las raíces tiene una influencia similar a la cohesión del suelo en el factor de seguridad; conforme aumenta el valor de este parámetro se incrementa de forma lineal el factor de seguridad y como consecuencia se estabiliza la ladera. Sin embargo, la variación en el FS es menor que la relacionada a la cohesión del suelo. En las figuras 4.16a y 4.16b es posible observar gráficamente esta relación lineal, la cual se mantiene tanto en condiciones normales como cuando la ladera está saturada, siendo en este último escenario más inestable la ladera.

En la cohesión de las raíces la saturación tiene un papel importante, pues una ladera con cubierta vegetal pero saturada es más inestable que una desprovista de vegetación pero con el nivel freático por debajo de la superficie y cercano a la superficie de falla.

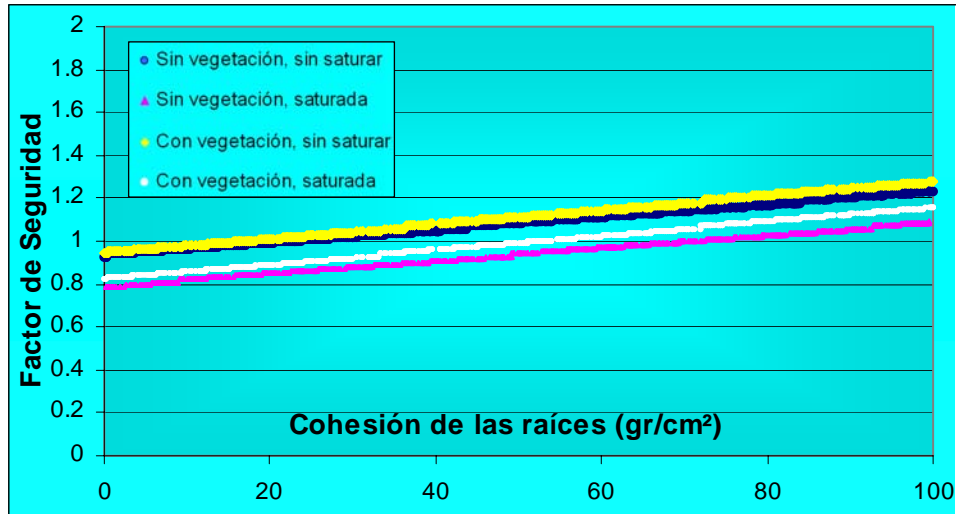


Figura 4.16a Variación de la cohesión de las raíces y su impacto en el factor de seguridad.

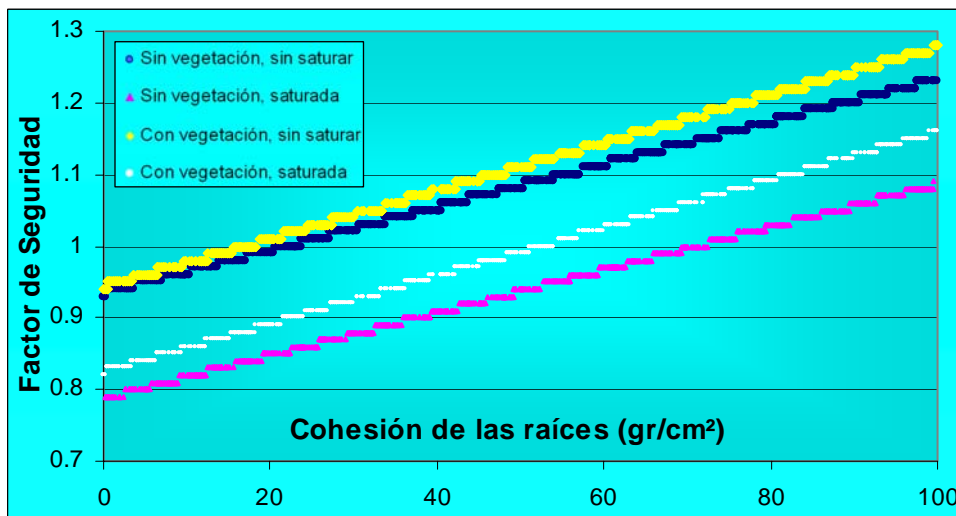


Figura 4.16b Variación de la cohesión de las raíces y su impacto en el factor de seguridad en los límites de la estabilidad.

