



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**RIESGOS POR INUNDACIONES E INESTABILIDAD
DE LADERAS EN EL MUNICIPIO DE
TECOLUTLA, VERACRUZ**



T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA
P R E S E N T A :
RICARDO JAVIER GARNICA PEÑA

ASESOR: DRA. IRASEMA ALCÁNTARA AYALA



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA



MÉXICO, D.F.

CIUDAD UNIVERSITARIA, 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

“ Si vas a hacer algo, hazlo bien y con ganas, si no, mejor no lo hagas”

Javier Garnica Pérez

DEDICATORIA

A mi familia, que siempre ha demostrado que la unión, la comunicación y la confianza son posibles de encontrar aún en momentos difíciles. Gracias por apoyarme a pesar de mi forma de ser. Agradezco también a la vida por haberme agraciado con personas que me han enseñado que lo mejor de uno se encuentra dentro de sí mismo y no en cosas superficiales y carentes de sentimiento. Me siento orgulloso de ustedes y este trabajo es para ustedes y para todos aquellos que creyeron en mí. Gracias por el apoyo y el amor que siempre me han brindado y a la confianza que han depositado en mí. Los amo.

A ti madre (la Jefa), por todos aquellos momentos en que has estado cerca de mí, física y mentalmente, y que desde pequeño siempre has sido el árbol que me protege en aquellos momentos difíciles. Gracias por tu paciencia, apoyo, confianza, amor y por todo aquello que nos une como madre e hijo.

A ti padre (Periquín), que a pesar de los tiempos difíciles has sabido demostrar que con esfuerzo y dedicación es posible alcanzar lo que uno se proponga. Gracias por no abandonarme en aquellos momentos en que la vida no tenía ningún sentido para mí. Me siento afortunado de tenerte como padre ya que has depositado en mí tu confianza, no te defraudare.

A ti hermana (Catusa), que siempre has sonreído a pesar de todos aquellos momentos difíciles que hemos pasado juntos. Espero algún día poder relacionarme con la gente de la misma forma en que los haces tú. Gracias por ser como eres, ojala todas las personas fueran como mi hermana, nunca cambies.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Ricardo Javier

Garnica Peña

FECHA: 12 - Enero - 2004

FIRMA: Javier Garnica

AGRADECIMIENTOS

A mi asesora, **Dra. Irasema Alcántara Ayala**, por su apoyo, orientación, confianza y por todo aquello que nos permitió unirnos, no sólo como asesor-estudiante, sino también como amigos. Además, porque gracias a ella encuentre la motivación que tanto me hacía falta y de esta forma pude hallar un tema que llamara mi atención. ¡**Muchísimas Gracias!** Y que su sueño se haga realidad.

A mis sinodales, **Mtra. Eurosia Carrascal Galindo, Mtra. Oralia Oropeza Orozco, Dr. Lorenzo Vázquez Selem, Dr. Mario Arturo Ortiz Pérez**, por la revisión de este trabajo y por sus observaciones que permitieron el enriquecimiento de esta tesis.

Al **CONACyT** por el apoyo económico brindado para la realización de este estudio a través del proyecto “**Inestabilidad de laderas y riesgos asociados: estrategias de prevención de desastres para la región Puebla-Veracruz**” con clave J33428-T. A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por permitirme desarrollar mis conocimientos y poder así contribuir al desarrollo de este país. Al **Instituto de Geografía**, por facilitar el uso de las instalaciones.

Al **Lic. Luis Ernesto Hernández Méndez**, por su apoyo en el trabajo realizado en el municipio de Tecolutla. Al **Lic. Marcos Castillo Huertero** por el material y la información proporcionada y por los consejos que recibí de su parte.

A la **Comisión Federal de Electricidad**, en especial al **Ing. Viliulfo Islas**, por la información proporcionada y por brindar parte de su tiempo para la realización de este estudio.

Al **Sr. Rafael Mendoza Hernández**, por su apoyo durante el trabajo de campo realizado en la localidad de Hueytepec, y quien me pidió que este trabajo fuera conocido por todas aquellas personas que habitan el municipio de Tecolutla para evitar tragedias como la ocurrida en el año de 1999.

A la familia del **Sr. Evaristo Reyes** por permitirme el uso de su hogar durante las visitas a campo.

A la comunidad de la ladera (**Lic. Roberto Borja Baeza, Lic. José Marcos López, Marlene López Mendoza, Omar Esteban Chávez** y **Lic. Jovanna Castilla**) primero por su amistad y segundo por todos aquellos momentos que hemos vivido a lo largo de la realización de esta tesis. Gracias por su apoyo. Mención aparte para **Manolo** quien, a pesar de no pertenecer a la comunidad, nos apoyó en el trabajo de campo, gracias a ti y a **Marilú**.

A mis amigos (como ellos, pocos) **Brenda, Nancy, Nadia, Peter, Fabián, Mauricio (¡What!), Sergio, Daniel, Marco** y **Memo** por su amistad y por todos aquellos momentos en los cuales nos divertimos divagando acerca del mundo y la realidad en que vivimos. A las mujeres emancipadas, **Tania (2), Paloma, Valeria** (chavas, el hombre perfecto no existe) que durante algunos viernes me acompañaron con la calidez de su amistad a disfrutar de una cerveza para desahogar las penas y la tensión del trabajo.

Y a todos aquellos que de alguna forma participaron, no sólo en la realización de este trabajo, sino en mi desarrollo a lo largo de la vida.

¡**Gracias!**

Ricardo

*“Si ya no puede ir peor,
haz un último esfuerzo,
espera que sople el viento a favor.
Ya sólo puede ir mejor,
y está cerca el momento,
espera que sople el viento a favor”*

ÍNDICE

| | |
|-------------------|---|
| Introducción..... | I |
|-------------------|---|

Capítulo 1. Inundaciones y procesos de remoción en masa

| | |
|---|----|
| 1.1 Introducción..... | 1 |
| 1.1.1 Inundaciones..... | 1 |
| 1.1.2 Procesos de remoción en masa..... | 5 |
| 1.1.3 Inundaciones y procesos de ladera en México..... | 7 |
| 1.2 Inundaciones | 8 |
| 1.2.1 Conceptualización..... | 8 |
| 1.2.2 Factores que dan origen a las inundaciones..... | 9 |
| 1.2.3 Tipos de inundaciones..... | 10 |
| 1.2.4 Zonas susceptibles a inundaciones..... | 10 |
| 1.2.5 El hidrograma y los periodos de recurrencia..... | 12 |
| 1.2.6 Metodologías empleadas en el estudio de las inundaciones..... | 15 |
| 1.3 Procesos de remoción en masa..... | 19 |
| 1.3.1 Conceptualización..... | 19 |
| 1.3.2 Factores que influyen en la inestabilidad de laderas..... | 20 |
| 1.3.3 Clasificación de los procesos de remoción en masa..... | 21 |
| 1.3.4 Rasgos morfológicos de los procesos de remoción en masa..... | 27 |
| 1.3.5 Metodologías empleadas en el estudio de los procesos de remoción en masa..... | 31 |

Capítulo 2. Geología y Geomorfología

| | |
|------------------------------------|----|
| 2.1 | |
| Geología..... | 34 |
| 2.1.1 Introducción..... | 34 |
| 2.1.2 Estratigrafía..... | 39 |
| 2.1.3 Actividad volcánica..... | 48 |
| 2.1.4 Evolución Geológica..... | 49 |
| 2.2 Morfogénesis..... | 52 |
| 2.2.1 Mapa morfogenético..... | 53 |
| 2.2.2 Unidades morfogenéticas..... | 54 |

Capítulo 3. Inundaciones y procesos de ladera en el mes de octubre de 1999 en Tecolutla, Veracruz

| | |
|---|----|
| 3.1 Inundaciones y procesos de remoción en masa en México..... | 63 |
| 3.1.1 Inundaciones..... | 63 |
| 3.1.2 Procesos de ladera..... | 65 |
| 3.1.3 Inundaciones y procesos de ladera en Veracruz..... | 67 |
| 3.2 Inundaciones y procesos de ladera en Tecolutla, en octubre de 1999..... | 70 |
| 3.3 Análisis de la precipitación del municipio de Tecolutla..... | 78 |
| 3.4 Factores que propiciaron la ocurrencia de las inundaciones y los procesos de remoción en masa en octubre de 1999..... | 85 |

Capítulo 4. Índice de susceptibilidad a procesos de ladera

| | |
|---|----|
| 4.1 Introducción..... | 89 |
| 4.2 Modelos..... | 89 |
| 4.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG)..... | 91 |
| 4.4 Modelos Digitales de Elevación (MDE)..... | 91 |
| 4.5 Modelo infinito de estabilidad de laderas..... | 93 |
| 4.6 SINMAP..... | 94 |
| 4.7 Cálculo del índice de susceptibilidad del municipio de Tecolutla..... | 96 |

Capítulo 5. Susceptibilidad a inundaciones

| | |
|---|-----|
| 5.1 | |
| Introducción..... | 114 |
| 5.2 Metodología empleada para el análisis de susceptibilidad a inundaciones en el municipio de Tecolutla..... | 115 |
| 5.3 Determinación de gastos máximos..... | 116 |
| 5.4 Probabilidad y estadística..... | 117 |
| 5.5 Procesamiento de la información hidrométrica..... | 118 |
| 5.6 Delimitación de zonas susceptibles a inundación..... | 125 |
| 5.7 Uso de los modelos digitales de elevación en aspectos hidrológicos..... | 126 |
| 5.8 Delimitación de zonas susceptibles a inundaciones con el programa Watershed Modeling System (WMS)..... | 128 |
| 5.9 Análisis de las formas fluviales..... | 137 |
| 5.10 Comparación de resultados con imágenes de satélite..... | 142 |

Capítulo 6. Vulnerabilidad y riesgos asociados

| | |
|---|-----|
| 6.1 Aspectos socioeconómicos..... | 146 |
| 6.2 Vulnerabilidad..... | 150 |
| 6.2.1 Cálculo de vulnerabilidad del municipio de Tecolutla..... | 151 |
| 6.3 Riesgos..... | 158 |
| 6.3.1 Riesgos por inestabilidad de laderas..... | 158 |
| 6.3.2 Riesgos por inundaciones..... | 161 |
| Conclusiones | 164 |
| Referencias | 168 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| • Figura 1.1. Localización del municipio de Tecolutla..... | III |
| • Figura 1.2. Mapa altimétrico del municipio de Tecolutla..... | V |
| • Figura 1.1. Pérdidas de vidas y personas afectadas por los peligros naturales..... | 3 |
| • Figura 1.2. Proceso gravitacional en Teziutlán, Puebla, en octubre de 1999..... | 6 |
| • Figuras 1.3. Destrucción en el estado de Tabasco debido a la ocurrencia de inundaciones..... | 8 |
| • Figura 1.4. Daños ocasionados en el estado de Tabasco a causa de las inundaciones..... | 8 |
| • Figura 1.5. Hidrograma..... | 12 |
| • Figura 1.6. Mapa de susceptibilidad a inundaciones en el curso bajo del Río San Pedro, Nayarit..... | 17 |
| • Figura 1.7. Mapa de zonas susceptibles a inundaciones en la República Mexicana..... | 18 |
| • Figura 1.8. Zonificación de planicies inundables de acuerdo al periodo de recurrencia..... | 18 |
| • Figura 1.9. Proceso de caída..... | 23 |
| • Figura 1.10. Vuelco..... | 24 |
| • Figura 1.11. Deslizamiento..... | 25 |
| • Figura 1.12. Esquema donde se presentan los diferentes tipos de movimientos de ladera..... | 28 |
| • Figura 1.13. Diagrama idealizado de los rasgos morfológicos de un movimiento de ladera..... | 32 |
| • Figura 1.14. Rasgos morfológicos de un deslizamiento..... | 33 |
| • Figura 2.1. Mapa geológico del municipio de Tecolutla..... | 35 |
| • Figura 2.2. Columna estratigráfica de la cuenca Tampico-Misantla..... | 38 |
| • Figura 2.3. Mapa morfogenético del municipio de Tecolutla..... | 55 |
| • Figura 3.1. Inundación en el estado de Tabasco en el año de 1999..... | 64 |
| • Figura 3.2. Daños ocasionados por las inundaciones de octubre de 1999 en el estado de Veracruz..... | 64 |
| • Figura 3.3. Casa sepultada por un proceso de remoción en masa en el municipio de Zapotitlán de Méndez, Puebla..... | 66 |
| • Figura 3.4. Desbordamiento del río Zempoala, en el municipio de, Zapotitlán de Méndez..... | 66 |
| • Figura 3.5. Municipios del estado de Veracruz, afectados durante las lluvias del mes de octubre de 1999..... | 68 |
| • Figura 3.6. Zonas por donde salió el agua que se desbordó del río Tecolutla a la altura de la localidad El Triunfo..... | 71 |
| • Figura 3.7. Foto tomada en la zona que se abrió después de la salida del agua proveniente del río Tecolutla..... | 72 |
| • Figura 3.8. Daños ocasionados por la inundación ocurrida en octubre de 1999, al norte de la cabecera municipal..... | 72 |
| • Figura 3.9. Daños ocasionados por la inundación ocurrida en el mes de octubre de 1999 en Tecolutla, Veracruz..... | 73 |

| | |
|---|-----|
| • Figura 3.10. Casas dañadas en la porción occidental de la Villa de Tecolutla..... | 74 |
| • Figura 3.11. Deslizamiento en las cercanías de la localidad de Hueytepec..... | 75 |
| • Figura 3.12. Cultivos de cítricos afectados por la ocurrencia de un deslizamiento..... | 75 |
| • Figura 3.13. Deslizamiento en las cercanías de la localidad Plan de Carrizo..... | 76 |
| • Figura 3.14. Escarpe de un deslizamiento localizado en Plan de Carrizo..... | 76 |
| • Figura 3.15. Daños ocasionados por la ocurrencia de un deslizamiento en las cercanías de la localidad de Hueytepec..... | 77 |
| • Figura 3.16. Pared destruida a causa de un deslizamiento en las proximidades de la población de Hueytepec..... | 77 |
| • Figura 3.17. Trayectoria que siguió la depresión tropical 11 en los primeros días de octubre de 1999..... | 79 |
| • Figura 3.18. Precipitación total anual de 1961 a 2002 en la estación El Remolino..... | 80 |
| • Figura 3.19. Precipitación media mensual en la estación El Remolino..... | 80 |
| • Figura 3.20. Precipitación diaria y diaria acumulada durante el periodo 28 de septiembre a 9 de octubre de 1999 en la estación El Remolino..... | 81 |
| • Figura 3.21 Precipitación total anual del periodo 1927-2000 en la estación Tecolutla..... | 82 |
| • Figura 3.22. Precipitación media mensual en la estación Tecolutla..... | 83 |
| • Figura 3.23. Precipitación total anual periodo 1981-2002 en la estación Libertad-Misantla..... | 84 |
| • Figura 3.24. Precipitación media mensual en la estación Libertad-Misantla..... | 84 |
| • Figura 3.25. Precipitación diaria y diaria acumulada durante el periodo dl 28 de septiembre al 13 de octubre de 1999 que se registró en la estación Libertad-Misantla..... | 85 |
| • Figura 4.1. Modelo Digital de Elevación del municipio de Tecolutla..... | 96 |
| • Figura 4.2. Mapa de pendientes del municipio de Tecolutla..... | 99 |
| • Figura 4.3. Mapa de dirección de flujo del municipio de Tecolutla..... | 101 |
| • Figura 4.4. Mapa de área específica de la cuenca del municipio de Tecolutla..... | 102 |
| • Figura 4.5. Mapa de índice de humedad del municipio de Tecolutla..... | 105 |
| • Figura 4.6. Mapa de índice de estabilidad del municipio de Tecolutla..... | 108 |
| • Figura 4.7. Localización de los recortes hechos al mapa base del índice de estabilidad..... | 109 |
| • Figura 4.8. Zona ubicada al oeste de la localidad de Gutiérrez Zamora y que presenta alta susceptibilidad a procesos de ladera..... | 110 |
| • Figura 4.9. Alta susceptibilidad a inestabilidad de laderas en las proximidades de Mesa Grande..... | 111 |
| • Figura 4.10. Cerca de las localidades de Chichicatzapan Méndez, Ampliación Pino Suárez, Ampliación Ancón Arenal, La Gloria y Plan de Carrizo se localiza esta zona que presenta alta susceptibilidad a movimientos del terreno..... | 112 |
| • Figura 4.11. Alta susceptibilidad a inestabilidad de laderas en la zona donde se encuentran localidades como Ignacio Zaragoza, El Zapote, Cerro de Hueytepec y San Isidro el Hular..... | 113 |
| • Figura 5.1. Obtención de la dirección de flujo a partir del método D8..... | 131 |

- Figura 5.2. Secciones transversales empleadas para el cálculo de los canales en el cauce del río Tecolutla.....132
- Figura 5.3. Cuadro de diálogo donde se llevó a cabo el cálculo de canales de los perfiles transversales.....132
- Figura 5.4. Mapa de susceptibilidad a inundaciones por período de retorno en el curso bajo del río Tecolutla.....136
- Figura 5.5. Tipos de lechos que forman parte del cauce de un río.....139
- Figura 5.6. Mapa de susceptibilidad a inundaciones obtenido a partir de la delimitación de los lechos fluviales.....141
- Figura 5.7. Imagen satelital con fecha 26 de octubre de 1989.....143
- Figura 5.8. Imagen satelital con fecha 22 de octubre de 1999.....143
- Figura 5.9. Sobreposición de la delimitación de zonas inundables con un periodo de retorno de 25 años.....144
- Figura 5.10. Sobreposición de las zonas susceptibles a inundaciones obtenidas a partir del reconocimiento de los lechos fluviales del río Tecolutla.....144
- Figura 6.1. Mapa de vulnerabilidad del municipio de Tecolutla.....157
- Figura 6.2. Mapa de riesgo por inestabilidad de laderas del municipio de Tecolutla.....159
- Figura 6.3. Mapa de riesgo por inundaciones en el curso bajo del río Tecolutla.....162

ÍNDICE DE CUADROS

- Cuadro 1.1. Inundaciones y procesos de remoción en masa ocurridos alrededor del mundo durante el periodo 1900-2002..... 4
- Cuadro 1.2. Posibilidades de que ocurran inundaciones de diferentes magnitudes.....15
- Cuadro 1.3. Principales causas de los movimientos del terreno según Cruden y Varnes.....21
- Cuadro 1.4. Clasificación de los procesos de remoción en masa según EPOCH a partir de la clasificación de Varnes.....22
- Cuadro 1.5. Escala de valores de los procesos de remoción en masa según Cruden y Varnes (1996).....29
- Cuadro 2.1. Clasificación de las unidades morfogenéticas.....56
- Cuadro 3.1. Ríos de México en los cuales se presentaron desbordamientos de las corrientes.....63
- Cuadro 3.2. Resumen de daños totales en el estado de Veracruz.....69
- Cuadro 4.1. Clases de estabilidad en función del índice.....96
- Cuadro 4.2. Rangos de estabilidad tomados para el presente trabajo.....104
- Cuadro 5.1. Registros históricos de los gastos máximos registrados en el río Tecolutla durante el periodo 1962-1998, exceptuando el año 1991.....121
- Cuadro 5.2. Ordenamiento de los registros máximos, su periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.....122

- Cuadro 5.3. Periodo de retorno y su gasto máximo esperado.....125
- Cuadro 5.4. Niveles máximos de agua calculados para cada una de las secciones creadas dentro del río Tecolutla.....134
- Cuadro 5.5. Resumen de la información obtenida a partir del cálculo del gasto para cada periodo de retorno.....140
- Cuadro 6.1. AGEBs y número de localidades que las componen.....151

INTRODUCCIÓN

El hombre ha tenido que hacer frente a diversos peligros que ponen en riesgo su vida y sus bienes. Estos peligros abarcan principalmente sismos, erupciones volcánicas, inundaciones, tornados, huracanes, procesos de remoción en masa, etc. Esta relación entre el hombre y la naturaleza se ha convertido en objeto de estudio de la geografía. El presente trabajo analiza esta interacción, principalmente en el ámbito de las inundaciones y los procesos de remoción en masa, los cuales son eventos que se presentan con una gran regularidad en el municipio de Tecolutla, en el estado de Veracruz, área que es objeto de estudio de este trabajo.

Uno de los eventos más extraordinarios y desastrosos ocurrió a principios del mes de octubre de 1999, cuando, debido a una precipitación extrema, se presentaron procesos de remoción en masa y una gran inundación. Esto trajo como consecuencia la pérdida de un gran número de vidas y la alteración del ritmo de vida de la población.

Debido a esta situación se llevó a cabo la elaboración de esta investigación con el objetivo de presentar un análisis de los riesgos asociados a este par de eventos, a partir de la realización del mapa de riesgos, tanto por inundaciones como por inestabilidad de laderas. Este mapa fue resultado de la combinación de los mapas de peligros (inundaciones e inestabilidad de laderas) y del mapa de vulnerabilidad del municipio de Tecolutla.

Ambos peligros son estudiados de manera distinta en nuestro país, mientras las inundaciones reciben una mayor atención por parte de las diferentes ramas de la ciencia, los procesos de remoción en masa apenas están siendo estudiados debido a que no se les consideraba como un evento peligroso para la población.

Para este estudio se tomaron en cuenta las ideas básicas y de mayor uso en el estudio de las inundaciones y los procesos de remoción en masa. Además fue necesario conocer los diferentes grados de vulnerabilidad de la población del

municipio a partir del análisis de los aspectos socioeconómicos. Todo esto auxiliado por los Sistemas de Información Geográfica, los cuales permiten un análisis completo de los peligros y de la vulnerabilidad.

La tesis se divide en 6 capítulos, cada uno de los cuales cumple con un objetivo en particular el cual se relaciona con la temática principal.

En el primer capítulo se abordan las características principales de las inundaciones y los procesos de remoción en masa. Se abordan las teorías fundamentales de ambos eventos, su clasificación y dinámica, entre otros aspectos.

Las características litológicas y morfológicas del área de estudio son tratadas en el capítulo 2, con el objeto de obtener los mapas geológico y geomorfológico y así entender las características de los diferentes materiales que se encuentran en el municipio, además de tomar en cuenta las diferentes formas del relieve que existen en el mismo.

El capítulo 3 está enfocado al análisis de las inundaciones y procesos de remoción en masa que han afectado al estado de Veracruz y en especial al municipio de Tecolutla a través del tiempo. De igual forma se analizan los eventos que se suscitaron en la primera semana del mes de octubre de 1999, la influencia de la precipitación como detonante de la inundación y de los procesos de remoción en masa, además de la distribución de los daños en el municipio.

Los capítulos 4 y 5 analizan los peligros. En el caso de la inestabilidad de laderas fue necesario realizar el cálculo del índice de estabilidad para el municipio, derivado del modelo digital de elevación y de las características de los materiales, ambos a su vez manipulados en el software SINMAP (Stability Index Mapping) en la plataforma del SIG ArcView. Por otro lado, la susceptibilidad a inundaciones se llevó a cabo con la ayuda del software WMS (Watershed Modelling System), mientras que para conocer los períodos de retorno de inundaciones de diferentes magnitudes fue necesario realizar cálculos a partir de la utilización de fórmulas utilizadas en hidrología.

El capítulo sexto analiza la vulnerabilidad de la población del municipio, obtenida a partir de un análisis de componentes principales que se representa en un mapa con la ayuda de los programas ILWIS y ArcView. También se realizaron los mapas de riesgos, tanto por las inundaciones como por la inestabilidad de laderas, por lo que se explican los diferentes niveles de riesgo que presentan las localidades ubicadas en el municipio de Tecolutla.

MARCO GEOGRÁFICO

El municipio de Tecolutla, cuyo significado es lugar donde abunda el Tecolote, (Figura I.1) se localiza en el extremo norte del estado de Veracruz en la provincia fisiográfica denominada Llanura Costera del Golfo de México.

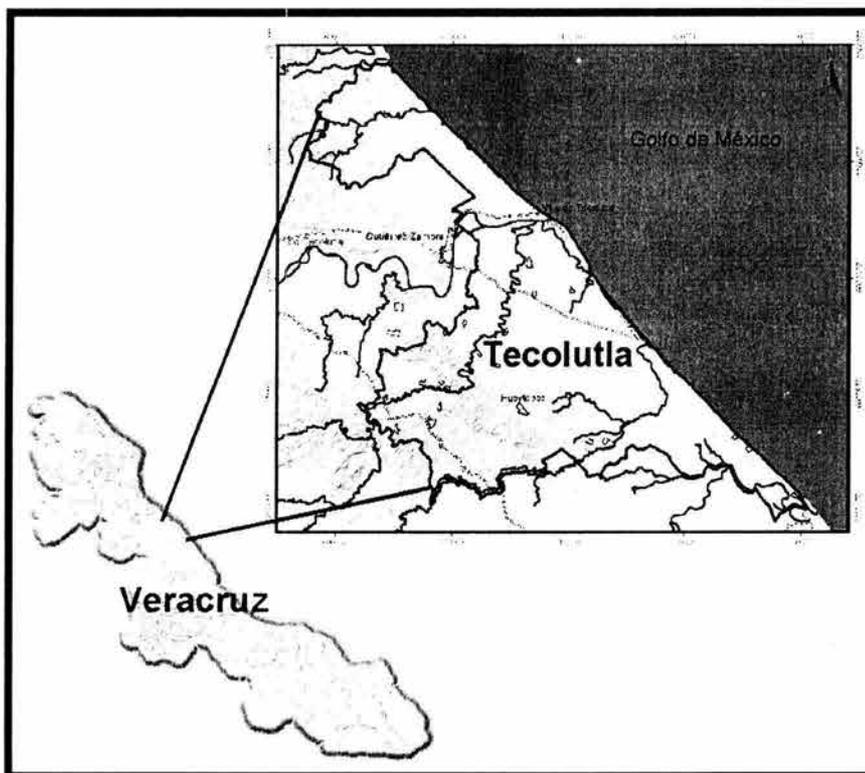


Figura I.1. Localización del municipio de Tecolutla

Las coordenadas extremas del municipio son $20^{\circ} 14' 38''$ y $20^{\circ} 36' 30''$ de latitud norte y $96^{\circ} 48'$ y $97^{\circ} 12' 16''$ de longitud oeste. Tiene una superficie de 471.31 km^2 y está

limitado al norte por el municipio de Papantla, al oeste por los municipios Gutiérrez Zamora y Papantla, al sur por Martínez de la Torre y al este por el Golfo de México.

El municipio, con una población de 25,681 habitantes, está compuesto por 181 localidades, entre las cuales destacan, por su alto número de habitantes, la cabecera municipal Villa de Tecolutla, Hueytepec y Casitas.

El área de estudio se caracteriza por presentar lomeríos bajos de pendiente suave y cerros aislados, los cuales desaparecen conforme se acercan a la franja costera, rampas de material piroclástico, una mesa de lava y planicies aluviales muy extensas. Las partes más elevadas, con cerca de 350 msnm, se localizan en la parte occidental del municipio y a partir de esta zona comienza un descenso en las altitudes hasta alcanzar el nivel del mar en la parte oriental (Figura 1.2). Entre los cerros más prominentes se encuentran Copelado (100 msnm), Hueytepec (220 msnm), Espinazo del Diablo y Las Burras (240 msnm), y por último El Mirador (251 msnm).

El municipio se localiza dentro de la región hidrológica Tuxpan-Nautla, en las cuencas de los ríos Tecolutla y Nautla, la primera atraviesa la porción central, mientras que la segunda se localiza en el extremo sur del área. Ambos ríos transportan una gran cantidad de sedimentos provenientes de la Sierra Madre Oriental, presentan una serie de meandros y el desarrollo de barras en su desembocadura.

El río Tecolutla nace en la Sierra Norte de Puebla en donde se localizan los arroyos formadores ubicados en los municipios Pahuatlán, Huauchinango, Zacatlán, Teziutlán, entre otros. En su parte más septentrional recibe el nombre de río Necaxa, en donde se localiza el sistema hidroeléctrico del mismo nombre. Posteriormente recibe nombres como Tenango, Laxaxalpan y Chichicatzapan y que se conecta con diferentes arroyos y esteros entre los que destacan el arroyo Solteros y los esteros Del Silencio y Cruz de los Esteros.

El río Nautla también se origina en la Sierra Norte de Puebla, al sur de Teziutlán, esto como resultado de la unión del río Bobos con el Martínez de la Torre, recibiendo ya

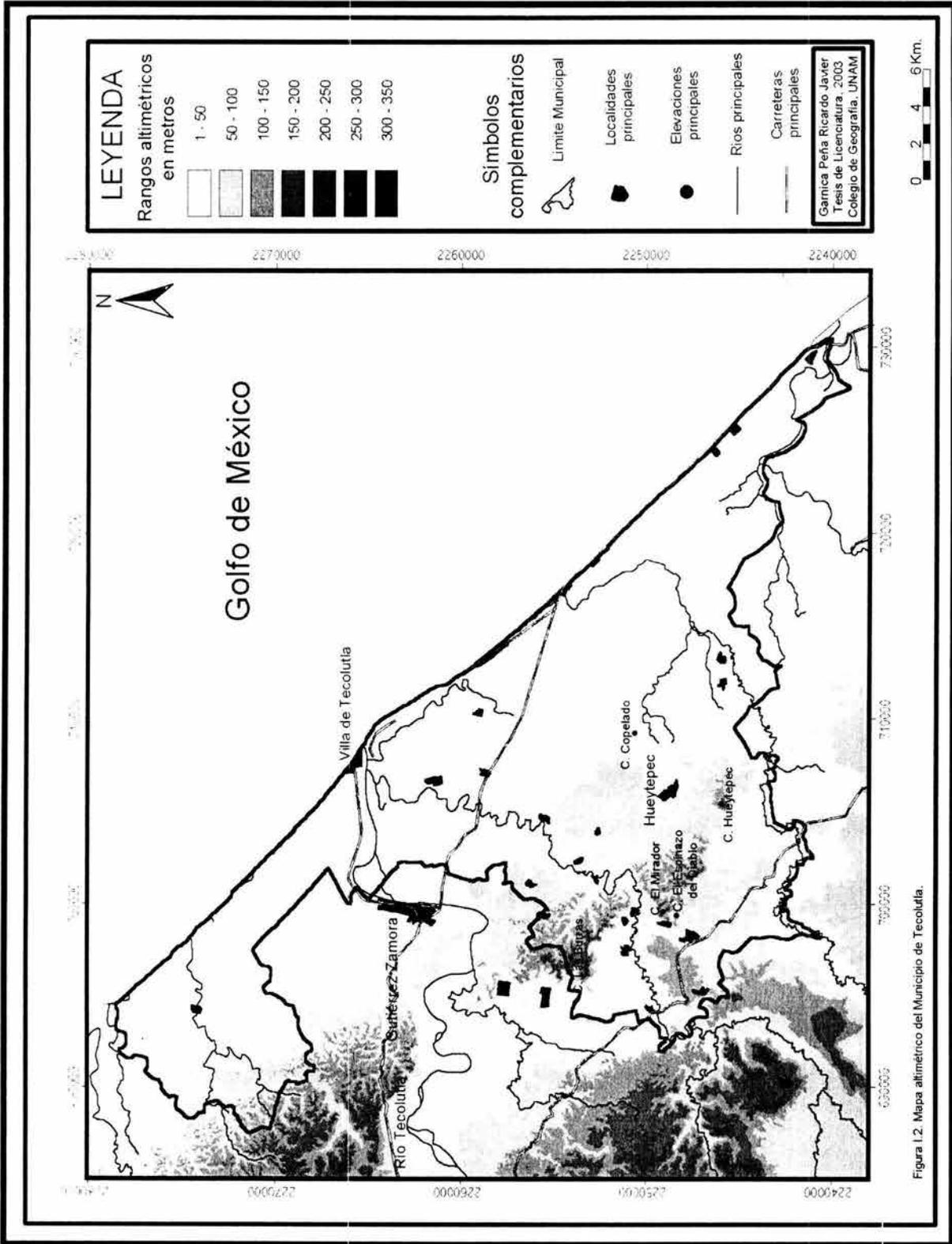


Figura 1.2. Mapa altimétrico del Municipio de Tecolutla.

dentro de la llanura costera numerosos arroyos, para seguir después hacia la barra de Nautla en que descarga al mar, cerca de la localidad de Casitas.

El clima que predomina en la zona, de acuerdo con la clasificación de Köppen, es Aw, cálido subhúmedo con lluvias en verano. Además, de acuerdo a la carta de efectos climáticos realizada por INEGI, presenta dos periodos de lluvia, de mayo-octubre y de noviembre-abril, el primero oscila entre los 900 y 1200 mm, mientras que el segundo se ubica dentro de los 300-350 mm. Cabe señalar que esta precipitación puede variar debido a la ocurrencia de fenómenos atmosféricos (huracanes, tormentas tropicales, depresiones tropicales, etc.), los cuales en algunos casos han dado lugar a inundaciones y procesos gravitacionales.

CAPÍTULO 1: INUNDACIONES Y PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

1.1 INTRODUCCIÓN

El hombre ha tenido que hacer frente a diversos peligros que ponen en riesgo su vida y sus bienes. El mayor porcentaje de muertes asociadas a la ocurrencia de los desastres naturales se presenta en los países en vías de desarrollo (95%), principalmente en América Latina y Asia, debido a que éstos se ubican en zonas que son altamente susceptibles a los peligros naturales (Alexander, 1993), y al alto grado de vulnerabilidad existente entre la población (Alcántara Ayala, 2002).

El 42% de los desastres naturales registrados entre 1900 y 1999 sucedieron en Asia, el 27% en América, en Europa el 13%, y en Oceanía y África el 8 y 10 por ciento respectivamente (Alcántara Ayala, 2002). En el año de 1989 dichas cifras hicieron evidente la necesidad de llevar a cabo un programa que atendiera tal situación, por lo que la ONU declaró a la década de 1990, como la Década Internacional Para la Reducción de los Desastres Naturales, la cual tuvo como objetivo principal reducir, a través de la acción internacional, el efecto o efectos dañinos causados por los peligros naturales, especialmente en los países en vías de desarrollo, en los cuales el impacto de los desastres es mayor debido a dos factores muy importantes, su localización geográfica en zonas susceptibles a los peligros naturales y los diferentes tipos de vulnerabilidad que existen en estas naciones.

1.1.1 INUNDACIONES

De todos los peligros naturales existentes, las inundaciones sobresalen como el fenómeno que tiene mayor presencia en el ámbito mundial, debido a que su impacto afecta a un mayor número de gente que cualquier otro peligro natural (Figura 1.1 y Cuadro 1.1). Cada año son cerca de 75 millones de personas afectadas y cerca de 20,000 las que pierden la vida en todo el mundo (Smith, 1996). De estos 75 millones, el sureste asiático concentra aproximadamente 17 millones de personas, debido a la

existencia de grandes aglomeraciones humanas con un alto grado de vulnerabilidad y ubicadas en zonas altamente susceptibles a este tipo de fenómenos.

De tal forma que debido a sus características, a nivel mundial las inundaciones se concentran en los continentes asiático y americano, ya que son el resultado de la presencia de huracanes, ciclones, tormentas tropicales y monzones en ambos continentes (Alcántara Ayala, 2002).

Los países más afectados por la ocurrencia de inundaciones se localizan, en su mayoría, en los océanos Pacífico e Índico, en el Golfo de México y en el Mar Caribe. El ejemplo más claro de esto es Bangladesh, país que presenta el nivel más alto de susceptibilidad a inundaciones en todo el mundo, por lo que tres cuartas partes de las vidas que se pierden cada año en el mundo tiene lugar en este país. China es otro ejemplo del impacto que puede llegar a causar una inundación. Entre 1860 y 1960, 5 millones de personas perdieron la vida a causa de las inundaciones (Smith, 1996). Uno de los eventos más catastróficos se registró en el año de 1931, como resultado de una gran inundación del río Yangtze, en la cual un área del tamaño de las islas británicas se inundó. El impacto arrojó como resultado la muerte de 3.7 millones de personas, la destrucción de viviendas, comercios y edificios de cualquier tipo, y cerca de 60 millones de personas perdieron sus pertenencias (Coates, 1981).

A pesar de que los dos ejemplos mencionados corresponden a las naciones subdesarrolladas, los países pertenecientes al primer mundo no se encuentran libres de los efectos de las inundaciones; un ejemplo es Estados Unidos, nación que durante décadas ha tenido que hacer frente a las inundaciones del río Mississippi. Una de las más desastrosas inundaciones se presentó en el año de 1993, cuando cerca de 50,000 viviendas fueron destruidas, casi 54,000 personas tuvieron que ser evacuadas de las zonas inundadas y más de 4 millones de hectáreas de cultivos se perdieron durante la inundación (Smith, 1996).

Pérdidas de vidas como resultado de la ocurrencia de peligros naturales



Personas afectadas por los peligros naturales

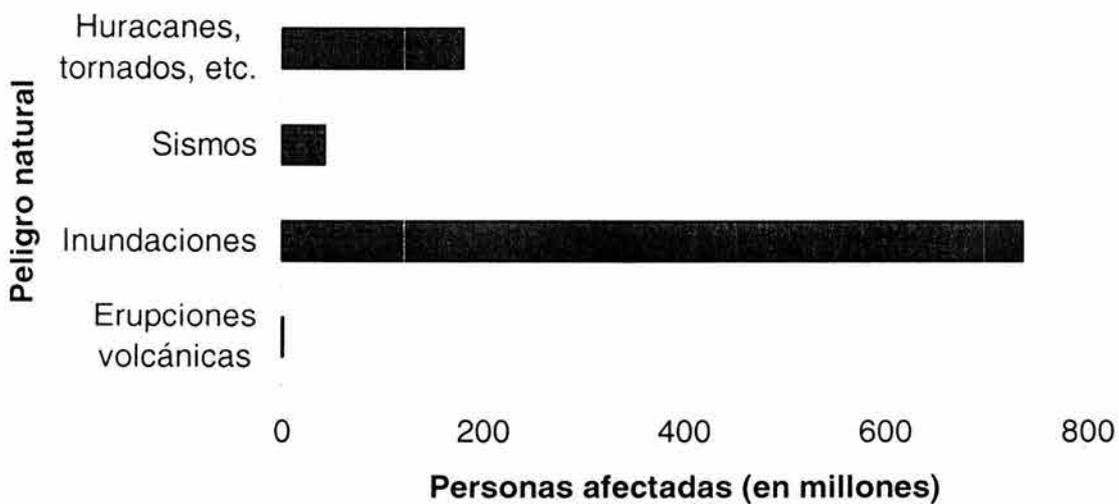


Figura 1.1. Pérdidas de vidas y personas afectadas por los peligros naturales.

Fuente: Casale (1999).

| AÑO | LUGAR | EVENTO | IMPACTO (muertes) | AÑO | LUGAR | EVENTO | IMPACTO (muertes) |
|---------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------|------|----------------------------|---|----------------------|
| 1903 | Canadá | Avalancha de rocas | 70 | | Filipinas | Inundaciones | 149 |
| 1919 | Java | Flujo de detritos | 5,100 | 1975 | Filandia | Inundaciones | 131 |
| 1920 | Republica Popular de China | Flujo de loess | 200,000 | 1976 | México | Inundaciones | 500 |
| 1921 | Kazakhstan | Deslizamiento de escombros | 500 | | Hong Kong | Inundaciones | 500 |
| 1931 | Republica Popular de China | Inundaciones | 3,700,000 | | Indonesia | Inundaciones | 136 |
| 1934 | E.U.A. | Flujo de detritos | 40 | | Pakistan | Inundaciones | 316 |
| 1936 | Noruega | Caída de rocas | 73 | | Filipinas | Inundaciones | 215 |
| 1938 | Japón | Flujo de lodo | 461 | 1981 | Java | Procesos gravitacionales | 500 |
| 1941 | Perú | Despliegue violento de un glaciar | 5,000 | 1982 | Liberia | Procesos gravitacionales | 200 |
| 1949 | Guatemala | Inundaciones | 40,000 | 1983 | España | Inundaciones | 42 |
| | Tadjikistan | Deslizamientos originados por sismos | 12,000 | 1985 | Colombia | Lahares | 22,000 |
| 1959 | República Popular de China | Inundaciones | 2,000,000 | 1987 | URSS | Inundaciones | 110 |
| | E.U.A. | Avalancha de rocas | 28 | | Italia | Inundaciones y procesos de remoción en masa | 44 |
| 1963 | Italia | Deslizamiento de rocas | 2,600 | | Suiza | Inundaciones | |
| 1964 | Alaska | Deslizamientos | 114 | 1988 | Brasil | Flujo de escombros | 200 |
| 1966 | Italia | Inundaciones | 113 | 1989 | España | Inundaciones | 12 |
| 1966-67 | Brasil | Inundaciones y deslizamientos | 2,700 | 1993 | India | Inundaciones | 827 |
| 1969 | E.U.A. | Flujo de detritos | 150 | | Italia y Francia | Inundaciones | 15 |
| 1970 | Peru | Avalancha de detritos | 66,974 | 1994 | Gran Bretaña | Inundaciones | |
| | Rumania | Inundaciones | 200 | | Italia | Inundaciones | 70 |
| 1971 | Perú | Deslizamiento | 400 | 1998 | India | Inundaciones | 1,811 |
| 1972 | Perú | Inundaciones | 12 | | México | Inundaciones | 1,256 |
| | Japón | Inundaciones | 115 | | Sudán | Inundaciones | 1,393 |
| | Hong Kong | Inundaciones | 87 | | Republica Popular de China | Inundaciones | 3,656 |
| | Filipinas | Inundaciones | 427 | | Mozambique | Inundaciones | 23 |
| | India | Inundaciones | 100 | 1999 | México | Procesos de remoción en masa e Inundaciones | |
| | Nepal | Inundaciones | 105 | | Republica Popular de China | Inundaciones | 725 |
| | Corea del Sur | Inundaciones | 296 | | Venezuela | Inundaciones | 30,000 |
| 1973 | Argelia | Inundaciones | 20 | 2000 | Bután | Inundaciones | 200 |
| | Bangladesh | Inundaciones | 900 | | Filipinas | Procesos de remoción en masa | 287 |
| | México | Inundaciones | 130 | | India | Inundaciones | 1,290 |
| | Pakistan | Inundaciones | 290 | 2001 | Argelia | Inundaciones | 921 |
| | España | Inundaciones | 190 | | Nepal | Procesos de remoción en masa | 144 |
| 1974 | Perú | Flujo de detritos | 451 | 2002 | Alemania, Rep. Checa | Inundaciones | |
| | Bangladesh | Inundaciones | 2,000 | | México | Inundaciones | |
| | Brasil | Inundaciones | 1,500 | 2003 | Kirguistan | Procesos de remoción en masa | 38 |
| | Honduras | Inundaciones | 8,000 | | Argentina | Inundaciones | 623 |
| | India | Inundaciones | 302 | | México | Inundaciones | |

Cuadro 1.1. Inundaciones y procesos de remoción en masa ocurridos alrededor del mundo durante el periodo 1900-2002
Fuente: Basado en Coates (1981), Mc Call (1992), Smith (1996), Alcántara Ayala (2002).

Un aspecto que acompaña a las inundaciones es la propagación de enfermedades, principalmente de tipo gastrointestinal; éstas se desarrollan principalmente debido a los bajos niveles de salubridad e higiene, entre otros, que imperan en los países en vías de desarrollo. Tal situación se agrava en el caso de los países tropicales, en donde la incidencia de enfermedades, tales como la tifoidea y la malaria es mayor, mientras que en las naciones desarrolladas los trastornos mentales causados por el impacto de las inundaciones son más comunes en los sobrevivientes (Smith, 1996).

1.1.2 PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

El crecimiento demográfico y el avance de la urbanización, fundamentalmente, han obligado al hombre a tener que habitar las laderas de las colinas. Esto de alguna forma permite a las personas evitar la problemática de las inundaciones, sin embargo, las laderas son igualmente peligrosas debido a que en ocasiones están constituidas de materiales inestables. Debido a esto, el conocimiento de los distintos factores que determinan los procesos de ladera recibe, hoy día, una mayor atención en la toma de decisiones en relación con el uso del suelo (Coates, 1981).

Los procesos de remoción en masa, al igual que las inundaciones, son eventos que pueden presentarse en la mayoría de los países del mundo, ya que pueden ocurrir tanto en laderas de fuerte inclinación como en zonas con pendientes bajas. Estos consisten en el movimiento de arriba hacia abajo de los materiales que forman los declives montañosos bajo la influencia de la gravedad y sin la asistencia de algún agente de transporte (Brunsden, 1979), por esta razón también son llamados procesos gravitacionales (Figura 1.2).

Algunas de las causas que originan este tipo de procesos son las precipitaciones extraordinarias (Sierra Norte de Puebla, México 1999), la ocurrencia de sismos (Perú, 1970), erupciones volcánicas (Indonesia, 1919) y por factores antrópicos, principalmente cambios en el uso del suelo (Hong Kong, 1966).



Figura 1.2. Proceso gravitacional en Teziutlán, Puebla, en octubre de 1999.

Fuente: www.la.jornada.unam.mx

Durante la década de 1970, en el plano mundial, perdieron la vida, un promedio de 600 personas por año aproximadamente, a causa de fallas o debilitamiento de las laderas, y cerca del 90% de estas muertes ocurrieron en las inmediaciones del océano Pacífico, en donde se localizan zonas altamente susceptibles a procesos de remoción en masa debido a la combinación de diferentes tipos de roca, terrenos escarpados, altas precipitaciones, cambios bruscos en el uso del suelo, alta densidad demográfica y la ocurrencia de sismos y erupciones volcánicas (Smith, 1996).

Dos de los desastres más importantes en las inmediaciones del océano Pacífico fueron los ocurridos en Perú en los años de 1970 y 1974. En el primero una avalancha de rocas precipitó sobre el pueblo de Huascarán debido al colapso de una capa de hielo del Nevado Huascarán. Esto dio como resultado la desaparición de los pueblos Yungay y Ranrahirca y la muerte de 25,000 personas. En 1974 ocurrió una caída de rocas sobre la población de Mayunmarca, poblado en el cual perecieron 450 personas (Jones, 1992).

Cabe destacar que existen grandes variaciones en cuanto a los daños y al número de víctimas que se dan como resultado de la ocurrencia de ambos eventos. Los países que más resienten los impactos de los peligros naturales, y en particular de las

inundaciones y los procesos de ladera, son los que se encuentran en vías de desarrollo debido al alto grado de vulnerabilidad ya que no cuentan, entre otros aspectos, con eficientes sistemas de alarma y prevención, mientras que por el otro lado, las naciones desarrolladas han mostrado una ligera disminución en el impacto de las inundaciones y los procesos de ladera, debido a los grandes avances en los sistemas de alarma, prevención y mitigación.

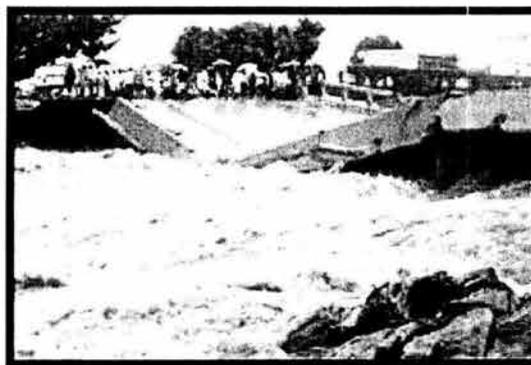
1.1.3 INUNDACIONES Y PROCESOS DE LADERA EN MÉXICO

Debido a su situación geográfica nuestro país se ve afectado por lluvias derivadas de los ciclones y las tormentas tropicales, en verano, y por los frentes polares en invierno. Esta diversidad de fenómenos produce condiciones extremas de precipitación (Domínguez *et al.*, 1999). De acuerdo con este autor y sus colaboradores entre 1973 y 1990, el promedio de daños por inundaciones se estimaba en 173,000 millones de pesos (valor del peso en 1990).

Algunos de los estados de la República que se han visto afectados por las inundaciones son: Veracruz, Tabasco, Campeche, Chiapas, Oaxaca, Puebla, Michoacán, Estado de México, Tlaxcala, Hidalgo, Baja California Sur, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas, Aguascalientes, Durango, Coahuila, Guanajuato, Nayarit, Querétaro, Sonora, Sinaloa, Zacatecas, Jalisco y Yucatán.

Los últimos eventos más desastrosos se presentaron en los años 1999, 2002 y 2003. En el primero se presentaron inundaciones y procesos de remoción en masa en gran parte de la Sierra Norte de Puebla, abarcando a estados como Puebla, Veracruz e Hidalgo, además del estado de Tabasco (Figuras 1.3 y 1.4). Esto como resultado de las precipitaciones extraordinarias que se registraron durante los primeros días del mes de octubre. Todo esto ocasionó grandes daños en los pueblos que se ubican en esta zona. Durante el año 2002 los estados de Campeche, Yucatán y Chiapas, principalmente, se vieron afectados por la ocurrencia de inundaciones, debido a la presencia del ciclón Isidore. Por último, durante los meses de julio a octubre del 2003, cerca de 23 estados de la República Mexicana sufrieron los efectos de las inundaciones y los procesos de remoción en masa que se suscitaron como resultado

de las precipitaciones extraordinarias originadas por los huracanes Ignacio, Marty, Olaf, Nora y Larry. Esto trajo como consecuencia grandes daños económicos, 40 muertes y 120,000 personas afectadas aproximadamente (datos no oficiales y recabados hasta el 12 de octubre de 2003).



Figuras 1.3 y 1.4. Destrucción en el estado de Tabasco debido a la ocurrencia de inundaciones durante el mes de octubre de 1999. Fuente: www.lajornada.unam.mx.

1.2 INUNDACIONES

1.2.1 CONCEPTUALIZACIÓN

Muy poco se ha escrito sobre el verdadero significado de lo que es una inundación y esto se debe principalmente a que el proceso es tan conocido que los diferentes autores que tratan el tema no se enfocan en su definición, sino en la dinámica que presenta el evento. Sin embargo, para abundar en el tema de la *inundación* hay que revisar algunas de las definiciones que se le han dado al término en cuestión.

Chow (1964) menciona que una inundación es un flujo relativamente alto que sobrepasa al canal natural estipulado para la carga. Por otra parte, para Rostvedt (1968) es cualquier corriente de grandes proporciones que sobrepasa las orillas, naturales o artificiales, de una corriente. En México, Domínguez y colaboradores la definen como el proceso que se produce cuando el gasto de las avenidas generadas en una cuenca supera la capacidad del cauce y cuando esto sucede, el exceso de agua escurre fuera de su cauce, sin control, hacia las partes más bajas. En pocas palabras una inundación consiste en la acumulación o estancamiento del agua

debido a que se ha sobrepasado la capacidad de absorción del suelo. Se presenta por el desbordamiento en un río, lago, estero e incluso por un ascenso en el nivel del mar.

1.2.2 FACTORES QUE DAN ORIGEN A LAS INUNDACIONES

Las causas que dan origen a estos eventos se dividen de acuerdo a la zona en donde se presenten. Además se pueden agregar eventos como los sismos y las erupciones volcánicas como posibles causas para que un área determinada se inunde. Cabe mencionar que últimamente se han asociado a las inundaciones los cambios que realiza el hombre en el uso de suelo, principalmente la urbanización y la deforestación, sin embargo esto sólo influye en la dinámica que presenten las inundaciones futuras.

La urbanización incrementa la magnitud y recurrencia de las inundaciones debido a la existencia de superficies impermeables (techos, caminos) que no permiten la infiltración, de esta forma una gran cantidad de agua se une a la corriente. También interviene la creación de puentes en los canales de los ríos lo cual reduce la capacidad de transporte de los mismos, de esta forma aumenta la frecuencia con la que el agua sobrepasa las orillas de los ríos. Incluso la rectificación de cauces en dichas zonas aumenta la velocidad del escurrimiento, facilitando la ocurrencia de inundaciones.

La deforestación influye en las inundaciones debido a que al quitar la capa de vegetación del suelo éste se saturará mucho más rápido debido a que la vegetación se encargaba de asimilar una parte del agua que precipitaba, es decir, el suelo tiene que absorber grandes cantidades de agua, la cual al sobrepasar la capacidad de absorción del suelo se deslizará aguas abajo inundando las zonas bajas, esta situación con el tiempo creará las condiciones propicias para que se presenten inundaciones con más frecuencia.

1.2.3 TIPOS DE INUNDACIONES

Para un mejor estudio de las inundaciones éstas se pueden dividir en tres tipos (Domínguez *et al.*, 1999):

- PLUVIALES (son causadas por las lluvias principalmente)
- FLUVIALES (originadas por el desbordamiento de los ríos)
- COSTERAS (causadas por un ascenso en el nivel medio del mar como efecto de tormentas y mareas de viento, por ejemplo)

Las dos primeras son consecuencia de grandes precipitaciones, ya sea originadas por huracanes, vientos normales, masas polares o procesos convectivos (Domínguez *et al.*, 1999). Las costeras, de acuerdo con Domínguez y colaboradores, se deben principalmente a los huracanes o a las masas polares, los primeros acarrear gran cantidad de humedad la cual se manifiesta con precipitaciones de gran magnitud.

Un tipo de inundación muy particular son las llamadas inundaciones repentinas (flash floods), las cuales son eventos extraordinarios de poca duración, y que comúnmente ocurren bajo la influencia de tormentas que presentan movimientos lentos o estacionarios. Se presentan principalmente en zonas áridas y semiáridas y pueden llegar a ser muy destructivas debido a que a su paso acarrear una gran cantidad de sedimentos.

1.2.4 ZONAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIONES

El hombre, desde que aprendió a sacar provecho de los recursos que le brindaba la tierra, se ha visto en la necesidad de habitar zonas que son propensas a inundaciones debido a que éstas le ofrecen varios beneficios.

En general las áreas más susceptibles son todas aquellas depresiones o zonas más bajas que se encuentran en el relieve terrestre, sin embargo, para una mejor comprensión y para facilitar los estudios se han identificado y delimitado de una

manera más exacta cuáles son estas zonas. De acuerdo con Smith (1996) las zonas susceptibles a inundaciones son:

COSTAS. Las inundaciones en estas zonas se deben a crecidas tanto en los ríos que desembocan como a crecidas en el nivel del mar.

ESTEROS. Presentan la misma problemática que las costas.

PEQUEÑAS CUENCAS SUJETAS A INUNDACIONES REPENTINAS. Estas principalmente se dan en zonas áridas en donde es más común la ocurrencia de las inundaciones repentinas.

ÁREAS ALEDAÑAS A LOS LAGOS. La causa más común de inundación es por grandes precipitaciones que de alguna manera eleven el nivel del lago provocando que el exceso de agua se derrame sobre las planicies contiguas.

ABANICOS ALUVIALES. Al igual que las cuencas pequeñas, sufren de inundaciones repentinas.

LLANURAS DE INUNDACIÓN. Las inundaciones se dan por el desborde de los ríos, debido a precipitaciones extraordinarias, y por la saturación del suelo. Son las superficies más habitadas por el hombre debido a que le proporcionan algunas de las siguientes ventajas:

- -Existe la presencia de fértiles depósitos aluviales.
- -Se pueden llevar a cabo actividades aparte de la agricultura, por ejemplo la pesca o la creación de plantas generadoras de energía.
- -Algunas cuentan con corredores para la instauración de rieles o carreteras.

Sin embargo hay que hacer hincapié en que no todas las inundaciones tienen las mismas características y que por consiguiente no siempre presentan el mismo nivel, esta elevación varía de acuerdo con la época del año, la cantidad de precipitación, etc., pero eso se explicará en el tema relacionado con los periodos de recurrencia.

1.2.5 EL HIDROGRAMA Y LOS PERIODOS DE RECURRENCIA

Para estudiar la dinámica de las crecidas es necesario conocer dos aspectos muy importantes que facilitan su predicción: el hidrograma y el período de retorno o recurrencia.

a) Hidrograma

Un hidrograma sirve para estudiar la intensidad y evolución de las crecidas representando estos dos aspectos como variaciones de caudales para un corto periodo de tiempo, además de que puede mostrar las características que presenta la cuenca, ya que la forma del hidrograma y la importancia de sus componentes depende de parámetros meteorológicos y de las características edáficas, botánicas y morfométricas que tenga la cuenca las cuales influyen en la descarga (De Pedraza, 1996)(Figura 1.5).

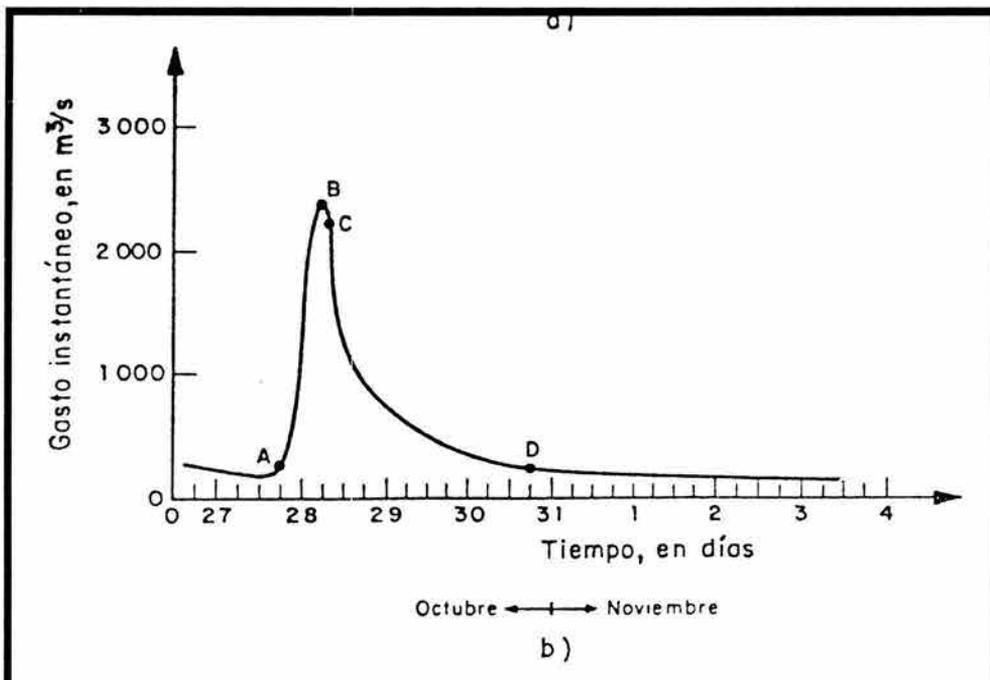


Figura 1.5. Los componentes de un hidrograma son: A. Inicio del escurrimiento, B. Gasto máximo, C. Punto de inflexión posterior al gasto máximo, D. Término del escurrimiento directo. Además la forma del hidrograma dependerá de las características físicas de la cuenca.

Fuente: C.F.E. (1982).

El hidrograma sitúa en el eje de las ordenadas la magnitud del caudal y en el eje de las abscisas el tiempo. Un hidrograma simple, es decir con un solo pico máximo, representa un solo episodio de crecida, también pueden existir el mixto y el complejo, el primero presenta dos picos máximos, mientras que el segundo puede presentar más de dos. Algo que hay que destacar es que en una misma cuenca pueden llegar a presentarse los tres tipos. Según De Pedraza (1996) un hidrograma se compone de los siguientes elementos:

CURVA DE ASCENSO. Crecimiento o concentración, representa el momento en que se detecta dicho evento y el máximo caudal.

CURVA DE DESCENSO. Comprende desde el máximo hasta que los efectos de la crecida ya no son percibidos.

CURVA DE AGOTAMIENTO. No quedan reflejados los efectos de la crecida, el aforo está compuesto por el caudal base procedente de aportes subterráneos.

La curva de ascenso es generalmente cóncava hacia arriba y refleja la capacidad de infiltración de una cuenca (De Pedraza, 1996). El tiempo que tarda en ascender representa el tiempo que transcurre antes de que se supere la capacidad de infiltración y se llenen todas las depresiones de la superficie antes de iniciar su recorrido río abajo (tiempo de saturación). Un súbito ascenso en la curva, refleja una gran descarga superficial inmediata (Abbott, 1996). El pico de la curva marca la máxima descarga. El descenso de la curva (curva de descenso) representa el desagüe de la cuenca después de que el flujo ha cesado. Su inclinación es por consiguiente dependiente de las características físicas que determinan la acumulación.

El hidrograma es una de las técnicas más usadas y confiables para predecir el flujo de una corriente. El principio fundamental del método depende del hecho de que el hidrograma de una corriente puede ser realizado para cualquier tipo de lluvia.

La gráfica que presenta el hidrograma tiene una relación muy marcada con 3 tipos de flujos que intervienen en los procesos hidrológicos, estos son:

- Flujo superficial
- Flujo subsuperficial (a manera de manantiales)
- Flujo subterráneo

La dinámica de los flujos puede ser observada por medio de un hidrograma ya que la forma que presente la línea reflejará en gran parte las características de la cuenca y de los tres flujos que intervienen durante una inundación.

La gráfica en cuestión puede mostrar descargas anuales, mensuales, diarias e incluso instantáneas. Así como consecuencia, el flujo total, el flujo base y los periodos de altos y bajos flujos podrán ser determinados con ayuda de un hidrograma (Mc Call, 1992).

b) Períodos de recurrencia

Para todas aquellas personas que habitan cerca de una corriente es vital conocer la frecuencia con la cual las inundaciones se presentan a lo largo de los años. Las inundaciones menores ocurren comúnmente cada año. En cambio las inundaciones mayores retornan con poca frecuencia, desde unos cuantos años hasta siglos o más. En estas los períodos entre una inundación y otra son más largos. Es decir pasan demasiados años para que se repita un evento de gran magnitud.

Un análisis típico de la recurrencia involucra una relación entre el tamaño (volumen de descarga) de las crecidas anteriores con el tiempo en que se presentan dichos volúmenes (Costa, 1981). Los volúmenes de descarga son expresados en un eje vertical (y) y los intervalos de recurrencia están localizados en el eje horizontal (x) y se representan como los años que hay entre cada crecida de una magnitud dada (De Pedraza, 1996).

Con una curva de frecuencia los periodos de retorno pueden ser estimados y a partir de la gráfica se pueden realizar modelos que nos indicarán las características que podría presentar una inundación futura. Se deben crear curvas individuales para cada evento debido a que cada corriente tiene sus propias características (Smith, 1996). Este tipo de gráficas puede servir de base para diseñar las estructuras de las construcciones sobre las zonas anegadizas y determinar las superficies con la más alta probabilidad de brindar seguridad a las personas y a sus bienes.

También se puede representar como una probabilidad estadística de descargas de un tamaño dado que ocurren en un determinado año o años. El período de retorno (Cuadro 1.2) más común es de 100 años, es decir que en 100 años existe el 1% de posibilidad de que se presente una inundación en cualquier año (Mc Call, 1992).

| Porcentaje de probabilidad de que se presente una o más inundaciones extraordinarias en los siguientes periodos | | | | | Periodo de retorno en años |
|--|---------|---------|--------|-------|-------------------------------|
| 100 años | 50 años | 25 años | 5 años | 1 año | |
| | | | | 50 | 2 |
| | | | | 20 | 5 |
| | 99.9 | 94 | 65 | 10 | 10 |
| | 90.5 | 71 | 40 | 5 | 20 |
| 86 | 63 | 40 | 18 | 2 | 50 |
| 63 | 39 | 22 | 9.6 | 1 | 100 |
| 39 | 22 | 12 | 5 | 0.5 | 200 |
| 18 | 9.5 | 5 | 2 | 0.2 | 500 |
| 9.5 | 4.8 | 2.5 | 1 | 0.1 | 1000 |
| 5 | 2.3 | 1.2 | 0.5 | 0.05 | 2000 |
| 2 | 1 | 0.5 | 0.2 | 0.02 | 5000 |
| 1 | 0.5 | 0.25 | 0.1 | 0.01 | 10,000 |

Cuadro 1.2. Probabilidades de que ocurran inundaciones de diferentes magnitudes.

Fuente: Costa (1981).

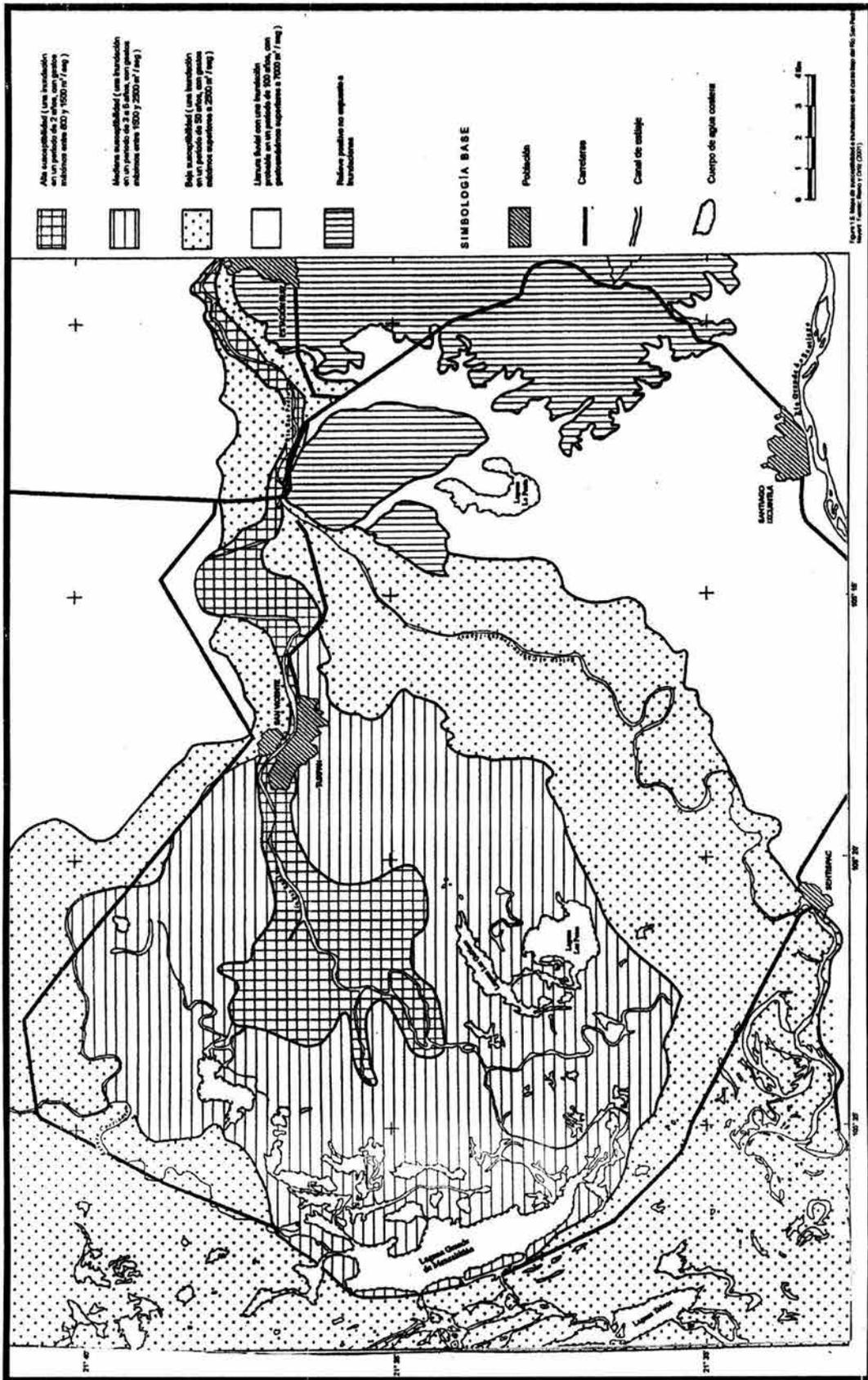
1.2.6 METODOLOGÍAS EMPLEADAS EN EL ESTUDIO DE LAS INUNDACIONES

Por ser uno de los peligros naturales más catastróficos del planeta, las inundaciones han recibido gran atención por parte de muchos investigadores de diferentes ramas de las ciencias, tanto sociales (psicología, economía, sociología, etc.), como de la tierra (meteorología, hidrología, geomorfología, etc.). La geomorfología ha llevado a

cabo estudios de paleoinundaciones e hidrología de las inundaciones (Enzel *et al.*, 1993; Baker, 1994; Kale *et al.*, 1997), simulaciones (Enzel y Wells, 1997; Bates y De Roo, 2000; Chang *et al.*, 2000), pronóstico de inundaciones (Chowdhury, 2000) y la creación de mapas mediante los Sistemas de Información Geográfica y la percepción remota. La mayoría de estos trabajos están basados en el análisis de inventarios, de archivos históricos, observaciones de campo, pruebas de laboratorio, monitoreo, el uso de la fotografía aérea y la percepción remota para su interpretación.

Actualmente los Sistemas de Información Geográfica son una herramienta muy útil, se emplean para la evaluación de las políticas de manejo de las inundaciones, debido a que permiten la integración y el análisis, al mismo tiempo, de la información que proceda de varias fuentes. Estos se basan en la comparación de diferentes escenarios de desarrollo urbano, la simulación hidrológica e hidráulica de las inundaciones además de que son de gran ayuda para la implementación de medidas alternativas para el control de las inundaciones.

Todas estas metodologías y herramientas permiten la creación de mapas de susceptibilidad (Figuras 1.6 y 1.7), de periodos de recurrencia y de riesgos y zonificación de planicies inundables (Figura 1.8), los cuales después pueden ser utilizados para llevar a cabo planes de prevención y/o mitigación y ordenamiento territorial.



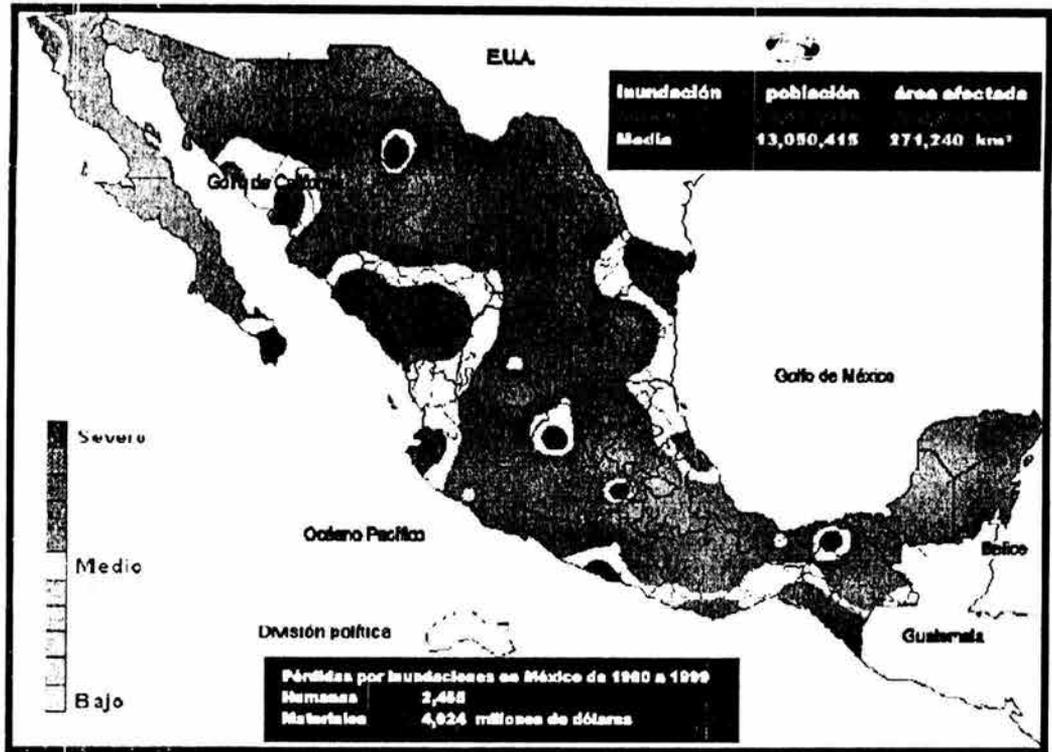


Figura 1.7. Mapa de zonas susceptibles a inundaciones en la República Mexicana
 Fuente: Domínguez *et al.*, 1999.

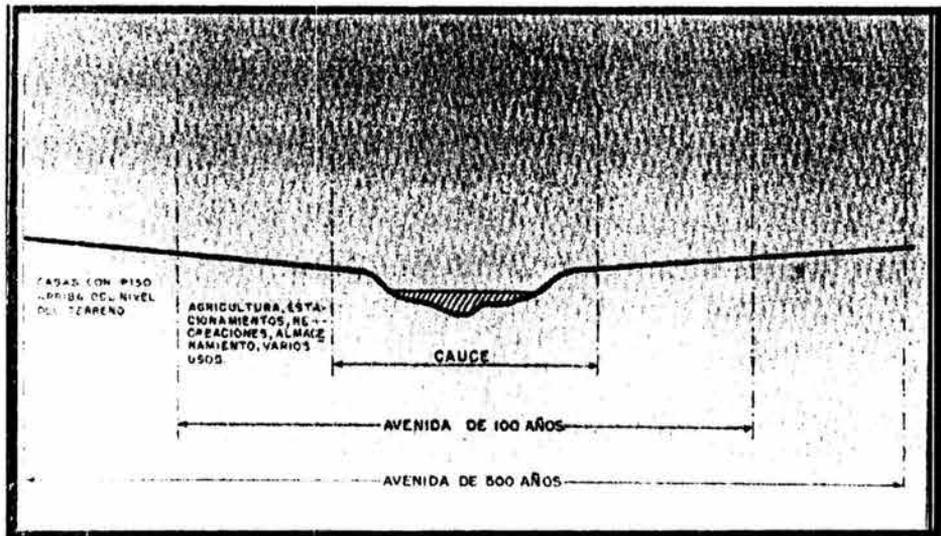


Figura 1.8. Zonificación de planicies inundables de acuerdo al periodo de recurrencia.
 Fuente: Domínguez *et al.*, 1999.

1.3 PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

1.3.1 CONCEPTUALIZACIÓN

La inestabilidad de laderas comprende diversos movimientos del terreno a los cuales se les ha nombrado procesos gravitacionales, procesos de ladera, movimientos de ladera, etc. En el caso de este estudio se utilizará el término procesos de remoción en masa.

Dichos procesos han sido estudiados por una gran variedad de especialistas los cuales los han definido de diversas maneras (Alcántara Ayala, 2000). Penck (1894) definió a la remoción en masa como los movimientos originados bajo la influencia de la gravedad y sin el empleo de transporte alguno. Sharpe (1938) los define como un movimiento ladera abajo de una masa relativamente seca de tierra, roca o una mezcla de ambas, a través de un mecanismo de deslizamiento o desprendimiento. Terzaghi (1950) menciona que la remoción en masa es un desplazamiento rápido de una masa de roca, suelo, o sedimentos, en el cual el centro de gravedad de la masa se mueve hacia abajo y hacia el exterior. Varios años después, Varnes (1958) menciona que este movimiento puede incluir materiales artificiales y naturales. De acuerdo con Coates (1977) representa una gran variedad de procesos y formas en los cuales la gravedad es la principal fuerza involucrada. Brunsden (1984), por su parte la define como todo aquel proceso ladera abajo que no requiere de un medio de transporte como el agua, hielo o aire. Cruden y Varnes (1996) definen a este tipo de evento como el movimiento de una masa de roca, tierra o detritos ladera abajo.

De este modo se tiene que la remoción en masa es todo aquel proceso que se presenta en el terreno en el cual se desplaza ladera abajo una masa de roca, detritos, o suelo bajo la influencia de la fuerza de gravedad, es decir, sin la intervención de algún agente de transporte como el agua o el aire.

1.3.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA INESTABILIDAD DE LADERAS

Cabe destacar que los procesos de remoción en masa se dan por la influencia de diversos factores que de alguna manera desestabilizan el terreno. Por esta razón es necesario conocer las causas de la inestabilidad para así poder realizar estudios más detallados y completos acerca de esta problemática.

La inestabilidad, de forma general, es cuando las fuerzas que crean el movimiento exceden la resistencia de los materiales, por lo que la litología es parte importante en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa. Sin embargo, no es el único factor que interviene en la inestabilidad del terreno.

De acuerdo con Terzaghi (1950) las causas se agrupan en dos categorías, las internas y las externas. Dentro de las primeras se ubican todos aquellos mecanismos que provocan una reducción en la fuerza de cizalla de los materiales, es decir, disminuyen la resistencia de los materiales formadores sin cambiar la tensión o los esfuerzos. Las segundas involucran a los mecanismos que son capaces de superar la fuerza interna y de esta forma ocasionar el debilitamiento, es decir, producen un aumento en la tensión, pero no en la resistencia de los materiales. En pocas palabras una ladera permanecerá estable mientras mayores sean las fuerzas resistentes, a diferencia de las fuerzas actuantes.

Los factores internos pueden ser cambios en las características de los materiales, ya sea en su composición, textura, etc. Entre los factores externos destacan los cambios en la geometría de las laderas (debido a erosión, socavamiento, incisión de un río, etc.), vibraciones naturales o artificiales (sismos y el uso de maquinaria pesada), los cambios en los regímenes hidrológicos, principalmente en la precipitación, y los cambios del uso del suelo, por ejemplo la deforestación y la urbanización. Cruden y Varnes (1996) agrupan una serie de factores que intervienen en la inestabilidad de las laderas (Cuadro 1.3). Sin embargo, los procesos de remoción se presentan cuando ambos factores se combinan y además uno de los dos puede ser un factor que desencadene algún tipo de movimiento.

| Causas de índole geológica | | Causas por procesos físicos | |
|---|--|---|--|
| Materiales débiles | | Precipitación intensa | |
| Materiales sensibles | | Derretimiento de nieve o hielo | |
| Materiales intemperizados | | Actividad sísmica | |
| Materiales sujetos a cizallamiento | | Erupciones volcánicas | |
| Materiales con fisuras y diaclasas | | Gelifracción | |
| Discontinuidades orientadas adversamente | | Expansión e hidratación de arcillas | |
| Discontinuidades estructurales | | | |
| Permeabilidad contrastante | | | |
| Contraste de materiales con diferente plasticidad | | | |
| Causas morfológicas | | Causas antrópicas | |
| Levantamientos tectónicos o volcánicos | | Excavación de laderas o al pie de las laderas | |
| Erosión glacial | | Incremento de peso en las laderas | |
| Erosión fluvial al pie de las laderas | | Disecación de cuerpos de agua | |
| Erosión marina al pie de los acantilados | | Deforestación | |
| Erosión en márgenes laterales | | Irrigación | |
| Erosión subterránea | | Actividad minera | |
| Remoción de la vegetación (por incendios y sequías) | | Vibraciones artificiales | |

Cuadro 1.3. Principales causas de los movimientos del terreno según Cruden y Varnes (1996).

Fuente: Alcántara Ayala (2000).

1.3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

En el estudio de la inestabilidad de laderas se ha hecho una gran variedad de clasificaciones de los movimientos o procesos que ocurren en las laderas (Alcántara Ayala, 2000). Estas clasificaciones varían de acuerdo a los objetivos y puntos de vista de los autores. De esta forma tenemos que los procesos se pueden clasificar de acuerdo a los atributos morfológicos de los movimientos, ya sea de la superficie de ruptura, del área de depósito o de ambos (Skempton 1953; Blong, 1973; Brunsten, 1973; Crozier, 1973); en el tipo y velocidad del movimiento (Sharpe, 1938; Ward, 1945; Hutchinson, 1968; Coates, 1977; Varnes, 1978); tamaño y tipo de los materiales involucrados en el proceso (Coates, 1977; Varnes, 1978); antigüedad del movimiento

(Zaruba y Mencl, 1969); grado de actividad (Erskine, 1973); y tipo climático (Sharpe, 1938).

En este caso la clasificación que se utilizará en el presente trabajo es la realizada por el programa EPOCH (1993) traducido al español por Alcántara Ayala (2000), el cual consiste en la conjugación de las clasificaciones hechas por Varnes (1978) y Hutchinson (1988). De esta forma Alcántara Ayala realiza una clasificación de acuerdo al tipo de movimiento y al tipo de material que está involucrado (Cuadro 1.4). Así tenemos que los movimientos se dividen en caída, vuelco, deslizamiento, expansión lateral, flujo y movimiento complejo. A su vez estos se subdividen de acuerdo con el material que puede ser roca, detritos o derrubios y suelo.

| Mecanismos de movimiento | Tipo de material involucrado | | |
|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | Roca | Derrubios | Suelo |
| Caída | Caída de rocas | Caída de derrubios | Caída de suelos |
| Vuelco | Vuelco de rocas | Vuelco de derrubios | Vuelco de suelos |
| Deslizamiento rotacional | Individual, múltiple y sucesivo | Individual, múltiple y sucesivo | Individual, múltiple y sucesivo |
| Deslizamiento traslacional | Deslizamiento de rocas en bloque | Deslizamiento de derrubios en bloque | Deslizamiento traslacional de suelos |
| Deslizamiento planar | Deslizamiento de rocas | Deslizamiento de derrubios | Coladas de barro |
| Flujo | Flujo de rocas | Corriente de derrubios | Flujo de tierra, arena o suelo |
| Expansión lateral | Expansión lateral en rocas | Expansión lateral en derrubios | Expansión lateral en suelos |
| Complejo | Alud de rocas | Flujo deslizante | Rotación con flujo de tierras |

Cuadro 1.4. Clasificación de los procesos de remoción en masa según EPOCH (1993) a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988) y traducido por Alcántara Ayala (2000).

Fuente: Alcántara Ayala (2000).

a) CAÍDA

Es uno de los movimientos más comunes y rápidos y se pueden presentar en laderas muy inclinadas, en los acantilados costeros, en las orillas escarpadas del lecho de un río, en el borde de una meseta y en un escarpe. Este movimiento involucra la caída libre del material de una ladera (Figura 1.9). El material se desplaza en el aire por medio de rodamiento, rebote o deslizamiento.

Se presenta cuando un bloque o grupo de bloques se separan del lecho rocoso. Esto se debe a cambios que ocurren en el agua al penetrar en las diaclasas y fracturas que se localizan en el material que se desprende, estos se deben al congelamiento y derretimiento del agua, proceso que va ensanchando las fracturas hasta que el material se desprende. También puede darse el caso de que la roca se desprenda como resultado de la acción de la temperatura, es decir, a altas temperaturas el material se expande y por el contrario, al disminuir ésta la roca se contrae provocando el ensanchamiento de las juntas. Raramente se presenta la caída por el crecimiento de las raíces. Otros factores que influyen en crecimiento de las grietas son la cristalización de sales dentro de las fisuras, el incremento en la inclinación de las laderas, por ejemplo en un volcán activo y en el caso de bloques incrustados en una matriz fina la cual por procesos fluviales es erosionada dejando libres a los diferentes bloques que formaban parte de ésta.



Figura 1.9. Proceso de caída.

Fuente: www.usgs.gov

b) VUELCO

El vuelco es un movimiento parecido a la caída, sólo que este involucra una acción de giro sobre un eje en vez de una separación completa del lecho rocoso (Figura 1.10). El proceso involucra grandes cantidades de material. Son muy comunes en rocas masivas, por ejemplo la arenisca. Es una inclinación sin colapso e involucra grandes bloques verticales que se rompen o separan paralelos a la pared escarpada. Los vuelcos de roca y detritos son comunes en esquistos y capas de calizas y en columnas de basaltos y doleritas. Mientras que el de suelo ocurre en columnas ricas en arcilla.

Los procesos que influyen en la ocurrencia de un vuelco son el intemperismo y la erosión, los cuales debilitan y remueven el material subyacente permitiendo un vuelco rápido y sobre todo la roca presenta diaclasas, fracturas, grietas o fallas. Otro factor que interviene es el socavamiento de las laderas ya sea por erosión fluvial o por excavaciones que favorecen la creación de laderas más empinadas lo cual aumenta la tensión.



Figura 1.10. Vuelco
Fuente: www.usgs.gov

c) **DESLIZAMIENTOS**

Son aquellos movimientos que ocurren sobre una(s) superficie(s) de ruptura (Figura 1.11). Debido a su complejidad se dividen de acuerdo con la forma de la superficie en la cual se desplazan. De esta forma existen los deslizamientos rotacionales, traslacionales y planos. Una de las primeras señales para identificarlos en el terreno, es la formación de grietas transversales en la zona que ocupará el escarpe principal. El material involucrado en este tipo de movimientos puede o no presentar deformación. Por lo general se presentan en suelos que son ricos en arcilla.

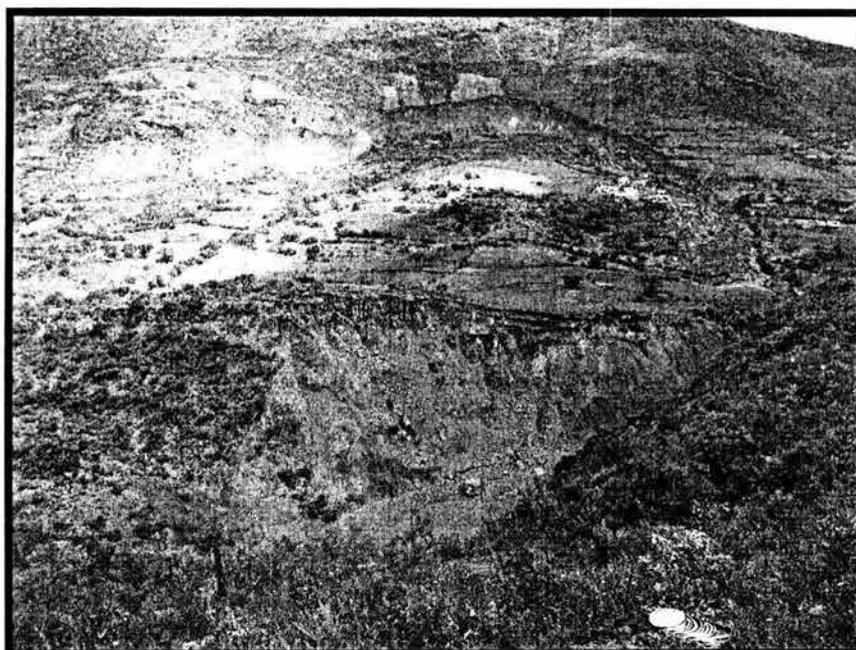


Figura 1.11. Deslizamiento rotacional

El rotacional presenta una superficie semicircular, cóncava, casi en forma de cuchara. Presenta una rotación hacia atrás o “de espaldas” del material. Se forma a partir de cicatrices de tensión en la parte superior de una ladera. Estas son generalmente concéntricas y paralelas a la cicatriz principal. Además con base en las etapas del movimiento se clasifican en simples, múltiples y sucesivos.

El traslacional usualmente ocurre en superficies semiplanas, principalmente en depósitos estratificados inclinados. Además son menos profundos que los

rotacionales e involucran un movimiento paralelo a la superficie (Alcántara Ayala *et al.*, 2001). Usualmente están definidos por superficies de debilidad en formaciones rocosas (planos de estratificación), diaclasas y zonas de cambio de estado de intemperización en las rocas.

d) **EXPANSIONES LATERALES**

Se presenta en laderas de baja inclinación y son el resultado de la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compactas debido a la licuefacción (consiste en el proceso en el cual los materiales sueltos y saturados, con alto contenido de arena y limo, adquieren el comportamiento de un fluido como consecuencia de las vibraciones causadas, por ejemplo, por un sismo (Alcántara Ayala *et al.*, 2001) o fluidización del material subyacente, ocurren cuando materiales gruesos están inmersos en una matriz de material fino. Ocurren principalmente en ambientes lacustres y marinos de poca profundidad (Alcántara Ayala, 2000)(Figura 1.12)

e) **FLUJO**

Consiste en un movimiento en el cual el material que lo constituye se comporta como una masa fluida, casi viscosa, en la que el agua y el aire están involucrados (Figura 1.12). El desplazamiento puede ser lento o rápido, así como secos o húmedos (Alcántara Ayala *et al.*, 2001). La superficie de deslizamiento no es visible. Son movimientos espacialmente continuos en los cuales las superficies de ruptura son muy próximas, de poca duración y difíciles de observar. La distribución de velocidades dentro del flujo no es homogénea y origina la formación de lóbulos.

f) **MOVIMIENTOS COMPLEJOS**

Ocurren cuando el movimiento inicial se transforma en otro al desplazarse ladera abajo, es decir, son la combinación de 2 o más de los procesos antes mencionados (Dikau *et al.*, 1996). Los eventos que caracterizan a este tipo de proceso son las avalanchas de rocas y los flujos deslizantes, estos últimos son el resultado del

colapso repentino y de gran extensión de una masa de material granular o de detritos que viajan a grandes velocidades como resultado de un evento perturbador (Alcántara Ayala *et al.*, 2001).

Otra de las características más importantes que se deben conocer acerca de un proceso de remoción en masa es la velocidad con la cual se desplaza, ya que no todos los eventos presentan la misma velocidad y esto de alguna forma permite inferir, a través de monitoreos, el tipo de impacto que puede producir en el espacio en el cual se desarrolla. En el Cuadro 1.5 se observan las diferentes velocidades que presentan los procesos de ladera.

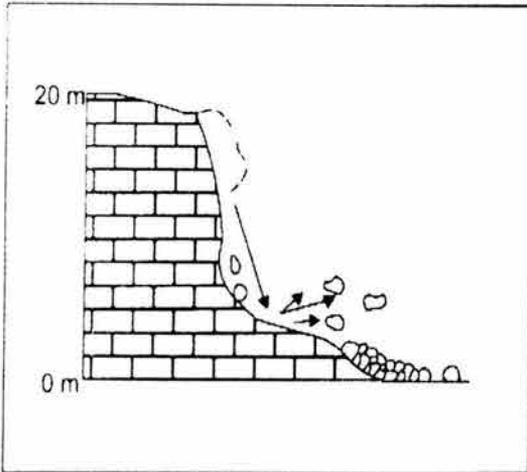
1.3.4 RASGOS MORFOLÓGICOS DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

En el estudio de los procesos de ladera es importante conocer e identificar los rasgos morfológicos ya que estos reflejarán el tipo de proceso que se lleva a cabo.

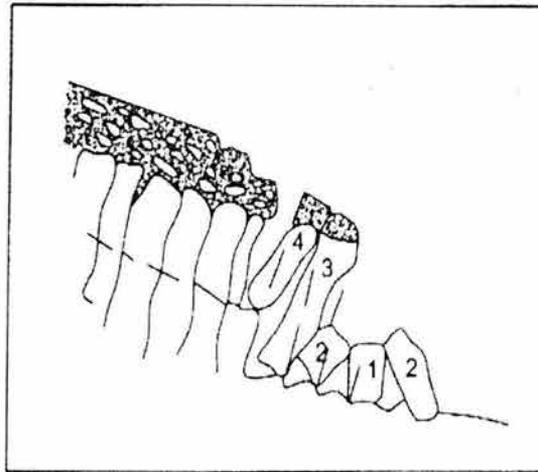
En las figuras 1.13 y 1.14 se pueden observar los diferentes rasgos que conforman a un movimiento del terreno. Esta clasificación fue propuesta por la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (IAEG), la cual está basada en un diagrama hecho por Varnes (1978).

De acuerdo a los conceptos propuestos por Alcántara Ayala (2000) los rasgos morfológicos que se pueden identificar en proceso de ladera son:

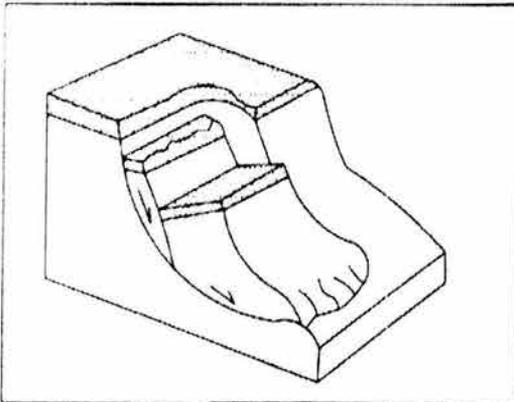
1. Corona. Representa la parte superior y adyacente al escarpe principal. Es la zona en la cual el material no ha sido desplazado.
2. Escarpe principal. Se localiza en la arista superior, resultado del movimiento.
3. Margen superior. Es el punto más alto de contacto entre el material que ha sido desplazado y el escarpe principal.



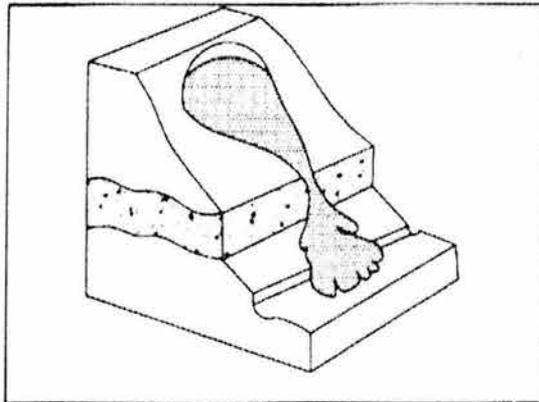
1.- Desprendimientos o caídas



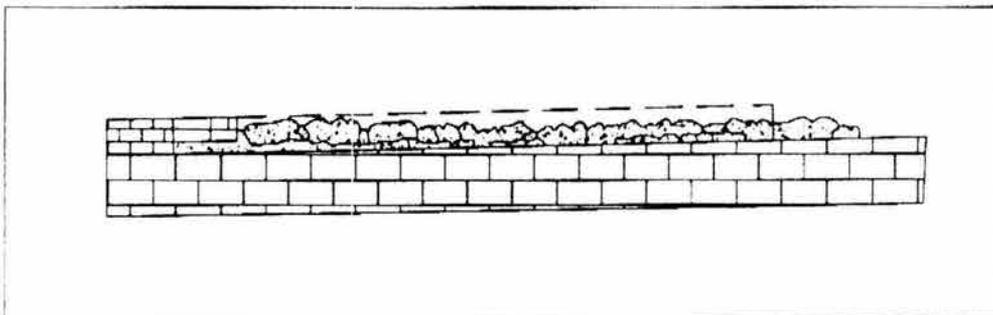
2.- Vuelcos o desplomes



3.- Deslizamientos



4.- Flujos



5.- Expansiones laterales

Figura 1.12. Esquema donde se presentan los diferentes movimientos de ladera.

Fuente: WP/WLI (1990). Tomado de Alcántara Ayala (2000).

| VELOCIDAD | CLASIFICACIÓN | LIMITES | DESCRIPCIÓN | IMPACTO |
|------------|---------------|-------------|-----------------------|---|
| 3 m/seg | 7 | 5 m/seg | Extremadamente rápido | Catástrofe de gran violencia, edificios expuestos totalmente destrozados y deceso de la población por el impacto del material desplazado, o por la disgregación del mismo. |
| 0.3 m/min | 6 | 3 m/min | Muy rápido | Pérdida de algunas vidas debido a que la velocidad del movimiento es muy rápida para permitir que todas las personas escapen, gran destrucción |
| 1.5 m/día | 5 | 1.8 m/hora | Rápido | Posible escape y evacuación, estructura, posesiones y equipo destruido por la masa desplazada. |
| 1.5 m/mes | 4 | 13 m/mes | Moderado | Estructuras poco sensibles pueden ser mantenidas si están localizadas a una distancia considerable en relación con el pie de la masa desplazada. Estructuras localizadas en la masa desplazada son dañadas en gran medida. |
| 1.5 m/año | 3 | 1.6 m/año | Lento | Carreteras y estructuras poco sensibles pueden ser mantenidas a través de frecuente trabajo de mantenimiento, si el movimiento no es de mucha duración y los movimientos diferenciales a lo largo de las márgenes del movimiento están distribuidos a lo largo de una zona ancha. |
| 0.06 m/año | 2 | 0.016 m/año | Muy lento | Algunas estructuras permanentes no son dañadas y si son agrietadas por el movimiento pueden ser reparadas. |
| | 1 | | Extremadamente lento | No hay daño a las estructuras construidas con precaución. |

Cuadro 1.5. Escala de valores de los procesos de remoción en masa según Cruden y Varnes (1996).

Fuente: Alcántara Ayala (2000).

4. Cabecera. Es la porción que se localiza a lo largo del contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.
5. Escarpe(s) secundario(s). Puede ser una o varias superficies abruptas que se ubican dentro del material desplazado y que además son el resultado de movimientos diferenciales.

6. Cuerpo principal. Es el material desplazado que se localiza sobre la superficie de ruptura entre el escarpe principal y el extremo inferior de la superficie de ruptura.
7. Pedestal. Es parte del material que se ha desplazado y que se ubica más allá del extremo inferior de la superficie de ruptura, además sobreyace la superficie original del terreno.
8. Margen inferior. Se localiza en la parte más alejada del margen superior del movimiento.
9. Lóbulo frontal. En el movimiento es la parte más baja, es decir es el material que se ha desplazado más allá de la superficie original del terreno.
10. Superficie de ruptura. Es la que se ha formado en el límite más bajo del material desplazado. Es aquella en la cual se desliza el material.
11. Pie de la superficie de ruptura. Es donde se encuentran o se unen la parte más baja de la superficie de ruptura y la superficie original y generalmente está sepultada.
12. Superficie de separación. Originalmente es el pedestal de la superficie original del terreno y que después del movimiento se localiza debajo del pedestal del mismo.
13. Material desplazado. Es parte del terreno que se ha deslizado debido al movimiento. La masa hundida y el depósito forman parte del material.
14. Zona de hundimiento. Es el área que se localiza debajo de la superficie original del terreno y en la cual descansa el material desplazado.
15. Zona de acumulación. Es aquella en la cual el material desplazado descansa sobre la superficie original.

16. Hundimiento. Se reconoce debido a que es el volumen que se encuentra rodeado por el escarpe principal, la masa que se ha hundido y la superficie original.
17. Masa hundida. Es la cantidad de material desplazado que se localiza entre la superficie de ruptura y la superficie original.
18. Acumulación o depósito. Es el material desplazado que se localiza sobre la superficie original del terreno, además parte de este material se localiza sobre la superficie de separación.
19. Flanco. Es el material que no fue desplazado y que forma parte del límite lateral del movimiento.
20. Superficie original del movimiento. Es la forma que tenía la ladera antes de que ocurriera el movimiento, es decir era toda la superficie que abarcaba en un principio el material desplazado.

1.3.5 METODOLOGÍAS EMPLEADAS EN EL ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

Para llevar a cabo una investigación acerca de los procesos gravitacionales se debe contar primero, con la información necesaria; en este caso es imprescindible analizar archivos históricos ya que esto nos permitirá entender el origen y la dinámica que siguen un determinado movimiento.

Algo que es muy importante es la realización de una cartografía en la cual se representen todos los aspectos relacionados con los procesos de remoción en masa. Para esto se pueden utilizar diversas herramientas, desde el mapa topográfico hasta los modelos digitales del terreno, pasando por el uso de las fotografías aéreas,

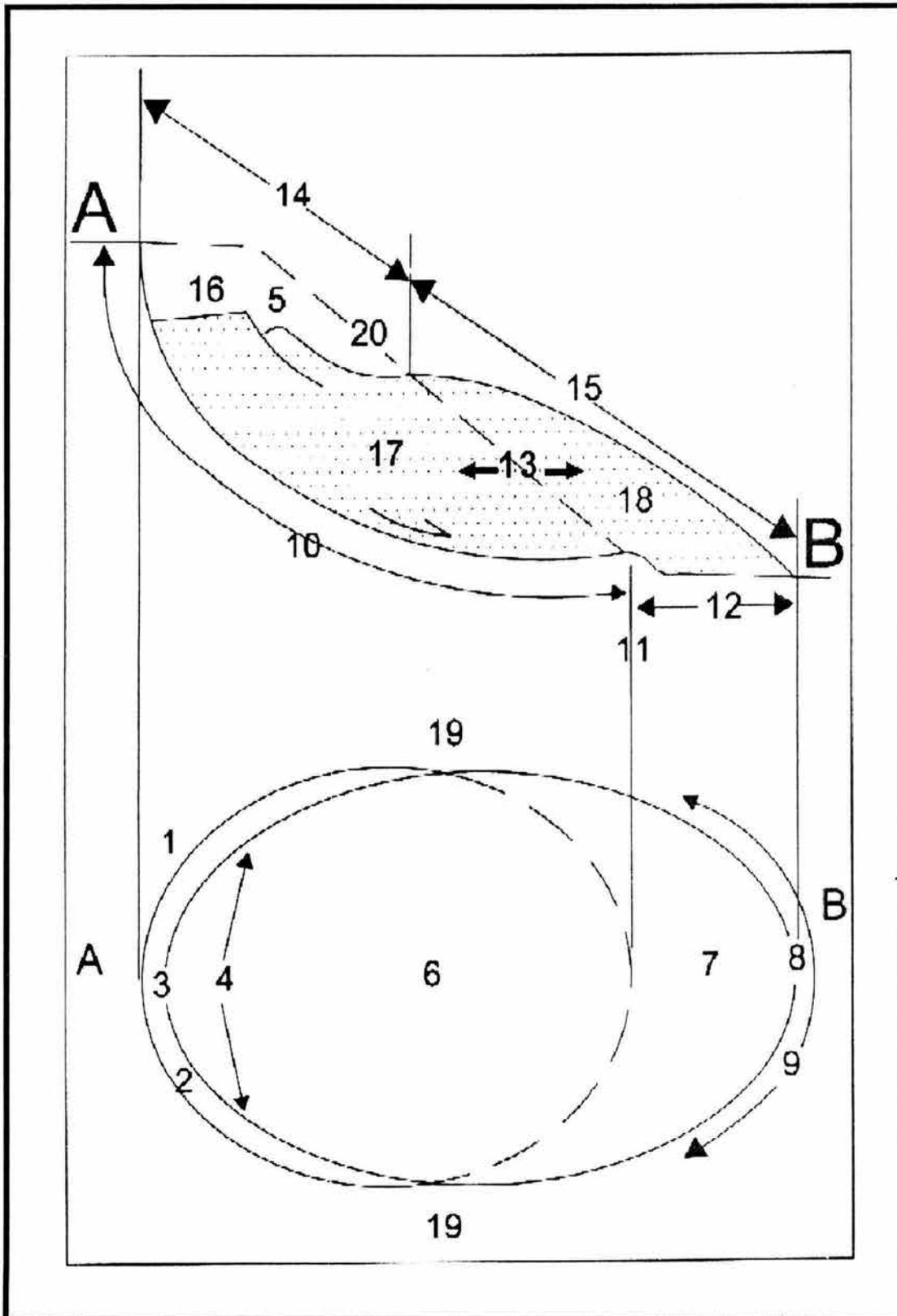


Figura 1.13. Diagrama idealizado de los rasgos morfológicos de un movimiento de ladera.
Fuente: IAEG Comisión on Landslides (1990). Tomado de Alcántara Ayala (2000).

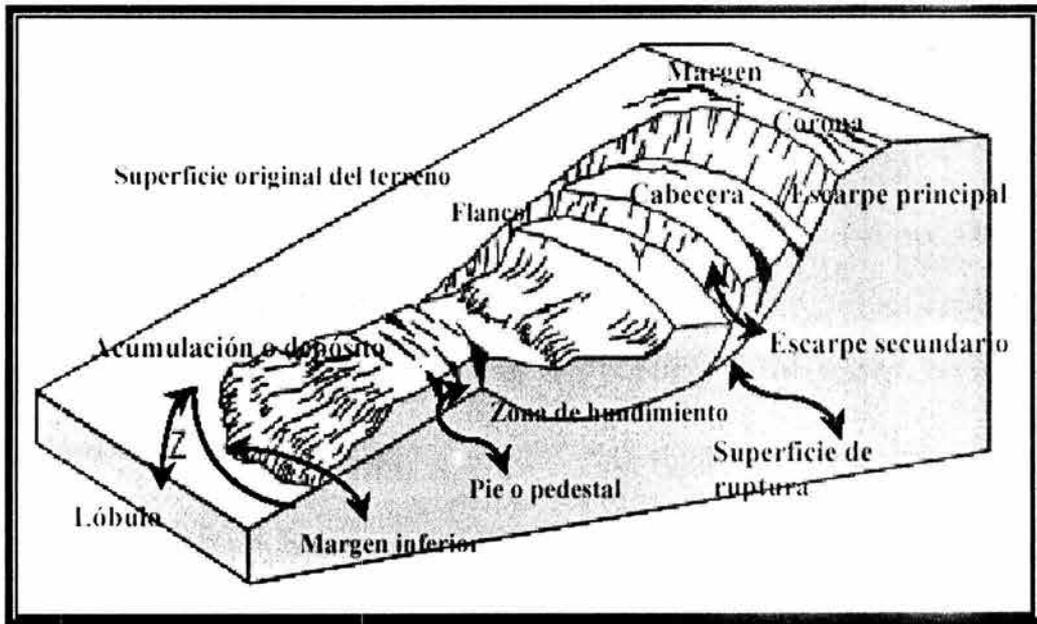


Figura 1.14. Rasgos morfológicos de un deslizamiento.