Sensibilidad global

Como se ha enfatizado durante el presente capítulo, parte fundamental del presente trabajo fue modelar dos laderas con características similares físicas y litológicas, con la diferencia de que una cuenta con vegetación natural y la otra fue deforestada; como parte de este objetivo, se realizó el análisis de sensibilidad para la ladera con vegetación, siguiendo el mismo procedimiento aplicado a la ladera sin vegetación. Asimismo, se modelan dos escenarios para entender la estabilidad del terreno: a) un análisis en condiciones naturales o sin saturación del suelo, es decir en la temporada de estiaje o sin precipitaciones constantes e intensas; y b) un escenario donde se presente la saturación del suelo por infiltración, como resultado de la ocurrencia de precipitaciones intensas o de larga duración, es decir, durante el período de lluvias.

Los resultados de la modelación se representan para cada escenario en las siguientes gráficas, así como un análisis del comportamiento de cada factor y su influencia en el cambio del factor de seguridad y, por lo tanto, en la estabilidad de cada ladera. Cuando se analiza la variación del factor de seguridad en relación con el cambio de los valores de los parámetros incluidos en la ecuación de laderas infinita, todo ello en porcentaje, es posible observar cuál es la correspondencia directa que existe, dejando de lado la problemática que implica comparar diferentes unidades.

La figura 4.17 muestra la relación variación factor-FS para la ladera sin cubierta vegetal en condiciones normales; en dicha imagen es posible notar que la cohesión tiene un papel fundamental en la estabilidad, pues su influencia en la variación del factor de seguridad es la más alta de todos los factores, en una relación casi lineal, es decir la variación de la cohesión en porcentaje es casi equivalente al cambio del FS.

La pendiente y la profundidad de la superficie de falla tienen un impacto importante en el FS similar, aunque la pendiente es un poco más determinante en este aspecto; ambos factores al incrementar notablemente su valor, bien sea en grados o en metros de profundidad según sea el caso, modifican el factor de seguridad, pero en el caso contrario a valores de poca profundidad o pendiente suave, el cambio en el FS a favor de la estabilidad es aún más notable.

Al observar la gráfica de la figura 4.17 destaca un cambio repentino en la tendencia de la línea que representa el peso específico del suelo, pues cuando el valor de este parámetro es bajo, menor a 1.3 gr/cm^2 , el factor de seguridad se incrementa considerablemente; es decir, a menor peso específico del suelo mayor estabilidad. En un caso de la ladera en estudio, la cohesión de las raíces modifica muy poco el FS en este modelo, pero cabe destacar que su valor original es cero y que el terreno no está saturado y no existe retención por parte del sistema de raíces que incremente el peso neto de la ladera.

En un escenario de precipitaciones intensas que incrementaran el volumen de agua infiltrado hasta saturar el suelo, la tendencia de modificar el factor de seguridad de acuerdo con la variación en porcentaje de cada parámetro es similar, aunque con pequeños cambios (figura 4.18). Por ejemplo, la cohesión al variar su valor modifica en mayor grado el FS, como resultado de los cambios de presión de poro que está relacionado directamente con la saturación. En este sentido una inclinación diferente del ángulo de fricción interna tiende a influir en la estabilidad del terreno más que en condiciones naturales o en la ladera con vegetación natural, aunque junto con la cohesión de las raíces son los parámetros de menor impacto en la oscilación del FS.

Por otra parte, mientras la pendiente mantiene un comportamiento similar en condiciones de saturación que en un estado natural del terreno, la profundidad del suelo requiere de un menor cambio en su profundidad para influir en mayor medida en la estabilidad del terreno, por ejemplo un suelo de 3.5 m de profundidad podría estabilizar a la ladera sin vegetación en condiciones normales, pero sería necesario un suelo menos profundo, aproximadamente de 2.9 m para estar en el umbral de la estabilidad en condiciones de saturación, lo cual se relaciona directamente con el peso que representa un suelo más profundo y consecuente aumento en el volumen de material a remover.

El peso del suelo tiene un comportamiento diferente cuando el nivel freático alcanza la superficie a diferencia de condiciones normales o no saturadas, pues a pesar de poder

tener un valor de peso por cm^2 no se incrementa el FS de forma contundente como sucede cuando no existe infiltración o ésta es poco profunda.