Fuente: Alcántara Ayala *et al.*, 2001.

imágenes de satélite y los Sistemas de Información Geográfica. Estos últimos permiten la realización de simulaciones en las cuales se pueden observar procesos reales o hipotéticos y a partir de ésta crear otro tipo de mapas e incluso se puede llevar a cabo una planeación.

Todos estos trabajos se realizan para satisfacer diversos propósitos: entender la dinámica de los procesos, realizar una adecuada planeación, crear sistemas de alarma, evitar pérdida de vidas y grandes costos materiales, desarrollar sistemas de protección, etc.

CAPÍTULO 2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

2.1 GEOLOGÍA

2.1.1 INTRODUCCIÓN

El análisis de las características de la geología de la superficie y del subsuelo da pauta para comprender los diferentes procesos que dieron origen al relieve además de la forma en la cual éste ha evolucionado a través del tiempo. Toda esta información permite identificar los diferentes contrastes que se presentan en la zona y por lo tanto inferir si presentan o no una relación estrecha con los diferentes procesos y fenómenos que se encargan de dar forma al relieve. También nos brinda la posibilidad de entender su grado de participación en los diferentes eventos naturales, en el caso de este trabajo, las inundaciones y los procesos de remoción en masa.

El municipio de Tecolutla se localiza dentro de la estructura geológica, Cuenca Tampico-Misantla, también llamada Cuenca Tampico-Tuxpan, Tuxpan-Misantla. Se compone principalmente, de acuerdo con la carta geológica de INEGI (1983) escala 1:250000, de rocas sedimentarias y rocas ígneas extrusivas, las primeras representadas por areniscas, una asociación de areniscas y lutitas y por el material aluvial y litoral. Por otra parte las rocas ígneas están representadas por tobas ácidas y basaltos, las cuales se encuentran introducidas y asociadas a secciones sedimentarias (Figura 2.1).

La Cuenca Tampico-Misantla está limitada al norte por el arco de Tamaulipas, por la Sierra Madre Oriental al oeste, al sur por el macizo Santa Ana (Teziutlán) y al este por la línea de costa del Golfo de México. Comprende la parte norte del estado de Veracruz, el extremo sur de Tamaulipas, el más oriental de San Luis Potosí e Hidalgo y parte del norte del estado de Puebla.

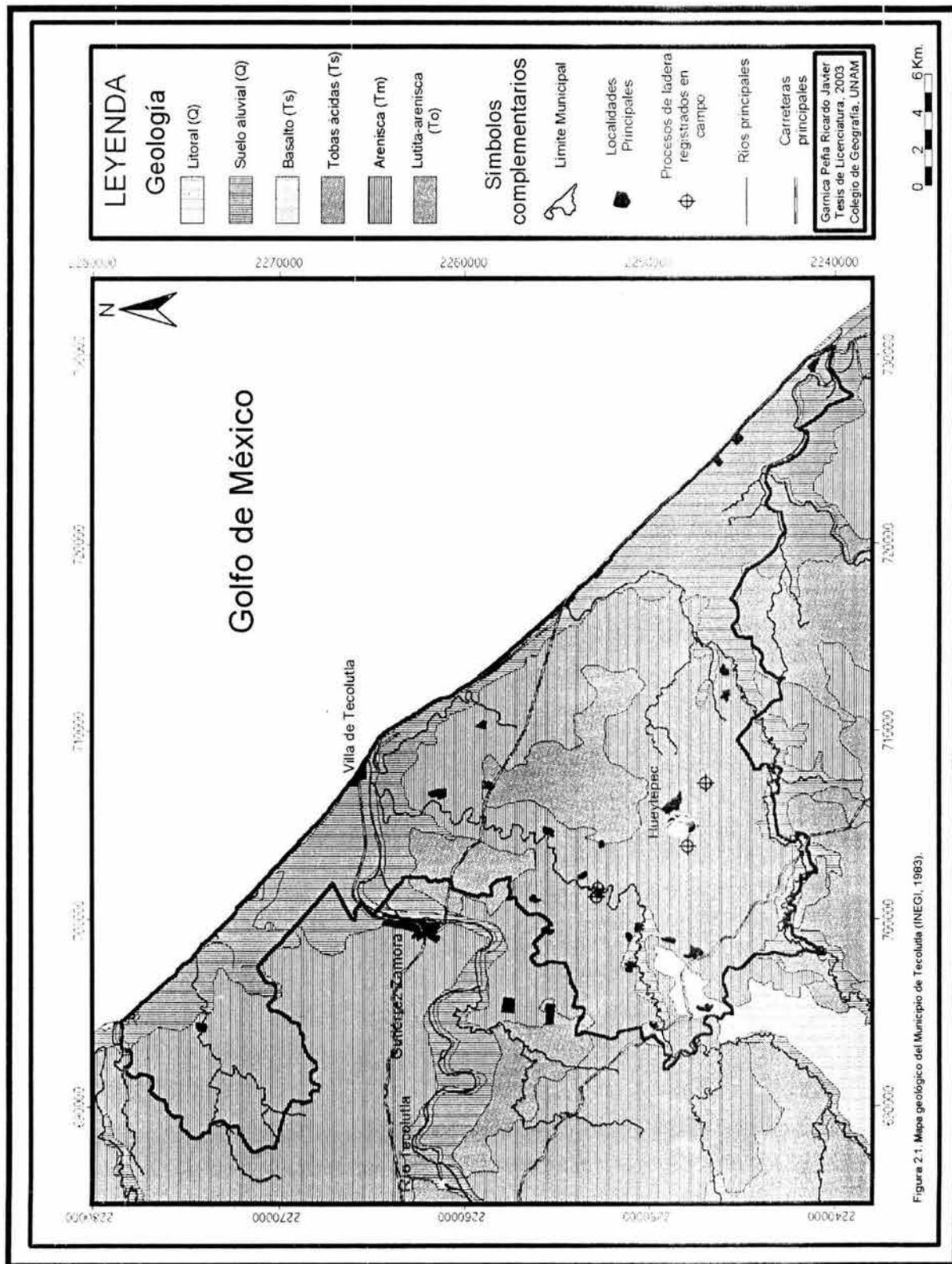


Figura 2.1. Mapa geológico del Municipio de Tecolutla (INEGI, 1983).

Según Salvador (1991) la cuenca es el resultado de la subsidencia del arco de Tamaulipas durante la orogenia Laramide a fines del Cretácico y principios del Terciario. Además estuvo sujeta a dos eventos tectónicos, a fines del Eoceno, principios del Oligoceno y durante el Mioceno. También se presentaron cinco episodios de acumulación durante los cuales se formaron el abanico submarino Ayotoxco (fines del Paleoceno), los cañones Chicontepec y Nautla (principios del Eoceno) y los paleodeltas Cazonas y Tecolutla (fines del Eoceno). De acuerdo con Quezadas (1961) se desarrolló durante el Mesozoico sobre la superficie erosionada del pre-Cámbrico y Paleozoico; su emplazamiento está relacionado con la estructura apalachiana de esta área.

La estratigrafía completa de la cuenca está compuesta de rocas sedimentarias, con edades que van desde el Jurásico hasta el Cuaternario, y por rocas ígneas extrusivas pertenecientes al Terciario Superior.

En el municipio predominan en la superficie las rocas sedimentarias, principalmente areniscas, seguidas del material aluvial depositado por los diferentes ríos que cruzan al municipio (el principal acarreador de sedimentos es el río Tecolutla), le siguen una asociación de lutitas-areniscas y por último en menor proporción los sedimentos que forman la playa que recorre el límite oriental del municipio y la barra que se forma en la desembocadura del río Tecolutla.

Las areniscas pertenecen al Terciario Superior y se distribuyen de manera irregular en la zona de estudio, ya que las podemos encontrar al norte, centro y sur del municipio, en algunas zonas se encuentran cubiertas por rocas ígneas extrusivas (tobas ácidas). Dan lugar a una morfología de lomeríos con una altitud menor a 300 msnm y presentan una gran cantidad de valles fluviales por lo que el acarreo de sedimentos se presenta en gran proporción.

Por otra parte los depósitos de aluvión se encuentran distribuidos de acuerdo a la ubicación de los principales ríos y a lo largo de su recorrido rumbo al mar. Abundan principalmente en la llanura de inundación y en las cercanías de la desembocadura del río Tecolutla, también se distribuyen a lo largo del río Solteros, al sur del

municipio, y se presentan en forma de una pequeña franja en las cercanías a los materiales que dan origen a las playas del municipio. Presentan una morfología caracterizada por grandes planicies, las cuales en ocasiones son cubiertas por las aguas de los ríos y los diferentes esteros que cruzan la zona.

La asociación de lutitas y arenisca se localiza fuera del municipio de Tecolutla, pero ha sido tomada en cuenta en este trabajo debido a que se localiza dentro del rectángulo que se consideró para el estudio de la inestabilidad de laderas. Estas rocas se ubican en la porción sur-suroeste del área de estudio y se caracterizan por dar forma a lomeríos de baja altitud, menores a 350 msnm, y que presentan poca disección por parte de las corrientes fluviales.

Las arenas que dan origen a la playa y a la barra del río Tecolutla se distribuyen a lo largo de una pequeña línea en el límite oriental del municipio. La barra presenta una morfología de media luna y se identifica como una barra ya que su lado convexo se localiza frente al mar.

La otra unidad geológica que se identifica en el área de estudio está compuesta por rocas ígneas extrusivas, representadas por una colada de lava y por materiales piroclásticos. El tipo de roca ígnea que abunda en la zona es la toba ácida la cual se localiza en la parte central y sur del municipio. Se presenta en forma de rampas (centro y sureste) y en las cercanías de la planicie aluvial del río Solteros casi no se distingue debido a su forma de peniplanicie. También se localiza en las cercanías del río Tecolutla en donde se presenta en forma de pequeñas elevaciones (arriba de los 20msnm).

Por último se tiene la gran colada de lava constituida principalmente por basalto. Esta unidad se localiza al suroeste del área de estudio y se caracteriza por presentar una morfología de mesa, la cual está cubierta en sus flancos por una gran variedad de materiales como areniscas, lutitas-areniscas y tobas ácidas. Por sus características no presenta corrientes fluviales.

| Era | Sistema | Serie | Edad (m.a.) | Formación | | |
|------------|-----------|-------------|-------------|---------------------|-----------------|-------------|
| Cenozoico | Terciario | Holoceno | 1 | Aluvión | | |
| | | Pleistoceno | | Basaltos y tobas | | |
| | | Plioceno | 10 | | Arenas y gravas | |
| | | Mioceno | Superior | 25 | Tuxpan | Escolín |
| | | | Medio | | Coatzintla | |
| | | | Inferior | | | |
| | | Oligoceno | 40 | Mesón | Palma Real | Alazán |
| | | | | Tantoyuca | Chapopote | |
| | | Eoceno | 60 | Guayabal | | |
| | | | | Aragón | | |
| | | Paleoceno | 70 | Chicontepec | Velasco | |
| | | Mesozoico | Cretácico | Superior | 82 | Méndez |
| San Felipe | | | | | | |
| Agua Nueva | | | | | | |
| Inferior | 135 | | | El Abra | Tamabra | Tamps. Sup. |
| | | | | Otates | | |
| | | | | Tamaulipas inferior | | |
| Jurásico | 166 | | Superior | San Andrés | Tamán | |
| | | | Medio | Santiago | | |
| | | | Inferior | Tepexic | | |
| Triásico | 181 | | Superior | Cahuasas | | |
| | | | Medio | Huehuetepec | | |
| | | | Inferior | Huayacocotla | | |
| Paleozoico | | | 330 | Complejo basal | | |

Figura 2.2. Columna estratigráfica de la cuenca Tampico-Misantla.

Fuente: Salvador (1991)

A continuación se presenta la secuencia estratigráfica que presenta el subsuelo de la zona, la cual dio lugar a grandes yacimientos petroleros en el área (Faja de Oro) (ver Figura 2.2).

| Era | Sistema | Serie | Edad (m.a.) | Formación | | | | |
|------------|-----------|-------------|--------------|---------------------|------------------|-------------|--------|---------|
| Cenozoico | Terciario | Holoceno | 1 | Aluvión | | | | |
| | | Pleistoceno | | Arenas y gravas | | | | |
| | | Plioceno | 10 | | Basaltos y tobas | | | |
| | | | | Mioceno | | Superior | Tuxpan | Escolín |
| | | | | | | Medio | | |
| | | Inferior | | | | | | |
| | | Oligoceno | 25 | Coatzintla | | | | |
| | | | | Mesón | Palma Real | Alazán | | |
| | | Eoceno | 40 | Tantoyuca | Chapopote | | | |
| | | | | Horcones | | | | |
| | | Paleoceno | 60 | Guayabal | | | | |
| | | | | Aragón | | | | |
| Mesozoico | Cretácico | Superior | 82 | Méndez | | | | |
| | | | | San Felipe | | | | |
| | | | | Agua Nueva | | | | |
| | | Inferior | 135 | El Abra | Tamabra | Tamps. Sup. | | |
| | | | | Otates | | | | |
| | | | | Tamaulipas inferior | | | | |
| | Jurásico | 166 | San Andrés | Tamán | | | | |
| | | | Santiago | | | | | |
| | | | Tepexic | | | | | |
| | Triásico | 181 | Cahuasas | Huehuetepic | | | | |
| | | | Huayacocotla | | | | | |
| | | | Huizachal | | | | | |
| Paleozoico | | | 330 | Complejo basal | | | | |

Figura 2.2. Columna estratigráfica de la cuenca Tampico-Misantla.

Fuente: Salvador (1991)

2.1.2 ESTRATIGRAFÍA

PALEOZOICO

Pérmico

La edad del basamento de la cuenca Tampico-Misantla, de acuerdo con Quezadas (1961) es Permo-Triásica, que funciona en la actualidad como una gran masa estable que operó como traspáis en una orogenia desarrollada durante el Paleozoico Superior y como antepaís en la Orogenia Laramíde. Está compuesto por rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

Las rocas ígneas son de tipo plutónico, y respecto a la saturación (contenido de sílice) se observan dos grandes grupos, uno saturado, constituido por horblendita y gabro y otro sobresaturado, formado por granodiorita, tonalita y granito (Quezadas, 1961).

Por lo que respecta a las rocas metamórficas del basamento, estas consisten de gneis, esquistos y metasedimentos. En las primeras predominan el cuarzo y el feldespato potásico. Estas rocas se formaron del metamorfismo de rocas ígneas como el granito, las granodioritas y las tonalitas.

En cambio las rocas sedimentarias están representadas por conglomerados y areniscas, los primeros compuestos de cuarcita y esquistos de cuarzo. De acuerdo con Quezadas (1961) estas rocas son el resultado de la erosión en cuerpos granodioríticos y tonalíticos, debido a los fragmentos de feldespatos que tienen una composición entre oligoclasa y andesina.

MESOZOICO

Triásico

Formación Huizachal

Está representada por una capa de rocas de origen continental llamadas lechos rojos, debido a sus características litológicas y a la ausencia de fósiles (Olivas, 1953). Esta formación se compone de arenisca cuarcífera, de grano fino a grueso, de conglomerado y de lutita. De acuerdo con el Benavides (1956), esta formación corresponde a un depósito continental en un medio predominantemente árido.

JURÁSICO

Formación Huayacocotla

Consiste en lutitas negras que contienen intercalaciones de areniscas verdes, amarillas y grises, así mismo incluye algunas intercalaciones de conglomerados y caliza, en los primeros los materiales consisten de rocas ígneas y metamórficas (López Ramos, 1982).

Esta formación está constituida por 9 unidades diferenciadas por la fauna y litología (Benavides, 1956). La cima de la formación puede estar constituida por una discordancia angular, por formaciones rojas, pertenecientes a las formaciones Cahuassas y Tamán (López-Ramos, 1982). De acuerdo con Ruiz Sains (1965) estas rocas se depositaron en aguas someras, durante un proceso de transgresión en el Jurásico Inferior.

Formación Cahuassas

Secuencia continental, que infrayace al Jurásico Superior marino, compuesta de lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados rojos, estos últimos con fragmentos de

cuarzo y arenisca. La formación está dada por sedimentación continental (Salvador, 1991).

Formación Huehuatepec

Formación de poco espesor que consiste de una secuencia de evaporitas con intercalaciones de lutitas y limolitas rojas. Ha sido interpretada como una unidad transicional entre las capas rojas no marinas de la formación Cahuascal y las calcarenitas marinas de la formación Tepexic (López Ramos, 1982).

Formación Tepexic

Esta pequeña formación, perteneciente al Jurásico Medio está compuesta de lodolita que presenta un color café grisáceo (López Ramos, 1982). Según Salvador (1991) ésta fue depositada en un ambiente marino de aguas profundas donde los recurrentes periodos de alta y baja energía resultaron en la formación de capas alternantes de calcarenita y margas.

Formación Santiago

Consiste de una secuencia de limolitas color café grisáceo y gris que cambian hacia la parte superior de la formación a lutitas calcáreas gris oscuro y negras (López Ramos, 1982).

Formación Tamán.

Se compone de calizas color gris oscuro intercaladas con margas de color gris oscuro y margas calcáreas (López Ramos, 1982). Según López-Ramos (1979) está representada por dos facies, una calcárea y una arcillosa, formadas bajo condiciones de aguas marinas profundas que la depositaron sobre la formación Santiago; fue depositada en un cinturón marino abierto dentro del cual la influencia de los clastos terrígenos fue mínima.

Formación San Andrés

Está constituida de calizas de color gris oscuro a negro y calizas arcillosas de color negro. La sedimentación que les dio origen se desarrolló en mares de poca profundidad durante el Jurásico Superior (Heim, 1940 en López Ramos 1979).

Formación Pimienta

Consiste principalmente de calizas y dolomías grisáceas a negras, con pedernal negro en bandas y calizas arcillosas negras, depósitos de mares transgresivos de ambiente fanerítico de aguas templadas (López-Ramos, 1982). Presenta una cima de bentonitas amarillas a verdes en alternancia con calizas arcillosas y areniscas grises. Los sedimentos de la formación yacen sobre las facies de la formación Tamán en la región de Tamazunchale (Benavides, 1956).

CRETÁCICO

Formación Tamaulipas inferior

Constituida por caliza compacta de textura fina, de colores gris, crema y amarillento, dividida en tres miembros constituidos de microfósiles, granos de cuarzo, caliza criptocristalina, bentonita, calcilutita y capas delgadas de lutita bituminosa y caliza arcillosa (Benavides, 1956). Los sedimentos de esta formación fueron depositados bajo condiciones de un ambiente infranerítico, producto de un mar transgresivo durante el Cretácico Inferior (Belt, 1925, en López Ramos, 1979) .

Formación Otates

Se compone de calizas arcillosas de colores gris a negro y alternan con lechos de lutita. Es una formación que tiene su origen en un ambiente de depósito marino de aguas profundas de baja energía (Bello, 1978).

Formación Tamaulipas superior

Compuesta totalmente por calizas arcillosas que en la parte sur de la cuenca descansa directamente sobre la inferior. En su miembro inferior se distinguen calizas de textura fina de colores blanco y crema. En el superior se localizan calizas de color gris blanco y amarillento (López Ramos, 1979).

Formación Tamabra.

Está compuesta por calizas semejantes a la formación Tamaulipas y por calizas porosas de tipo arrecifal como la caliza El Abra. En su miembro inferior se distinguen calizas dolomíticas de grano medio y de color crema y gris azul. En el miembro superior se encuentran capas de caliza de color gris crema (López Ramos, 1982).

Formación El Abra

Está compuesta de calizas de color gris-blanco, de textura fina y sobre esta de caliza de colores gris azul, blanco y café. Las calizas de esta formación presentan cavernas y cavidades de disolución y además se advierten en éstas huellas de la impregnación de hidrocarburos (Benavides, 1956).

Formación Agua Nueva

Constituida principalmente por capas de caliza de colores gris, gris oscuro y negro, arcillosas y alterna con lutita de colores gris oscuro a negro (Bello, 1978). Fue depositada en un ambiente de aguas profundas en la parte exterior de la plataforma bajo condiciones de circulación restringida.

Formación San Felipe

Abundantemente distribuida en la superficie. Está formada por una serie de calizas compactas, delgadas, arcillosas y con buena estratificación, de colores gris claro, verde o café y que por efecto del intemperismo adquieren un color pardo claro y

crema (Bello, 1978). Su depositación se llevó a cabo en un ambiente de aguas marinas profundas.

Formación Méndez

Corresponde a la parte más alta del Cretácico Superior, con características arenosas y calcáreas. Presenta una secuencia de lutitas y margas de colores verde olivo y gris que intemperizan en pardo-crema, y se caracterizan porque se originaron en un ambiente de depósito de mar abierto (Dumble, 1911, en López Ramos, 1979).

CENOZOICO

Terciario

Representado casi totalmente por sedimentos marinos, excluyendo a los depósitos de cenizas volcánicas que se localizan en el extremo sur de la cuenca. Estos sedimentos fueron depositados en una cuenca terciaria que se originó al iniciarse a fines del cretácico la formación de los primeros pliegues de la Sierra Madre Oriental, como consecuencia del avance del traspais sobre la plataforma de Tamaulipas (Benavides, 1956).

Formaciones Chicontepec inferior y Velasco

Consta de dos facies diferentes, una arenosa y la otra arcillo-margosa, que constituyen la formación Chicontepec inferior y la formación Velasco, respectivamente.

La primera está constituida por una serie alternante de capas de arenisca calcárea y de lutitas y margas, depositadas en aguas poco profundas. Estos sedimentos representan el tipo llamado flysch. En la parte inferior se encuentran capas de arenisca calcárea de grano fino de color gris oscuro, que alternan con capas de lutita calcárea (López Ramos, 1982).

La formación Velasco está constituida esencialmente por margas y lutitas de colores gris verde y gris azul (Benavides, 1956). Estas rocas se depositaron en un ambiente de aguas profundas.

Formaciones Chicontepec medio y superior, y Aragón

Chicontepec medio

Constituida por una serie de areniscas y lutitas en alternancia. Las areniscas son de color gris y de grano medio, por otro lado las lutitas son de color gris a gris azul, duras estratificadas en capas delgadas (Galloway *et al.*, 1991, en Salvador, 1991).

Chicontepec superior

Formada por lechos de arenisca de grano fino a medio de colores gris y gris oscuro, alternan con margas de color gris y con lutita de color gris azul (Galloway *et al.*, 1991, en Salvador, 1991).

Aragón

Está constituida por lutita de colores gris claro, gris azul y verde que por acción del intemperismo toman un color amarillento. La formación Aragón representa la facies de aguas profundas de la formación Chicontepec superior (Galloway *et al.*, 1991, en Salvador, 1991).

Formación Guayabal.

En ciertas regiones esta formación se encuentra ausente al parecer por los efectos de la erosión. Está constituida por lutitas de colores gris azul a café. Esta formación contiene gran cantidad de restos de especies marinas lo que indica que es un depósito de aguas someras (López Ramos, 1982).

Formaciones Chapopote y Tantoyuca

De acuerdo con Galloway *et al.* (en Salvador, 1991) consta de dos facies una arcillo-margosa de aguas profundas a la que se denomina Chapopote y otra arenosa-conglomerática denominada Tantoyuca que constituye una facies molasse típica. La facies Chapopote está constituida de margas de colores gris a gris verde y abundan los foraminíferos. La facies Tantoyuca consta de sedimentos arenoso-conglomeráticos, la forman areniscas de grano fino a grueso y areniscas conglomeráticas de matriz calcárea, con intercalaciones de lutita o de marga arenosa de colores gris y gris oscuro. Tiene desarrollos de conglomerados y brechas constituidos por fragmentos de calizas del cretácico. Es característica de la secuencia molassa, debido a la alternancia que presentan los conglomerados, las areniscas y las margas. La depositación de ambas formaciones tuvo lugar durante la culminación de la orogenia Laramide.

Formación Horcones

Su distribución no es muy amplia, está constituida por lutitas y margas de colores gris a café que alternan con lechos de arenisca cuarcífera de grano fino a grueso, de colores gris y gris claro (López Ramos, 1982).

Formaciones Palma real inferior y superior

En general la formación Palma Real está compuesta por lutitas calcáreas, margas arenosas, areniscas y conglomerados. Las lutitas son de color gris con tonos café y amarillo ocre. Los cambios litológicos se explican por el carácter transgresivo de la unidad, la cual cubre de forma discordante a los sedimentos eocénicos (INEGI, 1983).

Por otra parte, López Ramos (1982) menciona que la formación se divide a su vez en dos miembros, inferior y superior. El miembro inferior está compuesto de sedimentos arcillosos y arenosos que forman lutitas de color gris verde. Al poniente está constituida de margas de color gris oscuro. El miembro superior está constituido en su base por sedimentos litológicamente semejantes al miembro inferior. Los

sedimentos de la parte inferior representan el depósito de un mar en transgresión mientras que en la superior corresponden al depósito de un mar en regresión

Formación Alazán

Esta pequeña formación está compuesta por margas y lutitas de color gris azul que alternan ocasionalmente con algunas capas de arenisca arcillosa (López Ramos, 1982).

Formación Mesón

Se formó en facies de aguas someras. Su parte inferior se compone de lutitas y margas, muy arenosas de colores gris a gris azul. Sobre éstas se localizan estratos de arenisca calcárea de color café, que a su vez está cubierta por caliza el cual está tapado por conglomerado formado por restos de animales marinos (Galloway *et al.*, 1991, en Salvador, 1991).

Formaciones Coatzintla y Escolín.

La primera se compone de lutitas y margas de color gris oscuro que alternan con margas arenosas, conglomerados y calizas coralinas. Es un depósito de aguas más profundas por lo que parece haberse acumulado durante una etapa de transgresión (Galloway *et al.*, 1991, en Salvador, 1991).

La formación Escolín está formada por margas de color gris oscuro que están cubiertas por margas arenosas, arenisca calcárea y caliza arenosa, es característica de un período de regresión (López Ramos, 1982).

Formación Tuxpan

Se compone de capas de arenisca, arenisca calcárea, caliza arenosa y de lutita, y descansa en discordancia sobre las formaciones Escolín, Coatzintla, Mesón y Palma Real Superior que se caracterizan por presentar sedimentos arcillo-arenosos.

Representa un depósito transgresivo de aguas someras seguido de una regresión (Galloway *et al.*, 1991, en Salvador, 1991). Se encuentra ampliamente distribuida en el área de estudio y se caracteriza por presentar dos tipos de vacíos, poros y fisuras lo que le da una porosidad variable, pero es principalmente elevada, por lo tanto presenta una permeabilidad alta, lo que trae como resultado una alta densidad de corrientes fluviales que son alimentadas por flujos superficiales y subsuperficiales que descienden de las laderas de las diferentes formas del relieve que están constituidas por este tipo de roca.

Formación Encanto

Esta formada por arcillas plásticas y arcillas arenosas, de colores gris claro a amarillo rojizo, que alternan con lechos de arena o arenisca de grano fino (Benavides, 1956).

PLIO-PLEISTOCENO

Bajo esta denominación se incluyen todos aquellos sedimentos más recientes al Mioceno que no están diferenciados y que pueden corresponder desde el Plioceno hasta la actualidad. Están constituidos por sedimentos costeros y por depósitos piroclásticos y aluviales. Estos depósitos ocupan una franja estrecha, muy próxima a la línea de costa (Benavides, 1956). Por otra parte los depósitos piroclásticos están representados por tobas ácidas las cuales se dividen en dacíticas y riódacíticas. Además estos depósitos se presentan en pseudo capas casi horizontales. Esta unidad es de color café claro con tonos rosados e interperiza en tonos de rojo y amarillo ocre.

2.1.3 ACTIVIDAD VOLCÁNICA

En este aspecto aún existen dudas acerca del origen de las rocas ígneas localizadas dentro del municipio. Por una parte Robin (1976) menciona que las rocas, tanto las tobas como la colada de lava, provienen de la actividad que tuvo lugar en la localidad de Misantla, en donde se encuentran volcanes recientes en los alrededores de Naolinco y Chiconquiaco (Veracruz). Esta serie de volcanes se originaron por la

actividad volcánica que se presentó durante fines del Terciario en el Sistema Volcánico Transversal. Sin embargo, Byerly (en Salvador, 1991), relaciona la existencia de estos depósitos con la actividad volcánica que se presentó en la porción occidental del país durante el Terciario.

2.1.4 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA

El municipio de Tecolutla se localiza dentro de la región fisiográfica Llanura Costera del Golfo, y dentro de ésta en la zona llamada cuenca Tampico-Misantla, también llamada Tuxpan-Tecolutla, la cual tuvo su origen durante fines del Cretácico principios del Terciario (Salvador, 1991) y se formó sobre un basamento ígneo intrusivo de edad paleozoica tardía, que está cubierto a su vez por capas rojas continentales de edad Triasico-Jurásica. Ambas litologías formaron parte de áreas positivas lo que se tradujo en la existencia de islas en gran parte del Jurásico (Pedrazzini, 1978)

La cuenca fue el resultado de la acción de la orogenia Laramide que levantó y plegó las rocas sedimentarias del Mesozoico para así formar lo que hoy llamamos Sierra Madre Oriental. Esta orogenia se caracterizó por la interacción entre el empuje y levantamiento al oeste y los bloques del basamento rígido al este que se extendieron hacia el sur desde el arco de Tamaulipas hasta la plataforma Tuxpan, así la nueva cuenca se convirtió en el sitio en donde se dio una continua sedimentación en el Cenozoico (Ewing, 1991, en Salvador, 1991).

La depositación tuvo origen durante fines del Jurásico principios del Cretácico, cuando los mares cubrieron la región lo que trajo como consecuencia la acumulación de sedimentos de mar abierto pero de poca profundidad. Sin embargo este episodio fue breve y posteriormente, después del neocomiano, principalmente en el Albiano-Cenomaniano aparecen bancos someros sobre los cuales se acumulan los carbonatos masivos de la formación El Abra todo esto acompañado de una continua subsidencia que les permite alcanzar espesores que alcanzan los 1500 m, mientras que en las áreas circundantes se depositan sedimentos de mar abierto, estos con espesores inferiores al de la formación El Abra. Para finales del Cretácico tardío permanecen las condiciones de mar abierto y se depositan calizas arcillosas y margas

(Pedrazzini, 1978). De esta forma la región estuvo expuesta a condiciones subaéreas en varias ocasiones, esto lo indican los rasgos de la morfología y de erosión cárstica a distintos niveles (Pedrazzini, 1978).

La evolución sedimentaria estuvo bajo la influencia de un levantamiento intermitente en el oeste y una subsidencia progresiva o inclinación hacia el este. La relación que existía entre el continente y el mar fue inestable, y estuvo determinada por la sucesión y alternancia entre los ciclos de transgresión y regresión de las aguas marinas. Estos ciclos se reconocen en la secuencia estratigráfica por una serie de rasgos sedimentarios contrastantes, ya que existen rocas que se formaron en periodos de regresión, mientras que por el otro lado se encuentran rocas que tuvieron su origen en etapas de transgresión (Salvador, 1991).

De acuerdo con Salvador (1991) durante el resto del Paleoceno, la depositación se llevo a cabo, primero, en el sur y este de la cuenca, esta fase estaba representada por los sedimentos de la formación Velasco, y en segundo al norte y oeste, caracterizada por una secuencia de areniscas y margas, la cual contiene fauna perteneciente a ambientes superficiales y de aguas profundas. A finales de este periodo la parte sur de la cuenca sufre un levantamiento para dar paso a la formación del macizo Teziutlán o Santa Ana, lo que ocasionó una ruptura en la cuenca dando lugar a la formación de la cuenca Tampico-Misantla al norte y a la cuenca de Veracruz al sur.

A principios del Eoceno los sedimentos derivados de la erosión de la mayor parte de la sección Mesozoica del macizo, dan origen a la apertura de canales submarinos o cañones a través de rocas del Cretácico y del Jurásico. Durante este periodo los paleocañones se fueron rellenando con sedimentos clásticos derivados de las tierras altas del oeste y de la plataforma Tuxpan, este material consistía en areniscas y margas el cual es típico en una secuencia de flysch y está representado por la formación Chicontepec (López Ramos, 1982).

En el Eoceno medio, la Sierra Madre Oriental toma la forma que tiene actualmente, además de que se dio la acumulación de la secuencia molassa de la formación

Tantoyuca, la cual incluye dos complejos deltaicos, el río Cazones y el río Tecolutla (Galloway *et al.*, 1991, en Salvador, 1991).

La primera depositación de sedimentos terrígenos o continentales se dio hasta mediados y finales del Eoceno (Formación Tantoyuca), ésto debido a los últimos episodios de la orogenia Laramide y al continuo levantamiento de las tierras altas del oeste.

Según Galloway (1991, en Salvador, 1991) el Oligoceno está representado por materiales marinos y no marinos (formaciones Mesón y Palma Real) de aguas poco profundas, lo que refleja la alternancia entre ciclos de transgresión y regresión del mar.

La acumulación de las margas de aguas profundas prevalece durante gran parte del Oligoceno, sin embargo, a finales de este periodo ocurre un levantamiento vertical de la Sierra Madre Oriental lo que da como resultado el acarreo de nuevas cantidades de sedimentos al oeste de la cuenca.

Durante el Oligoceno Superior se presenta una regresión seguida por una transgresión, a principios del Mioceno, y nuevamente una regresión durante el Mioceno Medio dando como resultado la depositación de las formaciones Coatzintla y Escolín, en Poza Rica y Tuxpan en Tampico.

A finales del Mioceno las aguas del Golfo se fueron retirando hacia el este por lo que la acumulación durante el Plioceno y el Cuaternario estuvo restringida a la plataforma continental y a la vertiente del Golfo.

Como se había mencionado anteriormente, Byerly (en Salvador, 1991) afirmaba que las pequeñas intrusiones ígneas localizadas dentro del municipio se deben a una intensa actividad volcánica durante el Terciario, estas constan de cenizas volcánicas y tobas sobre los sedimentos terciarios, esto derivado, de acuerdo con el autor, a la actividad volcánica en la Sierra Madre Occidental.

Durante el Terciario la depositación en la zona se debe principalmente a la acción de los diferentes ríos que se localiza en la misma, los cuales transportan una gran cantidad de sedimentos provenientes de las zonas altas de la Sierra Madre Oriental. En el caso del municipio de Tecolutla, la fuente principal de sedimentos es la cuenca del río con el mismo nombre el cual desciende desde las partes más altas de la sierra (Benavides, 1956).

2.2 MORFOGÉNESIS

La geomorfología es una ciencia esencialmente genética y evolutiva, aunque también dinámica, cuyo objetivo es el de comprender como se han originado y como han evolucionado, hasta el presente, los distintos elementos y propiedades del relieve (Gutiérrez-Valdés, 1989 en Tapia Varela y López Blanco, 2002).

Los mapas geomorfológicos son documentos científicos que sirven como fuente de información cartográfica básica para resolver una gran variedad de problemas específicos. El propósito de ese tipo de representación cartográfica del terreno es realizar una síntesis del relieve, de acuerdo con su origen, edad, evolución y sus procesos modeladores (endógenos y exógenos) (Tapia Varela y López Blanco, 2002).

De acuerdo con Verstappen y Van Zuidam (1991), existen tres tipos de mapas geomorfológicos:

Analíticos. Son el resultado de profundos estudios geomorfológicos monodisciplinarios, y proporcionan información sobre formas del relieve y procesos, destacando la morfogénesis y la morfocronología, pero también incluyendo información sobre la litología y morfoestructuras.

Sintéticos. Son el resultado de aquellos estudios que están enfocados a las relaciones ambientales entre la expresión del terreno y otros factores del paisaje, tales como clima, relieve, litología, suelos, hidrología y vegetación. Dicho análisis del terreno es realizado en el contexto de una síntesis del paisaje y para el uso de levantamientos multidisciplinarios del terreno.

Pragmáticos. Se desprenden de las investigaciones que están guiadas por un propósito específico, frecuentemente en el contexto de un proyecto de planificación del desarrollo. De esta forma tanto el contenido como la leyenda del mapa son diseñados usando la información analítica y sintética.

2.2.1 MAPA MORFOGENÉTICO

La morfogénesis se basa en tres aspectos: agente, proceso y forma. Los procesos intemperismo, erosión y acumulación son de distintos tipos y agregando los endógenos resulta una amplia variedad que da origen a la totalidad de las formas actuales de la superficie terrestre (Lugo Hubp, 1991).

En los mapas morfogenéticos la información principal de partida es la geológica y la topográfica (Lugo Hubp 1991). La base del mapeo es la representación cartográfica de unidades del relieve en función de sus orígenes, tipo, edad y geometría del relieve por clases. También puede contener información morfométrica (pendientes por ejemplo), edad de las formas e incluso información sobre geotectónica. Toda esta información se obtiene principalmente a partir de cartas topográficas, geológicas, fotografías aéreas e imágenes de satélite.

La información morfogenética es representada en forma de unidades geomorfológicas si los fenómenos son de tamaño cartografiable y mediante símbolos lineales si las formas son demasiado pequeñas (Verstappen y Van Zuidam, 1991).

Por su parte los símbolos areales son reservados para las unidades morfogenéticas. Estas se agrupan en nueve clases (Verstappen y Van Zuidam, 1991):

Formas de origen:

- Estructural
- Volcánico
- Denudatorio
- Fluvial
- Lacustre/marino
- Glacial/periglacial
- Eólico
- Cárstico
- Antropogénico/biológico

Para el caso de la tesis fue necesario realizar un mapa morfogenético (Figura 2.3) debido a que éste sería utilizado para llevar a cabo el índice de estabilidad en la extensión SINMAP del programa ArcView. Este se llevó a cabo principalmente con la ayuda de fotografías aéreas y el mapa geológico, Poza Rica (clave F14-12, escala 1:250000), realizado por INEGI (1983). Debido a la escala a la cual se presentaría el mapa resultante, se tuvo que generalizar de tal forma que no fue posible definir unidades morfogenéticas que representaran áreas muy pequeñas y que eran imposibles de cartografiar. A partir de la información obtenida se obtuvieron 16 unidades morfogenéticas que se agruparon de acuerdo a su origen, forma o tipo de relieve, edad y litología las cuales pueden observarse en el cuadro 2.1.

2.2.2 UNIDADES MORFOGENÉTICAS

ENDÓGENO

Volcánico acumulativo

El origen de este relieve se debe a la emisión de material volcánico, ya sea de forma efusiva o explosiva. En la actividad efusiva el material se desplaza sobre el relieve en forma de lava, modificando al relieve ya establecido y creando nuevas formas a partir de su gradual enfriamiento. Por otra parte la explosiva se manifiesta por la emisión, con gran fuerza, de material piroclástico a la atmósfera que posteriormente se depositará en el relieve preexistente dando lugar a nuevas formas.

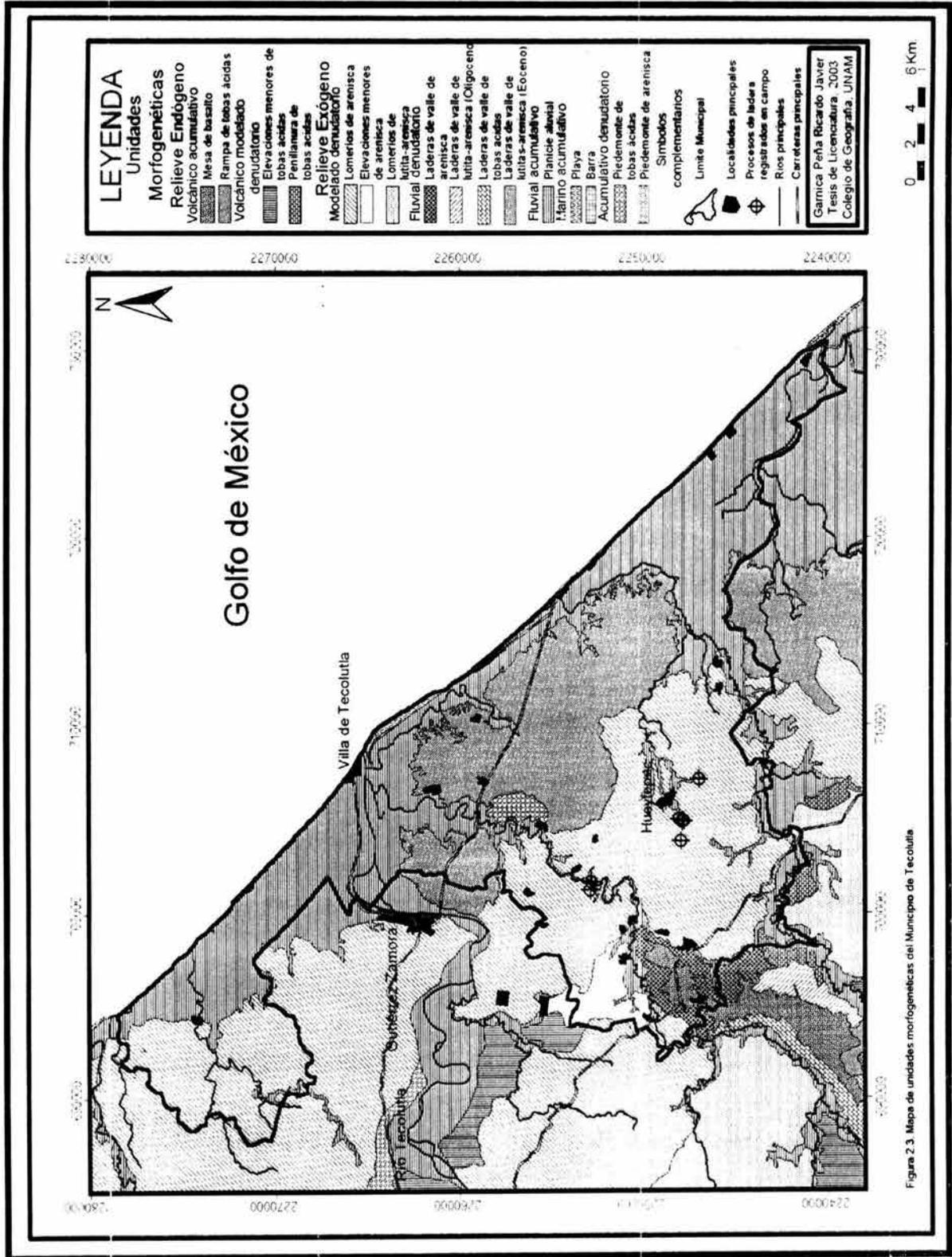


Figura 2.3 Mapa de unidades morfogenéticas del Municipio de Tecolutla.

| Origen | Tipo de relieve | Edad | Litología |
|---|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Endógeno Volcánico (acumulativo) | Mesa | Terciario Superior | Basalto |
| Endógeno Volcánico (acumulativo) | Rampa | Terciario Superior | Tobas ácidas |
| Endógeno volcánico modelado (denudatorio) | Lomeríos Bajos (elevaciones menores) | Terciario Superior | Tobas ácidas |
| Endógeno volcánico modelado (denudatorio) | Peniplanicie | Terciario Superior | Tobas ácidas |
| Exógeno modelado (denudatorio) | Lomeríos | Terciario Superior(Oligoceno) | Lutita-arenisca |
| Exógeno modelado (denudatorio) | Lomeríos | Terciario Superior(Mioceno) | Arenisca |
| Exógeno modelado (denudatorio) | Lomeríos bajos (elevaciones menores) | Terciario Superior(Mioceno) | Arenisca |
| Exógeno fluvial denudatorio | Laderas de valle | Terciario Superior(Mioceno) | Arenisca |
| Exógeno fluvial denudatorio | Laderas de valle | Terciario inferior(Eoceno) | Lutita-arenisca |
| Exógeno fluvial denudatorio | Laderas de valle | Terciario inferior(Oligoceno) | Lutita-arenisca |
| Exógeno fluvial denudatorio | Laderas de valle | Terciario Superior | Tobas ácidas |
| Exógeno fluvial acumulativo | Planicie Aluvial | Cuatemario | Arcillas, limos, arenas y gravas |
| Exógeno marino acumulativo | Playa | Cuatemario | Arenas de grano fino a medio |
| Exógeno marino acumulativo | Barra | Cuatemario | Arenas de grano fino a medio |
| Exógeno acumulativo(denudatorio) | Piedemonte | Terciario Superior (Mioceno) | Arenisca |
| Exógeno acumulativo (denudatorio) | Piedemonte | Terciario Superior | Tobas ácidas |

Cuadro 2.1. Unidades morfogénicas presentes en el municipio de Tecolula

Mesa de basalto

Esta unidad se localiza al suroeste del municipio y se distingue por presentar una forma alargada y casi plana en su parte más alta. La unidad está constituida por basalto de olivino, de color negro, mientras que expuestos al intemperismo muestran un color café claro con tonos amarillo ocre. No se distingue una buena red fluvial debido a las características que presenta la roca. Además en sus flancos presenta acumulaciones de materiales sedimentarios (arenisca, lutita-arenisca) e ígneos (tobas ácidas). Esta unidad cubre de forma discordante a las rocas marino arcillo-arenosas del Terciario.

Rampa de tobas

Localizada al centro y centro-sur de Tecolutla la rampa de tobas es una forma derivada de la expulsión de material piroclástico, principalmente, ceniza, arena y lapilli, que posteriormente son compactados y cementados. Las tobas son dacíticas y riodacíticas que presentan texturas piroclásticas, holocristalina, afanítica y porfídica. Se encuentra inclinada hacia el oriente y presenta una pendiente suave. Además no cuenta con una red hidrográfica importante y debido a su forma es empleada para cultivar y para desarrollar pastizales para el ganado.

Volcánico Modelado Denudatorio

Lomeríos Bajos (elevaciones menores) de tobas ácidas

Se localizan en la parte central del área de estudio. Rodean a la planicie aluvial del río Tecolutla. Están constituidas por las tobas ácidas que fueron expulsadas durante el Terciario Superior producto de la actividad volcánica que se produjo en la zona. Se caracterizan por presentar montículos irregulares con una altura aproximada de 30 a 40 m.

Peniplanicie de tobas ácidas

Esta unidad se encuentra al sur del municipio. Compuesta de tobas del terciario superior que, según Robin (1976), provienen de la primera actividad del Golfo. Presenta una morfología casi plana e incluso puede llegar a confundirse con la planicie aluvial adyacente, río Solteros. Esta unidad posiblemente representaba una serie de lomeríos bajos, sin embargo al localizarse junto a lomeríos más altos y compuestos de rocas sedimentarias impermeables, las corrientes que se producen en estos lomeríos posiblemente arrastraron gran parte de material de estas unidades lo que ocasionó que redujeran su tamaño hasta casi desaparecer.

EXÓGENO

Modelado denudatorio

Lomeríos de Lutita-Arenisca

Comprende a todas aquellas formas localizadas en la parte suroeste y sur del municipio. Están compuestos de lutitas calcáreas, margas arenosas, areniscas y conglomerados. Se diferencian de los lomeríos de areniscas por su mayor relieve y su menor disección fluvial, además de que presentan una menor densidad de cauces fluviales.

Lomeríos de Arenisca

Son la unidad dominante en el área, prácticamente se localizan desde el norte del municipio hasta el sur en las inmediaciones del municipio Martínez de la Torre. Esta unidad presenta una mayor disección y un relieve de poca altura, alcanza los 200-250 m; además se puede observar una inclinación hacia el Golfo de México que trae como consecuencia una alta densidad de corrientes fluviales debido a las características de la roca. Cabe mencionar de esta unidad que en algunas zonas, principalmente en la parte occidental, presentan una serie de paredes casi verticales lo que puede

contribuir a la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Además es la zona en la cual se dio la mayor ocurrencia de procesos.

Lomeríos Bajos (elevaciones menores) de Arenisca

Esta unidad comprende una parte muy pequeña dentro del municipio. Está localizada entre dos formaciones de lomeríos de areniscas. Presentan una menor elevación con relación a los lomeríos circundantes, esto posiblemente como consecuencia de la acción fluvial, ya que varias corrientes descienden por esta unidad para unirse después al río Chichicatzapán, al sur, y al río Tecolutla, al norte, por lo que en su transcurso acarrearán una gran cantidad de sedimentos provenientes de las unidades cercanas, principalmente de los lomeríos bajos.

Fluvial denudatorio

Laderas de valle (tobas ácidas, arenisca, lutita-arenisca [Oligoceno-Eoceno])

Laderas de valle de tobas ácidas. Se localizan, al igual que las otras 3, rodeando a la mesa de lava, cubriendo sus flancos. Está ubicada en la parte occidental de la mesa y presenta una pendiente aproximada a los 45° y una forma alargada. Debido a que se localiza junto a una corriente fluvial (río Chichicatzapán), su base es erosionada cada que crece el nivel del río por lo que no tiene una mayor amplitud.

Laderas de valle de Arenisca (Mioceno). Al igual que la anterior rodea a la mesa de basalto, sólo que ésta se localiza en la parte norte de la misma. Esta debe su origen a la actividad volcánica que se presentó en el Terciario Superior, ya que al acumularse la lava sobre el material sedimentario ocasionó que las corrientes fluviales originadas en la mesa fueran erosionando gradualmente a las areniscas localizadas en los flancos. Presenta una mayor cantidad de corrientes fluviales que las otras laderas y por lo tanto se puede observar una mayor erosión en su base.

Laderas de valle de Lutita-arenisca (Oligoceno). Esta unidad se localiza en la parte sur del municipio y descansa en el lado oriental de la mesa de basalto. Presenta una

morfología parecida a los lomeríos de lutitas-arenisca localizados al sureste de esta unidad, sólo se diferencia de estos por presentar una mayor disección debido a la acción de las corrientes fluviales que se desplazan sobre las laderas.

Laderas de valle de lutitas-arenisca (Eoceno). Una de las unidades de menor proporción dentro de la zona de estudio. Se localiza dentro de los límites del municipio de Martínez de la Torre y forma parte del flanco sur de la mesa de basalto. Presenta un relieve con una altura aproximada a los 20 m y sus paredes tienen una pendiente aproximada a los 45°. Debido a que son rocas más antiguas que las lutitas del Oligoceno, presenta una mayor disección fluvial debido al mayor tiempo de exposición a los elementos atmosféricos.

Fluvial acumulativo

Planicie aluvial

Es la segunda unidad más representativa del municipio y está compuesta de los materiales que arrastran las corrientes fluviales que descienden de las diferentes elevaciones localizadas en sus alrededores. Las planicies más extensas son la del río Tecolutla, la cual transporta material desde lo más alto de la Sierra Madre Oriental hasta su desembocadura en el Golfo de México; y la del río Solteros. Toda la unidad está constituida por una gran cantidad de materiales volcánicos y sedimentarios, por ejemplo, cercano a las sierras es areno-gravoso, en la parte central es arcillo-arenoso con clastos de caliza, arenisca, pedernal y rocas volcánicas; y en la parte oriental es arcillo-limoso, con una gran cantidad de conchas de diferentes especies marinas.

Esta unidad también se caracteriza por sufrir de inundaciones prácticamente todos los años por lo que cada año es común que los habitantes sufran de daños y pérdidas debido a las crecidas de los ríos.