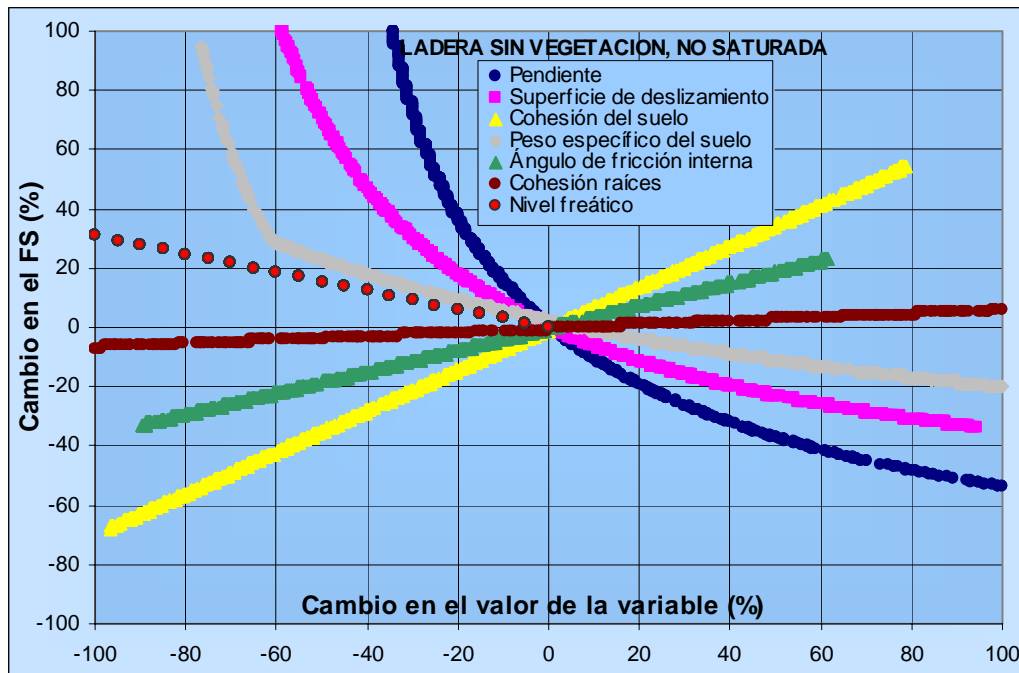


Figura 4.17 Análisis de sensibilidad de la ladera sin cubierta forestal en condiciones normales.

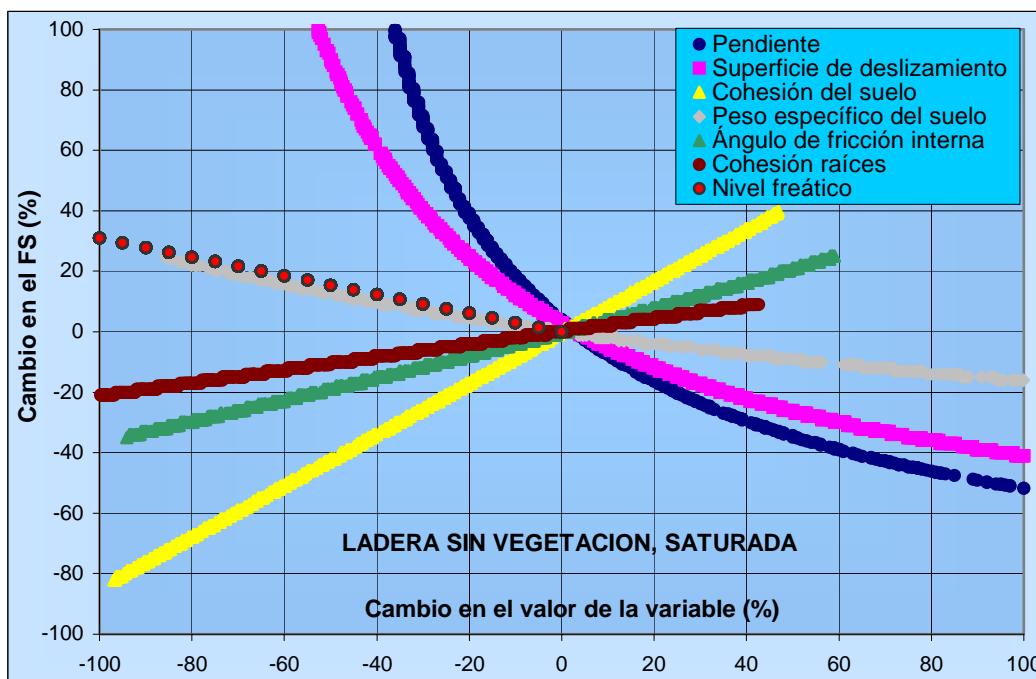


Figura 4.18 Análisis de sensibilidad de la ladera sin cubierta forestal, saturada.