Marino Acumulativo

Playa de arena

Esta unidad se localiza en el límite oriental del municipio, en donde sufre de la acción modeladora del oleaje. Aparece como una franja a lo largo de la línea de costa. Constituida principalmente por arenas que varían de grano fino a medio con cuarzo, feldespatos, fragmentos líticos y de conchas de diferentes organismos.

Barra de desembocadura.

Se localiza en la zona en donde se encuentran el río Tecolutla y el Golfo de México. Esta debe su origen a la disminución de la velocidad de la corriente fluvial, lo que provoca un estancamiento del agua. Presenta una forma arqueada como de media luna. Esta es una zona en donde se da el contacto entre las aguas provenientes del continente y las aguas marinas lo que favorece la presencia de manglares en la zona.

Acumulativo Denudatorio

Piedemonte de tobas ácidas

Una de las unidades menos abundantes dentro del municipio. Localizado en la parte central del mismo justo frente a la planicie aluvial del río Chichicatzapán. Su origen se debe principalmente a la acción de las corrientes fluviales las cuales erosionan la parte alta de la rampa de tobas y depositan este material justo en la base de la misma. No presenta una base bien definida debido al arrastre de material que ocasionan las crecidas del río.

Piedemonte de arenisca

Es una pequeña zona ubicada en las cercanías del río Tecolutla. Presenta una forma alargada y una base poco extendida, esto debido a las crecidas constantes del río. Se encuentra en la base de una gran pared vertical perteneciente a lomeríos de arenisca.

De acuerdo con la información obtenida por medio de los habitantes de Gutiérrez Zamora, esta zona se vio afectada, en octubre de 1999, tanto por la inundación como por procesos de remoción en masa.

CAPÍTULO 3. INUNDACIONES Y PROCESOS DE LADERA EN EL MES DE OCTUBRE DE 1999 EN TECOLUTLA, VERACRUZ

3.1 INUNDACIONES Y PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN MÉXICO

3.1.1 INUNDACIONES

De todos los peligros naturales las inundaciones sobresalen como el fenómeno que tiene mayor presencia en el ámbito mundial, debido a que tienen mayor impacto tanto en el número de pérdidas de vidas, como en las consecuencias económicas, que cualquier otro peligro natural. Nuestro país no es la excepción ante tal situación, de tal manera que en México, cada año se producen inundaciones derivadas del desbordamiento de los ríos. Algunos ejemplos extremos incluyen el Río Balsas en 1967, 1976 y 1984; el Pánuco, en 1993; el Papaloapan en 1944, 1958, 1969 y 1989, y recientemente el Tecolutla, en 1999 (Cuadro 3.1).

| Ríos | Años | Ríos | Años |
|----------------------|------------------------|-----------|------|
| Bajo Bravo | 1967, 1988 | Acaponeta | 1992 |
| Balsas | 1967, 1976, 1984 | Ameca | 1992 |
| Del noroeste | 1943, 1949, 1960 | Tijuana | 1993 |
| Del Pacífico central | 1958, 1959 | Pánuco | 1993 |
| Grijalva | 1963, 1973 | Nautla | 1995 |
| Papaloapan | 1944, 1958, 1969, 1989 | Camarón | 1997 |
| Santiago | 1973, 1992 | Pijijapán | 1998 |
| Cajoncito | 1976 | Cintalapa | 1998 |
| Santa Catarina | 1988 | Huixtla | 1998 |
| Sinaloa | 1990 | Coatán | 1998 |
| Mayo | 1990, 1995 | Tecolutla | 1999 |

Cuadro 3.1. Algunos de los ríos de México en los cuales se presentaron desbordamientos de las corrientes.

Fuente: Domínguez *et al.*, (1999).

Algunos de los estados de la República Mexicana que se han visto afectados por las inundaciones son: Veracruz, Tabasco, Campeche, Chiapas, Oaxaca, Puebla, Michoacán, Estado de México, Tlaxcala, Hidalgo, Baja California, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas, Guerrero y Yucatán (Figuras 3.1 y 3.2). Esto se debe en gran medida al crecimiento desmedido de los centros de población, los cuales en ocasiones se asientan en zonas susceptibles a inundaciones, por lo que es común que cada año se escuchen noticias acerca de desastres provocados por la ocurrencia de inundaciones.



Figura 3.1. Inundación en el estado de Tabasco en el año de 1999.

Fuente: www.reforma.com.mx

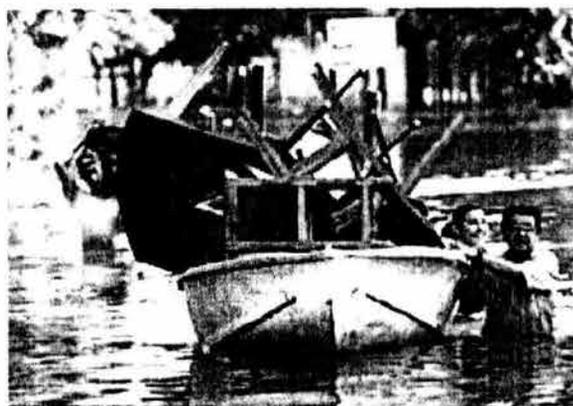


Figura 3.2. Daños ocasionados por las inundaciones de octubre de 1999 en el estado de Veracruz.

Fuente: www.lajornada.unam.mx

En nuestro país algunos de los trabajos que se han realizado acerca de la problemática de las inundaciones se enfocan en los procesos que generan las crecidas y como mitigar los efectos de las mismas (Domínguez, 1990), diagnósticos de las inundaciones que han ocurrido en las principales cuencas del país (Jiménez 1991), el impacto que han tenido en las ciudades más importantes del país (Bocco *et al.*, 1993), entre otros. En ellos se explican los aspectos básicos que dan origen a las inundaciones, los factores que intervienen en la ocurrencia de estos peligros, su dinámica y se menciona algunos de los estados de la República Mexicana que han sido afectados por la ocurrencia de fenómenos atmosféricos como los ciclones y las tormentas tropicales. Por último dichos trabajos, muestran cuales son las medidas que se deben de tomar para evitar los grandes daños que causan este tipo de eventos. En cuanto a trabajos realizados en el ámbito de la Geografía se pueden mencionar, por ejemplo, el de Romo y Ortiz (2001), en el cual se determina el riesgo de inundación en una porción de la llanura costera de Nayarit. También tenemos el realizado por Pérez (2001), trabajo en donde se determina las zonas susceptibles a inundaciones en el curso bajo del río Papaloapan en Veracruz.

Existen trabajos referentes a inundaciones en el municipio de Tecolutla, entre los que destacan están los de Pereyra (1993) y Pereyra y Hernández (1989). Sin embargo, estos sólo se enfocan en el cálculo de los gastos máximos para un período de retorno determinado, además de obtener por medio de ecuaciones el gasto máximo que se presentó en el río Tecolutla entre los días 3 y 9 de octubre de 1999. Sin lugar a dudas estos trabajos aportan información hidrológica importante, pero no presentan una zonificación de las áreas susceptibles a inundación, de tal forma que este planteamiento ha sido incorporado como uno de los objetivos de este trabajo.

3.1.2 PROCESOS DE LADERA

Además de las inundaciones, los procesos de ladera son muy comunes en nuestro país, principalmente en las zonas montañosas; y la mayor parte de ellos están asociados con precipitaciones de gran magnitud. En un principio, estos procesos se presentaban en zonas aisladas en donde no existían indicios de poblaciones, por lo que su estudio no se había desarrollado en gran medida. Sin embargo, recientemente

los procesos gravitacionales han atraído la atención de diversos investigadores relacionados con las ciencias de la tierra, ya que han ocurrido en zonas habitadas ocasionando desastres de gran magnitud.

Un evento de gran importancia en cuanto a procesos gravitacionales ocurrió paralelo a las inundaciones de 1999 en los estados de Puebla y Veracruz (Figuras 3.3 y 3.4) principalmente, cientos de movimientos fueron desencadenados por las lluvias extremas de octubre. En particular en Teziutlán, más de cien personas perdieron la vida en un solo evento. Entre los municipios más afectados cabe destacar Zacapoaxtla (Borja Baeza, 2003), Tlatlauquitepec (Marcos López, 2003), Zapotitlán de Méndez, entre otros.

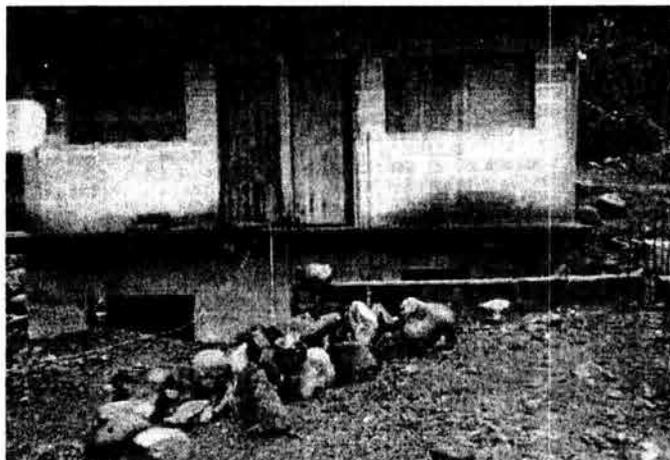


Figura 3.3. Casa sepultada por un proceso de remoción en masa en el municipio de Zapotitlán de Méndez, Puebla.
Cortesía de Marlene López.



Figura 3.4. Desbordamiento del río Zempoala, en el municipio de Zapotitlán de Méndez
Cortesía de Marlene López

Estudios detallados sobre procesos de remoción en masa en México incluyen los realizados por Lugo *et al.*, (1995), Alcántara Ayala (1999); Flores (1999); Lugo *et al.*, (2001), Alcántara Ayala y Flores (2002); Alcántara Ayala *et al.* (2001), Borja Baeza (2003) y Marcos López (2003), entre otros.

3.1.3 INUNDACIONES Y PROCESOS DE LADERA EN VERACRUZ

a) Inundaciones

El estado de Veracruz, al localizarse en la parte oriental de la República Mexicana, se ve afectado por la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos. Una gran cantidad de ríos que desembocan en el Golfo atraviesan a este estado lo que provoca la ocurrencia de inundaciones por lo que las diferentes localidades ubicadas en las cercanías de las corrientes sufren de los efectos ocasionados por los desbordamientos de las mismas.

Algunas de las inundaciones que más daños ocasionaron en Veracruz fueron las ocurridas en los años de 1955 (Huracanes Gladis, Hilda y Janet), 1993 (Huracán Gert), 1995 (Huracanes Opal y Roxana) y recientemente en 1999 (depresión tropical 11), estos dos últimos recordados por ser los eventos más desastrosos del estado de Veracruz.

Las inundaciones ocurridas en el año de 1995, principalmente las que fueron producto del huracán Roxana, afectaron a las poblaciones ubicadas en las proximidades de los ríos Nautla, Misantla y Bobos, afectando a 13,860 personas y 331 viviendas. Todo esto producto de lluvias que alcanzaron los 269.9 mm el día 20 de octubre de ese año (Domínguez *et a.*, 1999).

En el año de 1999 el estado de Veracruz sufrió los efectos de las inundaciones como consecuencia de las lluvias torrenciales ocasionadas por la presencia de la depresión tropical 11, la cual se originó el 4 de octubre y posteriormente entró en contacto con el frente frío 5 desplazándose hacia el noreste donde hizo contacto con flujos de aire húmedo provenientes del Golfo de México (Bitrán, 2001). Este fenómeno generó una

gran cantidad de vapor de agua lo que ocasionó las fuertes lluvias en el estado y en otros estados de la República.

En el caso de Veracruz los daños se presentaron en los municipios de Álamo, Tuxpan, Papantla, Tecolutla, Martínez de la Torre, Hueyapán de Ocampo, Minatitlán y Texistepec (Figura 3.5).

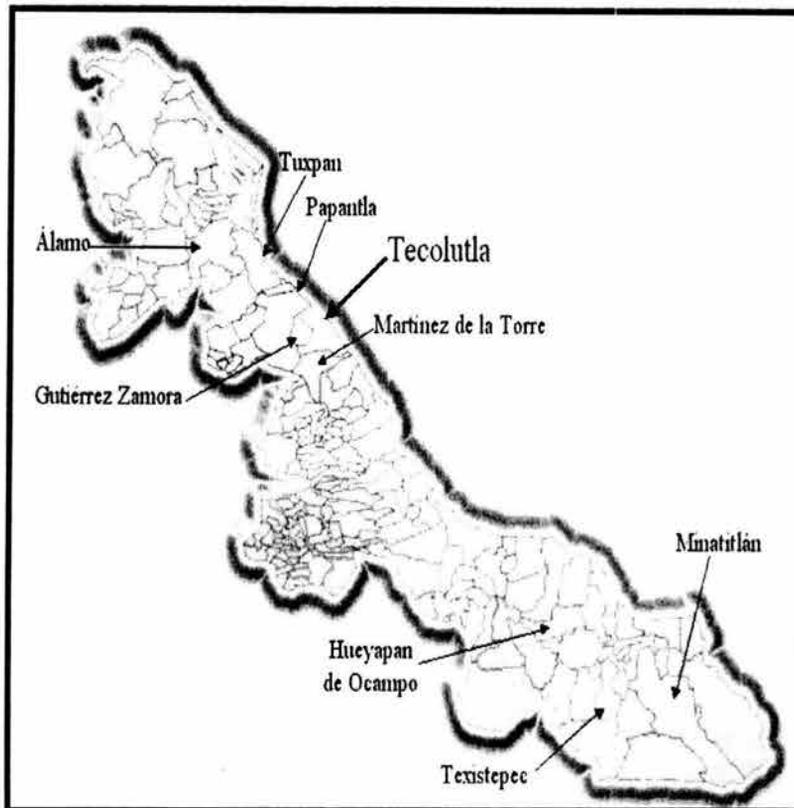


Figura 3.5. Municipios del estado de Veracruz, afectados durante las lluvias del mes de octubre de 1999

Fuente: Bitrán, 2001.

Las pérdidas económicas que generó dicho evento, sólo para el estado de Veracruz, se estimaron en 2,787 millones de pesos, de los cuales el 74% correspondieron a destrucción en los sectores agrícola, pesquero, forestal, industrial, comunicaciones y transportes, mientras que el resto se dio en la destrucción de bienes y servicios (Cuadro 3.2). Los sectores que sufrieron en mayor medida el impacto fueron, la agricultura, la vivienda, la destrucción de transporte y los daños en el sistema hidráulico (Bitrán, 2001).

| SECTOR / CONCEPTO | DANOS DIRECTOS | DANOS INDIRECTOS | TOTAL | PORCENTAJE DEL TOTAL |
|------------------------------------|-------------------|---------------------|--------|-------------------------|
| Agropecuario, pesca y forestal | | | | |
| Agricultura | | 609.8 | 609.8 | 21.9 |
| Ganadería | 111.9 | | 111.9 | 4 |
| Forestal | 6.1 | | 6.1 | 0.2 |
| Pesca | 66.3 | | 66.3 | 2.4 |
| Industria, comercio y servicios | 192.5 | 2 | 194.5 | 7 |
| Comunicaciones y transportes | 340.7 | 53.9 | 382.2 | 14.2 |
| Vivienda | 510* | | 510 | 18.3 |
| Escuelas | 183.5 | | 183.5 | 6.6 |
| Hospitales y Centros de salud | 193 | | 193 | 6.9 |
| Agua potable | 286.1 | | 286.1 | 10.3 |
| Suministro de electricidad | 161.7 | | 161.7 | 5.8 |
| Impacto ecológico | | 6.6 | 6.6 | 0.2 |
| Costo de la emergencia | | 63 | 63 | 2.3 |
| Total | 2051.8 | 735.3 | 2787.1 | 100 |

Cuadro 3.2. Resumen de daños totales en el estado de Veracruz (millones de pesos)

Fuente: Bitrán, 2001.

b) Procesos de ladera

Los procesos de remoción en masa en Veracruz siempre se ven acompañados por la ocurrencia de precipitaciones intensas en gran parte del territorio de la entidad, principalmente en los municipios ubicados en la Sierra Madre Oriental y en el Sistema Volcánico Transversal. Los eventos que se han suscitado recientemente ocurrieron en el año de 1999 y en el año 2003, el primero afectó, principalmente, a los municipios de Papantla y Gutiérrez Zamora, mientras que el segundo ocurrió en las proximidades de la ciudad de Jalapa en donde cientos de personas se vieron afectadas por un flujo lodoso; ambos eventos producto de lluvias torrenciales.

3.2 INUNDACIONES Y PROCESOS DE LADERA EN TECOLUTLA EN OCTUBRE DE 1999

a) Inundaciones

El municipio de Tecolutla se ve afectado por los desbordamientos de los ríos que se encuentran dentro del mismo debido principalmente a la incidencia que tienen los diferentes eventos meteorológicos en la zona, los cuales dan como resultado precipitaciones extraordinarias que a su vez funcionan como detonante de inundaciones de los ríos que descienden de la Sierra Norte de Puebla.

Tecolutla se ha visto afectado por inundaciones extraordinarias (que se tengan registro) en los años 1974, 1981, 1986, 1988 y 1999. Esta última, de acuerdo con los habitantes de la Villa de Tecolutla y del municipio vecino Gutiérrez Zamora, es la que más daños ha provocado en ambas localidades. Cabe destacar que de acuerdo a la información proporcionada por los habitantes de ambos municipios no se presentaba una inundación de igual magnitud desde el año 1944, por lo que a primera vista se puede observar que este fue un evento con un periodo de retorno de 50 años aproximadamente. También comentaron que en otras ocasiones se habían presentado precipitaciones mayores, pero que en esos años no ocurrieron eventos como los que se dieron en el año de 1999.

El desbordamiento de los ríos Tecolutla y Nautla, de los arroyos Chichicatzapán y Solteros, así como de los esteros Riachuelos, Negro y Tres Bocas trajo como resultado que se inundaran las planicies aledañas a estas corrientes así como las partes más bajas o deprimidas del municipio. Debido a la fuerza con la cual se desplazó el agua del río Tecolutla se extendieron las márgenes del cauce debido a la intensa socavación fluvial. Además fue posible observar cómo el río arrastraba personas, árboles, vacas, automóviles y muebles.

Por otro lado es importante mencionar la formación de aberturas en la planicie costera al norte de la cabecera municipal (Figuras 3.6, 3.7 y 3.8), llamadas zanjas por parte de los habitantes de la zona; las cuales, de acuerdo a la información proporcionada por los pobladores, se originaron debido a que la gran cantidad de agua transportada por el río Tecolutla, a la altura de El Triunfo (al oeste de la cabecera, sobre la carretera) se desplazaba a gran velocidad por lo que justo en el meandro ubicado en este sitio, el agua se salió del cauce siguiendo un curso lineal y el escurrimiento abrió canales en la parte norte de la cabecera, de tal manera que afortunadamente esta área no fue seriamente afectada por el desbordamiento del río, ya que, según la población, en esta zona, donde se encuentra ubicado el palacio municipal, el agua alcanzó 30 cm aproximadamente, mientras que otras zonas aledañas alcanzó casi dos metros y medio. Cabe mencionar que de no haber ocurrido esto, la cabecera pudo haber desaparecido debido a la gran cantidad de agua que fue arrastrada a través del río.

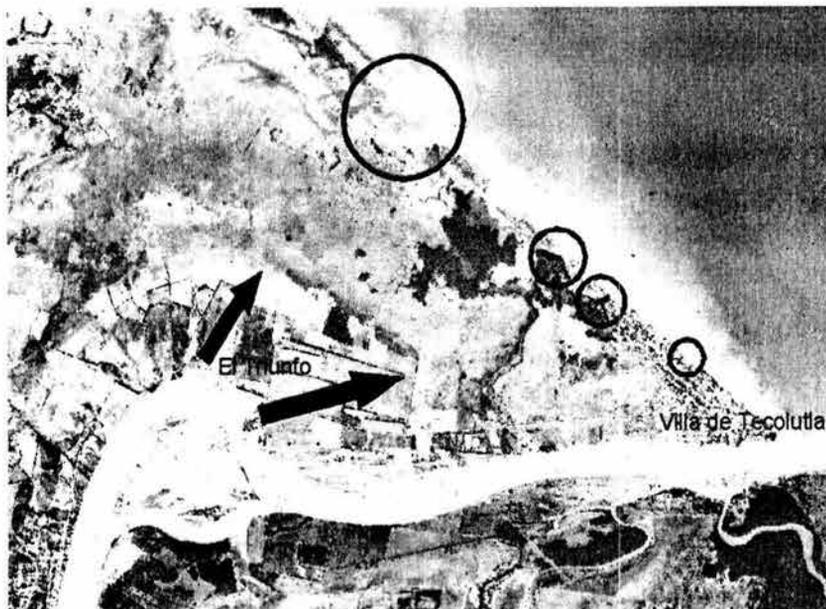


Figura 3.6. En la imagen se pueden observar, con círculo, las zonas por donde salió el agua que se desbordó del río Tecolutla y con la flechas la dirección que siguió el río a la altura de El Triunfo.

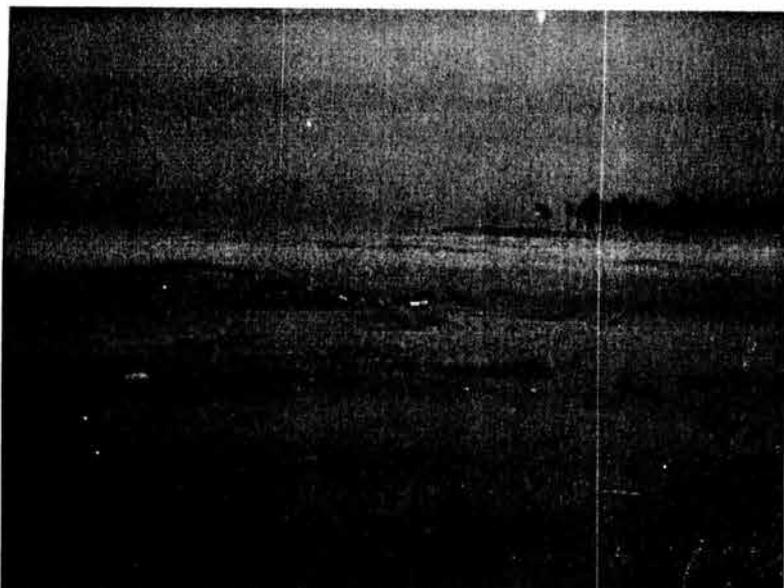


Figura 3.7. Foto tomada en la zona que se abrió después de la salida del agua proveniente del río.



Figura 3.8. Daños ocasionados por la inundación ocurrida en octubre de 1999, al norte de la cabecera municipal.

De acuerdo con Castillo (2000) entre las localidades que sufrieron daños se encuentran: Paso del Progreso, Chichicatzapán, José MA. Pino Suárez, La Gloria, Maximino A. Camacho, Plan de Carrizo, Vista Hermosa Calichal, Paso Real, Cruz de los Esteros, Paso del Río, Cañada Rica, Hueytepec, Fuerte de Anaya, Barra Boca de Lima, Río Blanco, Boca de Lima, Rancho Los Lagartos, La Guadalupe, Ricardo F. Magón, La Vigueta, Casitas, Santa Higinia, Palo Huevo, El Triunfo, La Libertad, Las Palmas y la Villa de Tecolutla.

También se vio afectada la red carretera lo que dificultó la comunicación entre los centros de población; las redes eléctrica y telefónica resultaron dañadas y el servicio se interrumpió durante tres semanas; el suministro de agua potable también se tuvo que suspender debido a los daños además de que el drenaje resultó averiado.

Cabe destacar que el sector que sufrió los daños más severos fue el turístico, en especial el corredor turístico del municipio en el cual se encuentra la Villa de Tecolutla, Ricardo F. Magón, La Vigueta y Casitas, sitios en los cuales la inundación dañó seriamente hoteles y restaurantes. El segundo sector más afectado fue el de la vivienda ya que se perdieron 104 viviendas en la cabecera municipal, 37 en Casitas y 29 en Costa Esmeralda (Figuras 3.9 y 3.10).



Figura 3.9. Daños ocasionados por la inundación ocurrida en el mes de octubre de 1999 en Tecolutla, Veracruz
Cortesía de Tomás Rodríguez.



Figura 3.10. Casas dañadas en la porción occidental de la Villa de Tecolutla.

Cortesía de Tomás Rodríguez.

b) Procesos de ladera

La intensa precipitación también propició la ocurrencia de procesos de ladera, los cuales se concentraron principalmente en la porción suroeste del municipio, en las localidades de Plan de Carrizo, Hueytepec, José Ma. Pino Suárez y Colonia Maximino Ávila Camacho. (Figuras 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16). Dichos procesos fueron levantados en campo por medio de un GPS y posteriormente representados en los mapas contenidos en este trabajo. Los daños ocasionados por los procesos de ladera se enfocaron principalmente en el sector carretero ya que varios caminos fueron bloqueados por grandes cantidades de material. Además en la localidad de Plan del Carrizo hubo la pérdida de una vivienda como resultado de un deslizamiento. Sin embargo, cabe destacar que dichos procesos no han recibido la atención necesaria por parte de las autoridades del municipio por lo que no se cuenta con información referente a este tipo de eventos además de que no existen estudios acerca de esta problemática en este municipio.



Figura 3.11. Deslizamiento en las cercanías de la localidad de Hueytepec.

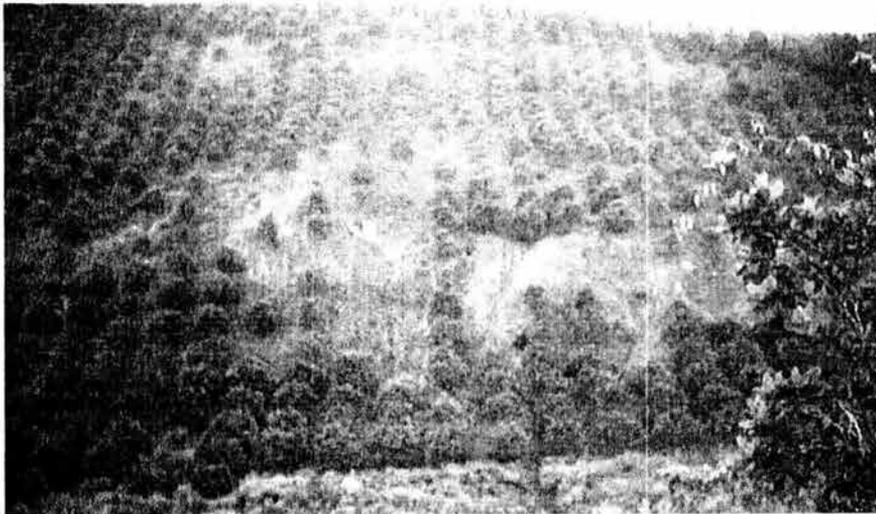


Figura 3.12. Cultivos de cítricos afectados por la ocurrencia de un deslizamiento.



Figura 3.13. Deslizamiento en las cercanías de la localidad Plan de Carrizo.



Figura 3.14. Escarpe de un deslizamiento localizado en Plan de Carrizo.

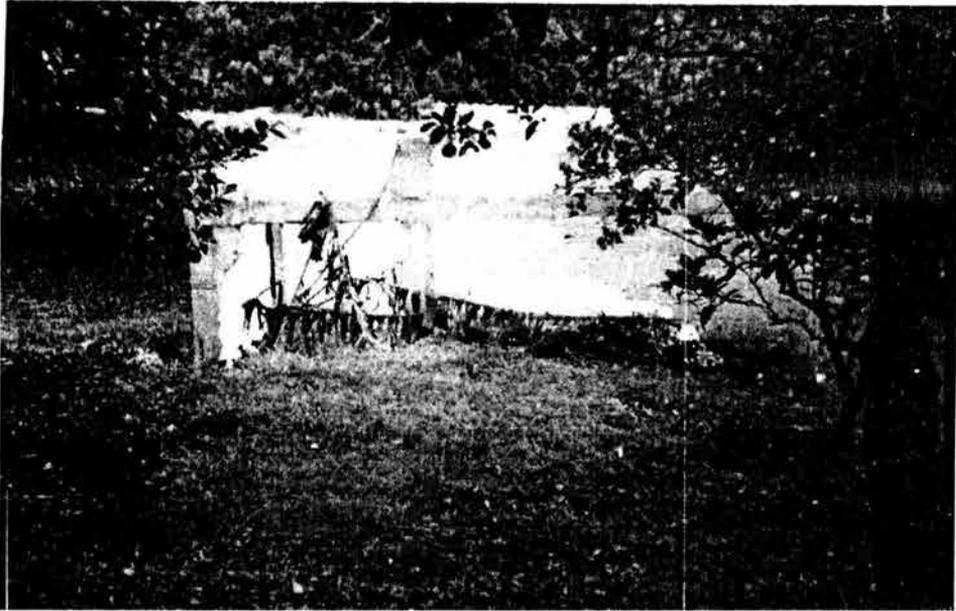


Figura 3.15. Daños ocasionados por la ocurrencia de un deslizamiento en las cercanías de la localidad de Hueytepec.



Figura 3.16. Pared destruida a causa de un deslizamiento en la proximidades de la población de Hueytepec.

3.3 ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN DEL MUNICIPIO DE TECOLUTLA

En los hechos ocurridos en el municipio de Tecolutla, la precipitación jugó un papel importante ya que actuó como desencadenante de los procesos de ladera. En el caso de las inundaciones la gran cantidad de agua precipitada dentro de la cuenca se concentró en las corrientes que descienden de la Sierra Norte de Puebla, estas corrientes, aguas abajo, dan lugar al río Tecolutla por lo que al unirse los caudales de las diferentes corrientes en una sola ocasionó que esta gran cantidad de agua arrasará con las poblaciones ubicadas en las cercanías del río y en su desembocadura. Este aspecto de los gastos será tratado más adelante cuando se analicen las características de los mismos.

Depresión tropical número 11

Este fenómeno atmosférico se formó en el sur del Golfo de México durante la tarde del día cuatro de octubre a partir de una onda tropical muy activa (la no. 35) . Debido a los efectos que generó, se le considera como el evento ciclónico de mayor afectación en México durante la temporada de 1999, aún cuando su centro no tocó tierra firme directamente, su cercanía, desplazamiento e interacción con el frente frío cinco, aunado al factor orográfico en la parte oriental y central de México, produjeron lluvias torrenciales las cuales trajeron como resultado la ocurrencia de inundaciones y movimientos del terreno, afectando a los estado de Veracruz, Hidalgo, Puebla, San Luis Potosí, Tabasco y Oaxaca (Figura 3.17).

Además de las inundaciones, la precipitación generó un incremento en el contenido de agua en los poros del suelo, hasta llegar a un estado de infiltración nula, dando como resultado una condición de saturación, lo que provocó que el peso de la ladera excediera al que puede mantener generando un movimiento del terreno.

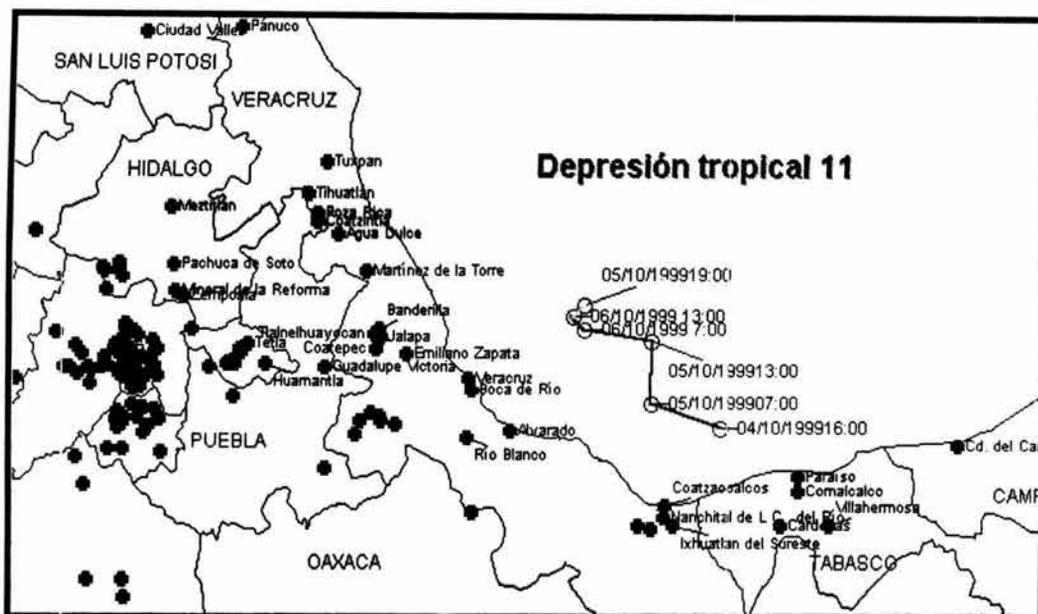


Figura 3.17. Trayectoria que siguió la depresión tropical 11 en los primeros días de octubre de 1999.

Fuente: www.cna.gob.mx

Para el presente trabajo se recurrió al análisis de la precipitación que se presentó en el municipio en los primeros días de octubre de 1999, por lo que fue necesario obtener toda la información disponible de las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro del área de estudio. De esta forma se obtuvieron los datos de 3 estaciones; El Remolino, Tecolutla, y Libertad-Misantla, únicas estaciones que presentaron datos actualizados.

Los meses más lluviosos de las tres estaciones son septiembre y octubre, durante ellos se alcanzaron niveles muy altos en el año de 1999, lo que de alguna forma nos permite entender la importancia que tuvo la precipitación como desencadenante de las inundaciones y de los procesos de remoción en masa.

Estación El Remolino

Para esta estación se calculó una precipitación media anual de 1314 mm, por lo que la cantidad de lluvia registrada en 1999, 2108.1 mm, sobrepasó en un 60% dicha media. En particular, durante los meses de septiembre y octubre de 1999 llovieron 1180 mm, es decir, el equivalente al 90% de la media anual (Figura 3.18).

Precipitación anual (Estación El Remolino)

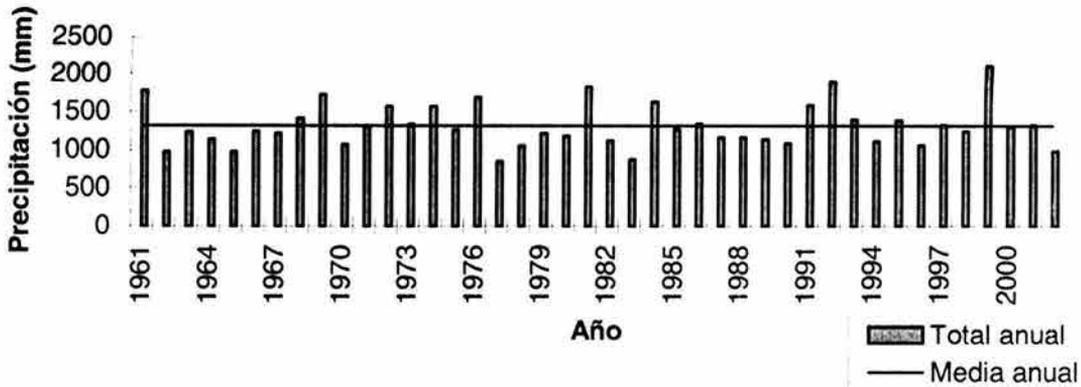


Figura 3.18. Precipitación total anual de 1961 a 2002

Fuente: C.F.E.

En cuanto a la precipitación media en los meses de septiembre y octubre, esta es de 253 y 167 mm respectivamente (Figura 3.19). Sin embargo en el año de 1999 la precipitación que se registró fue de 482.5 en septiembre y de 697.9 en el mes de octubre, este último sobrepasando más de 4 veces la precipitación media para este mes.

Precipitación media mensual

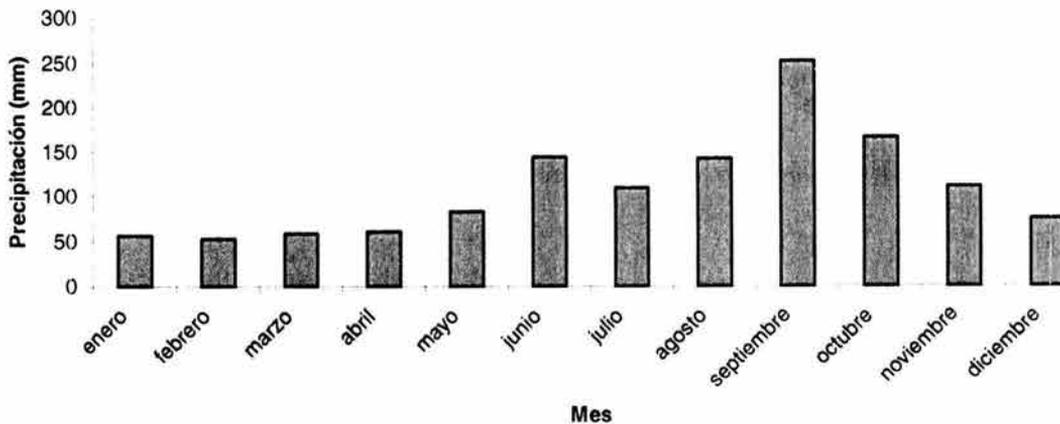


Figura 3.19. Precipitación media mensual

Fuente: C.F.E.

Como se puede apreciar en la figura 3.20, a finales de septiembre y principios de octubre, la precipitación registrada fue de 861.7 mm en tan sólo 12 días, es decir, el equivalente al 65.5% de lo que llueve en promedio en una año. De tal forma que podemos asociar este hecho a los procesos de remoción en masa, ya que como resultado de la cantidad de precipitación, el material que constituía las laderas llegó a un punto tal de saturación que trajo como resultado la ocurrencia de movimientos del terreno provocando bloqueo de caminos y la destrucción de algunas viviendas en la parte suroeste, principalmente en las localidades de Hueytepec y Plan de Carrizo. Es importante señalar que este tipo de fenómenos no había sido visto por los habitantes, es decir, no se tenía el conocimiento de que pudieran presentarse en estas zonas.

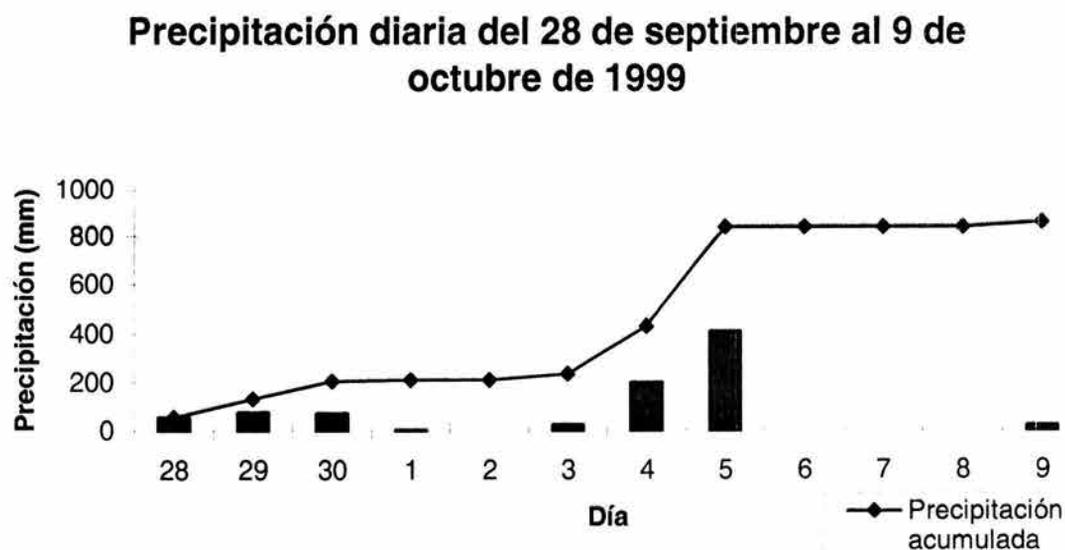


Figura 3.20. Precipitación diaria y diaria acumulada durante el periodo 28 de septiembre a 9 de octubre de 1999.
Fuente: C.F.E.

En el caso de las inundaciones, la gran cantidad de lluvia que precipitó sobre esta área ocasionó el crecimiento de los niveles de los ríos provocando inundaciones que, de acuerdo con los pobladores, no se habían visto en cerca de 50 años, ya que según los habitantes, la última gran inundación ocurrió en 1955, fecha de la cual no se tienen registros, tanto de precipitación como de gastos. Cabe destacar que el gasto máximo histórico, registrado en la estación El Remolino, para el río Tecolutla hasta antes de 1999, fue de 8321 m³/seg en el año de 1981, sin embargo los habitantes no consideran que aquella ocasión se presentara un evento tan importante como el de

1999, por tal razón fue necesario llevar a cabo el análisis de los gastos ocurridos en 1999 para así poder obtener los niveles más altos que puede alcanzar el río (ver capítulo 5).

Estación Tecolutla

El análisis de esta estación se llevó a cabo con información de diferentes años debido a que algunos no cuentan con un registro completo. De esta forma se obtuvo una precipitación media anual de 1528 mm, dicha media fue excedida en 15 de los 34 años analizados, lo que representa casi el 50% (Figura 3.21). Entre los años que registraron una precipitación mayor a 2000 mm cabe destacar: 1954, 1955, 1958 y 1999..

En particular, en septiembre y octubre de 1999 la precipitación fue de 554 y 795 mm respectivamente (este último dato no existe en la base de datos de la Comisión Nacional del Agua, sin embargo, se calculó un valor aproximado utilizando la ecuación de Gumbel, la cual se explica con mayor detalle en el capítulo 5), esto representa una precipitación 1.5 y 3 veces mayor que la media mensual de dichos meses (Figura 3.22).

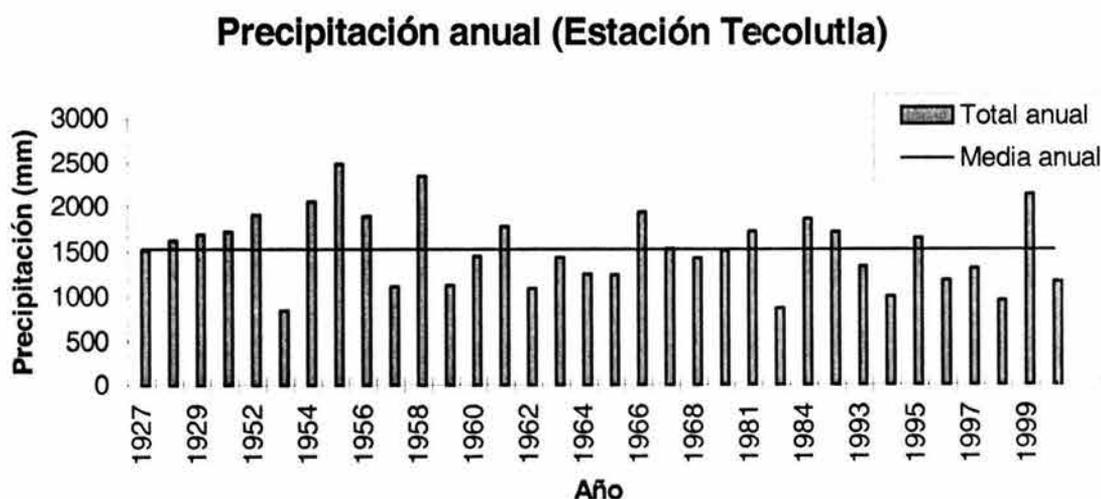


Figura 3.21 Precipitación total anual del periodo 1927-2000. Fuente: C.F.E. y S.M.N.

Precipitación media mensual

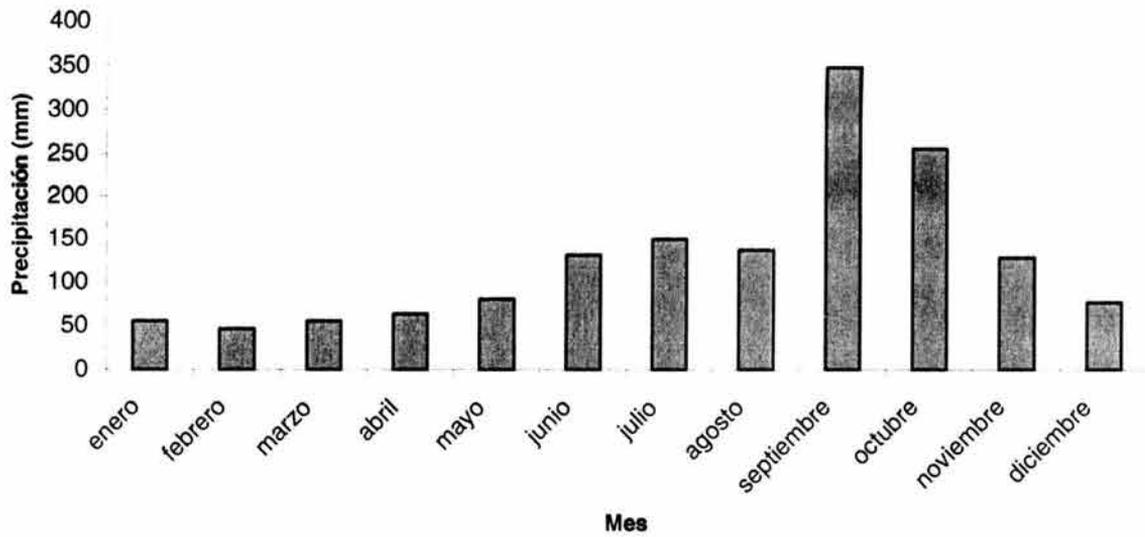


Figura 3.22. Precipitación media mensual

Fuente: C.F.E. y S.M.N.

Estación Libertad-Misantla

En el caso de la estación Libertad-Misantla sólo se tienen datos de 18 años debido a que se instaló en el año de 1980 (Figura 3.23). Se observa que la precipitación media anual de dicha estación es de 1795 mm, siendo excedida en el 50% de los años, destacando 1981, 1991, 1992, 1995, 1998 y 1999, en los cuales se alcanzaron valores mayores a los 2000 mm. En este último año la precipitación de los dos meses más lluviosos, septiembre y octubre, registró 478 y 576 mm, cuando el promedio mensual para el primero es de 302 mm y para el segundo de 276 mm (Figura 3.24).

Entre los días 28 y 13 de octubre se registró una lluvia de 738 mm siendo que en particular durante los días 4 y 5 de octubre se registró casi el 50% de la lluvia acumulada durante este periodo (Figura 3.25).

Precipitación anual (Estación Libertad-Misantla)

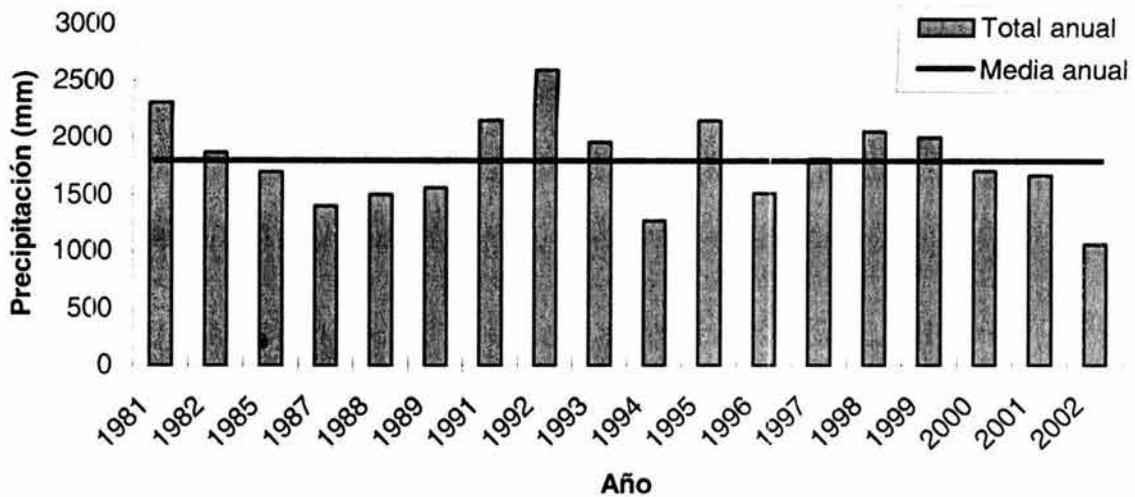


Figura 3.23. Precipitación total anual periodo 1981-2002.

Fuente: C.F.E. y S.M.N.

Precipitación media mensual

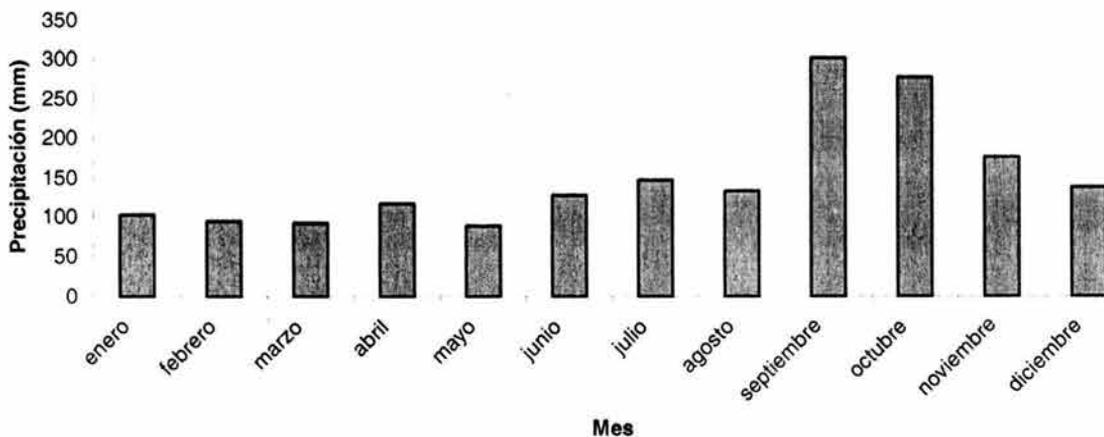


Figura 3.24. Precipitación media mensual.

Fuente: C.F.E. y S.M.N.

De esta forma podemos decir que en los meses de septiembre y octubre existen las mayores probabilidades de que se presenten inundaciones y procesos de remoción en masa.

Precipitación diaria del 28 de septiembre al 13 de octubre de 1999

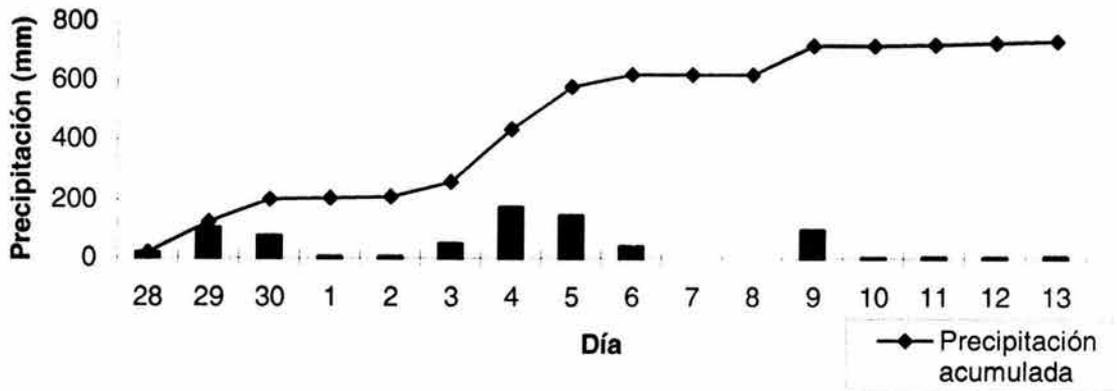


Figura 3.25. Precipitación diaria y diaria acumulada durante el periodo del 28 de septiembre al 13 de octubre de 1999.

Fuente: S.M.N.

3.4 FACTORES QUE PROPICIARON LA OCURRENCIA DE LAS INUNDACIONES Y LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN OCTUBRE DE 1999

Entre los factores que desencadenaron las inundaciones en el municipio de Tecolutla, cabe destacar, la precipitación extraordinaria, el relieve, la litología y la influencia antrópica.

La precipitación influyó de manera importante en la ocurrencia de las inundaciones debido a que ocasionó un gasto mayor al registrado de manera estacional en las diferentes corrientes localizadas aguas arriba, lo que provocó que esta gran cantidad de lluvia se concentrara en el cauce principal del río Tecolutla. Esto originó que el agua arrasara con las poblaciones localizadas en la llanura de inundación del río y en la desembocadura de la corriente.

De manera paralela, tal cantidad de precipitación actuó como detonante de diversos procesos de ladera al saturar de agua los materiales que forman parte del relieve del municipio, principalmente en la roca arenisca. Este tipo de litología se caracteriza por ser permeable debido a que presenta dos tipos de vacíos, poros y fisuras, de tal

manera que posee una porosidad elevada y por lo tanto un alto grado de permeabilidad. Cabe destacar que debido a las lluvias de extraordinarias de octubre de 1999, el agua excedió el nivel de absorción del suelo saturando los poros de la roca lo que provocó un descenso en la resistencia del material y por ende el movimiento del mismo como resultado de un mayor peso del material, razón por la cual éste se desplazó ladera abajo. También es importante mencionar que la acción de las corrientes fluviales puede ocasionar inestabilidad, principalmente por la socavación que se lleva a cabo en la base de las laderas cuando aumenta el caudal de los ríos.

El relieve, principalmente constituido por lomeríos compuestos de roca arenisca, también es parte importante en la ocurrencia de las inundaciones ya que se caracteriza por presentar un alto índice de escurrimientos asociado a las corrientes fluviales que provienen de los flancos de la Sierra Madre Oriental y desembocan en el Golfo de México, un ejemplo claro es el río Tecolutla. De igual forma es importante señalar que el caudal de dichas corrientes crece considerablemente gracias al aporte de agua derivada de los flujos que descienden de las laderas en época de lluvias; el aumento de caudal de dichas corrientes ocasiona, en algunos casos, daños en localidades que se encuentran dentro de las planicies de inundación.

Por otra parte, los procesos de remoción en masa se originaron debido a la influencia, entre otros, de dos aspectos asociados a las características morfológicas del sitio en estudio; la alta densidad de corrientes fluviales y los altos valores de pendiente concentrados en la parte suroeste del municipio. El primero juega un papel importante debido a la acción de los ríos en la base de las laderas que forman parte de la unidad de lomeríos de arenisca que se encuentran en esta área. De manera paralela, la pendiente es un factor que se debe tomar en cuenta ya que en esta zona se ubican los valores más altos de inclinación (entre 12 y 45 grados), es decir, el conjunto de lomeríos presenta las condiciones idóneas para el movimiento ladera de los materiales, esto se puede constatar ya que los procesos de remoción en masa registrados en campo se presentaron en laderas que se encuentran dentro de este rango de pendiente.

Los materiales formadores del relieve, principalmente la arenisca perteneciente a la formación Tuxpan, jugó un papel muy importante en la ocurrencia de las inundaciones y los procesos de remoción en masa. En el primer caso su permeabilidad influyó en el aumento del nivel de agua de los ríos, esto como efecto de los flujos superficiales y subsuperficiales que descendieron del relieve compuesto por dicha roca. Por otra parte, su elevada porosidad funcionó como un mecanismo detonador de movimientos del terreno, esto como resultado de un aumento en el peso del material constituyente de las laderas derivada de la intensa precipitación que saturó los poros de la roca ejerciendo una carga mayor en la ladera por lo que el material se desplazó afectando viviendas como fue el caso de la localidad de Plan de Carrizo.

Por último las actividades antrópicas han modificado en gran parte el espacio natural en el cual se desarrollan, entre ellas, la deforestación es una de las que más ha transformado el medio físico. Esto se debe a que se ha destruido una gran extensión de zonas arboladas con la finalidad de ampliar las áreas agrícolas, por lo que se origina una mayor infiltración. La importancia de la cubierta vegetal radica en que se encarga de retener un porcentaje de la precipitación y la regresa a la atmósfera a través de la evapotranspiración, por lo que se retrasa la saturación del suelo, evitando el crecimiento de los niveles de escurrimiento. Por otra parte éste incremento en la infiltración se convierte en un factor fundamental para la ocurrencia de procesos de ladera al acrecentar la saturación y por lo tanto la disminución de la resistencia de los materiales. A esto se suma el establecimiento de asentamientos humanos en la parte superior de las laderas, originando un incremento en el peso y la presión sobre los materiales que las conforman, además de que la descarga por medio de letrinas o drenajes inadecuados incrementan el contenido de humedad en el terreno. Por esta razón es vital realizar una planeación de las actividades económicas y del establecimiento de centros poblacionales de la zona para así evitar un incremento en las probabilidades de que se susciten eventos como los ocurridos en octubre de 1999.

En resumen, una ladera que ha sido estable bajo ciertas condiciones puede cambiar a inestable como resultado de modificaciones en los patrones de drenaje (deforestación, cambio climático, incremento de la precipitación, etc). Estos cambios pueden ocurrir naturalmente como consecuencia de modificaciones en los patrones de precipitación

o pueden deberse a la influencia de las actividades humanas. Además el establecimiento de viviendas en la parte superior de las laderas puede ocasionar alteraciones en las condiciones del índice de humedad del terreno (drenaje deficiente, letrinas, descarga de líquidos en el terreno, sobrepeso en las laderas), esto modifica la escorrentía natural y los patrones de drenaje. Aunado a esto es importante tomar en cuenta las características del terreno y de los materiales que lo conforman para poder llevar a cabo estudios que permitan mitigar los efectos ocasionados por las crecidas y los procesos de remoción en masa.



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

CAPÍTULO 4. ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE LADERA

4.1 INTRODUCCIÓN

En el estudio de los peligros naturales existen diversas metodologías. Algunas de éstas se basan en el uso de modelos que tiene como objetivo determinar el grado de susceptibilidad que presenta el terreno a estos procesos. Sin embargo, se debe considerar que existen factores que influyen en la inestabilidad de laderas que no pueden ser tomados en cuenta en un modelo, debido a su dificultad para cuantificarlos, y por ende no pueden ser representados en un mapa.

Para la realización de este trabajo se llevó a cabo la utilización del modelo infinito de estabilidad de laderas a partir del cual se puede analizar la estabilidad de los materiales que componen a una ladera. También se empleó el programa SINMAP (Stability Index Mapping) para realizar el mapeo de zonas susceptibles a presentar movimientos del terreno con el fin de obtener una cartografía referente a los diferentes grados de inestabilidad de las laderas.

4.2 MODELOS

De acuerdo con Harvey (1967), un modelo es la representación de una característica del terreno de una forma sintética, abstracta y temporal con el objeto de tener una visión próxima a las formas del relieve. Su uso debe adecuarse a los objetivos que se deseen alcanzar, a partir de una escala temporal ya sea *a priori* o *a posteriori* (Hardisty *et al.*, 1993). El primero da una idea de la dinámica del relieve como resultado del desarrollo del medio físico. Los modelos *a posteriori* surgen como una alternativa para el resultado final en el desarrollo de una teoría.

Los modelos, de acuerdo con Chorley (1967), se clasifican en normativos y descriptivos. Los primeros involucran el uso de analogías, aplicando un mayor o menor conocimiento de la situación, usualmente son utilizados para predecir eventos futuros, es decir, presentan una connotación de carácter predictivo. En cambio los descriptivos representan formas reales y se da un equilibrio estructural de las formas o sobre cambios en procesos a través del tiempo.

De acuerdo con Chorley (1967) en geomorfología los modelos se clasifican en:

Analogías naturales. Se recurre al análisis y modelado de las características históricas que se han presentado en el terreno y así poder inferir las condiciones futuras en el espacio.

Modelos físicos. Estos a su vez se dividen en materiales y matemáticos. Los materiales tienen el objeto de representar a escala las condiciones de la realidad, con los mismos materiales y características, para conocer y determinar su dinámica. Los matemáticos usan abstracciones del terreno donde los objetos son reemplazados por expresiones matemáticas por medio de variables, parámetros y constantes, esto concentrado en un sistema idealizado donde los valores presentan una relación para describir la dinámica del terreno. Dentro de estos modelos existen diferentes enfoques, determinístico, estocástico y de optimización.

Sistemas generales. Basados en el estudio de las formas del relieve con base en la suposición de que más de un proceso erosivo ha afectado al relieve, esto deducido de la observación general de las condiciones del terreno o de la intuición que le da la experiencia del investigador. Dentro de este sistema existe una relación recíproca entre cada elemento que es posible de estudiar por separado (Von Bertalanffy, 1978).

En el caso de este trabajo se llevó a cabo la utilización de un modelo matemático de tipo estocástico, con el propósito de representar la dinámica actual o con posibilidades de existir en el relieve bajo ciertas condiciones dominantes, para lo cual fue necesario definir el modelo y los resultados que desean obtenerse, para comenzar a realizar las

simulaciones de los escenarios posibles que resultan del manejo de los elementos del modelo.

4.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Gracias al desarrollo que ha tenido la tecnología el uso de los modelos ha podido desarrollarse, principalmente gracias a los Sistemas de Información Geográfica, los cuales han permitido una mejor manipulación de la información, además de que permiten relacionar diversos aspectos referentes a las características de la superficie terrestre.

De acuerdo con Aronoff un SIG es cualquier conjunto de procedimientos, ya sea manuales o a partir de un cálculo de cómputo, empleados para guardar y manipular información que ha sido georeferenciada (López Blanco, 1994). Los SIG consisten en una base de datos, cuyo objetivo es el de apoyar a las tomas de decisiones a partir de la manipulación de información, la cual puede ser transformada en capas para facilitar su manejo y posterior análisis. En el caso del estudio de los peligros naturales, su predicción se lleva a cabo a partir del manejo de las distintas capas de información, lo que permite el desarrollo de cálculos de modelos, además de la realización de cartografía en donde se presenten los resultados obtenidos a partir de estos cálculos. Otra de las funciones que presentan dichos sistemas consiste en poder simular posibles escenarios a futuro e incluso recrear eventos pasados.

De esta forma los modelos y los SIG son empleados, generalmente, en diversos campos de las ciencias de la tierra, sin embargo también pueden ser utilizados para el análisis de aspectos sociales.

4.4 MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN

Los MDE son el arte de representar numéricamente y de forma digital las características de una superficie. Los MDE ahora forman parte de la tecnología de los SIGs. Esto porque los problemas actuales requieren de soluciones interdisciplinarias e integradas que combinan todos los aspectos que influyen en el fenómeno en estudio.

La integración de los modelos dentro de los SIG ha atraído al campo de la aplicación la atención de una gran audiencia de una gran variedad de aplicaciones desde la ingeniería hasta la geografía, hidrología, planeación e impacto ambiental, generalmente para la obtención de información referente a las características topográficas del terreno (Kidner y Smith, 2003).

Recientemente los modelos de elevación han permitido el desarrollo de métodos que permiten apoyarse en los SIG para cuantificar atributos topográficos relacionados con la inestabilidad de laderas, y de esta forma representar patrones de inestabilidad (Pack, 2001).

En algunos estudios sobre inestabilidad, los MDE son parte esencial para la realización de mapas de susceptibilidad, ya que a partir de los valores altitudinales, se pueden inferir las diferentes pendientes presentes en el terreno, dichos valores se emplean como uno de los parámetros dentro del modelo infinito de estabilidad de laderas.

De esta forma, a partir del empleo de modelos de elevación y SIG, se puede obtener información sobre dirección de las corrientes fluviales y el área de concentración de agua en un punto determinado, la cual permite, de manera muy general, determinar el grado de susceptibilidad que presenta el terreno a procesos de ladera. Además es posible incorporar información que permita llevar a cabo un estudio más detallado, esta puede ser geológica, edafológica, geomorfológica, geotécnica, precipitación e incluso de vegetación, dicha información puede ser complementada con registros sobre procesos que hallan ocurrido con anterioridad.

En el caso de la inestabilidad de laderas los elementos que generalmente se toman en cuenta para llevar a cabo un análisis comprenden características topográficas, la distribución espacial de los procesos, los escenarios topográficos con respecto a la variación de la intensidad de la lluvia y el tipo de roca.

Los MDE han permitido el manejo de modelos de mapas de susceptibilidad que se han empleado para determinar los diferentes grados de peligro en una zona específica (Sidle *et al.*, 1985; Dietrich, 1986, Montgomery and Dietrich, 1994; Miller, 1995; Gritzner, 2001).

4.5 MODELO INFINITO DE ESTABILIDAD DE LADERAS

Este modelo, desarrollado por Skempton (1957), se creó con el objeto de analizar la estabilidad de laderas en arcillas, en la ciudad de Londres. Se basa en una ecuación de tipo lineal considerando un movimiento paralelo a una superficie y una ladera que se extiende infinitamente. Este modelo ha sido utilizado en diversas investigaciones debido a su simplicidad.

Al emplear este modelo se asumen las características de la ladera en dos dimensiones, en el entendido de que las condiciones de la ladera son homogéneas. El tipo de movimientos analizados en este modelo, involucra masas que en longitud son mayores que la profundidad del mismo, por lo que el movimiento es planar y de longitud infinita (Alcántara Ayala, 1999).

La aplicación de este modelo desde la perspectiva hidrológica asume que el peso que presenta el suelo es perpendicular a la ladera y no vertical, este último es medido en valores de metros.

El modelo se expresa de la siguiente manera:

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [\rho_s g (D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g) D_w] \tan \phi}{D \rho_s g \sin \theta \cos \theta}$$

Dónde:

- F_s = valor de estabilidad de la ladera
- C_r = cohesión original del material
- C_s = cohesión del suelo
- θ = pendiente
- $\tan \phi$ = ángulo de fricción interna del suelo
- ρ_s = densidad del suelo en estado húmedo
- ρ_w = densidad del agua
- g = constante de gravedad
- D = profundidad del suelo
- D_w = profundidad de manto freático en la capa de suelo

4.6 SINMAP

Para la obtención del índice de estabilidad del municipio de Tecolutla se recurrió a la utilización del programa SINMAP (Stability Index Mapping), el cual es una extensión del SIG ArcView, y permite el cálculo y mapeo del índice de estabilidad con base en la información geográfica, principalmente la que se obtiene a partir del modelo digital de elevación.

En el cálculo del índice de estabilidad, SINMAP se basa en el modelo infinito de estabilidad de laderas descrito anteriormente, sólo que en este caso la fórmula está simplificada de la siguiente manera:

$$FS = \frac{C + \cos\theta \left[1 - \min\left(\frac{R}{T} \frac{a}{\sin\theta}, 1\right) r \right] \tan\phi}{\sin\theta}$$

Donde:

- a = área específica de la cuenca
- θ = ángulo de la pendiente
- c = cohesión del suelo
- $\tan \Phi$ = ángulo de fricción interna del suelo
- r = densidad del agua en el suelo
- R/T = Capacidad de recarga de agua en el suelo con relación al movimiento lateral del agua en el mismo.

A partir de los valores obtenidos del cálculo del Factor de seguridad se asignan los valores del índice de estabilidad.

Estos valores se hallan en función de los valores 0 (muy inestable) y 1 (poco estable). Esto se interpreta a partir del supuesto de que cuando una ladera presenta un valor cercano o igual a 0 tiene una condición de inestabilidad en la que están interactuando elementos como la inclinación de la ladera, la litología y el estado de la misma que compone a la ladera y la capacidad de la misma para soportar su propio peso en un estado de saturación. En cambio cuando presenta valores iguales o mayores a la unidad, la ladera presenta una condición de estabilidad aparente donde los elementos antes mencionados se encuentran en un estado hipotético de equilibrio.

SINMAP realiza un ordenamiento de clases en función del índice de estabilidad, tomando como referencia los valores 1.5, 1.25, 1, 0.5 y 0. Debido a que la interpretación de dicho valores es subjetiva se requiere crear clases para que los valores expresados en función de la estabilidad puedan ser interpretables (Cuadro 4.1).

| | | | | | |
|-------------------|---|----------------------------------|--|---|---|
| $IE > 1.5$ | 1 | Zona de ladera estable | Rango del modelo donde no hay inestabilidad | E S T A B L E | 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 | I N E S T A B L E | 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 |

Cuadro 4.1. Clases en función del índice de estabilidad.

Fuente: Pack *et al.*, 2001.

En el caso de este trabajo las clases se ajustaron a 3 categorías de acuerdo con su condición de estabilidad que de alguna forma dan una idea clara sobre la dinámica que presenta el espacio analizado en función de las condiciones que presenta la ladera según los parámetros de tipo geográfico que han sido introducidos.

4.7 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD DEL MUNICIPIO DE TECOLUTLA

Para obtener el índice de susceptibilidad a través del SINMAP, es necesario seguir una serie de pasos en la manipulación y procesamiento de la información requerida.

Una vez obtenido el MDE del municipio de Tecolutla (Figura 4.1), éste es corregido por el programa a través de un proceso conocido como *pit filling correction* o relleno de espacios. Este proceso consiste en rellenar aquellos espacios que presentan errores que provienen de la elaboración del MDE. Los espacios son rellenados con los valores más próximos asignándole así un valor de elevación de tipo real.

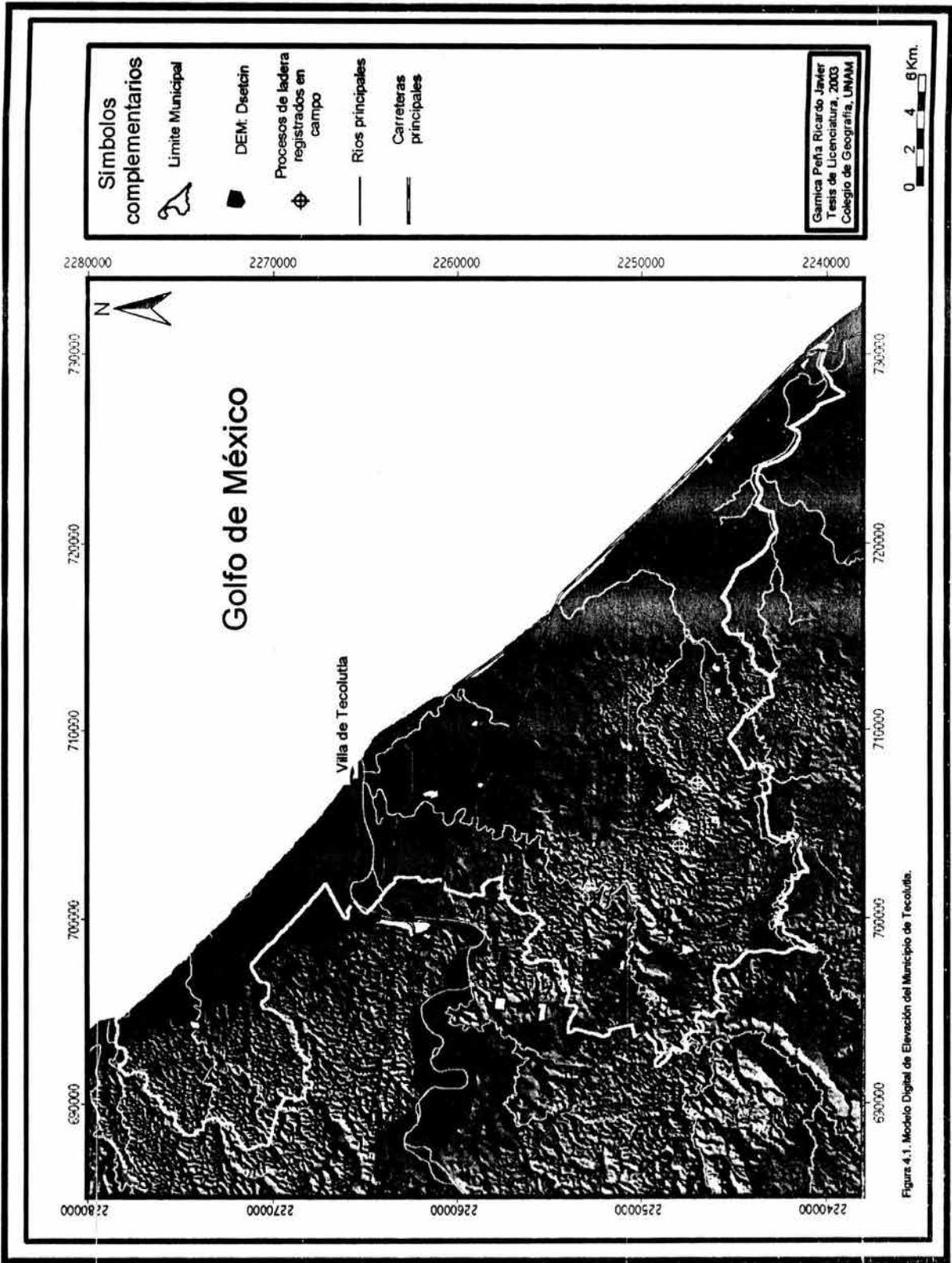


Figura 4.1. Modelo Digital de Elevación del Municipio de Tecolutla.

Posteriormente es posible realizar el mapa de pendientes correspondiente, el cual es parte importante en el análisis de susceptibilidad (Figura 4.2). Principalmente predominan las zonas que presentan una pendiente menor a los 12°, entre las que destacan las planicies aluviales, las diferentes elevaciones menores, tanto de arenisca como de tobas, la rampa de tobas y los diferentes valles fluviales que se encuentran dentro del área de estudio. Por otra parte, las zonas con valores mayores a los 12° están compuestas por las diferentes regiones elevadas, principalmente los lomeríos de arenisca y de lutita arenisca, además de las laderas que rodean a la mesa de lava. Como puede observarse en el mapa de pendientes existe un descenso de las mismas desde el oeste hacia el este.

Para llevar a cabo el cálculo de los índices de estabilidad por medio del SINMAP es necesario, primero, definir una serie de parámetros utilizados durante todo el cálculo. Por una parte tenemos aquellos valores que son considerados como constantes dentro del cálculo, dentro de estos tenemos (Pack, 2001):

- Constante de gravedad con valor de 9.81 m/s^2
- Densidad del suelo expresada en 2000 kg/m^3
- Densidad del agua con valor de 1000 kg/m^3

En contraparte es necesario establecer los valores que representan las propiedades de los materiales que conforman al área de estudio. Para realizar este paso se emplea el mapa morfogenético elaborado anteriormente y comentado en el capítulo 2. Así, para realizar la calibración de regiones se incorporan al proceso de cálculo los valores mínimos y máximos de los parámetros transmitividad, cohesión y el ángulo de fricción interna, los cuales permiten conocer los valores de resistencia de los materiales que conforman al relieve.

La transmitividad, según Pack (2001) es la capacidad que presenta el suelo para que exista una transferencia de agua bajo un gradiente hidráulico, esto se expresa como producto de la conductividad hidráulica por medio del espesor del suelo en un estado saturado.

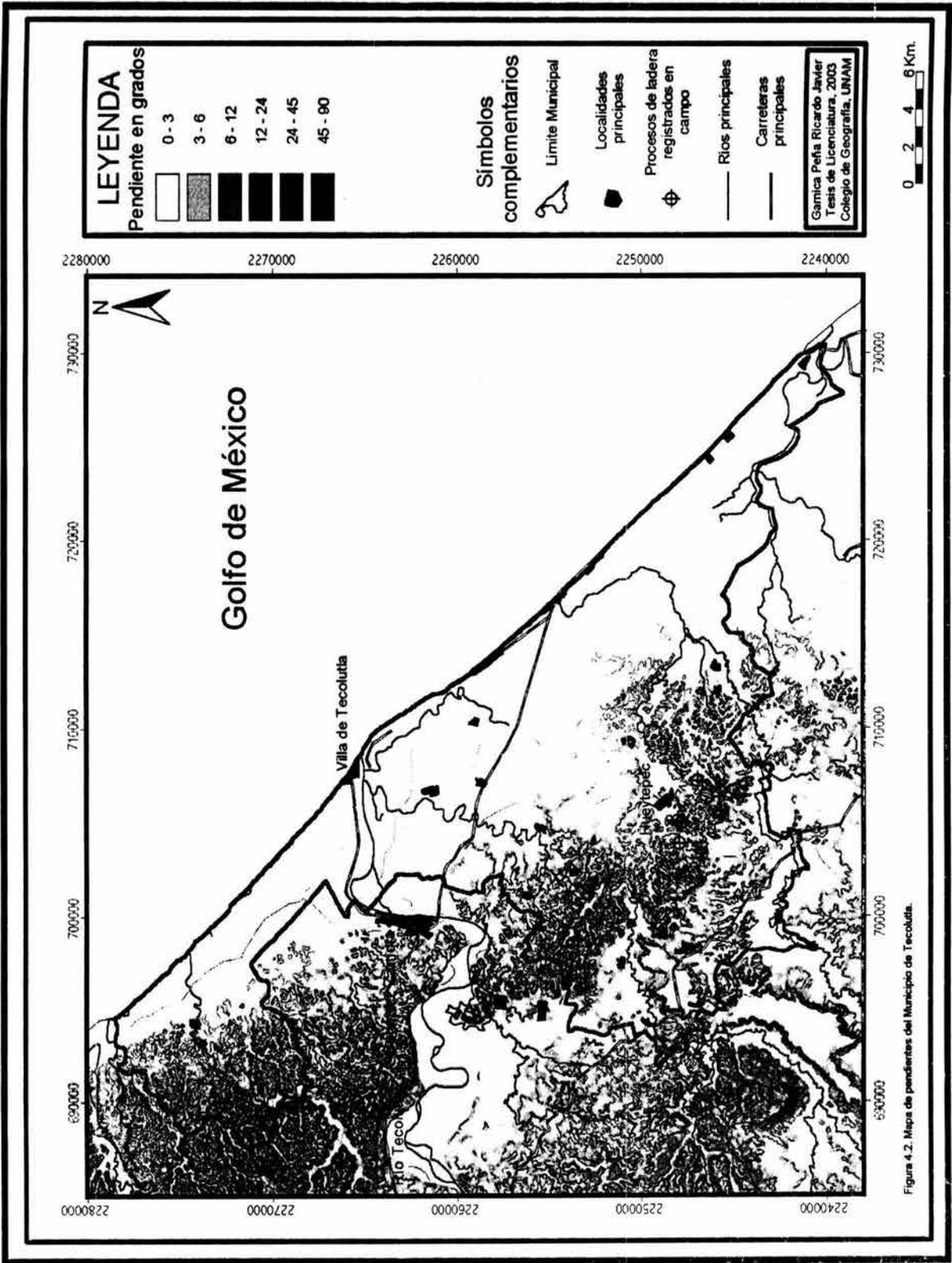


Figura 4.2. Mapa de pendientes del Municipio de Tecolutla.

El siguiente parámetro, la cohesión, es la propiedad que tienen los materiales de mantenerse unidos de manera intergranular. Esta propiedad se presenta tanto en las rocas como en el suelo.

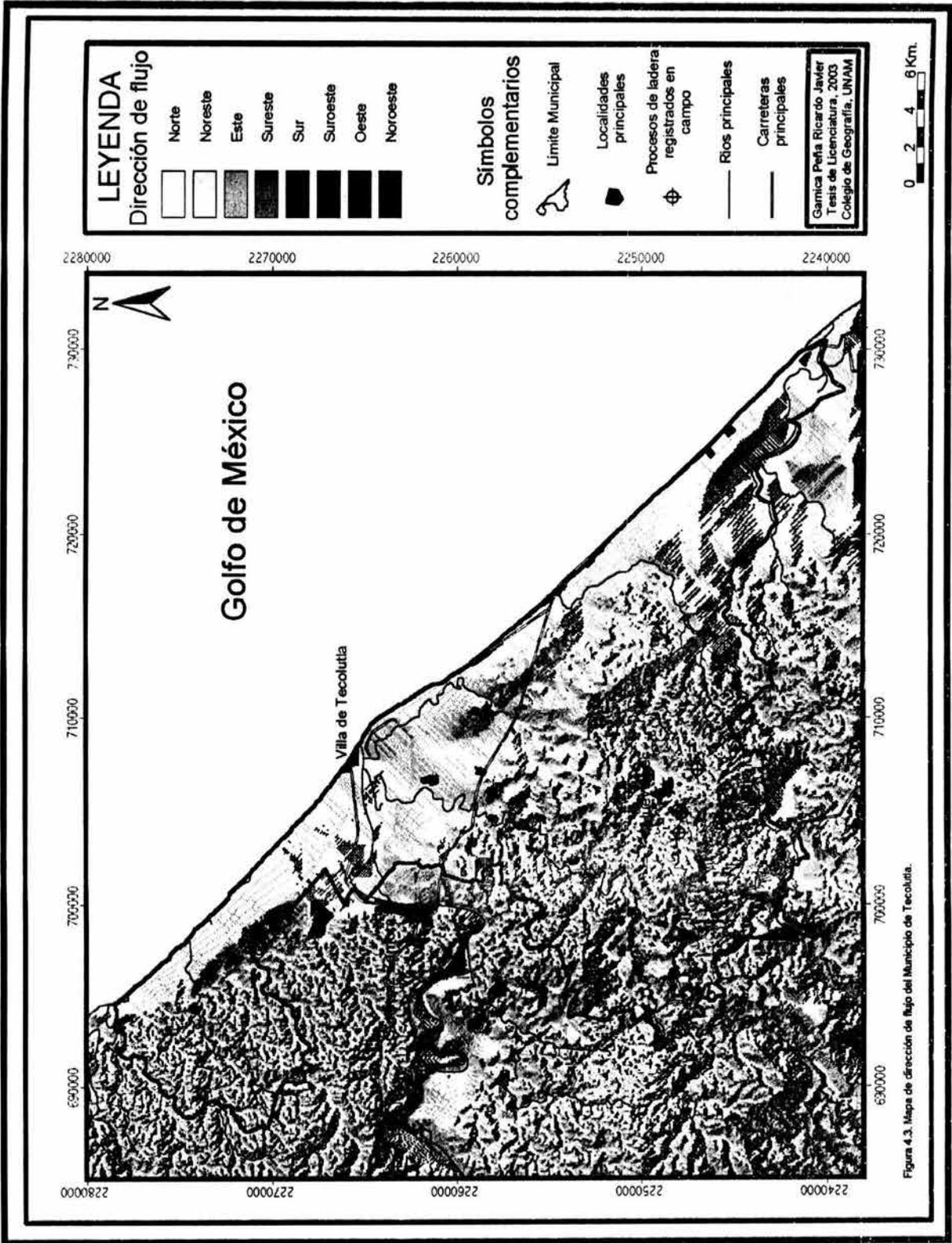
Por último el ángulo de fricción interna es la capacidad de la roca o el suelo de resistir una determinada tensión o fuerza. Además este valor aumenta o disminuye según la plasticidad y el contenido de agua que presenten los materiales (Selby, 1982).

Establecidos los valores antes mencionados se llevó a cabo el primer paso para conocer el índice de susceptibilidad. Este consiste en la obtención, a partir del SINMAP, de los mapas de dirección de flujo (Figura 4.3) y de área específica de la cuenca (Figura 4.4). A continuación se explican los mapas resultantes y sus características; para conocer la teoría en la cual se basa la realización de los mismos remitirse a Tarboton (1997), Pack (2001), Pack *et al.* (2001), Flores (2002), Borja Baeza (2003) y Marcos López (2003).

El mapa de dirección de flujo expresa el rumbo preferencial de los escurrimientos sobre las laderas, además de que nos permite conocer los sitios en los cuales se concentra la mayor cantidad de precipitación. Este mapa está basado en la relación que tiene la forma y la orientación de las laderas.

El mapa resultante del área específica de la cuenca corresponde a los sitios en donde se capta la mayor cantidad de agua, debido a los escurrimientos en función del área drenada. Estos valores tienen una relación directa con la red hidrológica de la zona, ya que los valores que representan a la mayor concentración, corresponden a los sitios donde existe una corriente fluvial, es decir este mapa, de alguna forma nos muestra cuál es la forma que presenta el relieve y cual es el tipo de drenaje que existe en la zona.

Los valores aparecen expresados de la siguiente manera, los valores menores representan a las zonas altas y que corresponde con los diferentes parteaguas existentes en la zona, sitios en los cuales no es factible la concentración de escurrimientos. Los valores de rango medio, muestran zonas donde la concentración



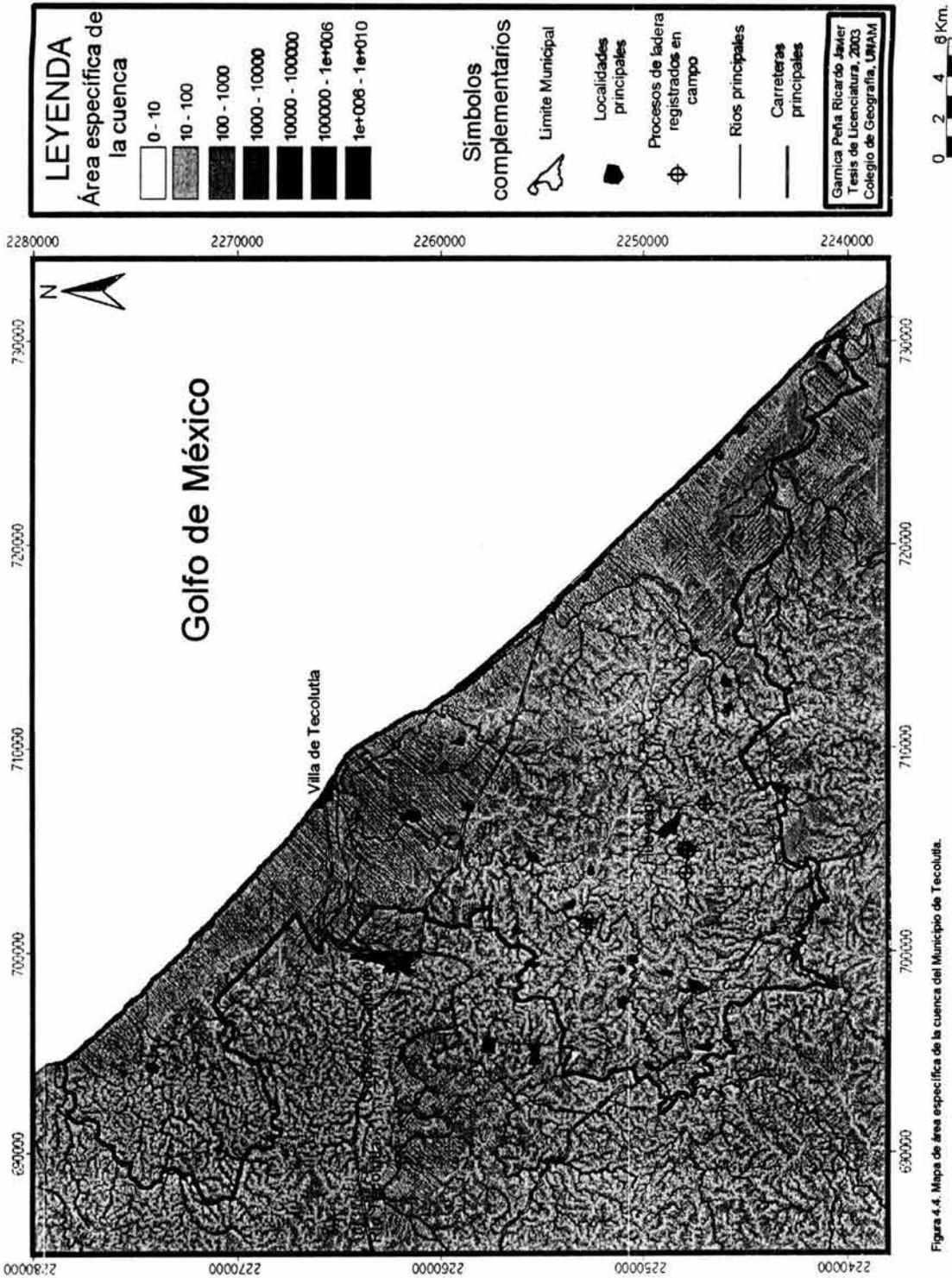


Figura 4.4. Mapa de área específica de la cuenca del Municipio de Tecolutla.

de corrientes es baja debido a la forma de las laderas y a su cercanía con los parteaguas. Las zonas en donde la concentración es óptima están representada por los valores más altos y se asocian a valles, los cuales representan a las zonas más bajas dentro del área y por lo tanto también son zonas potenciales para la concentración de la humedad.

Después de haber obtenido estos mapas, el programa los procesa y como resultado de este proceso se obtienen los mapas de índice de humedad (Figura 4.5) y estabilidad (Figura 4.6). El primero nos muestra los sitios en donde se acumula la mayor cantidad de humedad a partir de la infiltración del agua en las laderas, esto en función de las características de los materiales y la forma que presente el terreno. De este mapa se obtiene 4 rangos que expresan el estado de los materiales en un grado de saturación.

-Zona de saturación. Representa a las zonas donde los materiales pueden presentar una condición de alta concentración de agua esto como influencia de su situación topográfica y de la influencia de la concentración de escurrimientos que drenan en el área. En el área de estudio están representadas por las planicies aluviales, la zona costera y en los diferentes valles que se encuentran dentro de las regiones elevadas.

-Umbral de saturación. Consiste de un momento en el cual la saturación se encuentra en una situación previa, es decir se encuentra en un punto cercano a la saturación. Se localiza en las áreas que están dentro de los rangos de pendiente mayores a 12° y menores a 24° .

-Zona parcialmente saturada. Presenta un valor de concentración de agua de medio a bajo y por lo tanto no existe una gran proporción de saturación. Constituidas por laderas con pendientes mayores a 24° dentro de la región de lomeríos, los cuales abundan en la parte sur y suroeste del municipio.

-Zona de baja saturación. Se caracterizan por ser zonas donde debido a sus condiciones topográficas no es posible que ocurra una acumulación de agua.

Representadas en el área por los parteaguas que se encuentran en las zonas más elevadas del área de estudio.

Es importante mencionar que las zonas de saturación y el umbral de saturación corresponden a los valles y planicies fluviales mientras que por otro lado las partes más elevadas presentan valores bajos de concentración de humedad.

En el caso del mapa de índice de estabilidad, muestra las zonas potencialmente susceptibles a presentar procesos de ladera. Es el resultado del procesamiento de la información referente a las características del terreno a partir del cual se obtuvieron los mapas anteriores y que dieron forma al mapa de estabilidad.

Los valores de estabilidad se agruparon en tres clases las cuales indican la probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa (Cuadro 4.2).

| Condición | Índice de estabilidad |
|-------------------|-----------------------|
| $IE > 1.5$ | Estable |
| $1.5 > IE > 1.25$ | Casi estable |
| $1.25 > IE > 0$ | |

Cuadro 4.2. Rangos de estabilidad tomados para este trabajo.

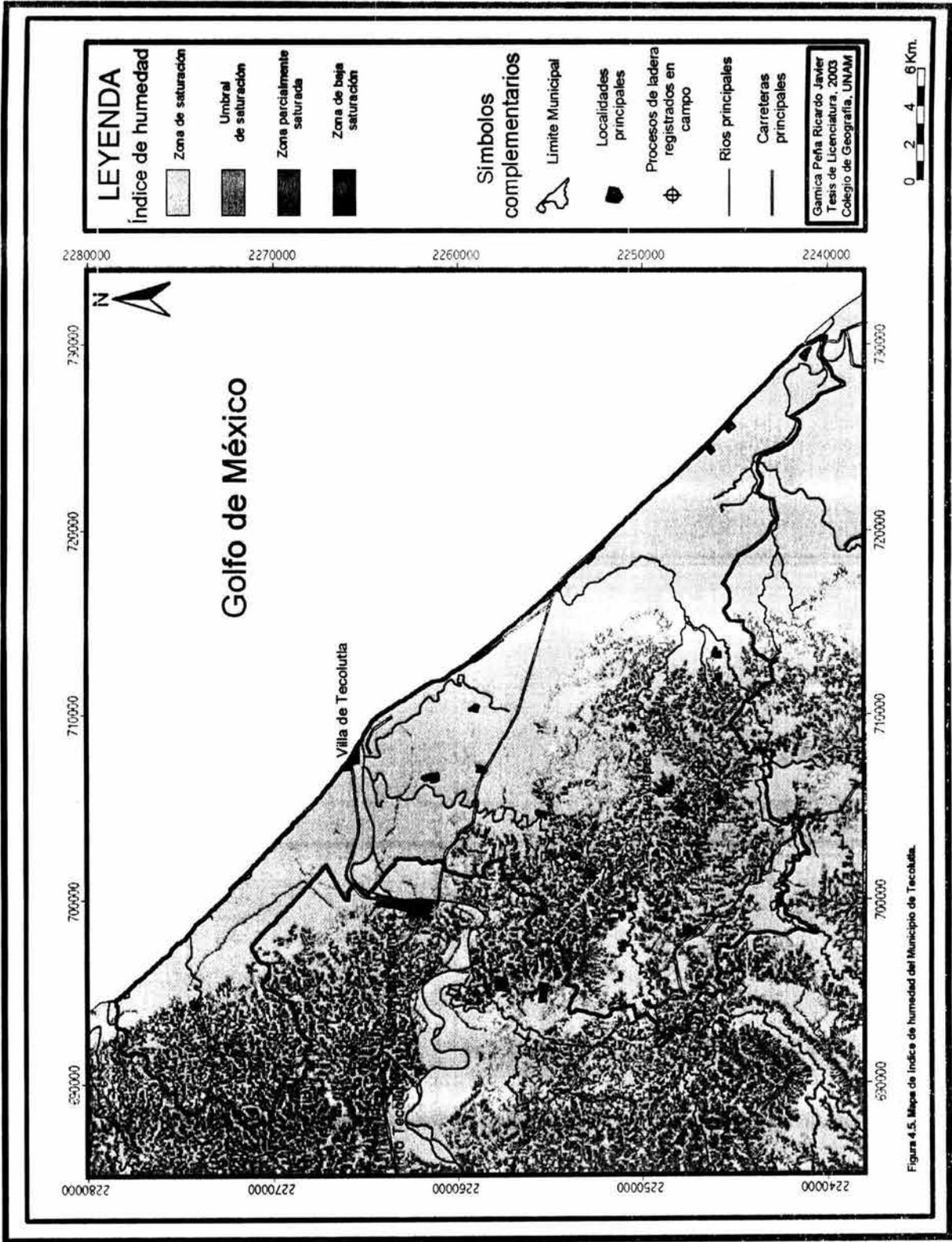


Figura 4.5. Mapa de Índice de humedad del Municipio de Tecolutla.

Las zonas que presentaron los valores más altos de estabilidad predominan en casi todo el municipio. Esto es debido a que estas zonas están representadas por las planicies aluviales, la rampa que está compuesta de tobas, la mesa de lava, así como por algunas zonas de lomeríos de arenisca las cuales presentan poca altitud e inclinación. En general son zonas que presentan valores altos en cuanto al índice de humedad, además de caracterizarse por ser zonas que presentan pendientes menores a 12° . Algunas de las localidades que se encuentran dentro de este rango son: la Villa de Tecolutla, Monte Gordo, Casa Colorada, 2 de Octubre, Fuerte de Anaya, Cruz de los Esteros.

La característica principal de estas zonas estables es que la ocurrencia de procesos de ladera es casi nula debido a las características del terreno. Sin embargo hay que hacer notar que algunas localidades que se encuentran dentro de este rango de estabilidad fueron afectadas por movimientos del terreno en octubre de 1999.

Las zonas casi estables, a pesar de estar entre los rangos estable e inestable, son consideradas inestables. Presentan un factor de seguridad entre 1.25 y 1.5. Se distribuyen a lo largo de las regiones donde predominan los lomeríos de arenisca, los cuales presentan las elevaciones y las pendientes más altas dentro de toda la zona de estudio. Además gran parte de estos lomeríos se ven afectados por las diferentes corrientes fluviales que se desplazan a través de los valles que se encuentran dentro de dicha zona. La distribución que presenta este rango es de la siguiente manera, al noroeste, en una pequeña porción en los límites del municipio con Gutiérrez Zamora; al sur y suroeste, en los límites con Papantla, y cercano a las localidades Plan de Carrizo, Vista Hermosa Calichal, etc. También se pueden observar en las laderas que rodean a la mesa de lava, principalmente donde las pendientes son mayores a los 12° y en las cercanías de las corrientes fluviales que se desplazan al pie de las laderas.

El aspecto más importante a considerar es la pendiente, debido a que en este rango las laderas se encuentran con pendientes mayores a 12° y menores a 45° , por lo que son susceptibles a presentar movimientos del terreno. El grado de humedad que presentan las mismas es bajo, sin embargo en el caso de que ocurran precipitaciones

extraordinarias, como las que se presentaron en 1999, estas zonas pueden ser altamente inestables.

Las zonas inestables, con los valores de estabilidad más bajos (entre 0 y 1.25), se encuentran principalmente en donde predominan los lomeríos de arenisca ubicados en la parte noroeste, sur y suroeste del municipio. Estas zonas representan las zonas más elevadas del área de estudio así como las pendientes más pronunciadas, entre los 24 y 45 grados e incluso mayores a este último. Estas áreas coinciden con las zonas que fueron afectadas durante el mes de octubre de 1999, principalmente las ubicadas en las proximidades del río Chichicatzapán, en donde se encuentran localidades como Plan de Carrizo, Vista Hermosa Calichal. En general son zonas deshabitadas, y/o agrícolas, principalmente de cítricos y pastizales para el ganado.

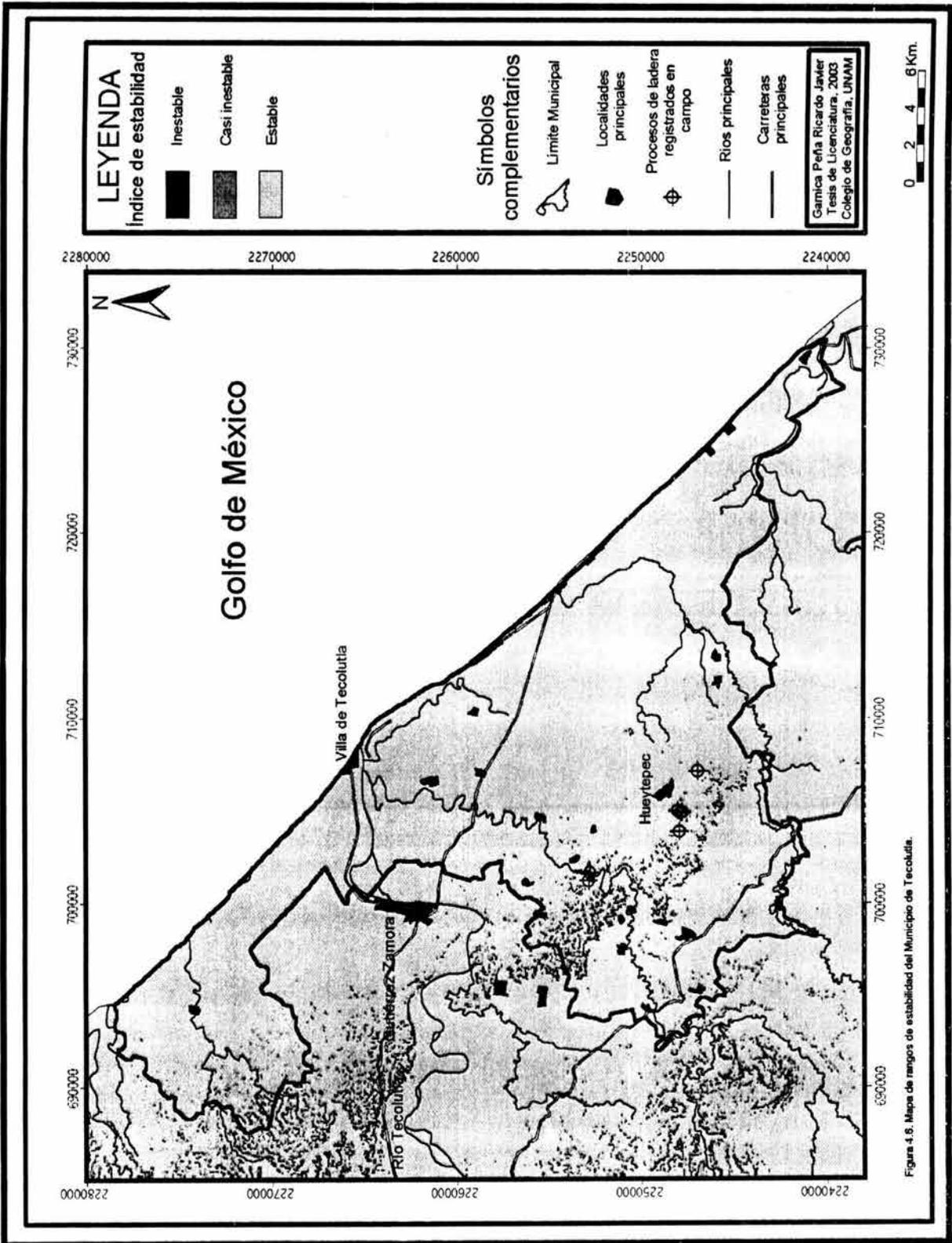


Figura 4.6. Mapa de rangos de estabilidad del Municipio de Tecolutla.

Como anexo a este mapa se realizaron los mismo pasos mencionados anteriormente para la obtención del índice de estabilidad en cuatro recortes que se obtuvieron del mapa base, esto con el objeto de presentar, a una escala mayor, las zonas que presentan mayor susceptibilidad (Figura 4.7).

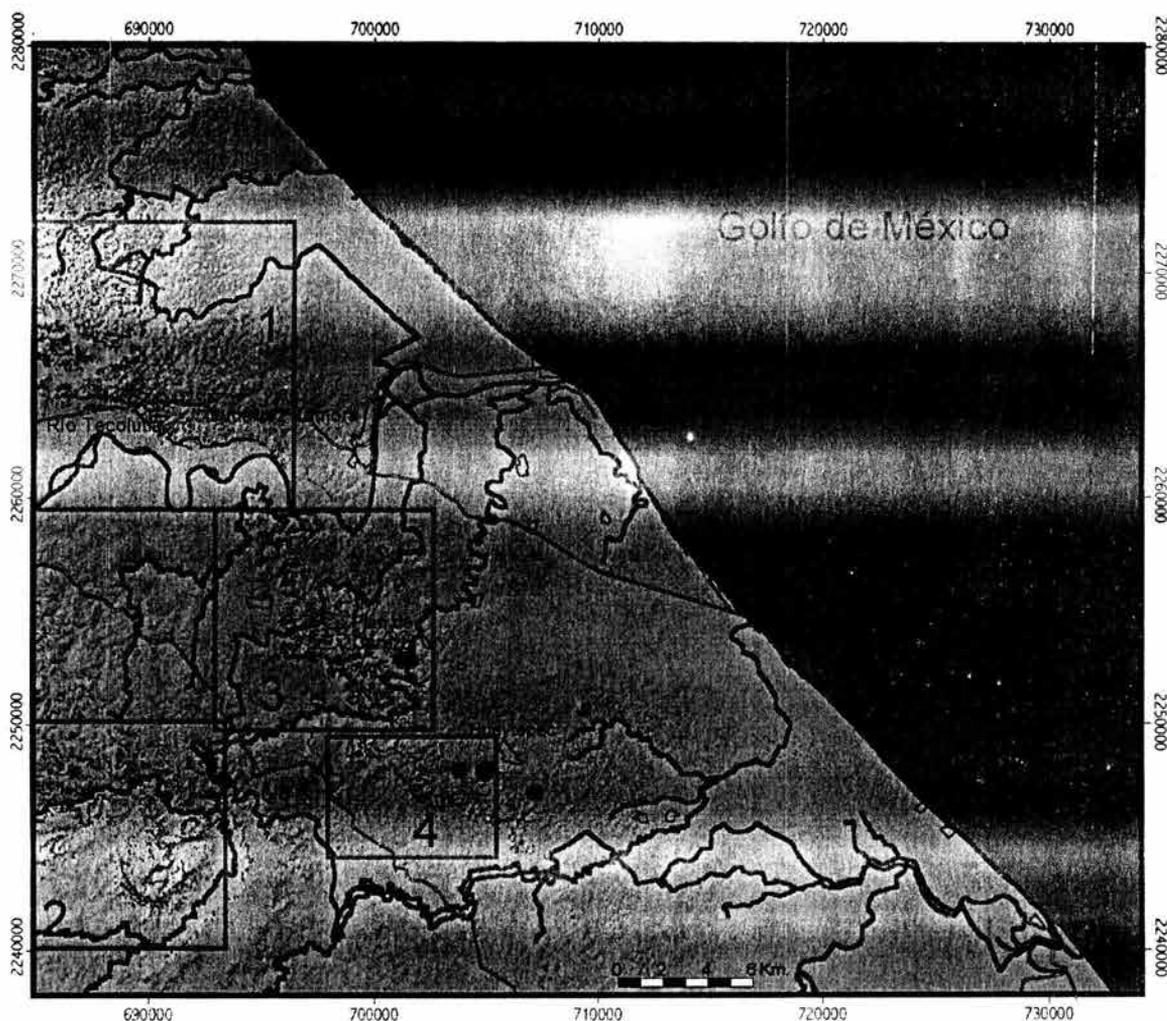


Figura 4.7. Localización de los recortes hechos al mapa base del índice de estabilidad

El primer corte corresponde a la zona adyacente a la llanura de inundación del río Tecolutla, al oeste de la cabecera municipal de Gutiérrez Zamora, sitio en donde se encuentra una pared casi vertical en la cual, de acuerdo con el mapa base, existe la posibilidad de que ocurran procesos de ladera (Figura 4.8).