En general, de los cuatro escenarios analizados, en la ladera sin vegetación en condiciones de saturación, por ejemplo, durante o después de una precipitación intensa, los valores de los factores que controlan la estabilidad requieren poca variación para modificar el FS, particularmente con tendencia a la inestabilidad.

De acuerdo con los aspectos teóricos descritos en el capítulo 1 relacionados a la estabilidad y los sistemas de raíces y con los resultados de la modelación en los programas DLISA y LISA, la dinámica de las propiedades de los materiales y las características físicas de la ladera, en concreto la pendiente, tienen una influencia en el factor de seguridad diferente a una ladera que presente condiciones de deforestación o sin cubierta vegetal natural.

El análisis de sensibilidad aplicado a la ladera de control demuestra que si bien la cohesión sigue siendo el factor determinante, ésta requiere de una mayor variación en su valor para modificar el FS respecto a la ladera sin vegetación; por ejemplo, cuando la cohesión cambió en un 80% en relación al valor que teóricamente estabilizaría la ladera, en un terreno sin vegetación el factor de seguridad varía en un 58%, mientras que en un área cubierta por vegetación su cambio es de 44%, todo ello en condiciones normales (figura 4.19). En el supuesto de que el terreno estuviera saturado, una menor fluctuación del valor de la cohesión del suelo podría ser determinante en desestabilizar el terreno (figura 4.20).

Un ladera no saturada y con cubierta vegetal presenta muy poca variación en su FS en función del cambio en el ángulo de fricción interna, así como de la cohesión de las raíces; esto significa que tendría que ser un valor extremo en ambos parámetros para que afectara considerablemente la estabilidad de la ladera; sin embargo, durante intensas lluvias ambos parámetros incrementan su sensibilidad a modificar el factor de seguridad, a pesar de lo cual continúan siendo los dos parámetros de mayor incidencia en este aspecto.

El peso específico del suelo tiene una intervención en el cambio del factor de seguridad semejante en ambas laderas cuando no están saturadas, aunque en la ladera con vegetación es necesario un mayor peso del suelo en gr/cm^2 para incidir negativamente en la estabilidad del terreno. Cuando ambas laderas se encuentran saturadas, la repercusión en el FS es diferente, mientras que en la ladera sin vegetación una ligera variación en el peso del suelo puede incrementar la posibilidad de falla en la ladera, es necesario un mayor cambio en este valor para ser decisivo en la inestabilidad.

Finalmente, en la ladera de control o de referencia, la pendiente y la profundidad de la superficie de falla tienen una incidencia desigual; el declive tiene menor peso específico en la estabilidad respecto a la profundidad del suelo. Esta última mantiene una influencia similar en los cuatro escenarios y es junto con la cohesión, el factor que menores cambios en la relación factor-FS presentan.

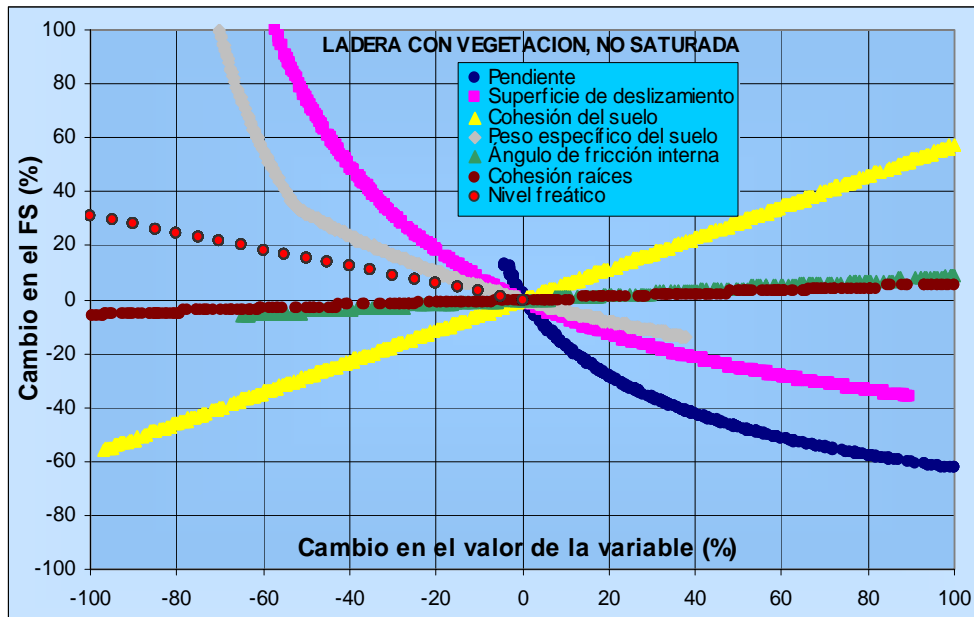


Figura 4.19 Análisis de sensibilidad de la ladera con cubierta forestal en condiciones normales.

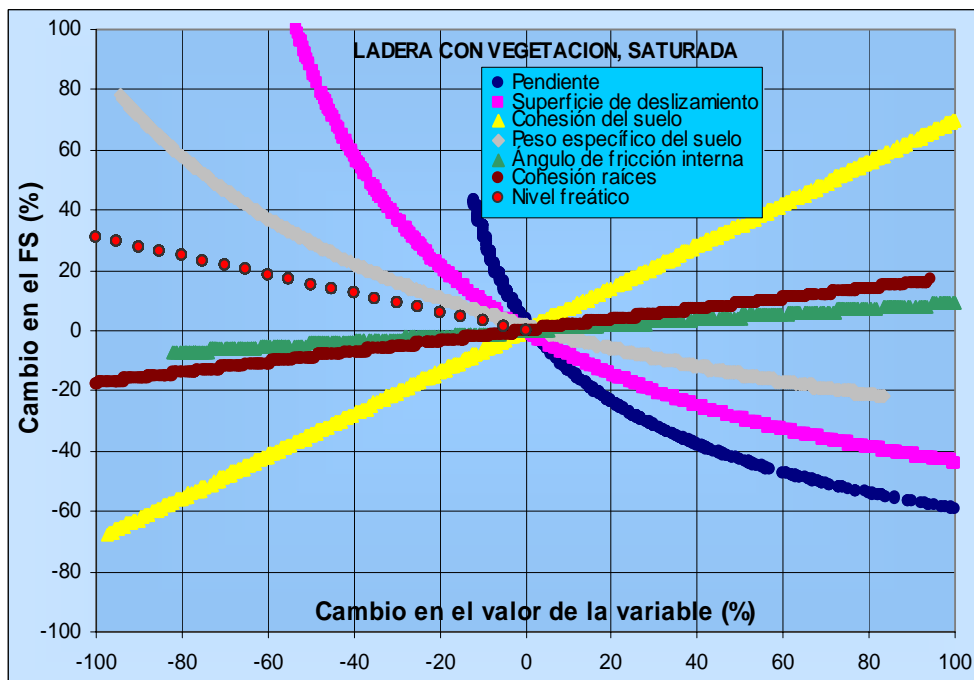


Figura 4.20 Análisis de sensibilidad de la ladera con cubierta forestal saturada.

El peso específico de los factores que controlan la estabilidad es diferente en función de su influencia en el factor de seguridad, pero en mayor o menor grado todos ellos presentan diferentes comportamientos en cada uno de los escenarios, es decir su dinámica es diferente bajo condiciones cambiantes de saturación o precipitación y de cobertura vegetal o cambio de uso de suelo.

Aun más, acorde con los resultados de la modelación, en condiciones de saturación ambas laderas incrementan su inestabilidad en estas condiciones y una menor variación del valor de los factores que rigen dicha estabilidad incide en mayor grado en la oscilación del FS, lo que implica que las precipitaciones intensas o de larga duración son un factor externo determinante en la ocurrencia de procesos de ladera.

De acuerdo con los resultados del análisis de sensibilidad aplicado a las dos parcelas de la localidad de La Unión (una desprovista de vegetación y otra con una cubierta vegetal natural inalterada) bajo dos escenarios diferentes (uno considerando que el terreno se encuentra en condiciones normales, es decir, no está saturado el suelo, y otro bajo el supuesto de que el nivel freático se encuentra a nivel de superficie), la cohesión del suelo es el factor interno que mayor influencia tiene en la variación del factor de seguridad y como consecuencia en la estabilidad del terreno. La relación es lineal y constante, es decir cuando la cohesión del suelo incrementa su valor el factor de seguridad es mayor y cuando la cohesión disminuye la ladera tiende a desestabilizarse.

Otro de los parámetros cuya tendencia es similar a la cohesión del suelo es la profundidad de la superficie de falla o del suelo, pues a mayor profundidad menor será el índice que representa al FS; sin embargo, su incidencia es menor respecto a la cohesión y bajo ciertas condiciones también influye en menor grado que la pendiente del terreno. Ésta última mantiene una tendencia similar, aunque con una relación con el factor de seguridad no lineal, es decir una pendiente poco inclinada incide muy favorablemente en la estabilidad, pero conforme aumenta el valor del declive, su peso específico se reduce y la estabilidad depende más de otros factores, como la cohesión del suelo y la profundidad de la potencial superficie de falla.

En conclusión, el análisis de sensibilidad permite comprobar de forma cuantitativa la influencia determinante de la infiltración en la estabilidad de laderas, como consecuencia de precipitaciones intensas, las cuales son frecuentes en la Sierra Norte de Puebla durante la temporada de lluvias; aún más, el mismo análisis aporta la información para determinar las propiedades de los materiales que mayor influencia tienen en la estabilidad, en particular, la cohesión.

Por último, considerando los resultados de la modelación que fueron la base para establecer que la ladera sin vegetación era inestable ante condiciones de saturación, mientras que la ladera con cubierta vegetal tendía a la estabilidad aún con la presencia de lluvias y la validación de estas afirmaciones, se concluye que el cambio de uso de suelo, generalmente acompañado de la deforestación y la eliminación de la cubierta vegetal natural, es un factor directamente asociado a la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

Bibliografía

- Anderson, M. G. y Calver, A. (1977). On the persistence of landscapes features formed by a large flood. *Trans. Institute British geographers*, No. 2, pp. 243-254.
- Anderson, M.G. y Kneale, P.E. (1984). Discussion on the influence of vegetation on clays. *Geotechnique*. No. 34, Vol. 2, pp. 150-151.
- Anderson, M.G. y Richards, K.S. (1987). *Slope Stability. Geotechnical Engineering and Geomorphology*. Edit. J. Wiley, Chichester, Inglaterra, 648 p.
- Anderson, M. G. y Sambles, K. M. (1988). A review of the bases of geomorphological modelling. En Anderson, M. G. (ed). *Modelling geomorphological systems*. Edit. Wiley and sons, pp. 1-32.
- Andrews, J. T. y Mahaffy, A. W. (1976). Growth rate of the Laurentide Ice Sheet and sea level lowering (with emphasis on the 115 000 BP sea level). *Quaternary Research*, No. 6, pp. 167-183.
- Angeli, M. G., Buma, J., Gasparetto, P. y Pasuto, A. (1998). A combined hillslope hidrology/stability model for low clay slopes in Italian Dolomites. *Engineering Geology*, No. 49, pp. 1-13.
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes. *Geotechnique* 5, pp. 7-17.
- Bitrán-Bitrán, D. (2000). "Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la Republica Mexicana durante 1999". Cuadernos de investigación Num. 50 Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México, pp 194-210.
- Bromhead, E. N. (1996). Slope stability models. En: Dikau, R., Schrott, L. Dehn, M., Hennrich, K., Ibsen, M. L., Rasemann, S. (1996). *The Temporal Stability and Activity of Landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC)*. Reporte final, 1a. Parte, Comunidad Europea, CEC Programa del Medio Ambiente, Contrato EV5V-CT94-0454, pp. 87-97.
- Brunsdon, D. (1999). Some geomorphological considerations for the future development of landslides models. *Geomorphology*, Vol. 30, pp. 13-24.
- Burton, A. y Bathurst, J. C. (1998). Physically based modeling of shallow landslide sediment yield at a catchment scale. *Environmental Geology*, No. 35, pp. 89-99.
- Cassale, R. y C. Margottini (2000). *Floods and landslides: Integrated Risk Assessment*, Springer, Berlin.
- Chorley, R. (1967) Models in geomorphology. In: R. J. Hagget (eds) *Models in Geography*, Methuen, London, pp. 59-96.
- Cofie, P., Koolen, A. J. y Perdok, U. D. (2000). Measurement of stress-strain of beech roots and calculation of the reinforcement effect of tree roots in soil-wheel systems. *Soil and Tillage Research*, 57, pp. 1-12.
- Collison A. J. y Anderson M. G. (1996). "Using a combined slope hydrology/stability model to identify suitable conditions for landslide prevention by vegetation in the humid tropics". *Earth surface processes and landforms*, vol 21, Londres.
- Crosta, G.B. y Dal Negro, P. (2003). Observations and modelling of soil slip-debris flow initiation processes in pyroclastic deposits: the Sarno 1998 event. *Natural Hazards and Environmental System Sciences*. No. 3, pp. 53-69.
- Crosta, G.B., Frattini, P., 2003. Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazards and Environmental Systems Science*. No. 3, pp. 81- 93.
- Crozier, M. J. (1999). Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model. *Earth surface processes and landforms*, No. 24, pp. 825-833.
- Dietrich, W. E., Wilson, C. J., Montgomery, D. R., McKean, J. y Bauer, R. (1992). Erosion

thresholds and land surface morphology. *Geology* 20, pp. 675-679.

Dikau, R., Schrott, L., Dehn, M., Hennrich, K., Ibsen, M. L., Rasemann, S. (1996). *The Temporal Stability and Activity of Landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC)*. Reporte final, 1a. Parte, Comunidad Europea, CEC Programa del Medio Ambiente, Contrato EV5V-CT94-0454.

GEO-SLOPE (1994). Manual del usuario.

Guimaraes, R.F., Fernandes, N.F., Gomes, R.A.T., Greenberg, H.M., Montgomery, D.R. y Carvalho Jr., O.A. (2003). Parameterization of soil parameters for a model of the topographic controls on shallow landsliding. *Engineering Geology*, No. 69, pp. 99-108.

Harvey, D (1967) *Explanation in Geography*. Edward Arnold, London

Haines-Young, R. H. y Petch, J. R. (1986). *Physical geography: its nature and its methods*. Edir. Harper and Row, Londres.

Hughes, C. E., Binning, P. y Willgoose, G. (1998). Characterisation of the hydrology of an estuarine wetland. *Journal of hydrology* No. 211, pp. 34-49.

Ibraim, I. y Anderson, M. G. (2002). A new approach to soil characterisation for hydrology-stability analysis models. *Geomorphology*, No. 49, pp. 269-279.

Iverson, R. M. (1986). Dynamics of slow landslides: a theory for time-dependent behaviour. En Abrahams, a. D. (Ed), *Hillslope processes*, Edit. Allen and Unwin, Winchester, pp. 297-317.

Janbu, N. (1957). *Stability analysis of slopes with dimensionless parameters*. Serie; Harvard University Soil Mechanics, No. 46.

Leimkuhler, K. (1982). Some methodological problems in energy modelling. En Cellier, F. E. (ed). *Progress in modelling and simulation*, Edit Academic, Londres.

Lida, T. (1999). A Stochastic hydro-geomorphological model for shallow landslideing due to rainstorm. *CATENA*, No. 34, pp. 293-313.

Moore, R. y Brunsten, D. (1996). Physico-chemical effects on the behavior of a costal mudslide. *Geotechnique* 46 (2), pp. 259-278.

Montgomery, D.R. y Dietrich, W.E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research* No. 30, pp. 1153-1171.

Noriega-Rioja, I. (2005). *Deslizamientos de ladera ocasionados por lluvias intensas*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, pp. 104.

Pack, R., Tarboton, D. y Goodwin, C. (2001). Assessing terrain stability in a GIS using SINMAP. En: 15th. Annual GIS Conference, Vancouver.

Rezaur, R. B., Rahardjo, H. y Leong, E. C. (2002). Spatial and temporal variability of pore pressures in residual soils slopes in a tropical climate. *Earth Surface Processes and landforms*, No. 27, pp 317-338.

Sidley, R. C., Pearce, A. J. y O'Loughlin, C. L. (1985). Hillslope and land use. Ed. American Geophysical Union Washington, D. C., 140 p.

Skempton, A. W. y Delory, F. A. (1957). Stability of natural slopes in London Clay. *Engineering* 2, pp. 378-381.

Van Asch, V., Hendriks, M. R., Hessel, R. y Rappange, F. E. (1996). Hydrological triggering conditions of landslides in varved clays in the French Alps. *Engineering Geology*, No. 42, pp. 239-251.

Waldron, L. J. y Dakessian, S. (1982). Effects of grass, legume and tree roots on soil effects on slope stability. *Transportation Research Board*, Washington, pp. 37-46.

Wilkinson, P. L., Anderson, M.G. y Lloyd, D. M. (2002). An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction. *Earth Surface Processes and landforms*, No. 27, pp. 1285-1297.

Wu, W. y Sidle, R.C. (1995). A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Research*. No. 31, pp.2097-2110

Discusión y Conclusiones

Como resultado del trabajo desarrollado se confirma que la inestabilidad de laderas en la Sierra Norte de Puebla, y de manera específica en el municipio de Tlatlauquitepec esta controlada en mayor grado por eventos de precipitación extraordinaria, es decir, aquellos de gran magnitud y baja frecuencia. Aunado a ello, se ha establecido que la deforestación ha jugado un papel muy importante como factor determinante de dicha inestabilidad. Resultados de la modelación presentada en la tesis sugieren que los cambios de cobertura vegetal en la zona de estudio controlan la dinámica hidrológica del suelo básicamente a partir de la infiltración, lo cual combinado con la incidencia de lluvias, las características del relieve, las propiedades de los materiales y los altos niveles de marginación hacen del municipio un escenario altamente susceptible a los procesos de remoción en masa.

Particularmente se destaca la importancia del papel de la vegetación en dichos procesos, de manera tal que los resultados son indudablemente el primer paso de un análisis complejo entre las interacciones de la cubierta vegetal y la dinámica de los procesos gravitacionales. A partir de ello se pueden establecer algunos vértices de futura investigación, tales como el entendimiento particular del rol de las raíces en la dinámica de la inestabilidad a partir de tipos de vegetación y profundidad del suelo, así como la influencia del grado de intemperismo y propiedades de los materiales, entre otros. La base de dichos argumentos esta centrada en las conclusiones del presente trabajo, las cuales se desglosan a continuación:

- La deforestación es un problema *per se* que requiere de una atención inmediata. Además de ello, la deforestación juega un papel muy importante como mecanismo de inestabilidad de laderas. En el municipio de Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla, el cambio de uso de suelo juega un papel determinante -particularmente forestal a agrícola o habitacional- en el incremento de procesos de remoción en masa.
- Las propiedades de los materiales son factores internos que regulan de forma importante la estabilidad del terreno, pero lo hacen de forma diferencial. En el caso de estudio se determinó, de forma cuantitativa, que la cohesión es la propiedad del suelo que controla la ocurrencia de procesos de ladera.
- Se modeló la relación vegetación-inestabilidad de laderas mediante la utilización de los programas DLISA y LISA a partir del cálculo del factor de seguridad con base en la ecuación infinita de laderas. Los resultados fueron validados considerando el impacto del huracán Stan en la zona de estudio. Lo anterior permitió corroborar la utilidad de estos modelos en la predicción de posibles procesos de ladera, así como en los escenarios ocurridos.
- La recreación de escenarios mediante el análisis de sensibilidad permite determinar las posibles soluciones y las medidas adecuadas ante la inestabilidad de laderas, todo esto considerando el tipo de material y las propiedades mecánicas y físicas del mismo.
- Como parte del análisis de sensibilidad y de la modelación la inestabilidad de laderas, se concluye que la precipitación intensa, como las ocurridas en octubre de

1999 y durante la presencia del huracán Stan en la Sierra Norte de Puebla, es el factor detonante más importante en esta región, aunque tal vez de manera puntual la inestabilidad también pueda ser generada por sismicidad.

- El estudio de la relación deforestación-procesos de ladera, independientemente de los objetivos o los métodos empleados, tienen un fin en común: la prevención de desastres por procesos de remoción en masa. Así, cada estudio de estabilidad de laderas que se realiza busca aportar resultados, técnicas o métodos que se puedan aplicar en estudios específicos o complementarios para diseñar y ejecutar programas para evitar la afectación de la población por estos procesos y, en consecuencia, pérdidas de vidas e incluso pérdidas materiales.
- El análisis de sensibilidad presentado puede ser empleado para considerar escenarios de mayor o menor inestabilidad en función de la importancia de las variables o factores de control. De igual manera, dichos resultados sirven para ilustrar la complejidad, tanto espacial como temporal, de dichos procesos.

Finalmente, cabe destacar que este tipo de estudios son claves en la determinación de umbrales de precipitación para distintos materiales, los cuales pueden ser utilizados en el diseño e implementación de Sistemas de Alerta Temprana con fines de prevención y mitigación de desastres.