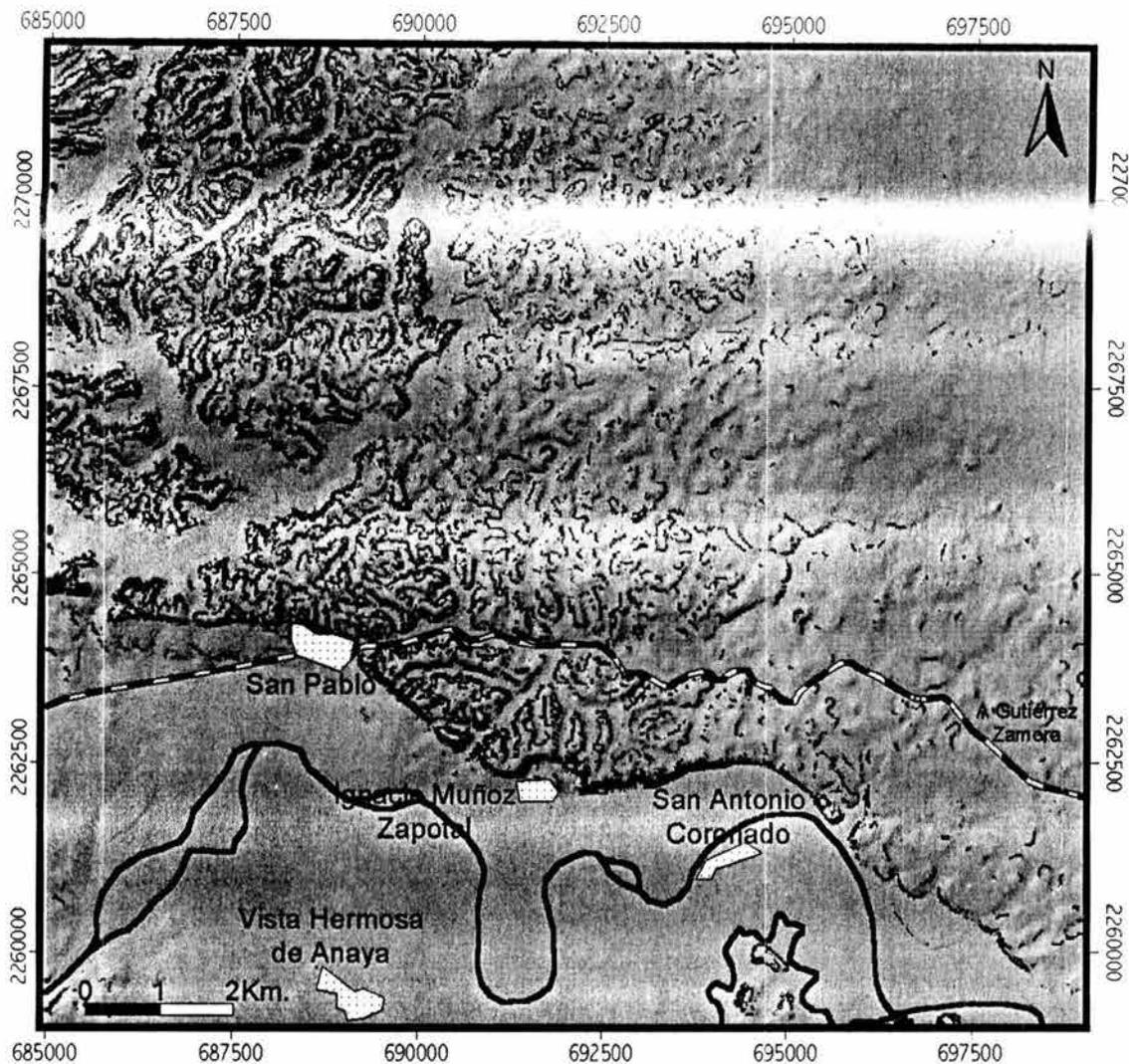


Figura 4.8. Zona ubicada al oeste de la localidad de Gutiérrez Zamora y que presenta alta susceptibilidad a procesos de ladera.

La segunda zona está ubicada al suroeste del área de estudio, en las proximidades con la mesa de lava. Esta zona, compuesta principalmente de areniscas y lutitas, presenta un grado alto de susceptibilidad a movimientos del terreno por lo que es vital enfocarse en esta zona para estudios referentes a la temática aquí planteada (Figura 4.9).

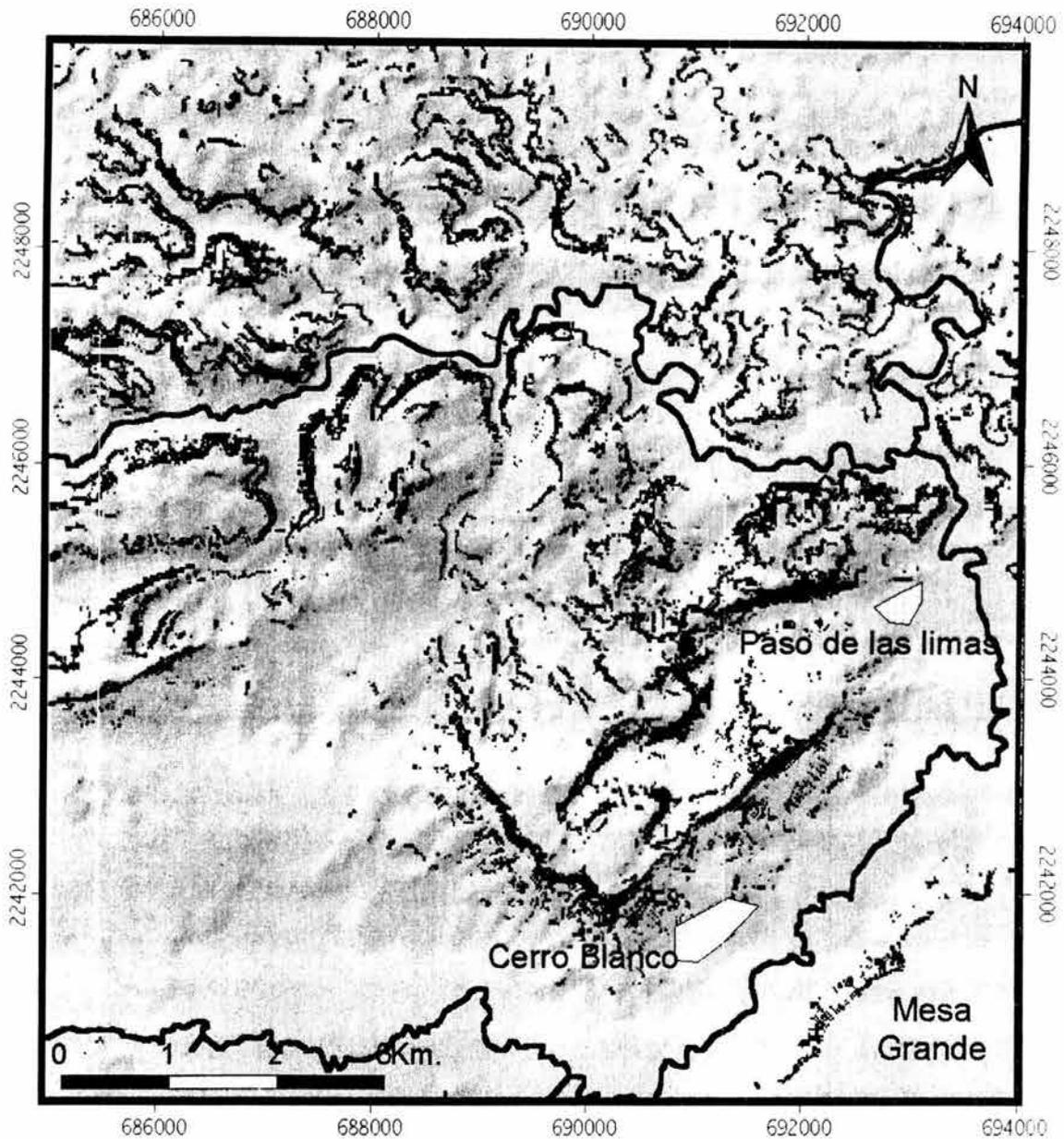


Figura 4.9. Alta susceptibilidad a inestabilidad de laderas en las proximidades de Mesa Grande.

Por último las dos zonas susceptibles que se encuentran dentro del municipio de Tecolutla están ubicadas al suroeste del mismo, próximas a las localidades de Plan de Carrizo, La Gloria, Vista Hermosa Calichal, Chichicatzapán de Méndez y la Colonia Maximino A. Camacho (Figuras 4.10 y 4.11). Estas áreas fueron particularmente afectadas por los eventos ocurridos en octubre de 1999, por lo que requieren mayor atención por parte de las autoridades del municipio.

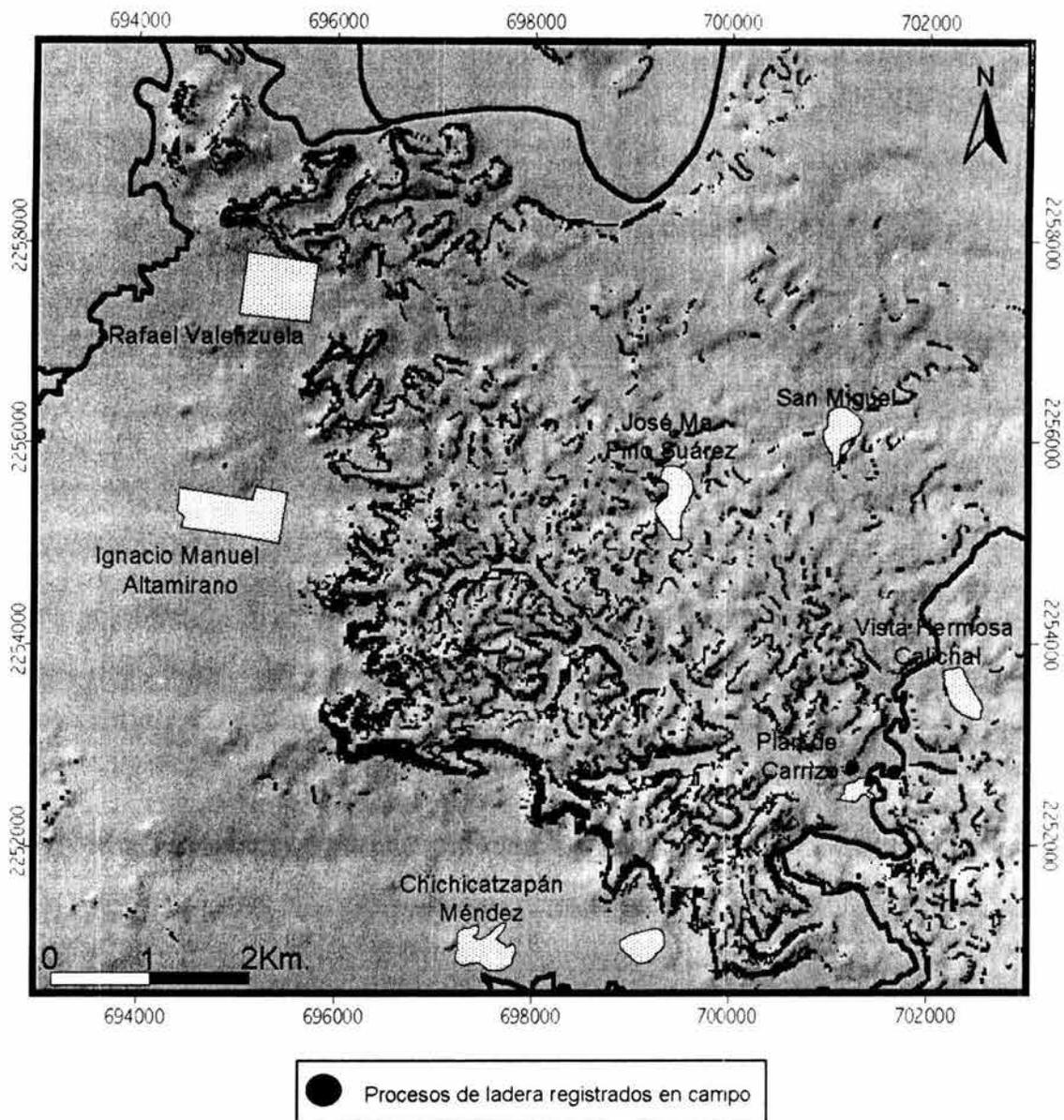


Figura 4.10. Cerca de las localidades de Chichicatzapán Méndez, Ampliación Pino Suárez, Ampliación Anclón Arenal, La Gloria y Plan de Carrizo se localiza esta zona que presenta alta susceptibilidad a movimientos del terreno.

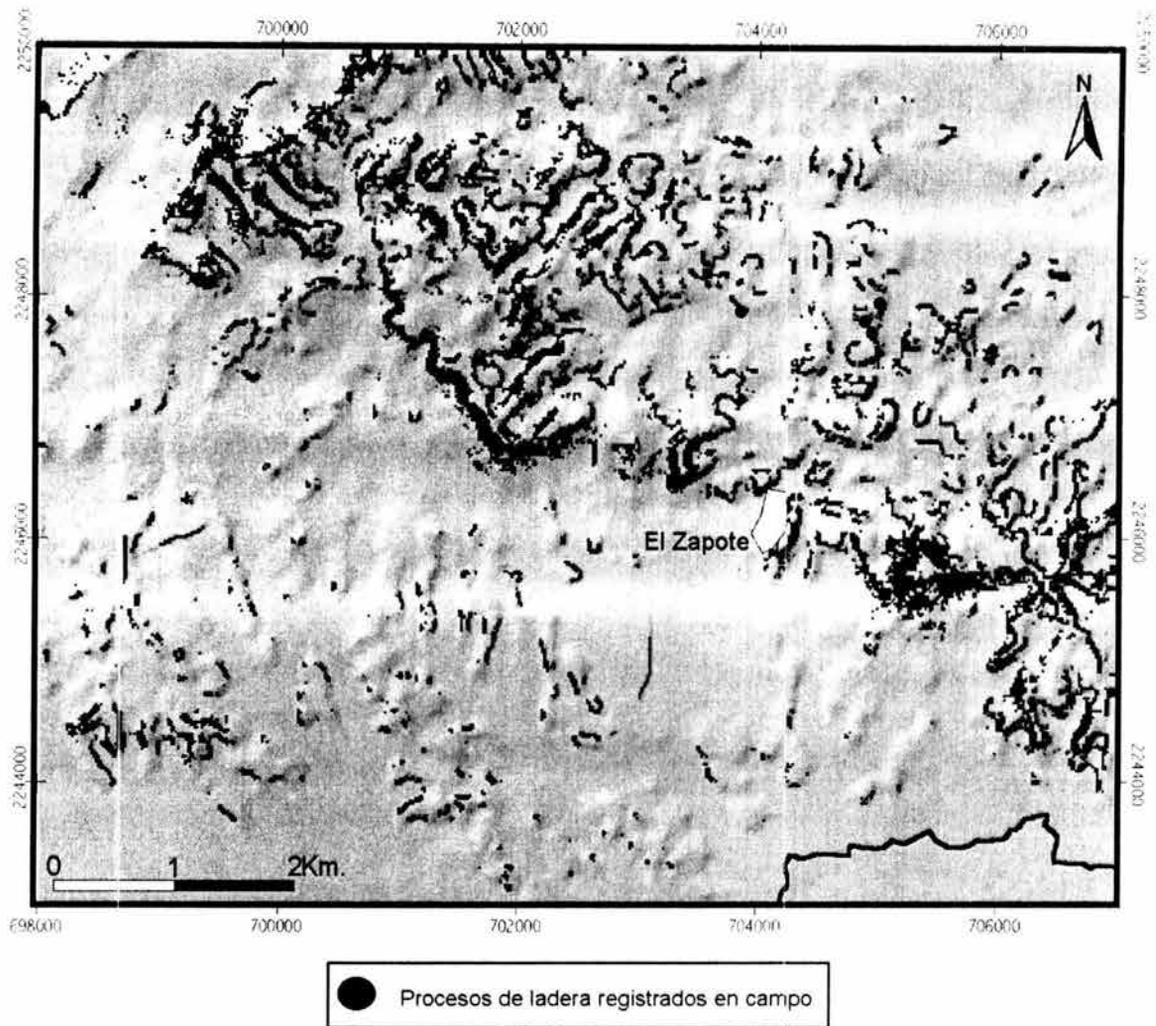


Figura 4.11. Alta susceptibilidad a inestabilidad de laderas en la zona donde se encuentran localidades como Ignacio Zaragoza, El Zapote, Cerro de Hueytepec y San Isidro el Hular.

Cabe mencionar, como se hizo anteriormente, que algunos sitios cercanos a la localidad de Hueytepec fueron afectados por procesos de ladera, sin embargo, de acuerdo al mapa resultante, esta zona se ubica dentro de un rango de estabilidad baja, de tal manera que no deja de ser importante que se realicen estudios, principalmente a escala local, para así poder determinar el grado de estabilidad con más precisión.

CAPÍTULO 5. SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES

5.1 INTRODUCCIÓN

Como se había mencionado anteriormente las inundaciones en la República Mexicana constituyen uno de los eventos naturales que cada año, debido a su ocurrencia, dejan como resultado pérdidas humanas, destrucción de viviendas y afectaciones en las actividades económicas en las localidades que se encuentran establecidas principalmente en las llanuras de inundación. Esto es debido, en gran parte al crecimiento acelerado y anárquico que ha presentado la población en los últimos años, razón por la cual se ve en la necesidad de habitar zonas que cada año están sujetas a las crecidas de los ríos, en el caso de esta tesis, las del río Tecolutla.

En México, Veracruz es el estado que ocupa uno de los primeros lugares en cuanto a la ocurrencia de inundaciones, ya que registra un índice de 3.5 inundaciones por año (Ortiz *et al.*, 1991). Dichas inundaciones tienen gran recurrencia en zonas influenciadas por los ríos Tuxpan, Papaloapan, Coatzacoalcos, Jamapa, Blanco, Cazonos y Tecolutla, los cuales son afectados por fenómenos atmosféricos tales como los ciclones, depresiones, tormentas tropicales, etc., por lo que es muy común que cada año se presenten inundaciones que afecten las poblaciones aledañas.

El río Tecolutla, por su parte, ha sufrido dos de los más grandes desbordamientos que han afectado a la Villa de Tecolutla; la primera ocurrió en el año de 1955 (año del cual no se tiene registro de gasto ya que la estación hidrométrica empezó a funcionar en el año de 1961) y la segunda en el año de 1999, esta última como resultado de las precipitaciones extraordinarias originadas por la depresión tropical número 11.

Por esta razón el presente capítulo tiene como objetivo el análisis de los registros hidrométricos para de esta forma obtener los gastos para diferentes periodos de recurrencia, y a partir de esta información llevar a cabo la delimitación de la llanura de inundación, por medio del programa WMS (Watershed Modeling System), para diferentes periodos de retorno.

La información obtenida podrá servir como una base para futuros estudios, por ejemplo el diseño de obras de protección, de aprovechamiento, planes de mitigación y evacuación, reordenamiento territorial, etc.

La cuenca del río Tecolutla abarca parte de los estados de Tlaxcala, Hidalgo, Puebla y Veracruz; presenta un área de drenaje, hasta la desembocadura en el Golfo de México de 7342 km² (CFE, 1977). Es una importante vía fluvial que debe su existencia a todos aquellos ríos provenientes de la Sierra Norte de Puebla, entre los cuales destacan Apulco, Zempoala, Xiucayucan, Necaxa, Zitlalcuahutla, Puxtla y Sontalaco; estos aportan una gran cantidad de agua al río principal y de esta forma contribuyen a la ocurrencia de crecidas extraordinarias. En el caso de este trabajo se analizará la parte baja del río la cual atraviesa la planicie costera del estado de Veracruz, a la altura de los municipios Gutiérrez Zamora y Tecolutla.

5.2 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES EN EL MUNICIPIO DE TECOLUTLA

Para la realización de este análisis se emplearon métodos estadísticos con la finalidad de calcular los diferentes periodos de retorno de las inundaciones. Esto se hizo con base en la información proporcionada por la Comisión federal de Electricidad y la Comisión Nacional del Agua. La información constó de datos hidrométricos, principalmente gastos máximos anuales, correspondientes a 36 años de registro (1962-1998); de la estación El Remolino, la cual se encontraba ubicada en las cercanías de la localidad de Gutiérrez Zamora, próxima a la desembocadura del río, y que fue arrastrada por la avenida ocurrida en el año de 1999, por lo que no se pudo contar con datos más recientes. Dicha información fue empleada para el cálculo del nivel máximo del agua en 18 secciones transversales que se crearon a lo largo del río Tecolutla.

De manera complementaría también se llevó a cabo un análisis de zonas susceptibles a inundaciones a partir de la delimitación de los diferentes rasgos morfológicos que forman parte del cauce del río Tecolutla.

De igual forma se empleó el programa WMS (Watershed Modeling System) para realizar la delimitación de la llanura de inundación correspondientes a diferentes periodos de retorno, con la finalidad de conocer las zonas más susceptibles a la ocurrencia de inundaciones y determinar así el grado de riesgo de la población de Tecolutla.

De esta forma uniendo el análisis estadístico de los datos hidrométricos al análisis del modelo digital de elevación por medio del programa WMS, se obtuvo el mapa en el cual se muestran las zonas que podrán ser cubiertas por una inundación de una magnitud determinada.

5.3 DETERMINACIÓN DE GASTOS MÁXIMOS

Uno de los principales objetivos para tratar de predecir la frecuencia en la cual se presenta una avenida extraordinaria de un río, es el poder reducir los efectos que este tipo de eventos puede acarrear. Por tal razón, es necesaria una buena planeación en el control de una inundación o para minimizar los daños que esta pueda ocasionar.

Una estimación de la frecuencia de una inundación puede ser hecha mediante el uso de conceptos estadísticos y probabilísticos basados en los registros históricos de una corriente. Esto permite, de alguna forma, predecir eventos que se presenten cada 10, 20, 50 y 100 años, incluso más. Así una inundación en 100 años es la descarga más alta de un río que puede esperarse que ocurra una vez cada 100 años. Este tipo de información es usado, principalmente para planeación urbana, para la creación de presas, y para la construcción de estructuras referentes a las vías de comunicación. Sin embargo, cabe mencionar que este concepto de periodo de retorno, no es más que un concepto puramente estadístico por lo que no hay que esperar 200 años para que ocurra una inundación extraordinaria, ya que es muy posible que en un lapso de tiempo mucho menor se presente una inundación de dichas características.

Los métodos que se emplean para la predicción de crecidas se dividen en un gran número de procedimientos. La mayoría de los métodos disponibles usan registros históricos de mediciones de la corriente en conjunción con algunos medios

estadísticos. Sin embargo cabe mencionar que los resultados obtenidos pueden presentar ciertos errores debido a que en las ecuaciones empleadas no se emplean parámetros complementarios en los cuales se involucre información referente a la dinámica de las cuencas, esta puede incluir vegetación, infiltración, permeabilidad del suelo, evaporación, precipitación, etc., por lo que es importante comparar los resultados obtenidos por medio de estos con otros procedimientos más complejos para así poder obtener resultados más precisos.

5.4 PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA

De acuerdo con Martínez (2000) la probabilidad se encarga de estudiar experimentos aleatorios. Se entiende por experimento la observación y registro de cierto fenómeno. Si un experimento aleatorio se repite un número n de veces, la frecuencia m con la que se presenta un resultado, llamado evento, define la relación $f=m/n$, llamada frecuencia relativa, que tiende a estabilizarse cuanto más grande sea n , o sea que se aproxima a un límite, el cual es designado probabilidad. Esta teoría se fundamenta intuitivamente en la estabilidad mencionada. Dentro de esta teoría se puede definir un modelo matemático del fenómeno anterior, asignando probabilidades a los eventos asociados con un experimento. La validez del modelo matemático planteado para un experimento dado depende del acercamiento de las probabilidades asignadas con las frecuencias relativas reales. Esto da origen a los problemas de verificación y confiabilidad que constituyen el tema principal de la estadística.

La estadística es, como la probabilidad, una rama de las matemáticas, fija los métodos científicos utilizados en la toma, organización, recopilación, presentación y análisis de datos, con el objeto de deducir conclusiones y tomar decisiones razonables, respecto a los datos, a partir de los análisis efectuados.

La probabilidad de excedencia es la posibilidad de que un evento sea igualado o excedido en cualquier año. Se puede calcular notando que es igual a la razón de un año cualquiera entre el número de años en promedio que tarda en presentarse un evento igual o mayor.

La principal limitación de los métodos estadísticos es que generalmente sólo se cuenta con una muestra relativamente pequeña (del orden de 15 a 25 años, generalmente) de valores tomados de la población de todos los que podrían ocurrir en el sitio de estudio, con lo cual la ley de probabilidades que se obtiene es de un grado alto de incertidumbre y resulta ser sólo una aproximación a la ley de probabilidades real. Esto se agrava porque en la mayoría de las zonas del país las tormentas máximas pueden ser del tipo convectivo o ciclónico y, por ello, la muestra corresponde a dos poblaciones diferentes, siendo, entonces, difícil la aplicación de los métodos estadísticos (Domínguez *et al.*, 1990).

5.5 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

El propósito del procesamiento de la información hidrométrica consiste en obtener los eventos máximos de diversos periodos de retorno. Los periodos de retorno se determinan de manera que tomen en cuenta las necesidades de las diferentes obras hidráulicas o incluso de prevención (C.F.E., 1982). EL periodo de retorno es el número promedio de años en que un evento es igualado o superado; se denota como T_r . Es el más común de los métodos usados para indicar la probabilidad de un evento y se define de la siguiente manera:

Un evento máximo extraordinario tiene un periodo e retorno de T años si su magnitud es igualada o excedida por lo menos una vez cada T años. El recíproco de T es la probabilidad de excedencia de un evento, que es la probabilidad de que un evento sea igualado o superado en cualquier año (C.F.E., 1982).

De esta forma una inundación de 50 años tiene una probabilidad de 2% de ser igualada o superada en cualquier año. Esto no quiere decir que tenga que ocurrir cada 50 años.

El estudio de los escurrimientos máximos de las corrientes fluviales constituye uno de los problemas más complejos en materia hidrológica. La predeterminación para un punto dado en una corriente fluvial de un gasto considerable es algo realmente complejo y en no pocas ocasiones, los errores en cálculos son grandes. Esto se debe

principalmente a que aún hay fenómenos relacionados con la dinámica entre el relieve y la precipitación que aún no son posibles de cuantificar por lo que la gran mayoría de los métodos usados para el cálculo de gastos máximos se basan en modelos empíricos (Martínez, 2000).

Esta predeterminación de los gastos extraordinarios tiene gran importancia debido a los efectos destructivos que causan cuando no se han tomado medidas preventivas. De esta forma los cálculos realizados para conocer el periodo de retorno de un gasto determinado permiten la planeación de obras además de poder conocer áreas susceptibles a grandes inundaciones, y de esta forma poder crear planes de prevención y de mitigación.

Los gastos máximos, considerados como valores extremos del escurrimiento, tienen lugar durante las crecidas y representan su valor más alto.

De acuerdo con Lucheva (1976), para llevar a cabo la determinación de las características cuantitativas de los gastos máximos, se requiere un número de valores no inferior a los 25 años, ya que esto permitirá una mayor precisión en la determinación de la probabilidad para diferentes gastos máximos.

El análisis de gastos máximos permite estimar la probabilidad de que un determinado valor del gasto sea alcanzado o sobrepasado al menos una vez.

Debido a que la cantidad y calidad de la información disponible varían enormemente de un lugar a otro y a que no siempre se requiere la misma precisión en los resultados, se han desarrollado una gran cantidad de métodos para la estimación de avenidas.

Desde luego, la complejidad de los métodos aumenta a medida que se toma en cuenta un mayor número de factores. Los métodos se clasifican en empíricos, probabilísticos y aquellos basados en la relación lluvia-escurrimiento (Martínez, 2000). Para el caso de este estudio se empleó un método probabilístico desarrollado por

Domínguez *et al.* (1990), el cual se basa en el análisis de los gastos máximos anuales a partir de la función de distribución de Gumbel o de valores extremos tipo I.

Esta función es de uso frecuente debido a que, bajo ciertas hipótesis, la función de distribución correspondiente fue derivada teóricamente. Es la función de valores extremos que utilizan tradicionalmente los hidrólogos para el estudio de los gastos máximos anuales en un río, y por lo tanto para la determinación de avenidas de diseño.

De acuerdo con C.F.E. (1982) las principales hipótesis en las que se basó la derivación de la función de distribución de Gumbel, y sus implicaciones al utilizarse en la determinación de los gastos máximos anuales se comprende mejor si se considera el siguiente experimento:

Sean x_i los valores de una variable aleatoria continua con función de densidad de probabilidad no acotada y cuya rama descendente tiene forma exponencial.

Tómense aleatoriamente muestras de N elementos y escójase el valor máximo de cada muestra. El valor máximo se designará como y_i .

Si el tamaño de las muestras es suficientemente grande, esto es, si N tiende a infinito, la nueva variable aleatoria y_i tendrá una función de distribución del tipo Gumbel.

La función de distribución de Gumbel se presenta de la siguiente forma:

$$F(x)=\exp\{-\exp(-x+(a/c))\} \quad (1)$$

Donde a y c son los parámetros de la función.

Tomando el logaritmo natural en dos ocasiones a la expresión anterior, se obtiene

$$\text{LnLn}(1/F(x))=-(x+(a/c)) \quad (2)$$

Si se despeja $1/F(x)$ de la ecuación anterior se obtiene

$$z=x+(a/c) \quad (3)$$

Donde $z=-\ln \ln Tr/(Tr-1)$

El procedimiento para el análisis preliminar de una muestra de gastos máximos anuales, consiste en ordenar los datos de mayor a menor, asignándoles un número de orden, m , creciente, de tal forma que al valor más alto le corresponderá $m=1$ y al más bajo $m=n$. Enseguida se le asigna a cada valor del gasto un valor de los periodos de retorno, estimado con la ecuación

$$Tr=(N+1)/m \quad (4)$$

La base teórica en la que se fundamenta esta ecuación es la siguiente:

-De los registros históricos de escurrimientos, se selecciona el valor que corresponde al gasto máximo de cada año. Estos se muestran en la cuadro 5.1.

| Año | Gasto (m ³ /seg) | Año | Gasto (m ³ /seg) | Año | Gasto (m ³ /seg) |
|------|-----------------------------|------|-----------------------------|------|-----------------------------|
| 1962 | 1072.00 | 1974 | 7491.00 | 1986 | 7755.00 |
| 1963 | 2067.00 | 1975 | 3049.00 | 1987 | 2384.00 |
| 1964 | 2383.00 | 1976 | 3188.00 | 1988 | 5782.00 |
| 1965 | 2271.00 | 1977 | 2892.00 | 1989 | 4481.00 |
| 1966 | 3701.00 | 1978 | 2622.00 | 1990 | 2130.00 |
| 1967 | 2882.00 | 1979 | 3621.00 | 1992 | 3740.00 |
| 1968 | 1452.00 | 1980 | 3467.00 | 1993 | 1657.00 |
| 1969 | 3952.00 | 1981 | 8321.00 | 1994 | 1389.00 |
| 1970 | 1295.00 | 1982 | 2360.00 | 1995 | 3247.00 |
| 1971 | 4258.00 | 1983 | 1444.00 | 1996 | 1546.00 |
| 1972 | 2188.00 | 1984 | 3024.00 | 1997 | 1993.00 |
| 1973 | 4415.00 | 1985 | 2847.00 | 1998 | 3049.00 |

Cuadro 5.1. Registros históricos de los gastos máximos registrados en el río Tecolutla durante el periodo 1962-1998, exceptuando el año 1991. Estación El Remolino.

Cortesía: C.F.E.

-Los valores antes seleccionados se ordenan de mayor a menor y se les asigna un número de orden (i), de tal forma que $i=1$ para el mayor (8321 m³/seg en el año de

1981), $i=2$ para el que le sigue, y así sucesivamente hasta que $i=N$ (N , es el número de años de registro, para el caso de este trabajo es 36) para el menor. Los valores ordenados se designan como Y_i (Cuadro 5.2).

| Orden (i) | Año | Gasto (m^3/seg) | Tr(Y_i) | Probabilidad | Probabilidad % |
|-----------|------|---------------------|-------------|--------------|----------------|
| 1 | 1981 | 8321.00 | 37 | 0.027027027 | 2.702702703 |
| 2 | 1986 | 7755.00 | 18.5 | 0.054054054 | 5.405405405 |
| 3 | 1974 | 7491.00 | 12.33333333 | 0.081081081 | 8.108108108 |
| 4 | 1988 | 5782.00 | 9.25 | 0.108108108 | 10.81081081 |
| 5 | 1989 | 4481.00 | 7.4 | 0.135135135 | 13.51351351 |
| 6 | 1973 | 4415.00 | 6.16666667 | 0.162162162 | 16.21621622 |
| 7 | 1971 | 4258.00 | 5.28571429 | 0.189189189 | 18.91891892 |
| 8 | 1969 | 3952.00 | 4.625 | 0.216216216 | 21.62162162 |
| 9 | 1992 | 3740.00 | 4.11111111 | 0.243243243 | 24.32432432 |
| 10 | 1966 | 3701.00 | 3.7 | 0.27027027 | 27.02702703 |
| 11 | 1979 | 3621.00 | 3.36363636 | 0.297297297 | 29.72972973 |
| 12 | 1980 | 3467.00 | 3.08333333 | 0.324324324 | 32.43243243 |
| 13 | 1995 | 3247.00 | 2.84615385 | 0.351351351 | 35.13513514 |
| 14 | 1976 | 3188.00 | 2.64285714 | 0.378378378 | 37.83783784 |
| 15 | 1975 | 3049.00 | 2.46666667 | 0.405405405 | 40.54054054 |
| 16 | 1998 | 3049.00 | 2.3125 | 0.432432432 | 43.24324324 |
| 17 | 1984 | 3024.00 | 2.17647059 | 0.459459459 | 45.94594595 |
| 18 | 1977 | 2892.00 | 2.05555556 | 0.486486486 | 48.64864865 |
| 19 | 1967 | 2882.00 | 1.94736842 | 0.513513514 | 51.35135135 |
| 20 | 1985 | 2847.00 | 1.85 | 0.540540541 | 54.05405405 |
| 21 | 1978 | 2622.00 | 1.76190476 | 0.567567568 | 56.75675676 |
| 22 | 1987 | 2384.00 | 1.68181818 | 0.594594595 | 59.45945946 |
| 23 | 1964 | 2383.00 | 1.60869565 | 0.621621622 | 62.16216216 |
| 24 | 1982 | 2360.00 | 1.54166667 | 0.648648649 | 64.86486486 |
| 25 | 1965 | 2271.00 | 1.48 | 0.675675676 | 67.56756757 |
| 26 | 1972 | 2188.00 | 1.42307692 | 0.702702703 | 70.27027027 |
| 27 | 1990 | 2130.00 | 1.37037037 | 0.729729729 | 72.97297297 |
| 28 | 1963 | 2067.00 | 1.32142857 | 0.756756757 | 75.67567568 |
| 29 | 1997 | 1993.00 | 1.27586207 | 0.783783784 | 78.37837838 |
| 30 | 1993 | 1657.00 | 1.23333333 | 0.810810811 | 81.08108108 |
| 31 | 1996 | 1546.00 | 1.19354839 | 0.837837838 | 83.78378378 |
| 32 | 1968 | 1452.00 | 1.15625 | 0.864864865 | 86.48648649 |
| 33 | 1983 | 1444.00 | 1.12121212 | 0.891891892 | 89.18918919 |
| 34 | 1994 | 1389.00 | 1.08823529 | 0.918918919 | 91.89189189 |
| 35 | 1970 | 1295.00 | 1.05714286 | 0.945945946 | 94.59459459 |
| 36 | 1962 | 1072.00 | 1.02777778 | 0.972972973 | 97.2972973 |

Cuadro 5.2. Ordenamiento de los registros máximos, su periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

Se estiman los periodos de retorno asociado a cada valor, utilizando la fórmula

$$\text{Tr}(Y_i) = N + 1/i$$

Se estima la probabilidad de que en un año cualquiera el gasto máximo sea menor que cada valor Y_i , mediante la ecuación

$$F(Y_i) = 1/\text{Tr}(Y_i) \quad (5)$$

Sin embargo, en nuestro país debido a que las cuencas son susceptibles a la dinámica de ciclones y otras perturbaciones atmosféricas, la estadística de gastos máximos anuales muestra la presencia de dos poblaciones, una con valores relativamente pequeños, que corresponde a años en los que ningún fenómeno atmosférico incidió directamente, y otra, con valores mayores que corresponde al caso contrario.

En estas cuencas, la presencia de las dos poblaciones hace que la extrapolación sea poco confiable, de tal forma que la población de gastos mayores contiene muy pocos valores. Por esta razón Domínguez *et al.* (1990) propuso una nueva ecuación derivada del uso de la función de distribución doble de Gumbel, dada por la expresión

$$F(q) = p\{\exp[-\exp(-x + (a_1/c_1))]\} + (1-p)\{\exp[-\exp(-x + (a_2/c_2))]\} \quad (6)$$

Esto debido a la frecuencia con que en las cuencas mexicanas se presenta el fenómeno de las dos poblaciones.

De esta forma a_1 y c_1 son los parámetros de la primera ecuación; a_2 y c_2 son los de la segunda y p la proporción de valores que pertenecen a la primera población respecto al total de valores.

De acuerdo con el análisis realizado en relación con la aplicabilidad del método, puede decirse que éste representa ventajas claras cuando se requiere hacer extrapolaciones para periodos de retorno sensiblemente mayores que el número de

años de registro, en cambio sucede lo contrario cuando se quiere conocer el gasto para periodos menores. En todos los casos es necesario verificar previamente que la cuenca esté realmente expuesta a la incidencia directa de fenómenos atmosféricos y que no esté protegida por barreras montañosas que impidan dicha incidencia.

De acuerdo con los estudios realizados por Domínguez y colaboradores (1990) los parámetros para cualquier cuenca ubicada en el Golfo de México y en la cual incidan las perturbaciones atmosféricas, son los siguientes:

- $p=0.93$
- $a_1=-0.4$
- $a_2=-7.5$
- $c_1=0.6$
- $c_2=1.9$

Una vez obtenidos los parámetros y la función de distribución de la variable q , se realizan los cálculos para poder obtener los gastos máximos para el río Tecolutla, esto a partir de la ecuación:

$$F_1(Q) = (A_i+259)^{0.8} * F(q) \quad (7)$$

Donde A_i es el área de la cuenca en km^2 , en este caso se toma el valor de toda la cuenca del río Tecolutla, ya que la estación hidrométrica registra el escurrimiento proveniente de todos los afluentes ubicados dentro de la misma; Q representa a los gastos máximos anuales y $F(q)$ es la función de distribución de la variable reducida, q , dada por la ecuación 6.

Este cálculo puede ampliarse o mejorarse, añadiendo al estudio otros factores tales como pendiente, longitud del cauce principal, tipo de suelo, etc.; los cuales influyen en la transformación de lluvias en escurrimientos.

Una vez realizados los cálculos necesarios para conocer los gastos máximos esperados para un periodo de retorno determinado, se obtuvieron los siguientes resultados (Cuadro 5.3):

| Periodo de retorno (años) | Gasto máximo esperado (m ³ /seg) |
|---------------------------|---|
| 2 | 873 |
| 5 | 1947 |
| 10 | 3117 |
| 20 | 8997 |
| 25 | 9939 |
| 50 | 12166 |
| 75 | 13298 |
| 100 | 14062 |
| 200 | 15831 |
| 250 | 16391 |
| 500 | 18096 |
| 1000 | 19738 |

Cuadro 5.3. Periodo de retorno y su gasto máximo esperado

De estos datos, el valor del gasto máximo calculado para periodos de retorno menores a la muestra (36) puede presentar cierta variación con la realidad por lo que para un análisis más detallado es necesario realizar métodos más complejos.

De los resultados obtenidos se escogieron los periodos de retorno de 2, 10, 50, 100 y 1000 años para llevar a cabo la delimitación de las zonas susceptibles a inundaciones con los periodos de retorno seleccionados.

5.6 DELIMITACIÓN DE ZONAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIÓN

En el presente trabajo se realizaron dos análisis para la obtención de zonas susceptibles a inundaciones, el primero consistió en la interpolación de la información referente al nivel máximo del agua en 18 secciones transversales; dicha información fue obtenida a partir del cálculo de la geometría del cauce, esto último con ayuda del programa WMS (Watershed Modeling System). El segundo método se efectuó a través del análisis de la relación que existe entre la morfología y las áreas sujetas a inundación, es decir, se llevó a cabo una delimitación a partir de las formas del relieve que se encuentran dentro del cauce del río Tecolutla.

Para el primer método fue necesario la utilización de un modelo digital de elevación, el cual sirvió de base para la delimitación de una subcuenca, de la cual se obtuvieron sus atributos geométricos y los mapas de dirección de flujo, red hidrográfica y acumulación del flujo; toda esta información posteriormente fue utilizada para definir las zonas susceptibles a inundaciones con periodos de retorno de 2, 10, 50, 100 y 1000 años.

A continuación se explica la función e importancia que presentan los MDE en el estudio de los aspectos hidrológicos, en especial de las inundaciones, y posteriormente se expondrá el concepto de la curva de elevaciones gastos empleada en la realización del mapa de susceptibilidad.

5.7 USO DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN EN ASPECTOS HIDROLÓGICOS

El uso de los modelos digitales de elevación forma parte de uno de los métodos que pueden ser empleados en el programa WMS para definir cuencas y analizar información hidrológica. Como se había mencionado antes, un modelo digital de elevación es la representación de forma digital de los diferentes atributos topográficos del terreno, en el caso del programa éste los define como un conjunto bidimensional de puntos de elevación con un espaciamiento constante x , y . Varios autores, por ejemplo Puecker y Douglas (1975) y Garbrecht y Martz (1995) han desarrollado métodos para extraer la geomorfología de una cuenca a partir de los modelos digitales de elevación.

La topografía juega un papel importante en la distribución y flujo de agua y energía dentro del paisaje natural. Algunos de los ejemplos clásicos son el escurrimiento superficial, la evaporación y la infiltración los cuales son procesos hidrológicos que toman lugar en la interrelación atmósfera-relieve. La evaluación cuantitativa de estos procesos depende, por una parte, de la configuración topográfica del terreno, la cual es una de varias condiciones que controlan a dichos procesos. De esta forma, los atributos topográficos son un importante

requisito para emplear modelos, no sólo hidrológicos, sino también hidráulicos, ecológicos y todos aquellos que de alguna forma se relacionen con los atributos del terreno.

Así la topografía del terreno puede ser digitalizada dentro de un conjunto de valores de elevación llamado modelos digitales de elevación (MDE). Estos modelos pueden ser visualizados a través de los Sistemas de Información Geográfica y evaluados con algoritmos numéricos especializados. De este modo los modelos se convierten en una alternativa más para el estudio de las condiciones que presenta el relieve terrestre, ya que permiten la obtención de aspectos tales como la pendiente, longitud de flujo, área de contribución, drenaje, acumulación de los flujos, orientación de las laderas, entre otros, de forma mucho más rápida; claro, esto depende en gran medida de la resolución con la cual se manipule el modelo, ya que a mayor resolución mejores serán los resultados y viceversa.

De esta forma el uso de los modelos digitales se ha expandido a otras ramas de las ciencias de la tierra gracias a los grandes avances que se han dado en el campo de los SIG, los cuales han permitido el estudio de diversos fenómenos ya que permiten el uso de MDE para la obtención de información de una forma mucho más rápida y muy aproximada a lo real, además de que permiten su representación cartográfica.

Para el caso de este estudio se requirió de dos tipos de estructuras de los modelos digitales, las estructuras de celda (grid) y las redes de triangulación irregulares (RTI). El primero consiste de una malla cuadrada en la cual aparece el valor de elevación de cada celda o píxel, los cuales presentan coordenadas x-y. Este grid fue el mismo que se realizó para la obtención del índice de susceptibilidad a procesos de ladera, sólo que este caso se realizó un recorte (el cual se manipulo a una resolución de 50 metros) para trabajar lo que es el río Tecolutla, ya que es el río más importante de la zona de estudio y además porque

sólo de este río se pudieron obtener los datos necesarios para el análisis de susceptibilidad. En el caso de la estructura de RTI, se genera una superficie continua a partir de triángulos interconectados, los cuales presentan un valor de elevación en los vértices de los triángulos. De esta manera cada triángulo tiene una ubicación x - y y una elevación z . Esta estructura se obtuvo a partir del grid usando el programa WMS.

5.8 DELIMITACIÓN DE ZONAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIONES CON EL PROGRAMA WATERSHED MODELING SYSTEM (WMS)

El programa WMS (Watershed Modeling System) es un sistema que permite realizar análisis hidrológicos. Fue desarrollado por personal del Laboratorio de Investigación de Modelado Ambiental de la Universidad Brigham Young, en cooperación con la Estación de Experimentación de los Ingenieros en corrientes fluviales de los cuerpos de la armada de los Estados Unidos (WMS manual).

El programa WMS está basado en el modelado hidrológico y ha sido diseñado para aprovechar la información sobre cuencas desarrollada en los SIG. Permite definir cuencas y se pueden obtener los atributos del terreno a partir de MDE y RTI. De esta forma podemos conocer la dirección de flujo y los valores de acumulación de flujo.

El WMS se ha desarrollado hasta el punto de que existe una gran cantidad de herramientas y modelos diferentes que permiten realizar una infinidad de aspectos, desde conocer atributos geométricos de una cuenca hasta crear hidrogramas complejos, por sólo mencionar un par de acciones. Este sistema trabaja con una serie de modelos hidrológicos, además de que es posible trabajar con información digital del terreno. De esta forma WMS usa tres fuentes básicas de información para el desarrollo de los modelos:

- Datos de Sistemas de Información Geográfica (SIG), como polígonos, líneas y puntos
- Modelos Digitales de Elevación (MDE con estructura de grid)
- Redes de triangulación Irregulares (RTI)

A partir de la información obtenida de las fuentes anteriores WMS permite delinear cuencas, corrientes y subcuencas. Una vez hecho esto, el programa, permite calcular los atributos geométricos de los elementos que se encuentran dentro de la cuenca, de esta forma podemos obtener área, pendiente, longitud de las corrientes, etc. De manera similar, es factible delimitar llanuras de inundación a partir de información relacionada con la altura que alcanza el río con determinado escurrimiento.

Para iniciar el análisis de la susceptibilidad a inundaciones, fue necesario, primero, definir la zona en la cual se llevaría a cabo dicho estudio, en el caso particular de este trabajo se optó por trabajar el área en la cual se localiza el río Tecolutla, debido principalmente a que es la corriente más importante en la zona. Posteriormente, se digitalizaron las curvas de nivel del área que comprende el río, para de esta forma poder delimitar una pequeña cuenca o subcuenca. Una vez hecho esto, se llevó a cabo la interpolación entre curvas para obtener el modelo digital de elevación, base para iniciar el análisis en el programa WMS.

El primer paso del programa es la obtención de la dirección y acumulación de los flujos. Esto se lleva a cabo con la rutina TOPAZ (The Topographic Parameterization), incluido en el programa WMS. TOPAZ es una rutina que permite efectuar un análisis digital automatizado del terreno. Este programa utiliza los modelos de elevación para identificar y cuantificar los diferentes atributos topográficos del terreno, ya que define, por ejemplo, el drenaje superficial, subdivide cuencas a partir de las divisorias, cuantifica la red de drenaje y delimita subcuencas (DeBarry *et al.*, 1999). De igual manera está diseñado para auxiliar en la evaluación topográfica y en la delimitación de cuencas para poder llevar cabo el análisis y la simulación de los aspectos hidrológicos, que para el caso de este estudio son las inundaciones.

El procesamiento de los modelos de elevación está basado en los métodos D8, ruta del flujo ladera abajo (*downslope flow routing*) y área de origen crítico (*critical source area*). El método D8 define las propiedades de cada celda y las de las 8 celdas adyacentes a esta (Figura 5.1). El siguiente método, ruta del flujo ladera abajo, define el drenaje y la dirección que tendrán los flujos dentro de la superficie del terreno. Por último el método de área de origen crítico define los canales de drenaje del terreno (DeBarry *et al.*, 1999).

De esta forma las operaciones que lleva a cabo el programa son: procesamiento de la información de elevación, segmentación hidrográfica (definición del drenaje superficial y de las subcuencas) y delimitación topográfica (cuantificación de las propiedades de la o las cuencas y de la red hidrográfica).

El segundo paso es definir el punto en el cual se concentra la salida del agua de la cuenca o zona de descarga, que en este caso está representado por la desembocadura del río a un lado de la cabecera municipal. Posteriormente se lleva a cabo la delimitación de la subcuenca y el cálculo de sus atributos geométricos.

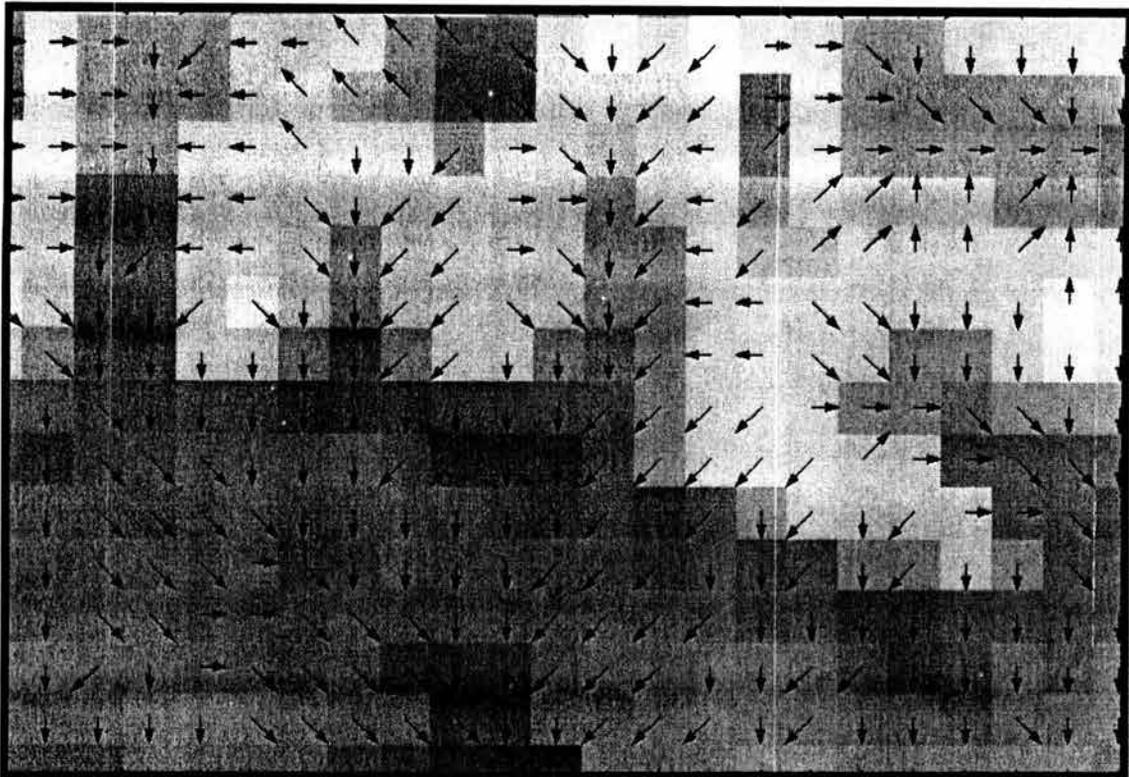


Figura 5.1. Obtención de la dirección de flujo a partir del método D8.

Para delimitar las zonas susceptibles a inundación se aplicó la metodología antes mencionada, que consistió en el cálculo de los niveles máximos del agua para cada sección del río, para posteriormente llevar a cabo la interpolación de valores, y así poder conocer las zonas susceptibles a inundaciones.

Este análisis consistió en la creación de 18 perfiles a lo largo del río Tecolutla con la finalidad de determinar el nivel máximo de altura que presentaría una lámina de agua con respecto a un gasto determinado (Figura 5.2). Este procedimiento se realizó por medio del cálculo de canales, el cual permite establecer la geometría del canal, la velocidad del flujo y además conocer la altura del río con un determinado gasto y viceversa (Figura 5.3). Todos los cálculos se realizan por medio de la Ecuación de Manning, la cual permite conocer el gasto de un río a través de parámetros tales como el índice de rugosidad, el área de la sección, el radio hidráulico y la pendiente o gradiente.

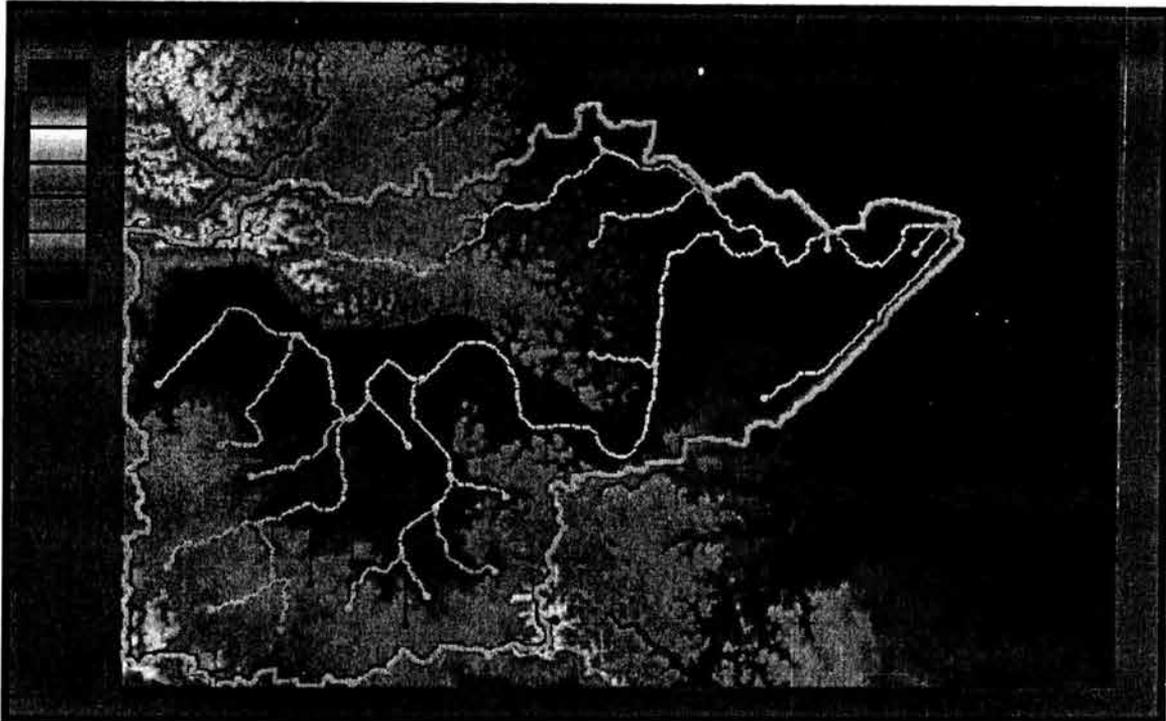


Figura 5.2. Secciones transversales empleadas para el cálculo de los canales en el cauce del río Tecolutla.

Channel Calculations

Channel type: **Cross Section** | Cross section: **perfil3**

Enter flow: **19738.00** | Enter depth: **0.00**

Z scale: **25:1**

| Metric | Units |
|-----------|---------------------|
| 0.00 | Side slope 1 (Z1) |
| 0.00 | Side slope 2 (Z2) |
| 0.00 | Channel width (B) |
| 1.0000e-0 | Longitudinal slope |
| 0.0000 | Manning's roughness |
| 0.00 | Pipe diameter (D) |

Calculated Values

- Flow: 19738.000 cms
- Depth: 10.780 m
- Area of Flow: 16201.152 sq m
- Wetted Perimeter: 3047.895 m
- Average Velocity: 1.218 m/s
- Top Width (T): 3047.803 m
- Froude Number: 0.169
- Critical Depth: 5.418 m
- Critical Velocity: 4.994 m/s
- Critical Slope: 0.00449

Buttons: **Copy Data To Clipboard** | **Calculate** | **Copy Picture To Clipboard**

Figura 5.3. Cuadro de diálogo donde se llevó a cabo el cálculo de canales de los perfiles transversales.

La Ecuación de Manning se presenta de la siguiente forma:

$$Q=(1.49/n)AR^{2/3}S^{1/2}$$

Donde:

Q= flujo en m³/seg

n= índice de rugosidad

A= área de la sección

R= radio hidráulico

S= pendiente

1.49= valor constante

El procedimiento que se llevó a cabo para la delimitación de áreas susceptibles a inundación fue el siguiente:

- Creación de secciones transversales, de forma arbitraria, sobre la llanura del río Tecolutla. En cada sección el programa establece un índice de rugosidad.
- Cálculo de los parámetros de cada sección (área de la sección, radio hidráulico, pendiente, velocidad, número de Froude).
- Obtención de la altura o tirante del río a partir del gasto estimado para cada periodo de retorno.

De esta forma se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las secciones del río (Cuadro 5.4):

| Sección | avenida de T=2 años. (m) | avenida de T=10 años. (m) | avenida de T=50 años. (m) | avenida de T=100 años. (m) | avenida de T=1000 años. (m) |
|----------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 3.198 | 5.154 | 8.589 | 9.068 | 10.190 |
| 2 | 1.766 | 2.845 | 4.729 | 5.366 | 6.325 |
| 3 | 1.953 | 3.148 | 5.246 | 5.539 | 6.292 |
| 4 | 1.599 | 2.587 | 4.360 | 4.592 | 5.154 |
| 5 | 1.599 | 2.585 | 4.260 | 4.490 | 5.083 |
| 6 | 1.499 | 2.465 | 3.991 | 4.179 | 4.636 |
| 7 | 1.469 | 2.349 | 3.506 | 3.663 | 4.084 |
| 8 | 1.111 | 1.920 | 3.418 | 3.634 | 4.191 |
| 9 | 1.490 | 2.550 | 4.478 | 4.756 | 5.473 |
| 10 | 2.092 | 3.407 | 5.594 | 5.877 | 6.641 |
| 11 | 2.167 | 3.492 | 5.699 | 6.033 | 6.930 |
| 12 | 1.929 | 3.109 | 5.098 | 5.387 | 6.155 |
| 13 | 1.419 | 2.620 | 5.209 | 5.619 | 6.715 |
| 14 | 2.557 | 4.120 | 7.097 | 7.482 | 8.502 |
| 15 | 2.499 | 4.028 | 6.602 | 7.004 | 8.080 |
| 16 | 1.654 | 2.521 | 4.142 | 4.355 | 4.927 |
| 17 | 1.890 | 3.250 | 5.783 | 6.161 | 7.157 |
| 18 | 1.124 | 1.925 | 3.658 | 3.919 | 4.611 |
| Promedio | 1.834 | 3.004 | 5.081 | 5.379 | 6.174 |

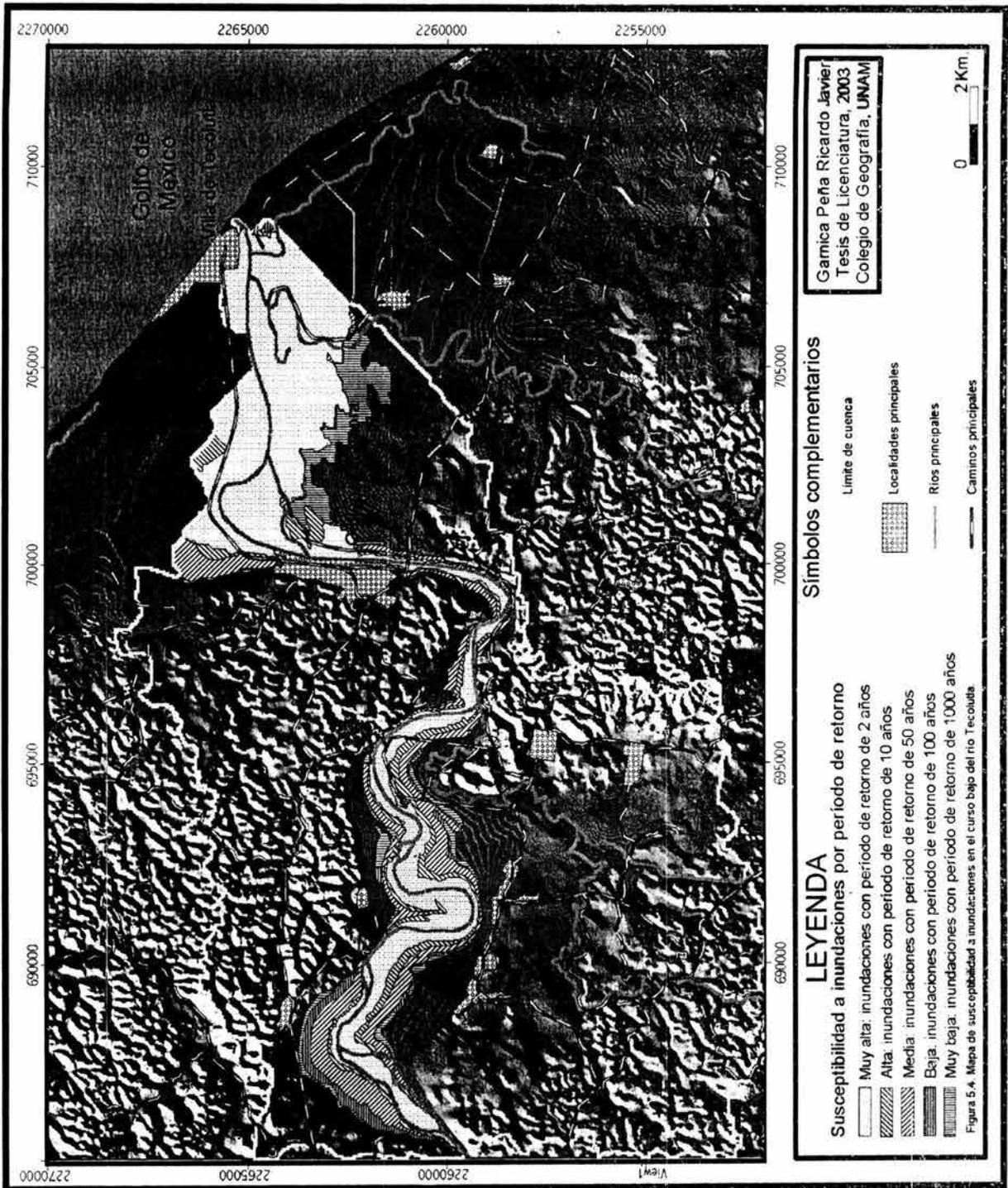
Cuadro 5.4. Niveles máximos de agua calculados para cada una de las secciones creadas dentro del río Tecolutla.

Una vez obtenidos los niveles máximos del agua, se llevó a cabo la interpolación de esta información para conocer las zonas susceptibles a crecidas con los periodos de retorno antes establecidos. Para lo anterior fue necesario transformar el modelo digital de elevación en una red irregular triangular (RTI). Realizada la transformación, se introdujeron los datos de elevación (obtenidos del análisis de perfiles) para cada periodo de retorno, en este caso de 2, 10, 50, 100 y 1000 años. Posteriormente con base en las características topográficas se delimitaron las llanuras de inundación para cada periodo de retorno, esto a partir de la interpolación de los valores de elevación del río.

A continuación se hizo la sobreposición de la delimitación de las distintas llanuras de inundación correspondientes a los periodos de retorno establecidos, para así elaborar el mapa de susceptibilidad a inundaciones. De esta forma se incluyeron 5 categorías de susceptibilidad, en donde la susceptibilidad más alta corresponde al periodo de retorno de 2 años, en tanto que de manera contrastante a la recurrencia de 1000 años, se le asignó el valor más bajo de susceptibilidad (Figura 5.4).

Muy alta. Comprende a todas aquellas crecidas que presentan un periodo de retorno de 2 años, además de un gasto máximo esperado de $873 \text{ m}^3/\text{seg}$. Esta zona corresponde a la llanura adyacente al río. De este modo la carretera y las poblaciones ubicadas en las inmediaciones del río se encuentran dentro de una zona de muy alto peligro. Las localidades que se encuentran dentro de este rango son la Villa de Tecolutla, Santa Teresa, Finca el Establo, San Antonio, Paso del Río, Finca del 44, Las Palmas, el Club de Pesca, El Triunfo, Santa Higinia, Palo Hueco, El Cristo y la Gloria; y fuera del municipio, dentro de Gutiérrez Zamora, se encuentran Macarena Arrazola, San Antonio Coronado y la parte más oriental de la cabecera municipal, Gutiérrez Zamora. La probabilidad de que suceda un evento de este tipo en un año es del 50% con una precipitación máxima en 24 horas de 120 mm. Se le debe considerar zona prohibitiva y debe ser reservada para el paso de los escurrimientos de las avenidas, además de que no deben establecerse emplazamientos de desarrollo, exceptuando todos aquellos que son esenciales para el paso libre del agua. Los daños que puede causar este tipo de evento son menores sin embargo se deben tomar algunas medidas precautorias.

Alta. Representada por las avenidas con un periodo de retorno de 10 años, con un porcentaje de probabilidad de que ocurra de 10 y la precipitación máxima de aproximadamente 216 mm. Dentro de este nivel se encuentran las localidades mencionadas en el inciso anterior además de la porción oriental de la cabecera municipal de Gutiérrez Zamora. El nivel de daños, en caso de que ocurriera un evento de esta magnitud, son de consideración aunque podrían ser controlados con obras de protección tanto en el cauce como en los inmuebles.



Media. Las zonas que se localizan dentro de este rango se verán afectadas en caso de que ocurra una crecida con periodo de retorno de 50 años con un gasto máximo esperado de 12166 m³/seg. De igual forma la precipitación necesaria es de 300 mm en 24 horas. Dentro de este rango se encuentran las localidades mencionadas anteriormente. En caso de ocurrir una inundación con las características antes mencionadas los daños serían mayores sin embargo estos pueden minimizarse si se establecen medidas de protección tanto en el río como en los inmuebles, aunque los efectos sobre la población podrían ser mayores.

Baja. Zonas que presentan un 1% de probabilidad de que se vean afectadas por una inundación. Se requiere una precipitación máxima de 336 mm y un gasto máximo de 14062 m³/seg. Su ocurrencia afectaría a las localidades ya mencionadas en los niveles anteriores y los estragos causados por la misma serían de consecuencias graves por lo que es necesario establecer medidas preventivas para evitar daños.

Muy baja. Comprende todas aquellas zonas ubicadas dentro de los niveles anteriores y que se verían afectadas por una avenida que tiene un 0.1 % de probabilidad de que ocurra en un año, por lo que la posibilidad de que sea afectada es poco probable. En este caso debe esperarse que suceda un fenómeno atmosférico que produzca lluvias extraordinarias que alcancen los 454 mm en tan sólo 24 horas y que esto genere un gasto superior a los 19000 m³/seg. En el caso de que se presentase un evento de tal magnitud las consecuencias serían catastróficas, ya que sitios como la Villa de Tecolutla y la zona oriente de Gutiérrez Zamora, ambas cabeceras municipales, serían arrasadas por la creciente, trayendo graves consecuencias, por lo que es necesario que se tomen medidas precautorias para tratar de minimizar los efectos de una inundación con estas características.

5.9 ANÁLISIS DE LAS FORMAS FLUVIALES

El análisis de las formas fluviales tuvo como base la elaboración de perfiles topográficos a través del cauce del río Tecolutla, de tal manera que se identificaron cuatro tipos de lechos fluviales, a partir de la clasificación expuesta por Strahler (1974)

en Romo y Ortiz (2001), y cuyas características se mencionan a continuación y en la figura 5.5:

Lecho menor. Es el cauce por el que corre el agua de un río en épocas de estiaje, incluyendo el canal. Sus márgenes están bien definidas, por lo que está delimitado claramente. Presenta una alternancia de zonas hundidas y de fondos altos (umbrales), que pueden llegar a formar islas fluviales.

Lecho mayor ordinario. Es el cauce del río que es cubierto por el agua en época de máximo caudal anual, es una zona que se inunda todos los años. Este lecho ofrece un perfil transversal alomado, debido a los resaltes de ribera que dominan el lecho menor, hasta el punto de que pueden aparecer contrapendientes que aislan pequeñas depresiones longitudinales. De acuerdo con Romo y Ortiz (2001), tanto el lecho menor como el mayor ordinario corresponden a fases de estabilidad del cauce, debido a la inexistencia de flujos que de alguna manera modifiquen el lecho del río.

Lecho mayor extraordinario. Se caracteriza por ser la zona que se anega en la fase de niveles altos o crecidas ordinarias.

Lecho mayor excepcional. Es la zona de inundación de un río en las grandes crecidas. Esta área del río sólo se ve afectada por aquellas crecidas que presentan periodos de retorno muy altos (100, 1000, 5000 años, etc.), por lo que es común que esté cubierto por la vegetación, además frecuentemente presenta áreas agrícolas y hasta se construyen viviendas en él. En este último nivel, el gasto del escurrimiento se incrementa de forma acelerada y obtiene las máximas velocidades de flujo al elevarse el esfuerzo cortante ejercido sobre el lecho del canal, que se manifiesta por excavación acelerada de la erosión lineal en el fondo, con la consecuente movilización de la carga de fondo y la rápida socavación de las riberas (Romo y Ortiz, 2001).

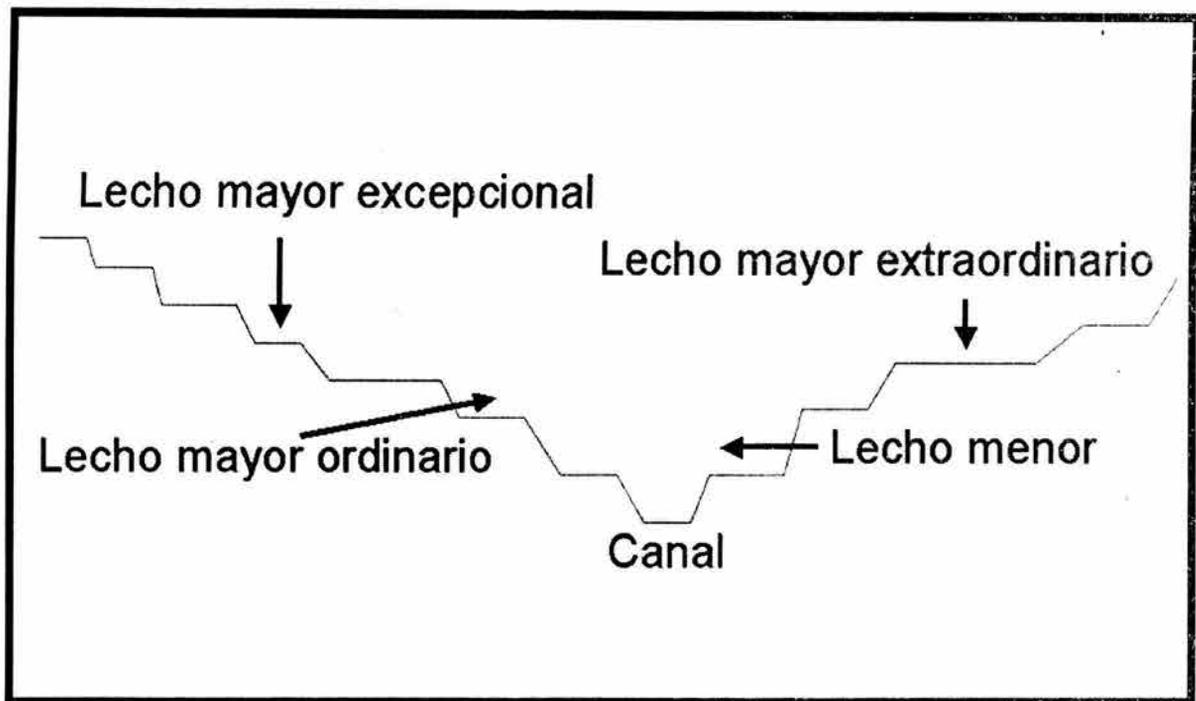


Figura 5.5. Tipos de lechos que forman parte del cauce de un río.

Para el caso del río Tecolutla la elaboración de los perfiles se llevó a cabo a partir del modelo digital de elevación y con la ayuda del software AutoCAD Map 2000 y las secciones que se crearon fueron tomadas arbitrariamente.

Por medio de la utilización de las secciones fue posible observar cambios en la pendiente, estos cambios corresponden a los diferentes lechos existentes en el cauce del río Tecolutla y son el resultado de los diferentes episodios de crecidas que se han presentado en la corriente.

De esta forma, se obtuvo para cada perfil, la delimitación de los lechos, los cuales fueron empleados para la realización de un mapa en el cual se representaron las áreas correspondientes a cada tipo de lecho, y por lo tanto de las zonas susceptibles a inundación. Cabe aclarar que no fue posible llevar a cabo la realización de perfiles en las cercanías de la desembocadura del río debido a la pobre cantidad de información de dicha zona, esto se debió principalmente a que el modelo fue obtenido de una carta topográfica en la cual las curvas de nivel presentan una equidistancia de 20 m, razón por la cual no fue posible la obtención de perfiles y por lo tanto de zonas susceptibles a las crecidas.

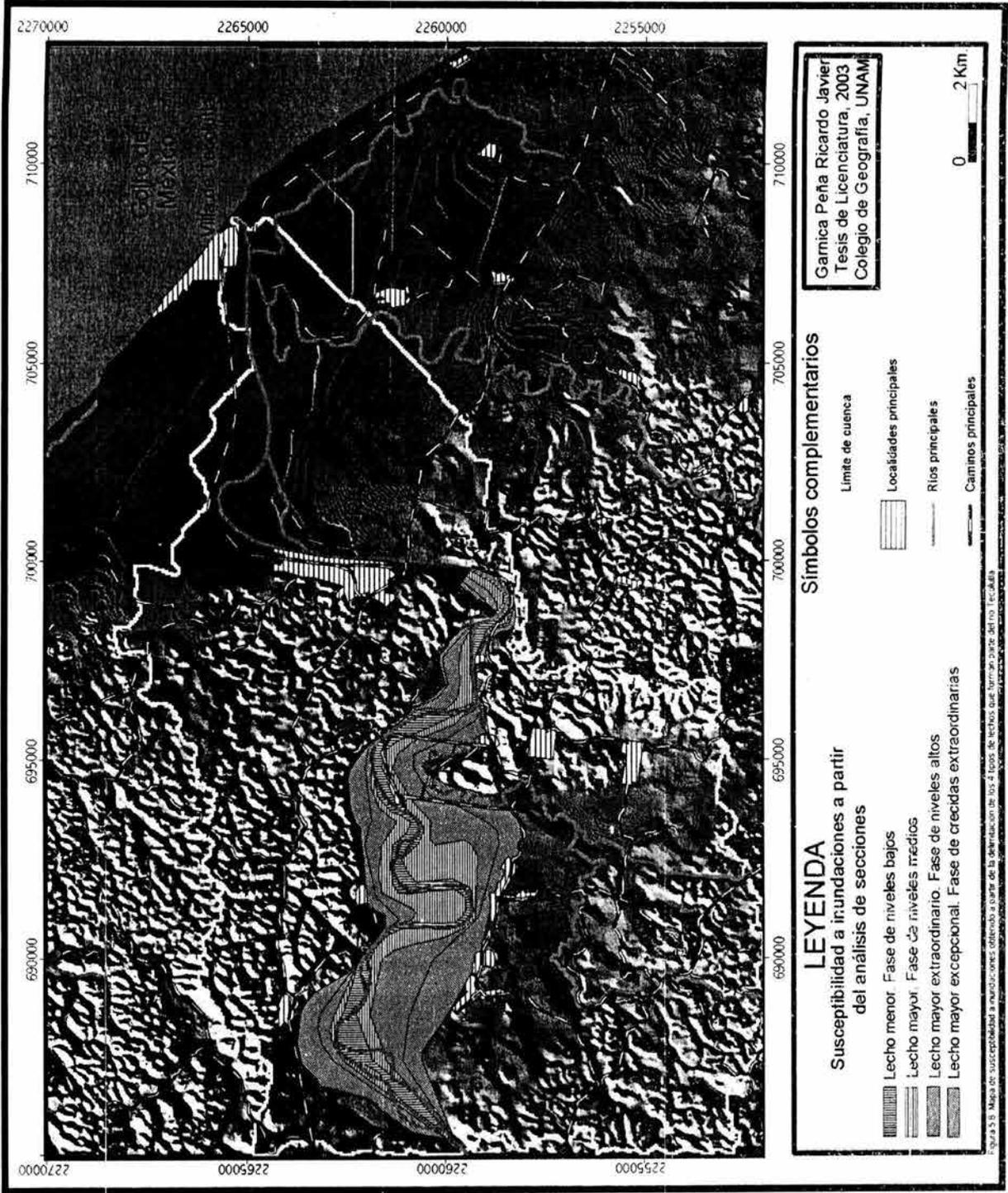
En el mapa resultante (Figura 5.6) se observan similitudes, principalmente, entre el lecho menor y el cauce principal del río y entre los límites del lecho mayor excepcional y la planicie aluvial del mismo. Asimismo la delimitación de zonas susceptibles a través de este método presenta una ligera semejanza con la forma y dinámica que tiene el río Tecolutla. Como complemento a este análisis se realizó la comparación de esta información con una imagen de satélite Landsat ETM, con fecha 22 de octubre de 1999, para corroborar los resultados obtenidos con las zonas afectadas por la avenida ocurrida ese año.

En resumen, en el mapa hecho por medio del cálculo de canales se observa una disminución de las zonas susceptibles con respecto al obtenido a partir de la delimitación de los diferentes tipos de lechos fluviales, esto se puede deber a que el lecho mayor excepcional representa zonas que son afectadas por avenidas de gran magnitud, las cuales incluso pueden llegar a ser mayores a la calculada en este trabajo (1000 años). Como ejemplo se puede observar la zona afectada por la crecida del año de 1999, la cual fue mayor el área afectada que la representada en el mapa de susceptibilidad a inundaciones realizado por medio del análisis de gastos máximos. Sin embargo, esto no puede ser corroborado debido a la desaparición de la estación hidrométrica como resultado de la crecida, de tal manera que para establecer de manera precisa las zonas de inundación es necesario contar con información hidrométrica adecuada del área de estudio.

Así la información obtenida se resume de la siguiente manera en el Cuadro 5.5

| Período de retorno (años) | Gasto máximo esperado (m ³ /seg) | Precipitación máxima esperada en 24 hrs. (mm) | Probabilidad de que suceda en cualquier año (%) | Nivel de susceptibilidad |
|---------------------------|---|---|---|--------------------------|
| 2 | 873 | 120.5 | 50 | Muy alto |
| 10 | 3117 | 216.6 | 10 | Alto |
| 50 | 12166 | 300.9 | 2 | Medio |
| 100 | 14062 | 336.6 | 1 | Bajo |
| 1000 | 19738 | 454.3 | 0.1 | Muy bajo |

Cuadro 5.5 Resumen de la información obtenida.



Gamica Peña Ricardo Javier
 Tesis de Licenciatura, 2003
 Colegio de Geografía, UNAM

Símbolos complementarios

- Limite de cuenca
- Localidades principales
- Rios principales
- Caminos principales

LEYENDA

- Susceptibilidad a inundaciones a partir del análisis de secciones
- Lecho menor. Fase de niveles bajos
 - Lecho mayor. Fase de niveles medios
 - Lecho mayor extraordinario. Fase de niveles altos
 - Lecho mayor excepcional. Fase de crecidas extraordinarias

Figura 3.1. Mapa de susceptibilidad a inundaciones obtenido a partir de la determinación de los 4 tipos de lechos. Fuente: Gamica Peña Ricardo, 2003.

5.10 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON IMÁGENES DE SATÉLITE

Con la idea de analizar desde otra perspectiva los resultados de la delimitación de áreas susceptibles a inundación, se llevó a cabo una comparación de éstas últimas con las zonas afectadas durante el evento de octubre de 1999 a través de técnicas de percepción remota, por medio del análisis de dos imágenes de satélite de octubre de 1989 y octubre de 1999, con resolución espacial de 25 y 30 m respectivamente (Figuras 5.7 y 5.8). De esta forma fue posible observar que el mapa obtenido a partir de secciones transversales presenta una ligera similitud con las zonas afectadas en 1999 (Figura 5.9). Las áreas delimitadas en el programa WMS son de menor extensión a las que presenta la imagen de satélite, esto se puede deber a que la inundación que se presentó en ese año pudo ser de una magnitud mucho mayor a la calculada en este trabajo, sin embargo no se pudo comprobar cual fue el gasto que se presentó en 1999 ya que la estación hidrométrica fue arrasada por la corriente.

Por otra parte el mapa, realizado con base en los lechos del cauce del río Tecolutla, presenta una mayor similitud a las zonas dañadas por la crecida ocurrida en octubre de 1999, principalmente en el área que corresponde al lecho mayor excepcional y que coincide con las características antes mencionadas, es decir, en esta zona se presentan zonas de cultivo que se encuentran dentro de los límites de los lechos mayor extraordinario y excepcional, zonas que sólo se ven afectadas por crecidas que presentan periodos de retorno muy altos y por lo tanto son de mayor magnitud, sin embargo no existen datos hidrométricos que permitan corroborar la ocurrencia de crecidas de magnitudes extraordinarias (Figura 5.10).

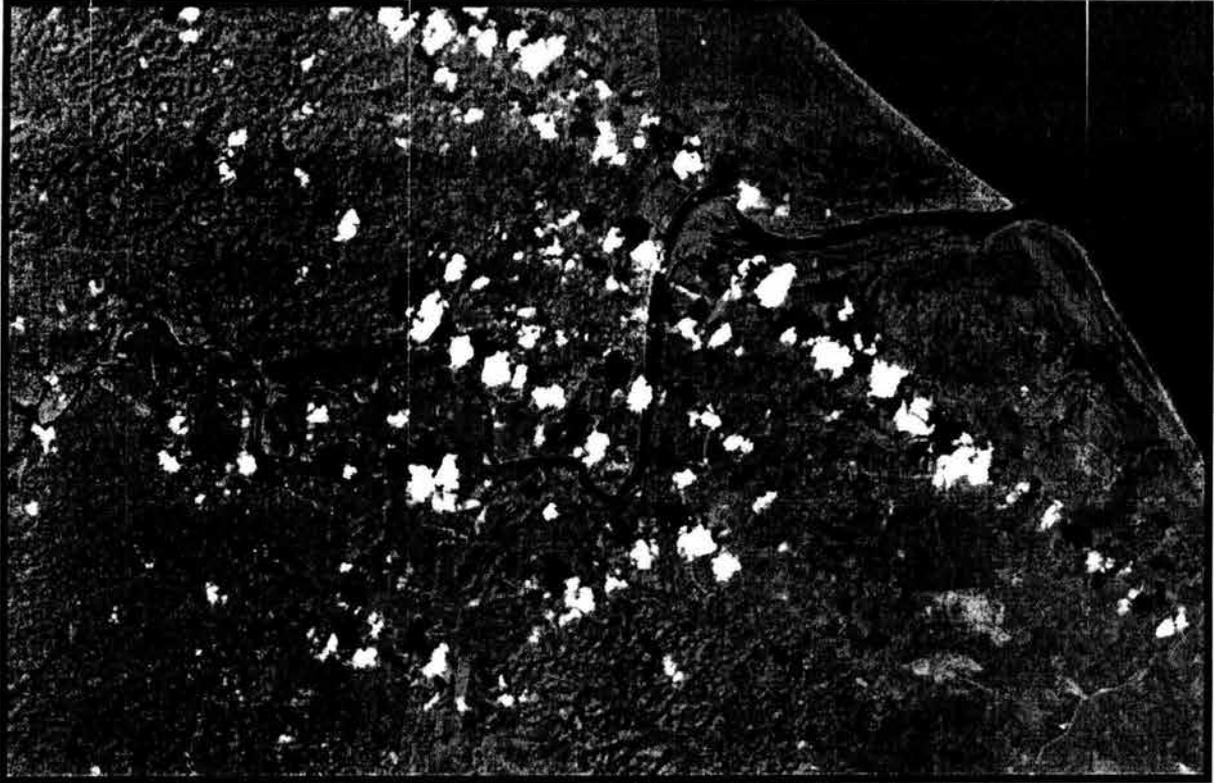


Figura 5.7. Imagen satelital con fecha 26 de octubre de 1989. Combinación de las bandas 4-3-2.

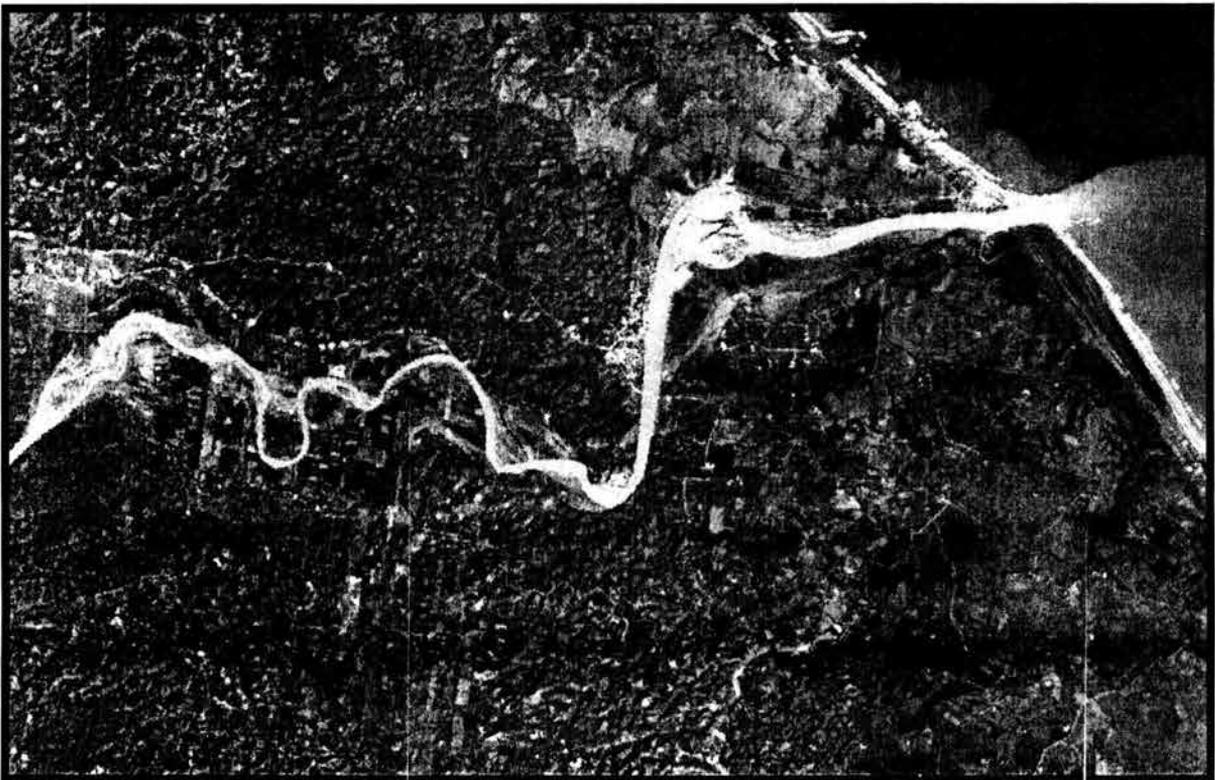


Figura 5.8. Imagen satelital con fecha 22 de octubre de 1999, en la cual se puede observar la zona afectada (color azul verdoso) por la inundación ocurrida entre los días 4 y 6 de octubre de ese año.

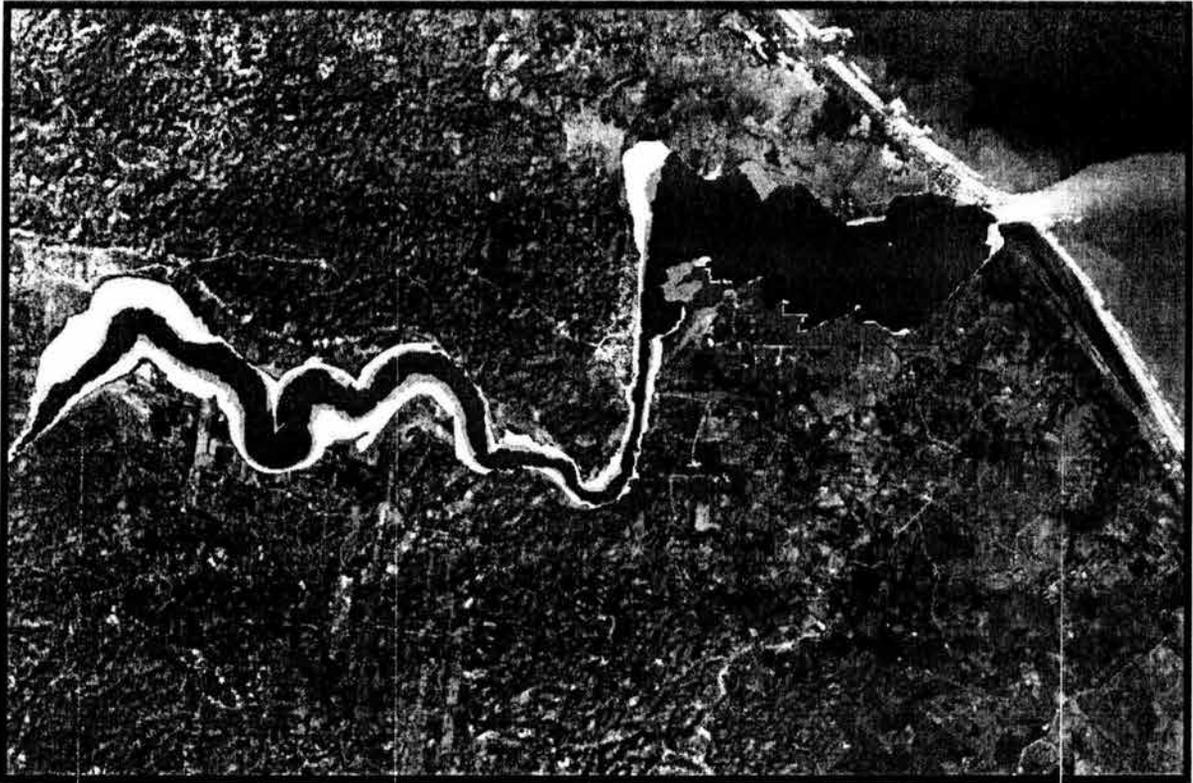


Figura 5.9. Imagen de octubre de 1999 y la sobreposición de las zonas susceptibles a inundación obtenidas a partir de secciones transversales y del cálculo de canales en WMS.

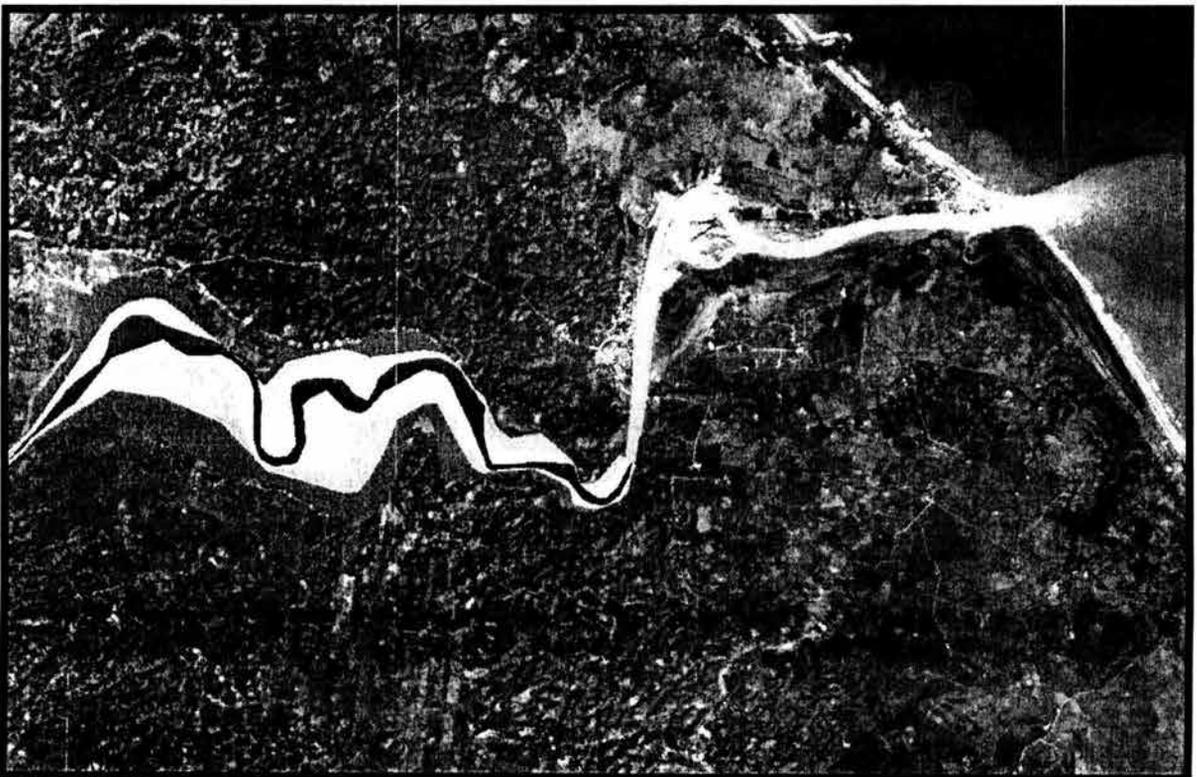


Figura 5.10. Sobreposición de las zonas susceptibles a inundaciones obtenidas a partir del reconocimiento de los lechos fluviales del río Tecolutla.

Por último cabe destacar que paralelo a los problemas de inexactitud asociados a las mediciones hidrológicas, y sus correspondientes interpolaciones, la resolución del modelo digital del terreno juega un papel muy importante en la delimitación de dichas áreas. En particular fue posible observar que en áreas donde la interpolación de curvas de nivel fue problemática, por la escasez de datos en zonas planas, la delimitación de zonas inundables no cubrió toda la zona afectada. Una diferencia notoria entre las zonas modeladas y las observadas a partir de las imágenes de satélite se concentró en el punto de confluencia entre el estero Cruz de los Esteros y el río Tecolutla. En esta porción no fue posible obtener una delimitación adecuada ya que no se cuenta con los datos correspondientes al caudal del estero.

CAPÍTULO 6. VULNERABILIDAD Y RIESGOS ASOCIADOS

En el presente trabajo, la determinación del riesgo por inundaciones y procesos de remoción en masa es fundamental, ya que nos permite conocer el nivel o grado de riesgo de la población ante estos tipos de peligros.

La determinación del riesgo se lleva cabo con la ayuda de la información obtenida a partir de los índices de susceptibilidad, tanto a inundaciones como a procesos de remoción en masa, junto con un índice de vulnerabilidad, obtenido a partir del análisis de la información socioeconómica, de esta forma podemos contar con dos parámetros que nos permitirán determinar el grado de riesgo de la población a inundaciones y procesos de remoción en masa.

6.1 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS

Población

Según el XII Censo de Población y Vivienda del año 2000, el municipio de Tecolutla estaba integrado por 25,681 habitantes, constituido por el 49.92 % de hombres y el 50.08 % de mujeres.

El municipio es eminentemente rural, ya que sólo la cabecera municipal, Tecolutla, y el poblado de Hueytepec son considerados como localidades urbanas. La primera cuenta con 3797 habitantes, mientras que el segundo tiene 2556.

En cuanto a los rangos de edad, éstos se distribuyen de la siguiente manera: el 35.6% corresponde a la población que se encuentra entre los 0 y 14 años, el 57.8% es para la población con edades entre 15 y 64 años, y por último la población que tiene edades mayores a 65 años suma el 6.5% del total de la población.

En relación con la distribución de la población por ocupación, el 33.67% estaba dentro de la población económicamente activa (PEA), mientras que la población económicamente inactiva sumaba el 66.33% (INEGI, 2000).

De los 8647 habitantes pertenecientes a la PEA, éstos se dividían de la siguiente forma: en las actividades primarias, principalmente agricultura, ganadería, explotación forestal y pesca, se concentra el 56.5%, en las actividades secundarias (subsectores, producción de alimentos, bebidas y tabacos; industria de la madera y derivados; productos minerales no metálicos, excluyendo los derivados del petróleo y del carbón; productos metálicos, maquinaria y equipo) el 12.1%, y por último el 31.3% en las actividades terciarias (principalmente turismo y comercio).

Educación

El municipio de Tecolutla cuenta con educación preescolar, primaria, secundaria y bachillerato. Sin embargo, los centros educativos no están distribuidos de una forma homogénea dentro del municipio.

De la población que tiene 6 años y más, el 16.13% es analfabeta, mientras que el resto (83.87%) sabe leer y escribir. Por otra parte el grado de escolaridad entre la población mayor de 15 años es de 5° de primaria.

Las localidades del municipio que cuentan con centros educativos son: Tecolutla, Hueytepec, Cañada Rica y Paso del Progreso (preescolar, primaria, secundaria, telesecundaria y bachillerato); Fuerte de Anaya (preescolar, primaria, secundaria y telesecundaria); Casitas, La Guadalupe y Ricardo F. Magón (preescolar, primaria y secundaria) y el resto de las localidades cuentan con preescolar y primaria, o en algunos de los casos, por ejemplo El Cabellal y Río Blanco, no cuentan con centro educativo alguno.

Vivienda

En el año 2000, según INEGI (2000), el municipio de Tecolutla contaba con 5985 viviendas habitadas, de éstas 5943 eran particulares. El promedio de habitantes por vivienda era de 4 a 5.

Del total de viviendas particulares habitadas, el 79.58% cuenta con techos contruidos a base de materiales ligeros, naturales y precarios (de desecho), el 39.03% presenta paredes hechas con materiales ligeros y el 41.97% cuenta con pisos que están hechos con un material diferente al cemento, mosaico, madera, es decir puede ser tierra u algún otro recubrimiento.

En cuanto a los servicios básicos como agua potable, drenaje y energía eléctrica, el porcentaje de viviendas que no cuentan con los mismos se reparte de la siguiente forma: el 15.6% no cuenta con energía eléctrica, el 46.96% no cuenta con drenaje y las que no tienen agua entubada es el 87.75% de las viviendas.

En cuanto a las localidades sólo 5 no cuentan con energía eléctrica, Tecolutla es la única localidad que cuenta con agua potable y en cuanto a drenaje sólo 3 localidades pueden disfrutar de este servicio, Tecolutla, Hueytepec y Paso del Progreso.

Actividades económicas

Como se mencionó anteriormente, en las actividades agrícolas es donde se desempeña el mayor número de personas pertenecientes a la PEA; seguida por el turismo y el comercio, y por las actividades secundarias antes mencionadas.

Entre los principales cultivos se encuentran el ajonjolí, arroz, chile verde, frijol, maíz, café, mango, limón, naranja, toronja, palma de coco (fruta), plátano y la vainilla. En el municipio también se desarrolla la ganadería, en la cual se crían ganados bovinos, porcinos y ovinos principalmente. El bovino juega un papel importante ya que es el de mayor número y extensión, y a este se le destina un gran número de hectáreas para su desarrollo. La explotación forestal se lleva a cabo principalmente en las localidades

localizadas al sureste del municipio, en donde la madera obtenida de los encinos es utilizada preferentemente en la de fabricación de muebles y como combustible doméstico, mientras que la del cedro se utiliza en la construcción de viviendas rústicas y en la realización de artículos artesanales. La pesca en Tecolutla es incipiente, esto a pesar de contar con un número importante de ríos, arroyos y esteros, además de 52 km de litoral. Las especies capturadas principalmente son el ostión, la jaiba, el pez lagarto, el cangrejo azul, el bagre, mojarra, sábalo, sierra, lisa, robalo y en forma esporádica el huachinango (Castillo, 2000).

El turismo y el comercio son las actividades terciarias que más se desarrollan dentro del municipio. El primero debe su desarrollo a que el área turística del municipio abarca aproximadamente 47 km de costa, desde la Barra de Boca de Lima hasta la localidad de Casitas. Mientras tanto el comercio se realiza en los diferentes centro de población del mismo (Castillo, 2000).

Servicios de salud

El municipio de Tecolutla cuenta con 7 unidades de consulta, 3 del IMSS; 3 de la Secretaría de Salud y 1 de desarrollo integral de la Familia. Estas se localizan en las localidades de Tecolutla, Hueytepec, Casitas, Cañada Rica, La Guadalupe, Cruz de los Esteros y Ricardo F. Magón.

En el año 2000, de acuerdo con INEGI (2000), 23089 habitantes no contaban con derecho a servicio de salud y cerca de 430 tenían alguna discapacidad, siendo el 89.9% y 1.67% de la población total respectivamente.

Infraestructura

Tecolutla cuenta con dos carreteras principales, la 180 (México-Tampico) y la 131 (Teziutlán-Nautla), la primera comunica al municipio con las ciudades del centro del país, por ejemplo, México D.F., Pachuca, Querétaro; mientras que la segunda conecta a las ciudades de Puebla, Tlaxcala y Teziutlán, por citar algunos ejemplos. Además existe la carretera que lo une con el municipio de Gutiérrez Zamora.

Hay 3 oficinas de correos y una red de servicios telefónicos domiciliarios con servicio de llamadas locales y de larga distancia, la mayoría de todos estos servicios están concentrados en la cabecera municipal, y los servicios de los cuales carece, la mayoría de estos se ubican en el municipio de Gutiérrez Zamora.

6.2 VULNERABILIDAD

Definición de vulnerabilidad

La vulnerabilidad, según Cannon (1994) es una condición de la población o de los individuos en función de sus características económicas y sociales en las que se desarrolla, además de su localización geográfica, lo cual los hace más o menos susceptibles a ser afectados por un fenómeno natural.

El estudio de la vulnerabilidad social implica el análisis de los diversos factores socioeconómicos que determinan el grado de condiciones desfavorables o precarias de la población. Esto no significa que la gente que cuenta con los recursos suficientes no sea vulnerable, simplemente lo que los diferencia es que estos últimos tendrán la capacidad de poder reponerse, en un tiempo muy breve, de los efectos producidos por un peligro natural, mientras que las poblaciones con las condiciones de vida más deficientes siempre requerirán de la ayuda externa para poder sobreponerse a un evento, incluso si este fuera de una magnitud menor.

Por eso es importante conocer los diferentes niveles de vulnerabilidad de la población, ya que esto permitirá desarrollar diferentes estrategias y planes tanto para prevenir una posible catástrofe como para hacerle frente al peor de los desastres. Además de que no sólo servirá para realizar estudios referentes a la problemática de los riesgos, sino que también podrá aplicarse esta metodología para planes de desarrollo, combate a la pobreza, problemas de desnutrición, salud, rezagos en la educación, creación de empleos, etc.

6.2.1 CÁLCULO DE LA VULNERABILIDAD DEL MUNICIPIO DE TECOLUTLA.

Para determinar la vulnerabilidad del municipio de Tecolutla se elaboró un índice en el que se incluyeron 17 variables de población y vivienda que reflejan el grado de susceptibilidad de las diferentes comunidades que forman parte del municipio. Dicha información se obtuvo del XII censo de Población y Vivienda, INEGI 2000, de los sistemas SCINCE y CONTAR-ITER (2000).

Los índices se desarrollaron a partir de las áreas geoestadísticas básicas, AGEBS, dichas áreas se caracterizan por estar delimitadas por rasgos culturales y naturales, permanentes e identificables en el terreno, con una extensión convencional al interior de cada municipio del país (INEGI, 1998).

Los índices se efectuaron tomando en cuenta a las 10 AGEBS que conforman al municipio, tanto urbanas (Tecolutla y Hueytepec) como rurales, dentro de las cuales se encuentran 102 localidades, la relación AGEBS-localidades se muestra en el cuadro 6.1.

| AGEB | Nº DE LOCALIDADES | POBLACIÓN |
|--------------|-------------------|-----------|
| 001-1 | 20 | 2358 |
| 003-0 | 14 | 2678 |
| 004-5 | 11 | 2297 |
| 005-A | 9 | 2666 |
| 007-9 | 7 | 2083 |
| 008-3 | 3 | 998 |
| 009-8 | 14 | 3996 |
| 010-0 | 4 | 67 |
| 015-3 | 18 | 1257 |
| 0001(urbana) | Tecolutla | 3797 |
| 0016(urbana) | Hueytepec | 2556 |

Cuadro 6.1. En este cuadro sólo aparecen aquellas localidades que contaban con datos, por lo cual algunas AGEBS no se registran con el número total de localidades.
Fuente: INEGI, SCINCE e ITER (2000).

Después de haber definido las variables a utilizar e identificado las AGEBS, se llevaron a cabo los cálculos correspondientes para obtener el índice de vulnerabilidad de cada AGEB.

Las variables que se seleccionaron se encuentran dentro de los campos de población, educación, empleo y vivienda, como se puede ver a continuación.

Variables seleccionadas

- Población de 0-14 años
- Población sin servicios de salud
- Población con discapacidad
- Población de 6-14 que no sabe leer
- Población de 15 años y más analfabeta
- Población económicamente inactiva
- Población que recibe menos de 1 salario mínimo
- Población que recibe de 1 a 2 salarios mínimos
- Viviendas particulares que cuentan con techos contruidos con materiales ligeros o de desecho.
- Viviendas particulares que cuentan con paredes contruidas con materiales ligeros o de desecho
- Viviendas particulares que no cuentan con servicio sanitario
- Viviendas particulares que no cuentan con servicios básicos (agua, energía eléctrica, drenaje)
- Viviendas que no cuentan con bienes.

Población.

La vulnerabilidad se ve reflejada en aquellas personas que presentan una edad en la cual son susceptibles a sufrir algún daño producto de un peligro natural, por esta razón se tomó en cuenta a la población infantil y a la población mayor de 65 años.

También se presentará en aquellas personas con los niveles de escolaridad bajos ya que de esta forma no podrán asimilar las medidas de prevención, además de que sus condiciones económicas tienden a ser precarias y por lo tanto establecen sus hogares dentro de zonas que presentan cierto grado de susceptibilidad a algún peligro natural.

De igual manera, la vulnerabilidad se refleja en las personas que reciben un salario muy bajo o incluso que no perciben ingresos, ya que en caso de ocurrir algún evento natural, no tendrán la posibilidad de enfrentar los daños causados por el mismo.

Otro de los puntos a mencionar es el caso de la población que no cuenta con los servicios de salud apropiados, ya que en caso de la ocurrencia de un fenómeno natural, no podrán ser respaldados. Además de esto hay que agregar a aquellas personas que tengan familiares con alguna discapacidad.

Vivienda

En nuestro país es muy común encontrar viviendas que estén construidas con los materiales menos resistentes a los embates de los fenómenos naturales. Esto a su vez representa el estado económico que viven las personas.

En el caso de las viviendas sin servicios básicos, propician que la población se encuentre involucrada en diferentes aspectos, por ejemplo, si no cuentan con energía eléctrica es muy difícil que puedan ser advertidos de la amenaza de algún evento peligroso (esto en el caso de contar con bienes materiales como televisor o radio). En cambio si no cuentan con agua potable, es muy probable que la población, después de la ocurrencia de un evento, sufra de enfermedades debido a la ingestión de agua que no se encuentra en las mejores condiciones de higiene. En el caso de las viviendas sin drenaje, en el caso de los procesos de remoción en masa, estas pueden contribuir a la saturación del suelo debido a la descarga de desechos directamente en el suelo, propiciando la ocurrencia de dichos eventos.

Hay que mencionar que los resultados obtenidos reflejan un aspecto general de la población y que existen excepciones que se contraponen a la tendencia. Como consecuencia es importante considerar que si se quiere realizar a cabo un trabajo de mayor profundidad acerca de esta temática, es mejor realizar un índice a nivel localidad poder tener una aproximación de las características de la población

El índice de vulnerabilidad se efectuó tomando como base el método estadístico de componentes principales; posteriormente se determinaron 3 rangos para el municipio de Tecolutla: vulnerabilidad alta, media y baja.

Alta. Esta se caracteriza por presentar los niveles más bajos de bienestar en los diferentes aspectos que fueron tomados en cuenta para el análisis. Es decir son las personas que se presentan las condiciones más precarias, son familias compuestas en su mayoría por niños o ancianos, presentan los niveles más bajos de educación e incluso los miembros de la familia nunca recibieron instrucción alguna. No cuentan con servicios de salud. Además se encuentran en empleos en donde perciben ingresos muy bajos o que incluso no obtienen salario alguno. Las viviendas se caracterizan por estar construidas con lo más materiales más susceptibles a cualquier fenómeno natural de cualquier índole y de cualquier magnitud, además de que no cuentan con los servicios básicos.

Estas poblaciones son las que requieren mayor atención en el caso de la ocurrencia de algún peligro natural, por lo tanto merecen mayor atención y medidas de prevención más eficaces.

Media. En este nivel la población se encuentra en la transición entre los niveles de bienestar altos y bajos por lo que su capacidad tanto de prevención como de reacción dependerán en gran parte de la magnitud del proceso, un evento de gran magnitud traería una recuperación lenta, en cambio un fenómeno de magnitud menor podría ser enfrentado pero con algunas deficiencias. En general se le puede considerar casi alta debido a las características que presenta la población en general en el municipio de Tecolutla.

Baja. Presenta los niveles más óptimos de bienestar en los diferentes aspectos tomados para el análisis de vulnerabilidad. La población cuenta con los niveles más altos de educación, ingresos, viviendas y situación social. Esto le permite, primero, llevar a cabo planes de prevención en los cuales toda la población está involucrada, segundo, en el caso de la ocurrencia de un evento pueden hacer frente a situaciones de desastre, incluso de grandes magnitudes.

Después del cálculo las localidades quedaron agrupadas de la siguiente forma:

VULNERABILIDAD ALTA

| AGEB | Localidades |
|-------|--|
| 015-3 | Cerro de Hueytepec, 5 Jatos, Maximino A. Camacho, La Esperanza, La Guasima, Huipanguillo, I. Zaragoza, Rancho Agustín G. Álvarez, San Francisco, San Isidro el Hular, Santa Gudelia, Tumbo a la Reina, El Zapote, Villa Hermosa, Paula Morales, Manantiales, Finca Santa Silvia y Rancho Las Palmas. |
| 008-3 | 2 de octubre, Fuerte de Anaya y Oro Verde |
| 010-0 | El Cristo, La Gloria, Huerto El Triunfo y Palo Hueco. |
| total | 25 localidades |

VULNERABILIDAD MEDIA

| AGEB | Localidades |
|-------|---|
| 001-1 | Barra Boca de Lima, Boca de Lima, El Cabellal, Finca Los Cerritos, La Florida, El Manantial, Plan de Ayala, Rancho Hnos. García, Rancho La Gloria, Río Blanco, Sto. Domingo, 3 Cruces, Vista Hermosa (El Aguacate), Isla de Doña María, Arroyo Cafetal, Hnos. Córdoba, Las Palmas, Rancho López, Crispín González y la Aurora. |
| 003-0 | Ampliación Anclón Arenal, Chichicatzapán Méndez, La Gloria, José Ma. Pino Suárez, La Libertad, Los Mangos, Mesa del Tigre, Paso de Hidalgo, Paso Real, Pino Suárez, Plan del Carrizo, Vista Hermosa Calchal y Los Gómez. |
| 004-5 | Cruz de los Esteros, El Embarcadero, Lázaro Cárdenas, LA Nva. Guadalupe, Paso del Río, Plan de Villa Cuauhtémoc, La Victoria, Colonia Díaz Mirón, Augusto G. Villanueva, Ejido El Paraíso y La Pomorosa. |
| 005-A | Cañada Rica, 5 de Mayo, La Curva, Finca Mapilca, Paso del Progreso, El Porvenir, 3 Marías, Los Velasco y Sal Si Puedes. |

| AGEB | Localidades |
|--------------------|---|
| 007-9 | Casas Quemadas, Cerro Copelado, La Guadalupe, El Ostional, Ricardo F. Magón y Ejido La Perla. |
| Hueytepec (urbana) | Hueytepec |
| total | 60 localidades |

VULNERABILIDAD BAJA

| AGEB | Localidades |
|--------------------|---|
| 009-8 | Casitas, Colonia Palmas del Mar, Las Lomas, Marbella, Monte Gordo, El Palmar, Playa Oriente, Playa Paraíso, Sn. Manuel, Torre Molino, La Vigueta, Sn. Justino, Los Puentes y Fraternidad Antorchista. |
| Tecolutla (urbana) | Tecolutla |
| total | 15 localidades |

Como se puede observar el municipio presenta principalmente una vulnerabilidad que se encuentra entre alta y media, rangos en los cuales se concentra más del 50% de las localidades tomadas para el cálculo del índice de vulnerabilidad, esto es debido a que la mayoría de ellas se encuentran muy aisladas de la cabecera municipal por lo que no reciben la atención necesaria; además de ubicarse en zonas donde se dificulta el abastecimiento de los servicios básicos. En cambio las localidades que presentan un nivel bajo de vulnerabilidad, principalmente, la cabecera municipal (Tecolutla) y la AGEB 009-8, se debe principalmente a que ahí se desarrolla la actividad turística y se encuentran las mayores concentraciones de población. Además de que, debido a su ubicación, sobre planicies aluviales, es posible el abastecimiento de servicios básicos, principalmente agua potable, drenaje y energía eléctrica (Figura 6.1).

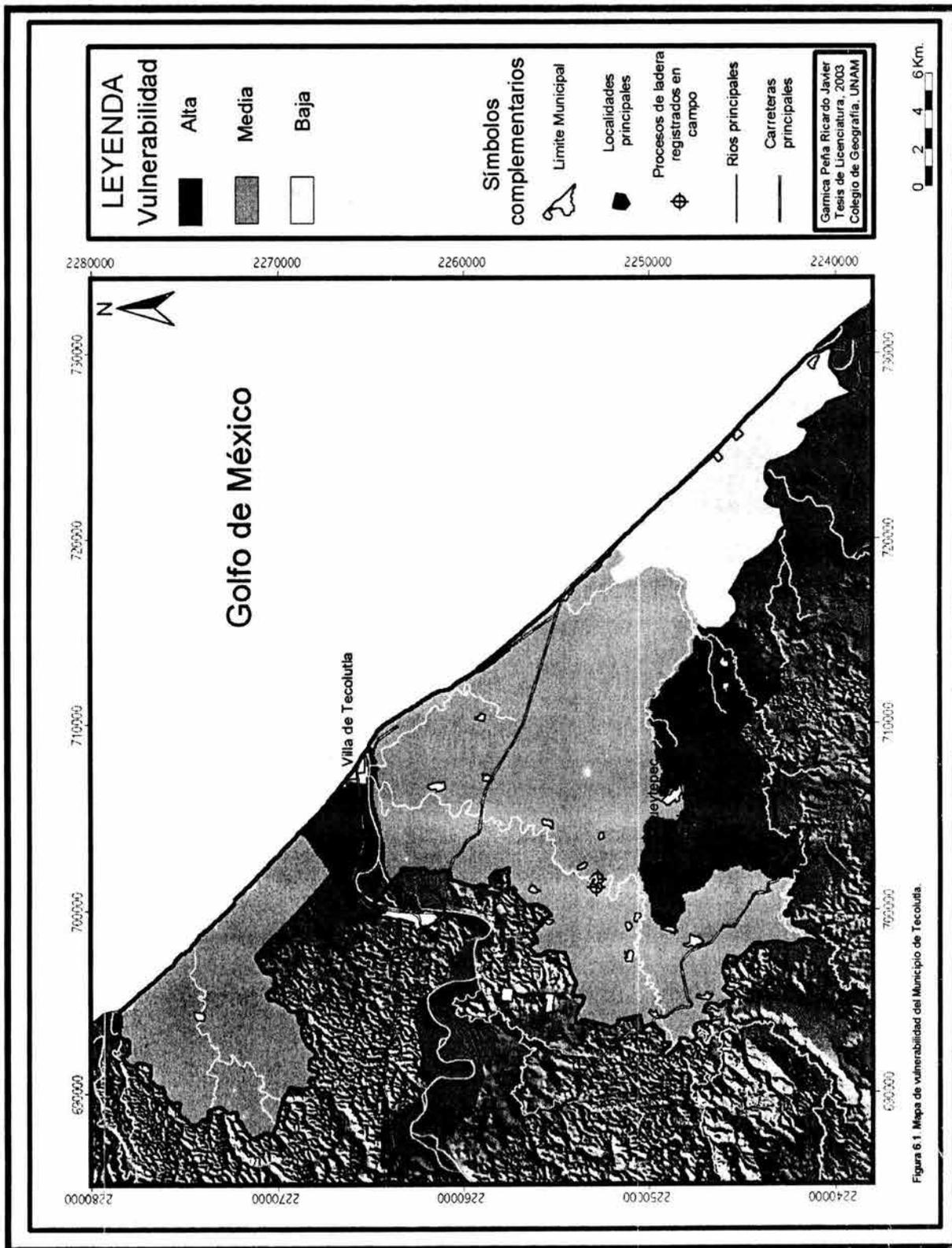


Figura 6.1. Mapa de vulnerabilidad del Municipio de Tecolula.

6.3 RIESGOS

Para llevar a cabo el análisis del riesgo es necesario tomar en cuenta dos aspectos: el peligro natural, en este caso representado por los mapas de susceptibilidad tanto de procesos de ladera como de inundaciones y la vulnerabilidad que existe a partir de las condiciones socioeconómicas de la población.

6.3.1 RIESGOS POR INESTABILIDAD DE LADERAS

Este análisis para el municipio de Tecolutla se realizó a partir de la combinación del índice de susceptibilidad a procesos de remoción (Capítulo 4) y el índice de vulnerabilidad de las diferentes áreas geostadísticas básicas que forman parte del municipio. El resultado de este proceso se representó por medio de un mapa, el cual se clasificó, al igual que los de susceptibilidad y vulnerabilidad, en tres rangos; riesgo alto, medio y bajo (Figura 6.2).

Riesgo Alto

Se presenta en aquellas zonas en donde existen los niveles más altos de inestabilidad y vulnerabilidad. Representan a aquellos lugares con una probabilidad muy alta de que ocurra un desastre causado por un proceso de ladera. Dentro del municipio la zona de alto riesgo se ubica, principalmente, en la parte suroeste, en la cual se localizan localidades como Plan de Carrizo, José Ma. Pino Suárez, Cerro de Las Burras, Chichicatzapán de Méndez, Pino Suárez (Ampliación), La Gloria, Ampliación Anclón Arenal, Maximino A. Camacho, La Guasima, San Francisco y Zapote. También se presentan en una pequeña porción al noroeste del área de estudio, en las cercanías de las localidades Santo Domingo, La Florida y El Cabellal. Estas son zonas que se caracterizan por presentar pendientes mayores a los 12 grados y además están constituidas por roca arenisca.

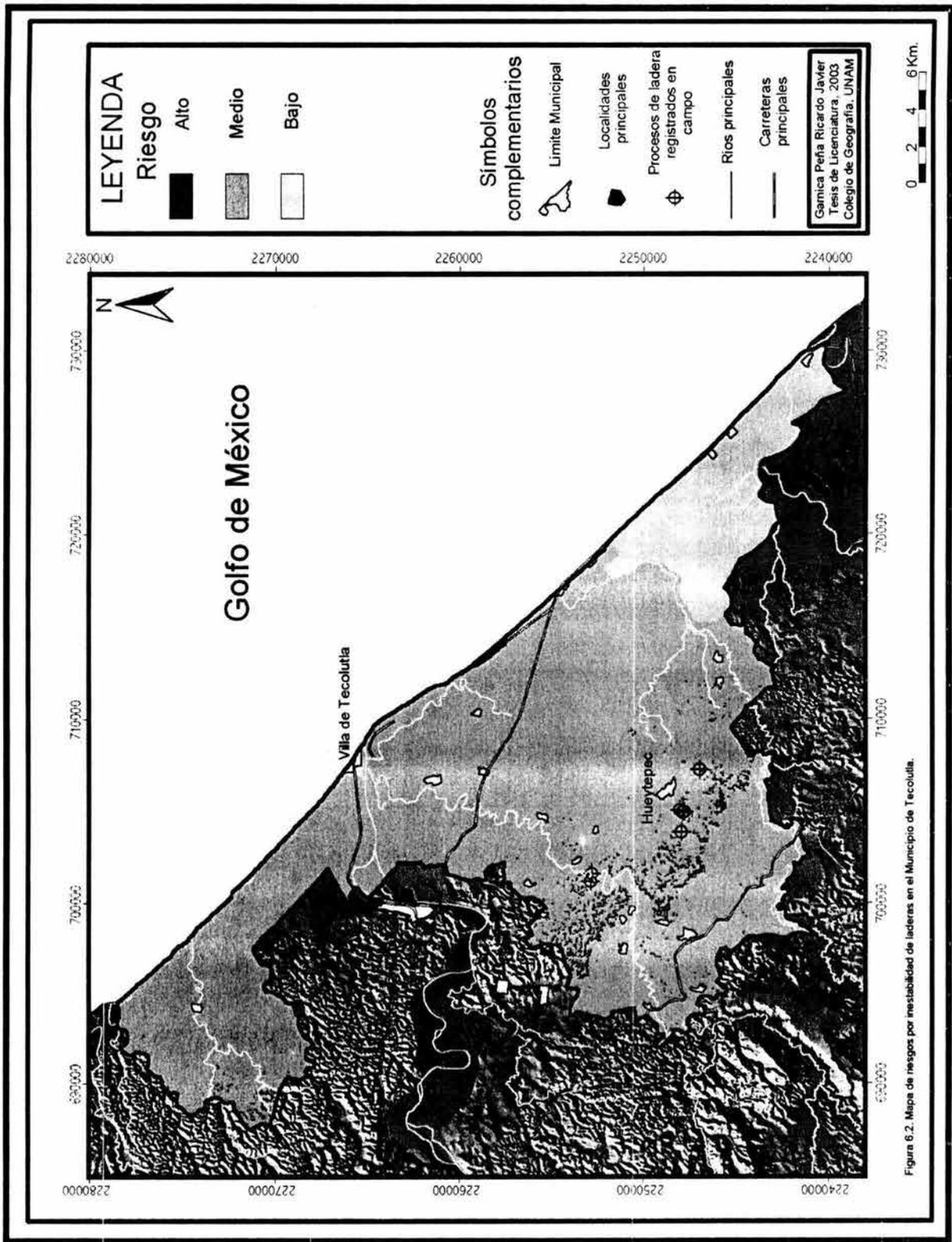


Figura 6.2. Mapa de riesgos por inestabilidad de laderas en el Municipio de Tecolutla.

Riesgo Medio

Se puede definir como una zona en la cual existe cierto grado de similitud entre la vulnerabilidad y la susceptibilidad a procesos de ladera. De forma general, este nivel de riesgo abarca la mayor parte del municipio, sin embargo, cabe aclarar, que debido al índice de vulnerabilidad realizado anteriormente, aparecen zonas que pertenecen a la planicie aluvial y que presentan un nivel de riesgo medio, esto se debe tomar con reservas ya que no es posible que se presenten procesos en zonas prácticamente llanas. De esta forma las zonas que podemos tomar en cuenta con un nivel medio de riesgo son la zona norte del municipio donde se localizan las localidades de Rancho Tres Cruces, Rancho Escondido, Finca San Gerardo y Santa Margarita, y la zona suroeste la cual rodea a la zona que presentan un nivel de alto de riesgo, en donde se localizan los pueblos Vista Hermosa Calichal, Hueytepec, Finca Santa Eugenia, Tumbo a la Reina, San Isidro el Hular, Río Verde, Cerro de Hueytepec y La Libertad. Además en esta zona fue en donde ocurrieron los movimientos del terreno que se levantaron en campo, de los cuales sólo el que se encuentra en la población de Plan de Carrizo tuvo repercusiones sobre la población.

Riesgo Bajo

Este grado se caracteriza por presentar condiciones estables, tanto el peligro como la vulnerabilidad presentan los niveles más bajos, es decir, el terreno es poco susceptible a presentar movimientos del terreno, mientras que la población presenta los niveles más altos de desarrollo, por lo que la ocurrencia de un desastre asociado a la inestabilidad de laderas es nula. Este nivel de riesgo comprende la cabecera municipal, Villa de Tecolutla, y la porción sureste, donde se encuentran las localidades de Casitas, Guadalupe, Los Esteros, Marbella, Eufrosina, Monte Gordo, San Justino, Las Lomas, Palmas del Mar, etc. Ambas se caracterizan por ser zonas prácticamente planas por lo que la ocurrencia de procesos de ladera es nula.

6.3.2 RIESGOS POR INUNDACIONES

El análisis del riesgo por inundaciones se realizó de forma similar al que se llevó a cabo para la inestabilidad, sólo que en este caso se tomó en cuenta sólo a las localidades ubicadas dentro de la llanura de inundación del río Tecolutla.

El nivel de riesgo, representado en la figura 6.3, se clasificó en 3 rangos: alto, medio y bajo.

Riesgo Alto

Esta zona está ubicada en la parte baja del río Tecolutla, cercana a su desembocadura. Se caracteriza por presentar una alta susceptibilidad a inundaciones por lo que es común que cada año sean afectadas las localidades ubicadas dentro de esta zona, las cuales presentan los niveles más bajos de bienestar dentro del municipio, por lo que en caso de la ocurrencia de una inundación de cualquier magnitud puede provocar daños considerables a la población la cual tardará demasiado tiempo en recuperarse de los estragos. Las localidades ubicadas dentro de este rango son Santa Teresa, Finca el Establo, San Antonio, Paso del Río, Finca del 44, Las Palmas, el Club de Pesca, El Triunfo, Santa Higinia, Palo Hueco, El Cristo, la Gloria. Por esta razón es necesario crear planes de prevención y mitigación para hacer frente a inundaciones de grandes magnitudes y así evitar situaciones de desastre.

Riesgo Medio

Las zonas que presentan riesgo medio se localizan en la porción sur de la cabecera municipal y en las proximidades de la localidad de Cruz de los Esteros (al sur del río Tecolutla) y se caracterizan porque presentan alta susceptibilidad a la ocurrencia de inundaciones, sin embargo, lo que la diferencia de la zona con riesgo alto es el nivel de vulnerabilidad que presentan las poblaciones. Por un lado, la cabecera municipal presenta los niveles más altos de desarrollo por lo que la ocurrencia de eventos de

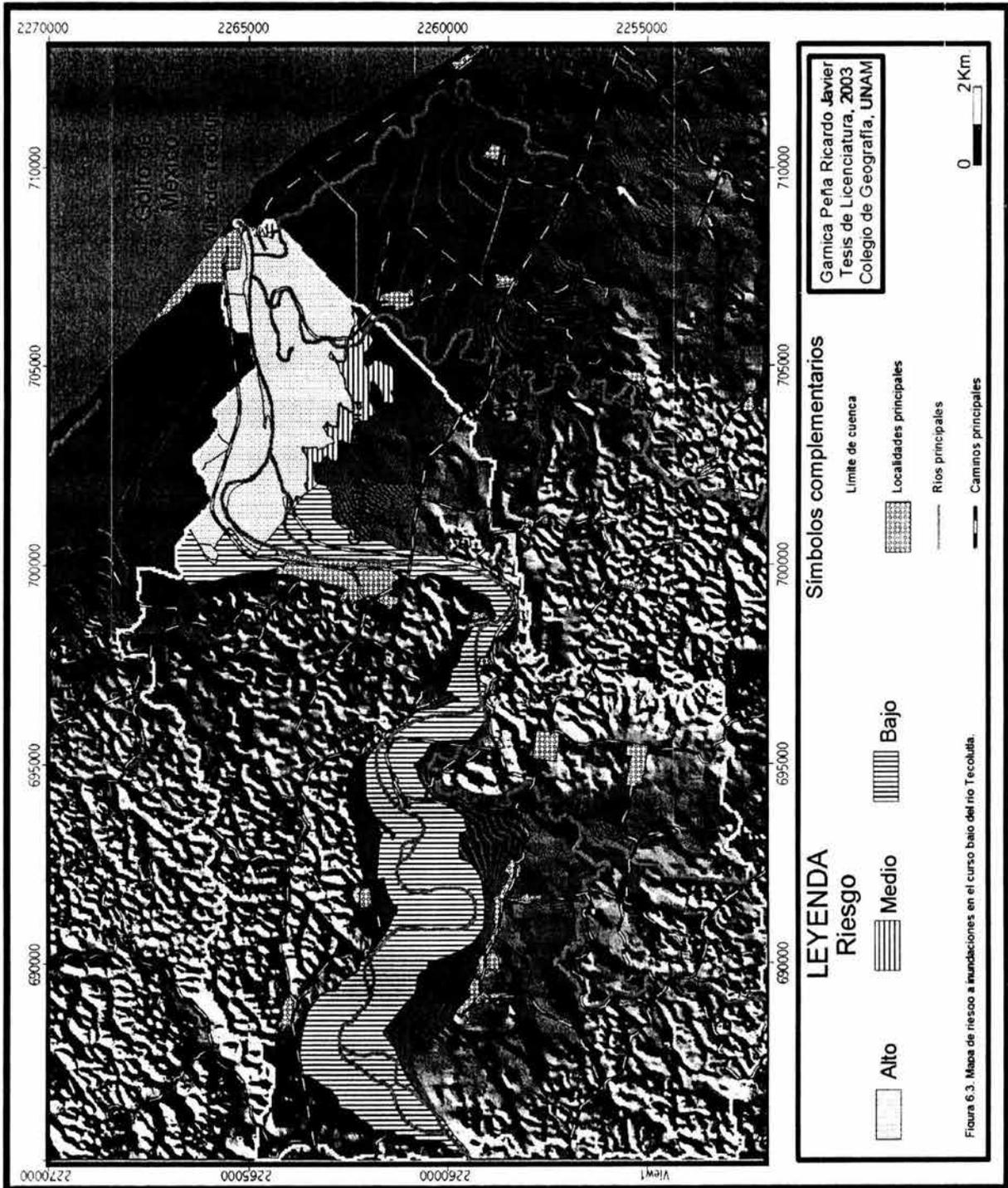


Figura 6.3. Mapa de riesgo a inundaciones en el curso bajo del río Tocolutta.

magnitudes baja y media podrán ser afrontados de manera rápida, en cambio, para situaciones de mayor peligro es necesario crear planes de prevención ya que, como se demostró en 1999, la población no cuenta con las herramientas suficientes para hacer frente a eventos extraordinarios. Por otra parte las localidades que se encuentran al sur del río presentan una vulnerabilidad media, así que los daños causados por inundaciones con periodos de retorno menores de 50 años pueden ser minimizados, por el contrario para inundaciones mayores es necesario la creación de medidas preventivas que de alguna forma intenten minimizar la ocurrencia de un desastre.

Riesgo Bajo

Esta zona, al igual que las anteriores, presenta una alta susceptibilidad a inundaciones, sin embargo, se encuentra dentro del municipio de Gutiérrez Zamora, por lo que las localidades de este entidad no fueron tomadas en cuenta para el análisis de vulnerabilidad razón por la cual aparecen con un nivel de riesgo bajo, pero, es importante mencionar que para un estudio más detallado de esta zona es necesario realizar un análisis de las condiciones socioeconómicas de los habitantes para poder determinar su grado de riesgo. Esta localidades son La Macarena, El Morro, San Antonio Coronado, Ignacio Muñoz, y la cabecera municipal, Gutiérrez Zamora.

CONCLUSIONES

La regionalización de las unidades morfogénicas realizada dentro de este trabajo permitió constatar que las características morfológicas influyen en la ocurrencia de las inundaciones y los movimientos del terreno. En el primer caso las zonas bajas toman gran importancia debido a que son los sitios donde se asienta la mayoría de la población del municipio. Estas áreas están distribuidas en casi toda la zona de estudio y presentan un peligro muy alto debido a la ocurrencia de inundaciones con una alta recurrencia. Por otra parte el conjunto de lomeríos, constituidos por rocas sedimentarias, es el más afectado por la inestabilidad de laderas debido, principalmente, a la pendiente, la geología (principalmente la roca arenisca) y a la influencia antrópica. Esta regionalización pone de manifiesto que los estudios a escala regional son base fundamental para la identificación de zonas que requieren investigaciones más detalladas.

Los eventos ocurridos en octubre de 1999 en el municipio de Tecolutla estuvieron influenciados en gran medida por la precipitación que se registró en aquellas fechas, la cual jugó el papel de detonante de los procesos de remoción en masa y de la inundación, ya que, de acuerdo con el análisis de precipitación, ésta rebasó por mucho los niveles máximos registrados en años anteriores. Este análisis de la información de precipitación permitió inferir el periodo de retorno de los eventos hidrometeorológicos extremos, los cuales se relacionan con las inundaciones y los procesos de remoción en masa como los ocurridos en el mes de octubre de 1999.

Los resultados que se obtuvieron de la manipulación del modelo digital de elevación en combinación con las características de los materiales que constituyen el relieve del municipio utilizando el SINMAP proporcionan una zonificación de las áreas susceptibles a presentar un estado de inestabilidad y que son potenciales para la generación de procesos de remoción en masa. El uso de modelos como SINMAP permite realizar, de manera rápida y sencilla, los cálculos necesarios para zonificar áreas que son potencialmente susceptibles a presentar inestabilidad.

Los resultados obtenidos de SINMAP fueron validados con trabajo de campo. De la misma forma se han desarrollado investigaciones similares para la Sierra Norte de Puebla, con lo cual se ha puesto en relieve la utilidad de dicha metodología.

Las zonas que presentan riesgo alto por procesos de remoción en masa, se caracterizan por tener un relieve escarpado y con materiales que son poco resistentes. Estas zonas se localizan en lugares con poca densidad de población, pero en grandes extensiones de cultivos de cítricos, los cuales son la base del sustento de muchas de las familias del municipio, por lo que es necesario tratar de evitar las actividades agrícolas en zonas susceptibles a procesos de remoción en masa. Cabe mencionar que es importante realizar estudios más detallados sobre inestabilidad en las localidades Plan de Carrizo y Hueytepec, sitios que más daños sufrieron por la ocurrencia de deslizamientos, principalmente el primero, en el cual existe un movimiento activo sobre el cual se asientan los habitantes del pueblo.

Los caudales máximos calculados, a partir de la ecuación propuesta por Domínguez *et al.* (1990), para los diferentes periodos de retorno en combinación con la delimitación de las llanuras de inundación, por medio del programa WMS, permitió conocer las zonas que presentan alta susceptibilidad a inundaciones. A partir de ellas deben desarrollarse medidas preventivas para controlar o contrarrestar el efecto de inundaciones, principalmente con periodos de retorno altos, los cuales, a pesar de su baja probabilidad de ocurrencia, son los que mayores daños pueden causar.

La utilización del programa WMS permitió conocer, a partir del modelo digital de elevación, la información de gastos máximos y el análisis de perfiles transversales, las zonas susceptibles a inundación para un periodo de retorno determinado de forma rápida y simple, con lo cual se demuestra su aplicabilidad en estudios de índole geográfico y principalmente en el ámbito de los peligros naturales y los riesgos asociados a los mismos. Sin embargo, cabe mencionar que el programa es sólo una herramienta de muchas que existen para el estudio de las inundaciones por lo que es importante realizar estudios más detallados acerca de la problemática aquí expuesta para poder corroborar los resultados, además, si es posible, aplicar otra metodología que permita la comparación y así poder obtener información que se aproxime a la

realidad, es decir, este trabajo debe ser tomado como un punto de arranque para estudios posteriores tanto para la zona en cuestión como para otras regiones o localidades.

La comparación de la delimitación de zonas inundables con ayuda de las imágenes de satélite permitió corroborar los resultados obtenidos por medio de la modelación a través de información real contenida en dichas imágenes. Esto da pauta para que en futuros trabajos pueda ser empleada la metodología aquí expuesta, tomando en cuenta que es necesario contar con información más detallada y completa para desarrollar análisis más completos que permitan la creación de medidas preventivas para minimizar los efectos causados por la inundaciones. Con esto se evitarán los problemas con los cuales se enfrentó éste estudio.

Dentro de la zona que presenta alta susceptibilidad a inundaciones se encuentra la cabecera municipal, Villa de Tecolutla, ésta localidad posee un mayor grado de desarrollo, principalmente asociado al turismo, actividad económica que mayores ingresos deja al municipio.

La distribución de la vulnerabilidad dentro del municipio se presenta de forma preferencial, los valores bajos se concentran en las localidades que mayor desarrollo han tenido dentro del municipio, esto gracias a la actividad turística, la cual de alguna forma genera empleos que permiten a la gente obtener ingresos más altos que los habitantes de las demás localidades. Este desarrollo permite a la población hacer frente a diferentes peligros de una manera mucho más rápida. Los valores medios se ubican en zonas en donde las actividades agrícolas permiten a la población obtener recursos que le permiten contar con algunos servicios, sin embargo, al situarse en zonas alejadas de la cabecera municipal y además en zonas de difícil acceso, es difícil poder abastecerlos de los servicios básicos por lo que sus condiciones de vida se presentan como precarias. Las localidades que presentan los valores altos de vulnerabilidad se encuentran en zonas donde no se cuenta con los servicios básicos necesarios, además de que en la mayoría de los casos son localidades cuyas viviendas están constituidas de materiales de muy poca resistencia por lo que presentan una alta probabilidad a sufrir los efectos de cualquier peligro natural. Estas

localidades se ubican en la porción centro y sur del municipio, siendo esta última la zona en la cual se presenta una alta susceptibilidad a procesos de remoción en masa, mientras que en la primera es alta la susceptibilidad a inundaciones. Por esta razón es necesario tomar medidas precautorias, fomentar la prevención, así como llevar a cabo monitoreos tanto de las laderas del municipio como del comportamiento del río Tecolutla para evitar situaciones como las ocurridas en octubre de 1999. Además es importante realizar estudios más detallados par poder recopilar información más precisa de la dinámica de ambos peligros.

El análisis del riesgo permitió detectar zonas susceptibles a sufrir daños por la ocurrencia de inundaciones y procesos de ladera, esto en función del grado de peligro y de vulnerabilidad. Este consistió en la integración del índice de susceptibilidad, tanto para las inundaciones como para los procesos de remoción en masa, y el índice de vulnerabilidad. Los resultados obtenidos permiten hacer algunos comentarios; las zonas bajas, principalmente en la planicie aluvial del río Tecolutla, muestran una alta susceptibilidad a inundaciones con periodos de retorno de 2, 10, 50, 100 y 1000 años, esto aunado a la presencia de localidades en los márgenes del río que presentan diferentes grados de vulnerabilidad, siendo la cabecera municipal la localidad más importante, por lo que es necesario llevar a cabo planes que permitan prevenir los efectos causados por la ocurrencia de inundaciones, y así de esta manera evitar tragedias como la ocurrida en octubre de 1999.

Con este trabajo se pueden sentar las bases para, posteriormente, desarrollar acciones que permitan minimizar el grado de afectación por inestabilidad e inundaciones. De tal manera que es importante recomendar el reordenamiento en el crecimiento de los asentamientos humanos y de las actividades económicas, los cuales deberán ocupar las zonas más aptas para el desarrollo de los mismos.

Este trabajo muestra de forma muy general un estudio en el cual se integró e interrelacionó la información física y social y la aplicabilidad que puede tener en planes de desarrollo.

REFERENCIAS

- Abbott, P. (1996) *Natural disasters*. Wm. C. Brown Publishers. Dubuque, IA. 438 pp.
- Alcántara Ayala, I. (1999) The Torviscon, Spain, landslide of February 1996: the role of lithology in a semi-arid climate. *Geofísica internacional*, Vol. 38, No. 3, 175-184.
- Alcántara Ayala, I. (2000) Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. No. 41 UNAM México, 9-25.
- Alcántara Ayala, I., Echavarría, A., Gutiérrez, C., Domínguez, L., Noriega, I. (2001) Inestabilidad de laderas. Serie fascículos 11. CENAPRED. México. 36p.
- Alcántara Ayala, I. (2002) Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology* 47, 107-124.
- Alcántara Ayala, I. y Flores, P. (2002) Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. No. 49. UNAM. México, 7-26.
- Alexander, D. (1993) *Natural disasters*. Chapman & Hall. New York. 632 pp.
- Baker, V. (1994) Geomorphological understanding of floods. *Geomorphology* 10, 139-156.
- Bates, P. and De Roo, A. (2000) A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology* 236, No. 1-2, 54-77.
- Bello, R. (1978) Estudio estratigráfico y diagenético de 13 pozos localizados al sur del río Cazonos, en la Faja de Oro. *Bol. Soc. Geol. Mexicana*. Tomo 39, No. 2, 34-41.
- Belt, B. (1925) Stratigraphy of the Tampico District of Mexico. *Bull. American Assoc. Petrol. Geol.* Vol. 9 No. 1, 136-144.
- Benavides, L. (1956) Symposium sobre yacimientos de petróleo y gas. América del Norte. Juan Guzmán (ed.) Vol. 3. México. 562 p.
- Bitrán, D. (2001) Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99. CENAPRED. México. 107pp.

- Blong, R. (1973) Relationships between morphometric attributes of landslides, *Zeitschrift fur Geomorphologie*, Supplement Band 18, 66-77.
- Bocco, G. et al. (1993). Evaluación del impacto de las inundaciones en Tijuana (enero de 1993). Uso integrado de percepción remota y sistemas de información geográfica. *Frontera Norte*, 5(10), 53-84.
- Borja, R. (2003) Análisis de susceptibilidad y riesgos asociados a procesos de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla. Tesis-UNAM, México, 145pp.
- Brunnsden, D. (1973) The application of systems theory to the study of mass movement, *Geologia Applicata e idrogeologia*, University of Bari, 8, 1, 185-207.
- Brunnsden, D. (1984) Mudslides, in Brunnsden, D. y D. B. Prior (eds.), *Slope Instability*, Wiley & Sons, Chichester, 363-418.
- Cannon, T. (1994) Vulnerability Analysis and the explanation of "Natural" disasters. In Valey (1994). *Disasters, Development and Environment* Ed. John Wiley & Sons, 13-30.
- Casale, R. (1999) *Floods and landslides: integrated risk assessment*. Springer. New York.
- Castillo, M. (2000) Análisis geográfico del municipio de Tecolutla, Veracruz, 1999. Tesis-UNAM, 119p.
- C.F.E. (1977) *Boletín Hidrométrico: cuenca del río Tecolutla*. Vol. 7, 489 p.
- C.F.E. (1982) *Manual de diseño de obras civiles*. Sección A. Tema 1. Capítulo 6. Análisis estadístico. México.
- Coates, D. (1977) Landslides: Geological Society of America. *Reviews in Engineering Geology*. Vol. III, 278 p.
- Coates, D. (1981) *Environmental geology*. Wiley. New York. 710 pp.
- Costa, J. (1981) *Surficial geology: Building with the earth*. Wiley. New York. 497 pp.
- Crozier, M. (1973) Techniques for the morphometric analysis of landslips, *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 17, 78-101.
- Cruden, D. y Varnes, D. (1996) Landslides types and processes, in Turner, A. y R. Schuster (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C., 36-75.

- Chang, T. J., Hsu, M. H., Teng, W.H., Huang, C.J. (2000) A GIS-assisted distributed watershed model for simulating flooding and inundation. *Journal of the American Water Resources Association* 36, No. 5: 975-988.
- Chorley, R. (1967) *Models in Geomorphology*. In: R.J. Haggett (ed.) *Models in Geography*, Methuen, London, 59-96.
- Chow, V.T. (1964) *Handbook of applied hydrology; a compendium of water-resources technology*. McGraw-Hill. New York.
- Chowdhury, M. (2000) An assessment of flood forecasting in Bangladesh: The experience of 1998 flood. *Natural Hazards* 22, No. 2: 139-163.
- DeBarry, P. y Quimpo, R. (1999) GIS modules and distributed models of the watershed: report/ ASCE Task Committee on GIS Modules and Distributed Models of the Watershed. American Society of Civil Engineers. Virginia. 120 p.
- De Pedraza, J. (1996) *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Rueda. Madrid. 414 pp.
- Dietrich, W. (1986) Hollows, colluvion and landslides in soil-mantled landscapes, Chapter 17 in *Hillslope Process*, edit by A.D. Abrahams, Allen and Unwin Boston, 361-388.
- Dikau, R et al. (1996) *Landslide recognition, identification, movement and causes*, John Wiley & Sons, Chichester, U.K..
- Domínguez, R., Martínez, R., Vázquez, M.T. (1990) Análisis regional para caracterizar estadísticamente los gastos máximos anuales en zonas sujetas a la incidencia directa de ciclones. CENAPRED. México. 92p.
- Domínguez, R., Fuentes, O., García, F. (1999) *Inundaciones. Serie Fascículos No. 3*. CENAPRED. México 28p.
- Dumble, E. (1918) Geology of the northern end of the Tampico Embayment Area. *Proc. Calif. Acad. Sci. Ser. 4 Vol.8*, 113-156.
- Enzel, Y., Ely, L., House, P., Baker, V., Webb, R. (1993) Paleoflood evidence for a natural upper bound to flood magnitudes in the Colorado River Basin: *Water Resources Research.*, 29, 2287-2297.
- Enzel, Y. and Wells, S. (1997) Extracting Holocene paleohydrology and paleoclimatology information from modern extreme flood events: an example for southern California. *Geomorphology* 19, No. 3-4, 203-226.

- EPOCH (European Community Programme; 1993), temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community, Flageollet, J. (ed.), 3 volumes, Contract no. 90 0025.
- Erskine, C. (1973) Landslides in the vicinity of the first Randall Reservoir, S. Dakota, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 675, 64 p.
- Flores, P. (2002) Inestabilidad de las laderas y riesgos asociados en Teziutlán, Puebla. Tesis-UNAM, México 120 p.
- Garbrecht, J. and Martz, L. (1995) TOPAZ: An automated Digital Landscape Analysis Tool for Topographic Evaluation. Drainage identification. Watershed segmentation, and subcatchment Parameterization: Overview, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS Publication No. NAWQL 95-1, 17 p.
- Gritzner, M. (2001) Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modelling and topographic attributes, Payette River, Idaho. *Geomorphology* 37, 149-165.
- Gutiérrez Valdés, M. (1989) Estudio geomorfológico y su relación con la conservación de los recursos naturales en el municipio de Xilotepec de Juárez, Estado de Puebla. Estudio morfométrico y morfodinámico. Tesis-UNAM, México, 84 p.
- Hardisty, J., Taylor, D., Metcalfe, S. (1993) Computerised environmental modeling. Jhon Wiley and Sons.
- Harvey, D. (1967) *Explanation in Geography*. Edward Arnold, London.
- Hutchinson, J. (1968) Mass movement, en Fairbridge, R. (ed.), *Encyclopedia of earth Sciences*, Reinhold, New York, 688-695.
- Hutchinson, J. (1988) General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrogeology, in Bonnard, C. (ed.), *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, vol. I, 3-35.
- INEGI (1983) Carta geológica E14-12 Poza Rica, México.
- INEGI (1998) NIBA Niveles de Bienestar por AGEB (Área Geoestadística Básica). México.
- INEGI (2000) SCINCE Sistema de Consulta de Información Censal 2000. México.
- INEGI (2000) CONTAR 2000 Sistema de Consulta de Tabulados y Bases de Datos. ITER Integración Territorial. México.

- INEGI (2000) XII Censo General de Población y Vivienda. Tabulados Básicos. México.
- Jiménez, M. (1991) Diagnostico sobre inundaciones ocurridas en las principales cuencas de la república mexicana (Regiones Hidrológicas No. 19, 20, 21 y 22), CENAPRED, México, 33 p.
- Jones, D. (1992) Landslide hazard assessment in the context of development. In McCall, G. (ed.) Geohazards: Natural and man-made. Chapman & Hall. London. 227 p.
- Kale, V. (1997) Flood hydrology and geomorphology of monsoon-dominated rivers; the Indian Peninsula. *Water Int.* 22, 259-265.
- Kidner, D. y Smith, D. (2003) Advances in the data compression of digital elevation models. *Computers & Geosciences*. 1-18 (en revisión).
- López-Blanco, J. (1994) Evaluaciones geomorfológicas y de recursos naturales aplicando un sistema de información geográfica (ILWIS). Tesis de Doctorado-UNAM. México, 222 p.
- López Ramos, E (1979) Geología General de México. Tomo III.5ª Edición. México.
- López Ramos, E. (1982) Geología de México. Tomo II. 3ª Edición. Instituto de Geología.
- Lucheveva, A. (1976) Hidrología práctica. Ed. Hidrometeoisdat.
- Lugo Hubp, J. (1991) Elementos de geomorfología aplicada (Métodos cartográficos). Instituto de Geografía, UNAM, México, 109 p.
- Lugo Hubp, J. et al (1995) Deslizamiento de tierras en Metztlitlán, Hidalgo. *Ciencia y Desarrollo* Vol. 21, No. 121, 53-60.
- Lugo Hubp, J. et al (2001) Procesos gravitacionales en las montañas de Puebla. *Ciencia y Desarrollo*. Vol. 27 No. 157. 25-33
- Marcos, J. (2003) Distribución espacial de los procesos de remoción en masa y riesgos asociados en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla. Tesis-UNAM, México 151 p.
- Martínez, S. (2000) Introducción a la hidrología superficial. UAA, Aguascalientes. 330 p.
- McCall, G. (1992) Natural and man-made hazards: their increasing importance in the end-20th century world. In McCall, (ed.) Geohazards: Natural and man-made. Chapman & Hall. London. 227 p.

- Miller, D. (1995) Coupling GIS with physical models to assess deep-seated landslide hazards. *Environ. Eng. Geosci.* 1 (3), 263-276.
- Montgomery, D. and Dietrich, W. (1994) A physically model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30 (4), 1153-1171.
- Olivas, R. (1953) Informe Geológico de la provincia del Macizo de Teziutlán, Puebla. *Asoc. Méx. Geólogos*. Vol. 5.
- Ortiz, M., Oropeza, O., Palacio, A. y D'Luna, A. (1991) Zonas susceptibles a desastres por fenómenos naturales. Inundaciones. *Atlas Nacional de México*. Instituto de Geografía. UNAM.
- Pack, R.T. (2001) SINMAP user's manual. Utah State University.
- Pack, R. et al (2001) Assessing terrain stability in a GIS using SINMAP. Presented at the 15th annual GIS conference, February 19-22, Vancouver, British Columbia.
- Pedrazzini, C. (1978) Facies, ambientales y desarrollo de la plataforma cretácica de Tuxpan-Tecolutla (Faja de Oro). *Bol. Soc. Geol. Mexicana*, Tomo 39, No. 2, 118-125.
- Penck, A. (1894) *Morphologie der Erdoberfläche*, 2 Vols. 471 and 696.
- Pereyra, D. y Hernández, A. (1989) Avenida de diseño: cuando no se tiene registros hidrométricos en el sitio del proyecto. *GEOS, Bol. Unión Geofís. Mex.*, 9, 95-102.
- Pereyra, D. (1993) Estimation of the design flood of Tecolutla River, Mexico, using the probable maximum rainfall. *Geofísica internacional* 32, no. 1. 35-39.
- Pérez, B. (2001) Vulnerabilidad a inundación en el curso bajo del río Papaloapán, Veracruz. Tesis de Maestría-UNAM, México, 171p.
- Puecker, T. and Douglas, D. (1975) Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. *Computer and Image Processing*, Vol. 4. 375-387.
- 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, 289-323.
- Robin, C. (1976) Las series volcánicas de la Sierra Madre Oriental (basaltos e ignimbritas) Descripción y caracteres químicos. *Rev. No. 2, Inst. de Geolo. UNAM*.

- Romo, M. y Ortiz, M. (2001) Riesgo de inundación en la llanura fluvial del curso bajo del río San Pedro, Nayarit. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía No. 45, UNAM, 7-23.*
- Rostvedt, J. (1968) Summary of floods in the United States during 1963. Washington, D.C.: U.S. Dept. of the Interior, Geological Survey. 124 p.
- Ruiz Sains, P. (1965) Estudio geológico preliminar del área de Teziutlán, estado de Puebla. Tesis-IPN, 133 p.
- Salvador, A. (1991) The Gulf of Mexico Basin. *Geol. Soc. Amer. Colorado.* 568 p.
- Selby, M. (1982) Hillslope materials and processes. Oxford University Press. 264 p.
- Sharpe, C. (1938) Landslides and related phenomena, Columbia University Press, New York.
- Sidle, R. (1985) Hillslope stability and land use. *Water Resources Monograph 11* edition. American Geophysical Union. 140 p.
- Skempton, A. (1953) Soil mechanics in relation to Geology, *Proceeding of the Yorkshire Geological Society, 29, 33-62.*
- Skempton, A. (1957) Stability of natural slopes in London clay. *Proc. 4th Int. Conf. On soil Mechanics. Foundation Engineering, London, 2, 378-381.*
- Smith, K. (1996) *Environmental Hazards. Assessing risk and reducing disaster.* Ed. Routledge. London. 389 p.
- Tapia Varela, G. y López Blanco, J. (2002) Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogénicas a escala 1:100,000. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 19, No. 1, 50-65.*
- Tarboton, D. (1997) A new method for the determination of flow direction and contributing areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research, 33(2), 309-319.*
- Terzaghi, K. (1950) Mechanisms of landslides, *Geol. Soc. Amer., Berkeley Volume, 83-123.*
- Varnes, D. (1958) Landslides types and processes, in Eckel, E. (ed.), *Landslides and Engineering Practice, Highway Res. Board Special Report 29, 20-47.*
- Varnes, D. (1978) Slope movements, types and processes, *Landslides: Analysis and control, transportation research board, Spec. Rep. 176, 11-33, National Academy of Science, Washington.*

- Verstappen H. and van Zuidam, R. (1991) The ITC system of geomorphologic survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards: ITC Publication, 10, 89 p.
- Vcn Bertalanffy, L. (1978) Tendencias en la teoría general de sistemas. Ed. Alianza Madrid, España.
- Ward, W. (1945) The stability of natural slopes. Geographical Journal, 105, 170-197.
- Zaruba, Q. y V. Mencl (1969) Landslides and their control, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.



FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA