



Universidad Nacional
Autónoma de México

Facultad de Filosofía
y Letras

Centro de Investigaciones
en Geografía Ambiental

Maestría en Manejo Integrado del Paisaje

Inestabilidad de laderas en la Zona de Montaña de la ciudad de Puerto Vallarta, Jalisco

Caracterización, susceptibilidad e implicaciones relacionadas con el crecimiento urbano

Tesis Profesional

Para obtener el grado de
Maestro en Geografía

Presenta

Jesús Arturo Muñiz Jauregui

Directores de Tesis

Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal
Dr. Lorenzo Vázquez Selem

Junio 2009 - Morelia. Mich.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios por seguirme dando el Don de la vida y la libertad de decisión. Agradezco a mis padres por su cariño, apoyo y paciencia. De la misma forma mi total agradecimiento a mis tutores; Víctor Manuel Hernández y Lorenzo Vázquez por sus enseñanzas, su guía, su tiempo y por lo mucho que he aprendido de dos personas de gran calidad y capacidad.

Quiero agradecer a la UNAM; institución que me dio la oportunidad, el espacio y las herramientas para realizar mis estudios, además de brindarme el apoyo económico por medio de la Coordinación de Estudios de Posgrado, sin el cual no hubiera podido cursar la maestría. Mis agradecimientos también para el CIGA por los apoyos que tuve para realizar mi tesis, a todos los investigadores que compartieron sus conocimientos a lo largo de estos dos años, en especial a Luis Miguel Morales de quién tuve la oportunidad de aprender un poco de lo mucho que él sabe, así como por su confianza que siempre me demostró y de quién adquirí conocimientos que fueron base para desarrollar este estudio.

Agradezco a la empresa Cartodata en la persona de su presidente Henric Audirac y de Felipe Arriaga por su valioso apoyo y las facilidades otorgadas para adquirir las fotografías áreas de la zona de estudio.

Lo mismo a la Unidad Municipal de Protección Civil de Puerto Vallarta por la disposición y apoyo en campo y por la información otorgada. A Jorge Téllez del CUCosta de la Universidad de Guadalajara por su atención y pronta ayuda.

Y claro, a Luis Valdivia y Rocío Castillo por su aliento y ayuda para realizar la maestría.

También les doy las gracias a los Dragones, para aquellos que siempre me ayudaron y me tendieron la mano en estos dos años, que aún lejos, mi intención siempre fue estar cerca. En especial para ustedes muchachos, gracias.

Para terminar no quiero dejar de agradecer a mis compañeros y amigos de la generación: Rocío, Giovanni, Angélica, Néstor, Silvia y Michel, y no dejo a un lado a Toño, por la amistad brindada.

Y para todos mis amigos que siempre me estuvieron dando ánimos y aliento.

ÍNDICE

	Pág.
Introducción	1
I. Marco teórico	3
I.1 Los Fenómenos de Inestabilidad de Laderas.....	3
I.1.1 Clasificación de los tipos de movimientos.....	5
I.1.1.1 Caída (fall).....	5
I.1.1.2 Vuelco (topple).....	6
I.1.1.3 Deslizamiento rotacional (slide rotational).....	7
I.1.1.4 Deslizamiento traslacional (slide translational).....	8
I.1.1.5 Extensión lateral (lateral spreading).....	9
I.1.1.6 Flujo (flow).....	10
I.1.1.7 Complejos (complex).....	12
I.2 Zonificación de la Susceptibilidad a Fenómenos de Inestabilidad de Ladera.....	12
I.2.1 Método heurístico.....	13
I.2.2 Método determinístico.....	13
I.2.3 Método estadístico.....	14
II. Inestabilidad de laderas en Puerto Vallarta	16
II.1 La Zona de Estudio.....	16
II.1.1 Factores desencadenantes y condicionantes de inestabilidad de ladera.....	18
II.1.1.1 Geología.....	18
II.1.1.2 Geomorfología.....	24
II.1.1.3 Clima (precipitaciones).....	27
II.1.1.4 Vegetación.....	28
II.1.2 Tipos de movimientos de remoción en masa identificados en Puerto Vallarta.....	29
II.1.2.1 Caída de detritos en bloque.....	29
II.1.2.2 Caída de rocas.....	30
II.1.2.3 Deformaciones gravitacionales profundas de ladera (flujo de rocas).....	31
II.1.2.4 Deslizamientos traslacionales.....	33
II.1.2.5 Deslizamientos rotacionales.....	35
II.1.2.6 Flujo de detritos (debris flow).....	37
II.2 Desastres Ocurredos por Fenómenos de Inestabilidad de Ladera en Puerto Vallarta.....	38
II.2.1 Julio 1975.....	38
II.2.2 Septiembre 1993.....	39
II.2.3 Temporal 2005.....	40
II.2.4 Abril 2007.....	42
II.2.5 Agosto 2007.....	42
II.2.6 Julio 2008.....	43
II.3 Inestabilidad de Laderas y Crecimiento Urbano.....	45

III. Elaboración del mapa de susceptibilidad	51
III.1 Elaboración de Capas Temáticas.....	54
III.1.1 Litología.....	54
III.1.2 Áreas de desmonte.....	55
III.1.3 Zonas inestables por caminos.....	56
III.1.4 Distancia a morfolineamientos.....	59
III.1.5 Radiación solar.....	60
III.1.6 Inventario de deslizamiento y su zona de influencia.....	61
III.1.7 Cortes en talud.....	65
III.1.8 Inestabilidad por deslizamientos superficiales.....	66
III.1.8.1 Aplicación del modelo.....	69
III.1.9 Concentración de flujos.....	72
III.1.9.1 Procedimiento.....	74
III.1.10 Asentamientos humanos.....	76
III.1.10.1 Procedimiento.....	77
III.2 Obtención del Mapa de Susceptibilidad.....	79
IV. Susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de ladera en Puerto Vallarta	83
IV.1 Resultados.....	83
IV.1.1 Susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de laderas bajo las Condiciones actuales (2006) de la zona urbana.....	83
IV.1.2 Susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de laderas para la zona urbana bajo condiciones de la mancha urbana propuesta.....	84
IV.2 Crecimiento Urbano y Susceptibilidad a Fenómenos de Inestabilidad de Ladera, Puerto Vallarta.....	85
IV.2.1 Cambios entre la susceptibilidad general bajo las condiciones de la zona urbana actual y la susceptibilidad general bajo condiciones de la zona urbana propuesta.....	85
IV.2.2 Susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de laderas para la superficie que cubre la zona urbana actual (2006).....	86
IV.2.3 Susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de laderas para la superficie que cubre la zona urbana que proyecta el PDU.....	89
IV.2.4 La expansión proyectada de la zona urbana y susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de laderas.....	90
Discusión	93
Conclusiones	95
Recomendaciones	97
Bibliografía	98
Anexo cartográfico	104

ÍNDICE DE FIGURAS	Pág.
Figura 1. Caída de bloques de roca en acantilados.....	6
Figura 2. Movimiento de vuelco en ladera.....	7
Figura 3. Movimiento de deslizamiento rotacional.....	8
Figura 4. Movimiento de deslizamiento raslacional.....	9
Figura 5. Movimiento de extensión lateral.....	10
Figura 6. Movimiento de flujo.....	14
Figura 7. Localización de Puerto Vallarta, Jalisco.....	16
Figura 8. Zona de estudio.....	17
Figura 9. Mapa de unidades litológicas.....	19
Figura 10. Granito en Mismaloya el cual presenta poco fracturamiento, A la derecha se muestra la interpretación hecha a la primera imagen donde se marcaron fracturas y diaclasas del macizo rocoso.....	20
Figura 11. Andesitas de la secuencia vulcanosedimentaria, en la zona de Conchas Chinas. Esta andesita se encuentra muy fracturada. En la imagen de la derecha se resalta las fracturas que presenta una distribución irregular donde las diaclasas se interceptan por fracturas de menor dimensión perpendiculares a esta.....	22
Figura 12. Secuencia terrígena inferior. El corte permite identificar tres capas (imagen derecha). Tanto la capa superior como la inferior están formadas por arenas (A) y la capa intermedia está formada por arenas y clastos (B). Este corte se localiza en las cercanías de la población de Ixtapa al norte de la zona de estudio.....	23
Figura 13. Secuencia terrígena inferior superior, donde se puede observar que los tipos de clastos que constituyen a esta secuencia, siendo estos los que mayormente la componen.....	24
Figura 14. Mapa de unidades geomorfológicas.....	26
Figura 15. Vista en perspectiva del relieve en la zona de estudio.....	26
Figura 16. Formación de una tromba frente a las playas de Vallarta en 1959.....	28
Figura 17. Vegetación del tipo selva mediana sub-caducifolia.....	28
Figura 18. Sitio que fue desprovisto de la vegetación para el desarrollo de construcciones. Fuente: Periódico NoticiasPV.com; 15 de mayo 2007.....	29
Figura 19. Se ilustra el movimiento de caída en bloques encontrado en un banco de material en la zona del poblado de Ixtapa (El bloque fue resaltado para su mejor visualización). A la derecha se ilustra en perfil el movimiento ocurrido.....	30
Figura 20. Caída de rocas en un escarpe de andesitas. El tamaño promedio de las rocas caídas es de 30 cm. Se localizó en el camino a la colonia Buenos Aires al salir del Libramiento.....	31

Figura 21. Dos deformaciones gravitacionales profundas de ladera, identificadas en la cuenca del río Pitillal. Las medidas que se presentan son aproximadas y la escala dentro de la misma imagen puede variar ya que es una vista en perspectiva En el mapa de localización de la izquierda se señala la ubicación exacta del sitio.....	32
Figura 22. Par estereoscópico de las dos deformaciones gravitacionales profundas (figura 21). Los deslizamientos se señalan con una flecha.....	32
Figura 23. Rocas de un deslizamiento traslacional en Conchas Chinas las cuales presentaban arcilla (delimitado por la línea blanca) dentro de las diaclasas, este posible factor que contribuyo al debilitamiento de la masa de rocas. Un deslizamiento de rocas en la carretera federal 200, este deslizamiento se presento sobre granitos. En la imagen de la derecha se muestra un deslizamiento sobre andesitas muy fracturadas que presentaban arcillas dentro de diaclasas. El deslizamiento pudo ser causado por las modificaciones a la pendiente por la construcción de un edificio de departamentos el cual se puede observar a la izquierda de la imagen.....	33
Figura 24 (a). Deslizamientos superficiales (detritos). Deslizamiento de suelo y detritos sobre andesitas, causado por el debilitamiento de la base de la pendiente debido a la construcción de un camino en un cerro contigua a la comunidad de Playa Grande.....	34
Figura 24 (b) Deslizamiento de suelo y detritos sobre andesitas en camino hacia la población de Paso Ancho, que se puede catalogar como remóntate ya que es causado por la pérdida de su base posiblemente por un deslizamiento anterior.....	34
Figura 24 (c) Deslizamiento de suelo sobre granito en Mismaloya, aquí el material que se desliza contiene pocos fragmentos de roca en comparación de lo que se presenta en andesitas.....	34
Figura 24 (d) Deslizamiento ocurrido en condiciones naturales dentro del cañón del río Cuale, donde aparentemente no existió alguna intervención antrópica, lo que puede indicar que no es necesaria una modificación de las condiciones naturales para que se presente un deslizamiento en la zona.....	34
Figura 25. Deslizamientos (traslacionales) de roca. En la imagen de la izquierda se presenta la cicatriz de un deslizamiento de rocas en la carretera federal 200, este deslizamiento se presentó sobre granitos. En la imagen de la derecha se muestra un deslizamiento sobre andesitas muy fracturadas que presentaban arcillas dentro de diaclasas. El deslizamiento pudo ser causado por las modificaciones a la pendiente por la construcción de un edificio de departamentos el cual se puede observar a la izquierda de la imagen.....	35

Figura 26. En la imagen de la izquierda se muestra un deslizamiento rotacional que ocurrió en residencial Villas de la Colina II en el 2007. A la derecha se muestra una fotografía tomada en octubre de 2008 de un muro bajo una terraza la cual presenta agrietamientos por el desplazamiento del talud, este también se encuentra en residencial Villas de la Colina II lo que hace pensar en que de nuevo se está presentando el fenómeno deslizamiento rotacional.....	36
Figura 27. Se ejemplifica el proceso que ocurre en residencial Villas de la Colina II y en el andador Olas altas donde parte del talud se está deslizando, ocasionando que las constricciones que se encuentra en la parte superior presenten agrietamientos por el hundimiento en su cimiento.....	36
Figura 28. La imagen de la izquierda muestra una serie de escalones que presentan deformación debido a desplazamientos en el andador Olas Altas.....	37
Figura 29. Restos dejados por un flujo de detritos que ocurrió en el año 2005 después que una tromba golpeará sobre la ladera de un cerro cercano al poblado de Playa Grande. En la imagen se distingue en primer plano un bloque con un tamaño cercano a los 2 m de alto por 3 de ancho, que fue arrastrado y refiere a la fuerza con la que bajan los flujos de detritos.....	38
Figura 30. Nota periodística de El Informador con fecha del 7 de julio de 1975, de la cual se extrajo la información del evento de flujo que afecto al hotel Camino Real.....	39
Figura 31. La imagen de la izquierda muestra la cañada por donde bajo el flujo de detritos en la calle Abasolo. La imagen de la derecha muestra una barda que fue parte de la casa que fue derrumbada por el flujo de 1993 sepultando y matando a dos de sus habitantes en la calle Abasolo en las partes altas del centro de la ciudad.....	40
Figura 32. En la imagen de la izquierda se muestran detritos y bloques de rocas arrastrados por el flujo que afecto la granja piscícola. La imagen de la derecha de Google Earth (2006) muestra el canal seguido por el flujo y su respectiva zona de depósito en el año 2005. El punto amarillo indica el lugar y la dirección donde fue toma la imagen de la izquierda.....	41
Figura 33. Imagen que muestra los detritos dejados sobre el lecho de arroyo por el paso del flujo de detritos en el año 2005. Las fechas señalan la dirección del flujo.....	41
Figura 34. Imagen tomada del periódico El Faro (2007) donde se muestra el deslizamiento ocurrido en Villas de la Colina II.....	42
Figura 35. En la imagen de la izquierda (Noticiaspv.com, 2007) se puede observar el material que fue arrastrado por el flujo. En la imagen de la derecha se muestra parte de la casa que fue destruida por el flujo detritos.....	43

Figura 36. En la imagen de la izquierda se muestra las alteraciones a la ladera del cerro realizadas por una construcción. En la imagen de la derecha se muestra el material deslizado y los fragmentos de la barda que fue tirada por un flujo de detritos en julio de 2008.....	44
Figura 37. Mapa de localización de los desastres descritos.....	45
Figura 38. Vista desde la zona de montaña hacia el centro histórico y bahía del Puerto.....	46
Figura 39. Cortes realizados a los cerros para la construcción de edificaciones.....	47
Figura 40. En la imagen de la izquierda se presenta la extensión urbana para el año 2006. En la imagen de la derecha se muestra la última versión del PDU. En este se observa que en el área al sur antes una zona de conservación, se proyecta que exista uso urbano, en especial turístico.....	48
Figura 41. Imagen extraída de la manifestación de impacto ambiental (MIA) presentada a la Secretaría de Comunicaciones y Transporte donde se establece el trazo proyectado para el libramiento. Comunicaciones y Transporte donde se establece el trazo proyectado para el libramiento.....	49
Figura 42. Esquema metodológico seguido para la elaboración del mapa de susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de ladera en Puerto Vallarta.....	53
Figura 43. Capa de litología con pesos.....	55
Figura 44. Capa de áreas de desmonte con pesos.....	56
Figura 45. Capa de zonas inestables por caminos con pesos.....	59
Figura 46. Capa de distancia a morfolineamientos con pesos.....	60
Figura 47. Capa de radiación solar con pesos.....	61
Figura 48. Capa de deslizamiento y su zona de influencia con pesos.....	64
Figura 49. Capa de cortes en talud con pesos.....	65
Figura 50. Capa inestabilidad por deslizamientos superficiales con pesos.....	72
Figura 51. Figura tomado del manual de usuario del HidroTool donde se ilustra la forma cómo es calculada la concentración para cada tipo de algoritmo usado por la función de “Flow Accumulation”.....	74
Figura 52. En la Imagen de la izquierda se presenta el modelo de concentración resultado de aplicar el algoritmo “Flow Acucumulation” y en la imagen de la derecha se presenta el resultado al extraer los rangos de valores de 50 a 500, considerados como aquellos que representan las zonas donde se pueden presentar los flujos de detritos.....	75
Figura 53. Capa de concentración de flujos con pesos.....	75
Figura 54. En la imagen de la izquierda se presenta la capa correspondiente a las zonas con asentamientos urbanos actuales. En la imagen de la derecha se presenta la capa que corresponde a los asentamientos actuales más la zona proyectada para el crecimiento urbano.....	78

Figura 55. Mapa de susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de laderas de Puerto Vallarta, bajo las condiciones actuales de la zona urbana.....	83
Figura 56. Mapa de susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de laderas de Puerto Vallarta, bajo las condiciones de la zona urbana proyectada.....	85
Figura 57. Corte que cubre la zona urbana 2006, marcada con el límite del área de estudio.....	87
Figura 58. Sitio que presenta actualmente una importante superficie con susceptibilidad Alta y Muy alta a fenómenos de inestabilidad de ladera en Puerto Vallarta.....	88
Figura 59. Corte de la superficie que cubre la zona urbana propuesta por el PDU.....	90

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfico 1a. A la izquierda se presenta el climograma para la ciudad de Puerto Vallarta.....	27
Gráfico 1b A la izquierda se presentan las lluvias máximas en 24 horas para cada mes del año....	27
Gráfico 2. Distribución de las superficies según su nivel de susceptibilidad bajo las condiciones actuales de la zona urbana.....	84
Gráfico 3. Cambios que presentaron las categorías de susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de laderas de las condiciones actuales de la zona urbana a las condiciones de la zona urbana propuesta.....	86
Gráfico 4. Distribución de las superficies según su nivel de susceptibilidad para la superficie que cubre la zona urbana actual (2006).....	88
Gráfico 5. Distribución de las superficies según su nivel de susceptibilidad para la superficie que cubre la zona urbana propuesta por el PDU.....	89
Gráfico 6. Incrementos presentados por clases de susceptibilidad para la superficie que cubre la zona urbana proyectada por el PDU.....	91
Gráfico 7. Comparación de las superficies por clase de susceptibilidad de la zona urbana actual (2006) y la zona urbana proyectada por el PDU.....	91
Gráfico 8. Distribución de las categorías de susceptibilidad sólo para la superficie que de nuevo crecimiento de la ciudad de acuerdo con el PDU.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Pesos otorgados a cada unidad litológica.....	54
Tabla 2. Tipología de caminos y su área de afectación a la estabilidad de laderas.....	57
Tabla 3. Peso otorgados a deslizamientos.....	62
Tabla 4. Distancia consideradas como zona de influencia para los deslizamientos.....	63
Tabla 5. Parámetros usados para correr el modelo de inestabilidad de SINMAP.....	70
Tabla 6. Rangos y pesos establecidos para la inestabilidad por deslizamientos superficiales.....	66
Tabla 7. Intensidades que considera el PDU y pesos asignados según su tipo de intensidad.....	77
Tabla 8. Valores de medición de parámetros.....	80

Tabla 9. Matriz de comparación de capas según su nivel de relevancia considerado para definir la ocurrencia fenómenos de inestabilidad de laderas.....	80
Tabla 10. Ponderación de valores a partir del análisis de temas en “Perfect Choice”	81
Tabla 11. Superficies resultantes según su susceptibilidad para la superficie que cubre la zona urbana 2006.....	84
Tabla 12. Superficies resultantes según su susceptibilidad bajo condiciones de la zona urbana propuesta.....	85
Tabla 13. Superficies resultantes según su susceptibilidad para la superficie que cubre la zona urbana 2006.....	87
Tabla 14. Superficies resultantes según su susceptibilidad para el área que cubre la zona urbana propuesta por el PDU.....	89

RESUMEN

La ciudad de Puerto Vallarta se localiza en el Estado de Jalisco sobre una angosta llanura costera bajo los límites de las sierras del Cuale y de San Sebastián, las que se caracterizan por sus pendientes abruptas y altas cimas. Esta zona montañosa es un atractivo que identifica a esta ciudad, pero también es el origen de importantes deslizamientos y flujos de detritos que han sido causa de significativas pérdidas materiales y humanas. A pesar de esta realidad en los últimos años se proyecta que la ciudad crezca hacia estas zonas. Por lo anterior, este estudio identificó y zonificó el nivel de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa. Se propone un método basado en el análisis heurístico y evaluación multicriterio donde se contempló causas que condicionan y desencadenan la inestabilidad de laderas, como fueron: litología, inventario de deslizamientos, áreas de desmonte, taludes en caminos, distancia a fallas y fracturas geológicas, insolación, cortes en talud, inestabilidad por deslizamientos superficiales, concentración de flujos y presencia de asentamientos humanos. Lo anterior dio forma a un mapa detallado que indica niveles de susceptibilidad, que es el primero en su tipo para esta zona. El resultado reveló que el 63.25 por ciento del área de estudio presentó problemas por inestabilidad de laderas y que más de la mitad (52.4 por ciento) de la superficie donde se proyecta el crecimiento de la ciudad presentó grados de susceptibilidad de media a muy alta.

ABSTRACT

The city of Puerto Vallarta (State of Jalisco) lies on a narrow coastal plain below the ridges of Sierra del Cuale and Sierra de San Sebastián, characterized by their steep slopes and high elevation. This mountainous area is the origin of landslides and debris flows that have caused significant material and human losses. Nevertheless much of Puerto Vallarta's current and projected urban growth is taking place in these mountains. This study proposes a heuristic analysis and multicriteria evaluation based model to identify and spatialize susceptibility to mass movements. This method considered the main factors that causes and trigger slope instability including lithology, mass movements inventory, cleared areas, artificial slopes in roads, distance to geologic faults and fractures, insolation, land cuts in slope, instability by superficial landslides, flow concentration and human settlements. These whole set of themes were the base for the first detailed map of susceptibility for Puerto Vallarta's area. These work revealed that 63.25 percent of the study area presents some degree of slope instability and 52.4 percent of the area projected for urban growth have a considerable level of susceptibility, ranging from medium to very high.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Puerto Vallarta cuenta con grandes potenciales económicos, principalmente en el sector turístico, por ello es la segunda ciudad en importancia del estado de Jalisco. La ciudad se caracteriza por su contrastante paisaje, por un lado su principal atractivo que son las playas bañadas por las aguas del Pacífico y por otro lado los grandes macizos montañosos que se elevan de los 0 msnm a los 1,200 msnm y los cuales están cubiertos por una verde selva. Pero esta última característica, de ser una población al pie de montañas, hace de Vallarta una ciudad propensa a fenómenos de inestabilidad de laderas.

Pero además de sus condiciones morfológicas, se añade sus características climáticas al ser una zona donde caen importantes cantidades de lluvia (1,649 mm, promedio anual), muchas de ellas resultado de ciclones tropicales. Sin olvidar la ocurrencia de sismos al localizarse dentro de una zona altamente sísmica, frente a la Placa de Rivera, causante del mayor sismo registrado en México de Ms=8.2 grados Richter, que ocurrió el 3 de junio 1932 (SMIS, 2009). Los factores anteriormente mencionados no son más que posibles detonadores de la inestabilidad en laderas.

En la historia de Puerto Vallarta han acontecido desastres provocados por fenómenos de inestabilidad de laderas causando tanto pérdidas materiales como humanas. La ocurrencia de estos sucesos se ha incrementado a la par del crecimiento y expansión de la mancha urbana.

Los problemas se pueden incrementar esto porque los desarrolladores urbanos han puesto su mirada sobre las laderas de la zona de montaña, con el fin de explotar su potencial paisajístico. Por lo que la tendencia es expandir la mancha urbana sobre estas zonas de montaña. Esto puede implicar para la ciudad de Puerto Vallarta la creación de potenciales escenario de desastres por fenómenos de inestabilidad de ladera.

Dada esta realidad, la presente investigación busca identificar y caracterizar las zonas susceptibles a fenómenos de inestabilidad de laderas, esto con el fin de determinar el impacto que ocasionan este tipo de fenómenos en la ciudad de Puerto Vallarta, tanto en la situación actual, como en un escenario futuro, de acuerdo a la tendencia y tipología del crecimiento urbano. Estos objetivos descansan en la hipótesis que la tendencia del crecimiento urbano en la ciudad de Puerto Vallarta, será factor que creará escenarios futuros con alto potencial de desastre causados por fenómenos de inestabilidad de laderas.

Para cumplir con los objetivos planteados se trabajó bajo el esquema de un modelo del tipo heurístico, a partir del cual se elaboró un mapa de susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de laderas donde se identificaron zonas potenciales a la ocurrencia de este tipo de peligros. Para ello, se realizó un recorrido en campo para conocer las condiciones y los tipos de procesos de remoción en masa que han ocurrido. Se tomaron en cuenta atributos físicos y antropogénicos identificados como factores que condicionan y detonan los procesos de inestabilidad de laderas para la zona de Puerto Vallarta. Estos fueron procesados y modelados a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG), (herramienta esencial para este trabajo) en forma de capas temáticas, las cuales dieron forma al mapa de susceptibilidad.

El documento de tesis se divide en seis secciones. La primera sección está dedicada al marco teórico donde se explica las bases sobre las cuales descansa este trabajo. La segunda sección presenta un contexto de Puerto Vallarta y la inestabilidad de laderas por lo que está dedicado a integrar qué hay en Puerto Vallarta, qué ha pasado, qué está pasando y las tendencias del crecimiento urbano. En la tercera sección describe y explica los pasos que fueron seguidos para la elaboración del mapa de susceptibilidad, la información y las herramientas utilizadas. En la cuarta sección se presenta una discusión de los resultados obtenidos. En la quinta sección se presentan las conclusiones finales de toda la investigación. En el último apartado se enumeran una serie de recomendaciones a tomar en cuenta en los resultados de este trabajo.

I. MARCO TEÓRICO

I.1 LOS FENÓMENOS DE INESTABILIDAD DE LADERAS

En materia de la inestabilidad de ladera existe más de un término para referirse a estos fenómenos. Los conceptos utilizados se derivan de publicaciones en inglés (Alcántara, 2000), siendo los más generales: “mass movements” (movimientos en masa), “gravitational processes” (procesos gravitacionales), “slope movements” (movimientos de ladera), y “landslide” (deslizamientos de tierra). Este último es el más usado internacionalmente, pero tiene el inconveniente que al ser traducido al español se puede confundir con un movimiento en particular que se le identifica como deslizamiento.

Los fenómenos de inestabilidad de ladera son parte de un proceso natural de erosión-sedimentación. Chacón (2003) los define como “un producto geomorfológico de procesos relacionados con la evolución del paisaje”. Estos fenómenos son definidos como “movimientos de una masa de roca, tierra o derrubios pendiente abajo” (Cruden, 1991), ó “un movimiento hacia abajo y hacia fuera de los materiales que forman una ladera bajo la influencia de la gravedad” (Varnes, 1978). Con base a estas definiciones se puede establecer que el fenómeno de inestabilidad de ladera es el movimiento hacia abajo de una masa compuesta por rocas, lodos, detritos, ó la combinación de estos, producto de la fuerza de gravedad y la pérdida de la resistencia de los materiales que la soportan.

La inestabilidad de laderas ocurre cuando se conjugan varios factores tanto de las condiciones propias del lugar como de factores externos, que de acuerdo a Cruden y Varnes (1996) se agrupan en:

- Factores geológicos, como puede ser la debilidad del material, la intemperización, fracturas, fisuras, capacidad de infiltración, dureza del material (densidad, plasticidad)
- Factores morfológicos, como la erosión en márgenes laterales, soportes tectónicos y volcánicos, erosión fluvial del pie de ladera, erosión subterránea, evidencia de remoción en masa en el pasado.

- Factores físicos, como la precipitación, la temperatura, el drenaje, vibraciones, sismos, erupciones volcánicas.
- Factores antropogénicos, como puede ser excavaciones, deforestación, vibraciones artificiales, aumento del peso sobre la pendiente, etc.

Pero existe una clasificación más funcional que por sí misma hace referencia a la forma en que actúan los factores relacionados con la inestabilidad de laderas. Esta clasificación identifica dos tipos de factores: condicionantes y desencadenantes (Ayala, 2002). Los factores condicionantes, son factores propios del lugar que responden a características físicas del terreno y del medio geográfico donde se encuentran. Se distinguen por su lenta evolución, ejemplo de este tipo de factores son la litología, estructura tectónica, la hidrogeología, el relieve y el clima. Por otra parte, los factores desencadenantes, son los que detonan o desencadenan la inestabilidad. La característica de estos factores son sus efectos rápidos o instantáneos. Esencialmente se reconocen 3 factores condicionantes: sismos, precipitaciones y actividades antrópicas.

Para que ocurra un deslizamiento se deben de presentar una serie de procesos sucesivos del tipo causa-efecto. Varnes (1978) señala 3 procesos:

1. Incremento del esfuerzo cortante, que puede ser causado por:
 - La remoción del soporte lateral o de base, como puede ocurrir con la erosión, deslizamientos previos, excavaciones de origen antrópico, etc.
 - El incremento de carga, que puede ser dado por el peso de la lluvia, rellenos o vegetación.
 - Incremento de presiones laterales, como presiones hidráulicas, raíces, cristalización, expansión de arcillas.
 - Esfuerzo transitorio causado por sismos, vibraciones.
 - Inclinación regional asociado a deformaciones tectónicas.
2. Disminución de fuerza del suelo o de la roca. Este se refiere a las propiedades intrínsecas de cada material.
3. Reducción de la resistencia al esfuerzo cortante, lo que puede ser causado por:
 - Cambios en las fuerzas intergranulares (presión de poro, disolución)

- Cambios en la estructura como puede ser la disminución de la resistencia en el plano de falla, fracturamiento debido a descargas o falta de confinamiento.
- Efectos de temperaturas extremas (dilatación y contracción del material)

I.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE MOVIMIENTOS

Para este trabajo se tomó como referencia la clasificación descrita en Dikau et al. (1996) dentro del escrito titulado “Landslide Recognition”. El cual está basado en las clasificaciones de Hutchinson (1988), EPOCH (The Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community (1991-1993)) que considera la morfología, el mecanismo, tipo de material y la tasa de movimiento así también como en la terminología propuesta por la UNESCO (1993) la cual se deriva de Varnes (1978) (Dikau, 1996). Los tipos de movimientos son:

I.1.1.1 Caída (fall)

Este es un movimiento de caída libre de un material en pendientes abruptas y acantilados (Flageollet y Weber, 1996), predominando las trayectorias verticales (Santacana, 2001) y el cual ocurre de manera muy rápida (Figura 1). El proceso de un movimiento de caída se describe como el desprendimiento y caída de material desde un escarpe que es seguido por el impacto en el pie del escarpe, a partir del cual otros procesos toman lugar (Flageollet y Weber, 1996). Se puede diferenciar según el material del cual se trata: roca, derrubios, o suelo.

Este movimiento sucede al presentarse el crecimiento de fisuras en el material de base; al perder la pieza o base que lo conectaba con la roca; al exceder el límite de la saliente; cuando se excede el límite de la fricción estática de uno o más bloques; por el incremento en el gradiente de la pendiente en deformaciones lentas y por la pérdida de la capa que funcionaba como protección al bloque o roca (*ídem*).

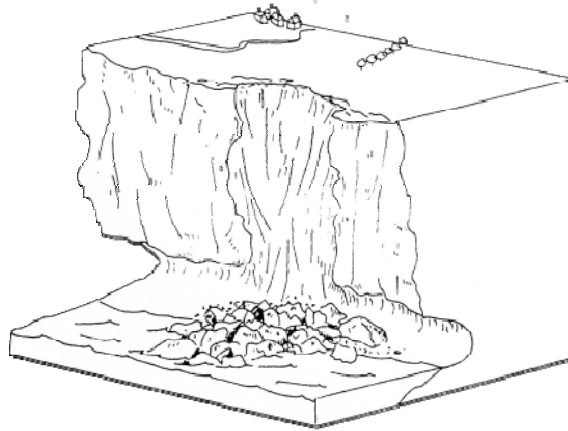


Figura 1. Caída de bloques de roca en acantilados (tomada de Dikau et al., 1996)

1.1.1.2 Vuelco (*topple*)

Es la rotación hacia delante y fuera de la pendiente, de un bloque de roca, detritos o suelo con relación a un punto o eje bajo el centro gravitacional de la masa desplazada (Cruden y Varnes, 1996), el cual culmina en una caída abrupta o puede irse desplazando lentamente (Figura 2). Este movimiento suele suceder a causa del desprendimiento de una columna cuya carga es aplicada sobre una base estrecha (Dikau y Schrott, 1996).

Los dos factores que controlan la ocurrencia de un movimiento de vuelco son la altura de la pendiente y el ancho de la base soportante. Las condiciones para que se presente un vuelco dependen del material del cual se trate, en el caso de vuelcos de rocas se necesita contar con laderas altas, y en el caso de los subtipos de derrubios y suelo, se pueden presentar en laderas suaves. La velocidad con la que se presente, dependerá de la altura de la ladera tanto como del área potencial de acumulación. Para estos movimientos al clima se le considera como un factor suplementario. El factor principal para que ocurra un vuelco es la socavación de la base por agentes fluviales, por oleaje o por modificaciones antrópicas en la ladera. (*ídem*).

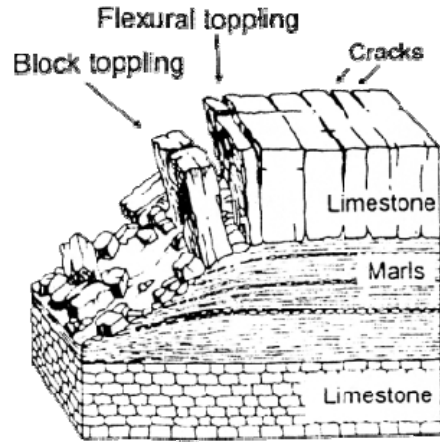


Figura 2. Movimiento de vuelco en ladera, (tomada de Dikau et al., 1996).

1.1.1.3 Deslizamiento rotacional (*rotational slide*)

Es el movimiento de un material que se desplaza a lo largo de una superficie de falla cóncava que es visible o inferida (Buma y Van, 1996), cuyo centro de giro se dibuja como un eje paralelo al centro de gravedad del cuerpo deslizado (Suarez, 1998); (Figura 3) y donde existe la posibilidad que la masa deslizada conserve, en gran parte, su estructura interna original (Cruden y Varnes, 1996).

Este tipo de movimientos puede suceder a causa de (Buma y Van, 1996): discontinuidades en la estratigrafía; por laderas que tienen suelos con baja cohesión por la ausencia de vegetación; por pendiente formadas por rocas altamente fracturadas. Otra causa suele ser una estratificación alternada entre rocas y sedimentos los cuales tienen permeabilidad y resistencias distintas y un lecho rocoso con un plano horizontal. Suelen ser causados también por socavamientos en la base de la ladera por mareas, arroyos o por excavaciones de origen antrópico. Algunos mecanismos desencadenantes son: sismos, explosiones, sobrecargas repentinas o por la presencia de láminas altas de agua seguidas por periodos de lluvia (*ídem*).

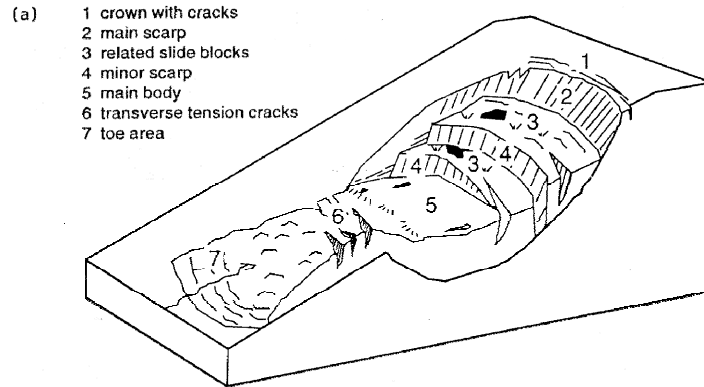


Figura 3. Movimiento de deslizamiento rotacional (tomada de Dikau et al., 1996).

I.1.1.4 Deslizamiento traslacional (*translational slide*)

Es un movimiento hacia abajo y fuera de material a lo largo de una superficie de deslizamiento plana (Cruden y Varnes, 1996), (Figura 4). La profundidad de estos es menor en relación con los deslizamientos rotacionales. Una de sus características es que una vez presentado un deslizamiento traslacional este puede ir progresando de manera continua a lo largo de la ladera (Suarez, 1998). Este tipo de movimientos se les considera como los más comunes y se dividen en:

- a) Deslizamientos en bloque que son causados por la existencia de un cambio abrupto en la secuencia del tipo de roca, por fuertes discontinuidades paralelas a la superficie del escarpe (Ibsen et al., 1996).
- b) Deslizamiento de suelos, que son fallas traslacionales en laderas compuestas de un suelo cohesivo, fino y no litificado. Pueden ser causados por cambios en la geometría de la ladera, cambios en la presencia de agua o cambios de origen antrópico (*ídem*).
- c) Deslizamiento de detritos, que son deslizamiento de materiales no consolidados los cuales se presentan en poca profundidad y puede ser causados por intensas precipitaciones, por sismos, ó por la eliminación de la cubierta vegetal (Carominas, 1996).

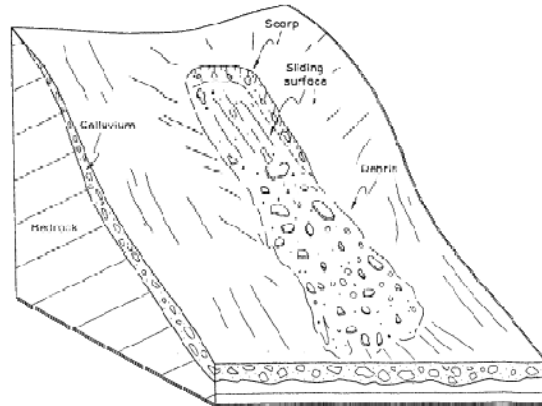


Figura 4. Movimiento de deslizamiento traslacional, (tomada de Dikau et al., 1996).

1.1.1.5 Extensión lateral (lateral spreading)

Es definido como una extensión de un suelo consolidado o masa de roca, combinada con una subsidencia general de la masa o material que lo subyace (Figura 5) y donde la superficie de ruptura no es una superficie de intensa cizaña (Cruden y Varnes, 1996). Las extensiones (spread) son el resultado de la licuefacción o flujo de un material somero. Se puede definir también como el colapso de una capa de suelo sensible, seguida por cualquier asentamiento de la capa de suelo más resistente (Dikau, 1996).

Este tipo de movimiento puede ser provocado por períodos prolongados de fuertes precipitaciones; por cambio en la presión de poro y por sismos (Pasuto y Soldati, 1996).

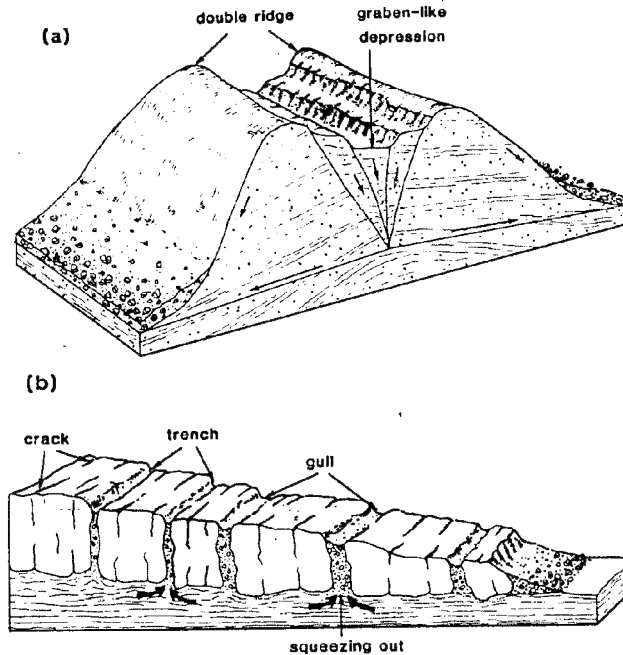


Figura 5. Movimiento de extensión lateral (tomada de Dikau et al., 1996).

1.1.1.6 Flujo (flow)

Es un movimiento espacialmente continuo donde la superficie de deslizamiento es continua y generalmente no deja marcas que permanezcan mucho tiempo y la distribución de velocidades en el desplazamiento de la masa se comporta como un líquido de consistencia viscosa (Cruden y Varnes, 1996). Pueden presentarse en varios tipos de material, como es en rocas altamente fracturadas o en granos de tamaño fino. Se le define también como la continua e irreversible deformación de un material ocurrido en respuesta a un esfuerzo aplicado (Dikau, 1996). Dentro de este movimiento se identifican otras subcategorías:

- a) Flujo de rocas, también identificado como Sackung, el cual se describe como una deformación plástica gravitacional profunda de ladera producto de un hundimiento o asentamiento de una pendiente (Bisci y Sorriso, 1996). Este es una deformación plástica de la ladera y el volumen de roca que desplaza es de grandes dimensiones y ocurre en zonas de montaña.

- b) Flujo de detritos que es formado por materiales finos y gruesos, con una cantidad variable de agua que forma una mezcla lodosa la cual se mueve pendiente abajo y es común que se presente en laderas conformadas por suelos detríticos o rocas poco consolidadas, especialmente en lugares donde la cobertura vegetal ha sido removida por tala o por incendios (Corominas, 1996). Estos flujos son ocasionados principal por la presencia inusual de agua (*Ídem*).
- c) El flujo de suelos al estar compuestos por materiales de tamaño fino se desplaza con facilidad y puede fluir de manera rápida pendiente abajo (Figura 6). Los flujos de suelos comúnmente surgen a partir de la existencia de cárcavas o pequeñas depresiones y terminan con la construcción de depósitos en forma de abanico sobre zonas llanas o en depósitos de poco espesor, extendidos a lo largo de una superficie plana (Schrott et al., 1996). Las condiciones que favorecen la presencia de flujos de suelo son: abundante presencia de agua y de materiales no consolidados, tanto como la degradación o pérdida de capa superficial de suelo (*Ídem*).

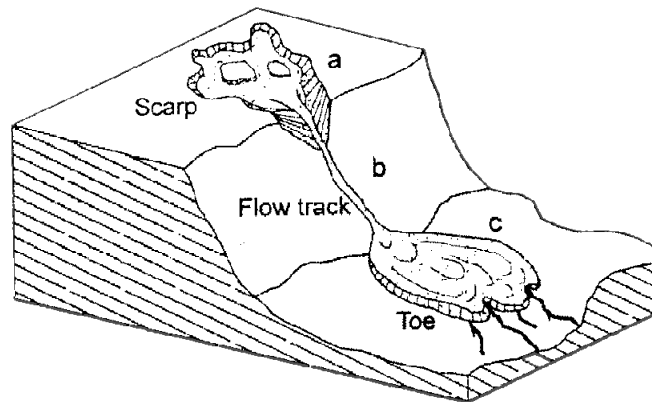


Figura 6. Movimiento de flujo (tomada de Dikau et al., 1996).

I.1.1.7 Complejos (*complex*)

A un movimiento de remoción en masa se le clasifica como complejo cuando en un sólo evento se presenta o se combina con más de un movimiento. Ejemplo de estos movimientos son el alud de rocas y llamado flujo deslizante (Dikau et al., 1996).

I.2 ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A FENÓMENOS DE INESTABILIDAD DE LADERA

Uno de los objetivos de esta investigación es conocer la susceptibilidad a la inestabilidad de ladera en la ciudad de Puerto Vallarta, por lo cual conviene definir este término. La palabra susceptibilidad en el vocabulario usado para el tema de los riesgos, se define como, “la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno” (Suárez, 1998). Otro significado puede ser la “predisposición del terreno a la ocurrencia de un fenómeno peligroso y no implica el aspecto temporal de éste” (Santacana, 2001). Un concepto más amplio hace referencia que es, “la propensión o tendencia de una zona a ser afectada físicamente por un peligro, determinada a través de un análisis comparativo de factores condicionantes y/o desencadenantes, cualitativos o cuantitativos, con las áreas que han sido afectadas en el pasado. Es un concepto relacionado con la probabilidad pero distinto, y normalmente se plasma en un mapa de susceptibilidad” (Ayala-Carcedo, 2002). Para van Westen (2008) la susceptibilidad representa la probabilidad espacial de que un pixel pueda ser afectado.

Por lo que, un estudio de zonificación de susceptibilidad puede ser entendido como aquel que busca determinar las áreas potenciales a la ocurrencia de un fenómeno peligroso, con base a la presencia o no de factores desencadenantes y condicionantes.

Para evaluar la susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de ladera se identifican de manera general dos formas (Suárez, 1998): *Sistemas Experto*, donde se utiliza la observación directa de deslizamientos ocurridos y el análisis se efectúa con la relación entre los eventos de inestabilidad y la geomorfología del terreno. Y el *Sistema Teórico*, para el cual se deben de

mapear los factores que se considera influyen en la ocurrencia de procesos de inestabilidad de laderas, y con ello analizar la posible contribución de cada factor considerado.

Existen 3 tipos de modelos para el análisis de fenómenos por inestabilidad de ladera a partir de los cuales se derivan un sin número de trabajos realizados (Ni, 2006). Estos son: Heurístico, determinístico y estadístico.

I.2.1 MÉTODO HEURÍSTICO

Este tipo de método cualitativo categoriza y pondera los factores que intervienen en la inestabilidad y se basa en la experiencia de quien lo elabora (Santacana, 2001). Este método combina el mapa inventario de deslizamientos y las condiciones geomorfológicas como los principales criterios para determinar el peligro. Su principal desventaja es la subjetividad de los criterios y requiere de un conocimiento previo de las causas y factores que han producido inestabilidad (Suarez, 1998). Existen dos tipos de análisis heurístico (Turner, 1996):

- a) El análisis geomorfológico, que se realiza usando técnicas geomorfológicas, se basa en lo encontrado en campo y está muy determinado por la experiencia del geomorfólogo y hace uso del razonamiento por analogía para establecer los niveles de peligro. Este análisis tiene el inconveniente de que los criterios utilizados varían de acuerdo al sitio estudiado.
- b) Combinación de Mapas Cualitativos, este método se basa en el traslape de capas de información temática de los factores causantes, a las cuales se les otorga un peso según sus atributos, esto de acuerdo a la experiencia del autor, y se establece una categoría de nivel de peligro.

I.2.2 MÉTODO DETERMINÍSTICO

Este tipo de análisis se basa en modelos de estabilidad de ladera para obtener factores de seguridad y trabaja con pruebas de medición de factores de inestabilidad (Santacana, 2001). La ventaja de este tipo de análisis es que no exige trabajar con una variedad de capas temáticas y

que da como resultados valores de peligro (Barredo et al. 2000). Se recomienda que los trabajos se realicen en áreas con condiciones geológicas y geomorfológicas similares (Turner, 1996) ya que el método considera que las condiciones del sitio son homogéneas (Dai y Lee, 2001). El modelo determinístico más común es el llamado “pendiente infinita” que usado para deslizamientos traslacionales. Es necesario para estos análisis el contar con parámetros geomecánicos del sitio a estudiar. Turner (1996) señala como principal desventaja es su grado de sobresimplificación esto en caso de los parámetros que requiere.

I.2.3 MÉTODO ESTADÍSTICO

Este tipo de análisis cuantitativo trabaja bajo modelos estadísticos a partir de la relación que existe entre factores y la distribución de los deslizamientos ocurridos. Con ello se puede predecir futuros deslizamientos en zonas donde se presentan condiciones similares (Turner, 1996). Este método tiene como desventaja que se requiere una gran cantidad de información histórica o de un evento específico y que asume una densidad de deslizamientos continua en el espacio (Suarez, 1998). Existen dos clases de métodos estadísticos para los estudios de peligros por procesos de remoción en masa:

- a) Análisis estadístico bivariado, el cual combina cada factor con el mapa de distribución de deslizamientos, otorgando pesos basados en la densidad de deslizamientos y se realiza este cálculo para cada clase de los parámetros.
- b) Análisis estadístico multivariado, que combina todos los factores más relevantes con unidades morfométricas. De esto resulta una matriz que es analizada por medio del uso de regresión múltiple o análisis discriminante.

La metodología usada para este trabajo de tesis está basada en el modelo heurístico del tipo Combinación de Mapas Cualitativos. Las ventajas de usar esta clase de análisis son que es un método rápido, razonable y consistente con las condiciones que presenta la zona de estudio (Roa, 2006), uno de los propósitos de usar este método es contemplar los diferentes factores

como un conjunto que incide en la inestabilidad de ladera en la zona de estudio, atributo de cual carecen otros métodos (Ruff y Czurda, 2008) tanto como, para cumplir con el objetivo de este trabajo que es identificar y caracterizar las zonas susceptibles a los fenómenos de inestabilidad de ladera y con ello el impacto que causa o causaran estos a la ciudad de Puerto Vallarta. Si bien el método heurístico su debilidad se encuentra en la subjetividad de los criterios considerados, Castellanos y van Westen (2008) lo consideran la aproximación más confiable para la elaboración de los mapas de susceptibilidad, además de que a este tipo de análisis se le considera el más popular (Soeters, 1996; Suarez, 1998). Ejemplos del uso de este método pueden ser encontrados en los trabajos en: Giorgio, L. y Audisio, C., (2006); Castellanos y van Westen, (2008); Malet et al. (2007); Barredo et al. (2000); Ruff y Czurda, (2008); Budeta et al. (2008); Carrara y Pike (2008); Melzeder et al., (2007); Donati y Turrin, (2002); Roa, (2006).

II. INESTABILIDAD DE LADERAS EN PUERTO VALLARTA



Figura 7. Localización de Puerto Vallarta, Jalisco.

II.1 LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en el municipio de Puerto Vallarta, Jalisco, y corresponde a una porción de la ciudad del mismo nombre y una zona adyacente sobre la sierra del Cuale y de San Sebastián (Ver mapa base en anexos). Sus coordenadas extremas son $20^{\circ} 44'N$, $105^{\circ} 19'W$ y $20^{\circ}30'N$, $105^{\circ}09'W$. A esta zona de montaña también se le identifica como “El Edén”. En la figura 8 se muestra el área considerada para el estudio que abarca una superficie de 137 Km^2 aproximadamente. El criterio para establecer la delimitación en la zona de estudio fue a partir de considerar el parteaguas de las microcuencas que terminan en la mancha urbana y en la línea de costa. Para el caso del área dentro de la ciudad, el criterio fue abarcar las zonas donde por las características del relieve, se podría esperar la presencia deslizamientos.

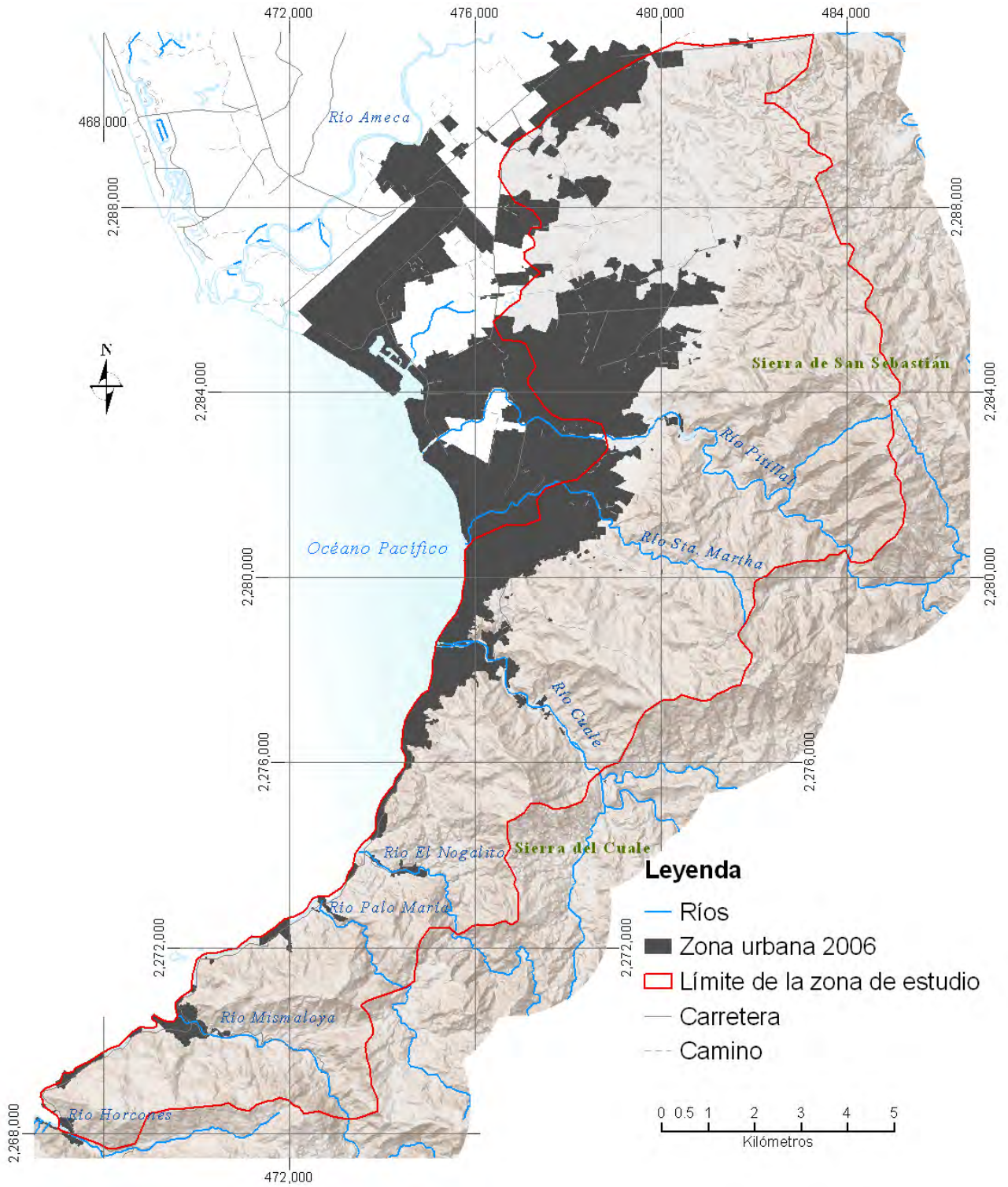


Figura 8. Zona de estudio.

Puerto Vallarta es la segunda ciudad en importancia en el estado de Jalisco, sólo después de la ciudad de Guadalajara. La población reportada para el CONTEO 2005 del INEGI es de 178,484 habitantes siendo una ciudad con una importante dinámica de crecimiento (Habitat, 2004). Vallarta es un importante polo económico para esa región del estado de Jalisco y del vecino Nayarit. Su principal actividad económica es el turismo y los servicios que de ello se desprenden. Esto se demuestra en el censo económico 2004 de INEGI, donde se indica que el 35% del personal ocupado total se dedica a los servicios de alojamiento temporal y al de preparación de alimentos y bebidas. En esta misma materia, Vallarta es de los tres principales destinos turísticos del país (Sectur, 2008), pero al igual que muchas otras ciudades mexicanas presenta importantes contrastes. Por un lado se encuentran las zonas de grandes hoteles y casas de gran lujo que hospedan a turistas de todo el mundo, y por el otro están las colonias marginadas donde el nivel económico de los habitantes es precario (Habitat, 2004).

II.1.1 FACTORES DESENCADENANTES Y CONDICIONANTES DE INESTABILIDAD DE LADERA

A continuación a manera de descripción se exponen una serie de los principales factores físico-ambientales presentes en la zona de estudio que condicionan o desencadenan la inestabilidad de ladera en Puerto Vallarta.

II.1.1.1 Geología

La zona de estudio pertenece a un bloque montañoso dentro de la provincia de la Sierra Madre del Sur, dentro del llamado Bloque Jalisco frente a la Placa de Rivera, la cual se está subduciendo bajo la Placa Norteamericana. La zona es considerada altamente sísmica al tenerse reportado la ocurrencia de fuertes sismos. El mayor de ellos ocurrió en 1932, de $M_s = 8.2$ grados Richter. Su epicentro fue localizado frente a las costas de Vallarta. Es resaltar que este es el mayor sismo registrado en México.

En la zona aflora el Batolito Puerto Vallarta compuesto por granito que varía a granodiorita y de diorita a tonalita, sus edades radiométricas (K-Ar) son variables ya que se indican edades desde 100 a 73 Ma, a los 51 a 56 Ma (SGM, 1999). En la parte central se encuentran rocas volcánicas y volcánoclasticas del Cretácico superior y del Terciario (Valdivia, 2001).

A continuación se presentan y describen las unidades litológicas presentes en la zona de estudio. Lo escrito aquí fue tomado del trabajo de geología del Atlas de Peligros Naturales de Puerto Vallarta elaborado por Aragón (2006) y la publicación de Aragón y Nuñez (2001).

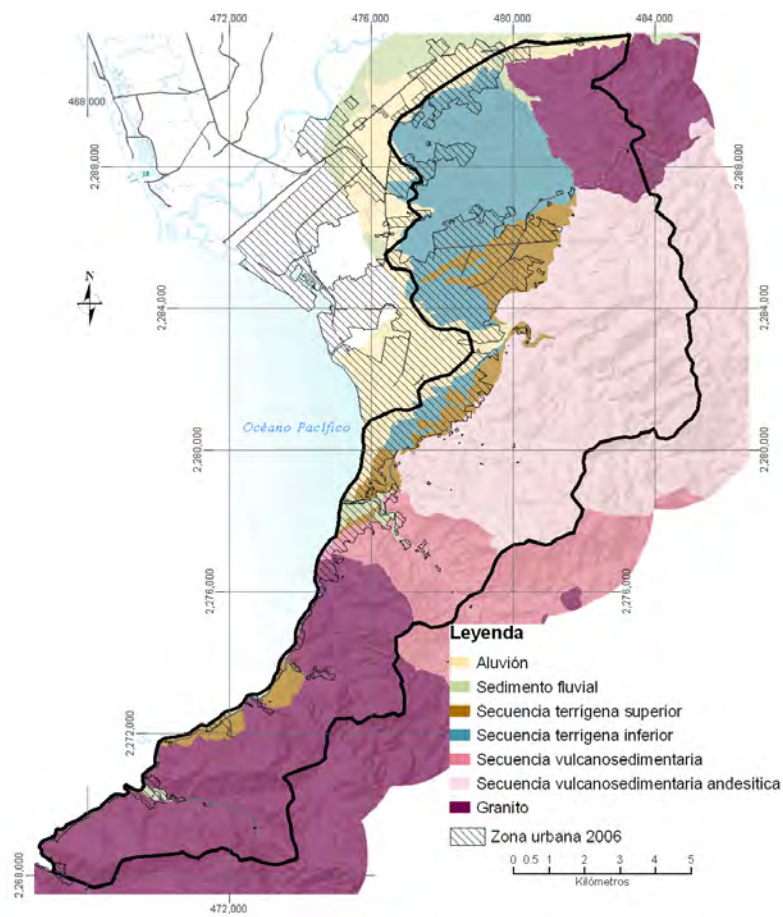


Figura 9. Mapa de unidades litológicas

Granitos. En zona afloran granitos de dimensiones batolíticas que constituyen el basamento cristalino. Esta unidad se encuentra tanto al Sur y cubre una extensión de 4,268.8 Ha; como en una porción al noreste de la zona de estudio (Figura 9). Los granitos se presentan en 3 facies (Aragón, 2006):

- a) Granito de biotita, son rocas de color rosáceo y textura equigranular, fanerítica, con variaciones con relación cuarzo-feldespatos de 1.2 a 0.8, el tamaño de grano es aproximadamente 5 mm. El contenido de minerales ferromagnesianos varía entre 1-10%.
- b) Granito de muscovita (Figura 10) que son rocas de color crema a blanquizco, con textura equigranular, fanerítica, relación cuarzo-feldespatos de 1 y tamaño de grano cercano a 0.5 mm.
- c) Granito de hornblenda y biotita que son rocas muy semejantes en textura y relación cuarzo-feldespatos a los granitos de biotita, con la diferencia de la presencia de hornblenda fibrosa de hasta 0.3 mm de diámetro en cristales subedrales.

Se diferencian cuerpos intrusivos discretos que sugieren el emplazamiento en forma de pulsos (Aragón y Nuñez, 2001).

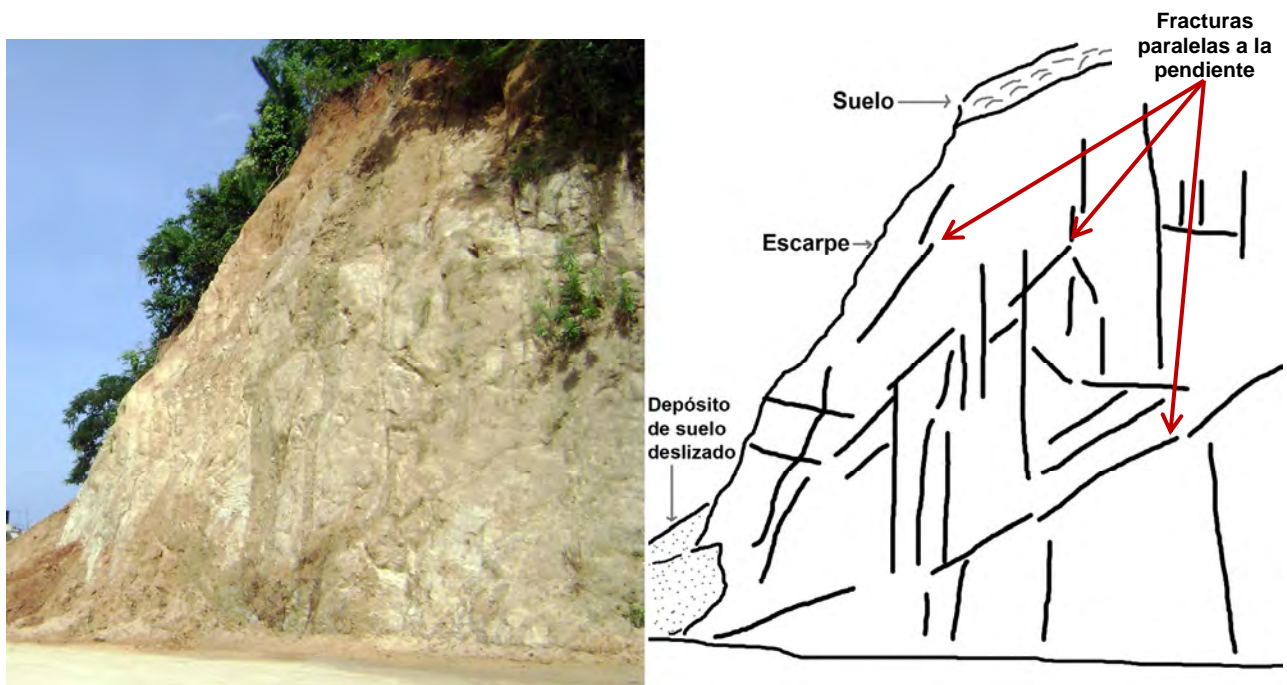


Figura 10. Granito en Mismaloya del tipo muscovita. A la derecha se muestra la interpretación hecha a la primera imagen donde se marcaron fracturas y diaclasas del macizo rocoso. En la interpretación resaltan fracturamientos verticales y fracturas con direcciones paralelas a la orientación de la pendiente del escarpe, lo que puede ser factor para la ocurrencia de deslizamientos al funcionar esta debilidad como planos de deslizamiento. La altura del escarpe es de 5 m.

Secuencia vulcanosedimentaria. (Figura 11) Esta secuencia que se encuentra en la parte media y Este de la zona de estudio; y se divide en vulcanosedimentaria que se extiende en un área de 935.9 Ha y vulcanosedimentaria andesítica, siendo este el de mayor abundancia, cubriendo una zona de 4,484.4 Ha. La unidad está formada por (Aragón, 2006):

- a) Andesitas (Figura 11), Rocas de color verdoso oscuro a gris oscuro, de grano fino a muy fino, parcialmente cloritizadas, en ocasiones fuertemente craqueladas. Algunas veces presentan estructura vesicular.
- b) Depósitos de flujos piroclásticos, rocas de color blanquiso y verdoso, parcialmente o totalmente sericitizadas, de grano fino a medio con algunos cristales de plagioclasa
- c) Aglomerados volcánicos, Los tamaños de grano varían entre menos de 1 cm hasta cerca de 20 cm, están bien litificados, de color claro, aunque varían dependiendo de la predominancia de los clastos, estos están constituidos principalmente de rocas volcánicas, menor cantidad de grauvacas y algunos aglomerados. Sólo se encontró un fragmento proveniente de granitos.
- d) Areniscas (Grauvacas), Rocas color marrón con gran variedad de tamaños de grano, desde conglomeráticas hasta grano muy fino. Los clastos están constituidos por cuarzo, feldespatos y fragmentos de roca. Por lo general conservan la estratificación, los estratos varían de medianos a gruesos para la granulometría mayor y de delgados a laminares para la granulometría fina. Las granulometrías finas presentan estratificación laminar, que a primera vista parece foliación, sin embargo esta fábrica siempre es consistente con la variación composicional por depósito. Dentro de las facies con estratificación delgada se observan estratos compuestos por cuarzo removilizado producto de diagénesis. Estas grauvacas finas son la litofacie más deformada dentro de la unidad, presentando plegamiento y crenulación.

La secuencia varía verticalmente: hacia la base dominan los sedimentos, hacia la cima, el componente volcánico y aglomerático. La secuencia está basculada hacia el norte, cortada por fallas normales y localmente plegada. La secuencia está intrusionada por diques de composición andesítica y diques de composición granítica cercanos a los contactos con el batolito (Aragón y Nuñez, 2006).

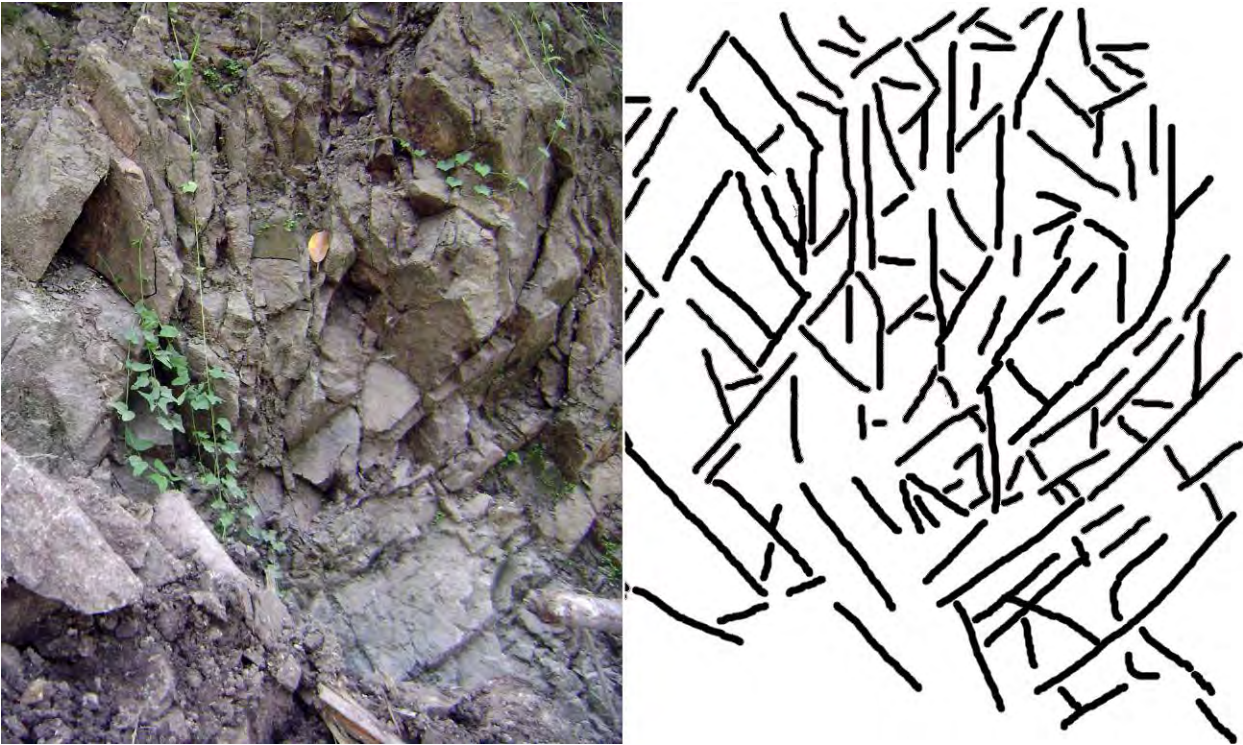


Figura 11. Andesitas de la secuencia vulcanosedimentaria, en la zona de Conchas Chinas. Esta andesita se encuentra muy fracturada. En la imagen de la derecha se resalta las fracturas que presenta una distribución irregular donde las diaclasas se interceptan. Esta característica en las andesitas parece ser un factor para deslizamientos o caídas de rocas dada la poca cohesión que puede existir en la roca.

Secuencias terrígenas. Estas están formadas por conglomerados y arenas. El afloramiento de estas unidades está confinado entre el pie de la zona de montaña y una línea subparalela a la costa que define dos eventos de terrazas marina (*ídem*). Estas unidades clásticas están cortadas por un patrón de drenaje rectangular, al parecer asociado con fallamiento. En esta secuencia se divide en dos unidades (Aragón, 2006):

- a) Inferior. (Figura 12) Yace casi horizontal, los clastos son redondeados y sus dimensiones varían de 5 a 30 cm, las arenas varían de medianas a gruesas (0.25 – 1 mm) con algunos horizontes limosos; se desarrollan estructuras de canal, estratificación cruzada de bajo ángulo, gradación normal y fallas de crecimiento. Se observa fallas normales con salto superior a 8 m. Estas unidades clásticas están cortadas por un patrón de drenaje rectangular, al parecer asociado con fallamiento.

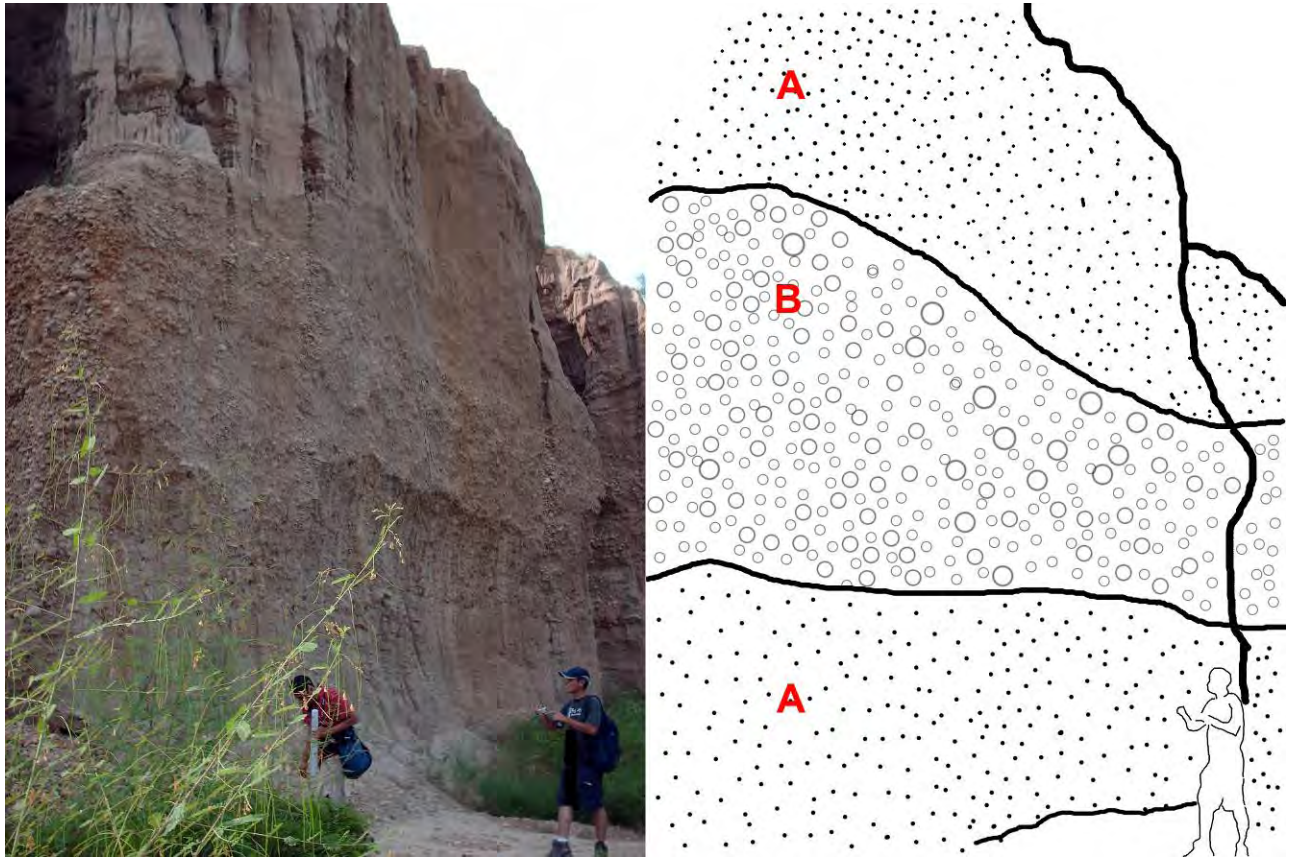


Figura 12. Secuencia terrígena inferior. El corte permite identificar tres capas (imagen derecha). Tanto la capa superior como la inferior están formadas por arenas (A) y la capa intermedia está formada por arenas y clastos (B). Este corte se localiza en las cercanías de la población de Ixtapa al norte de la zona de estudio. La altura promedio del talud es de 5 metros. La estratificación que muestra la secuencia terrígena inferior es factor de desprendimientos al existir erosión diferencial en la capa más baja y por tanto la pérdida del material que soporta el paquete superior.

- b) Superior. (Figura 13) Es similar a la secuencia inferior pero se diferencia por su grado de compactación y se extiende sobre 1,056 Has. La secuencia está basculada, los conglomerados son angulosos y las arenas son generalmente gruesas, el color de la matriz es rojizo y verdoso. El tamaño de los clastos es mayor que en la secuencia inferior (20-120 cm).



Figura 13. Secuencia terrígena inferior superior, donde se puede observar que los tipos de clastos que constituyen a esta secuencia, siendo estos los que mayormente la componen. La imagen pertenece a un corte hecho para una obra de construcción en la parte baja del fraccionamiento Amapas.

Sedimentos fluviales. (Figura 13) Son compuestos por sedimentos de composición muy variada. La granulometría de los sedimentos es muy variable y se presentan desde arenas muy finas y limos hasta cantos rodados de más de 1 m de diámetro. Los esteros depositan sedimentos finos, limos y arcillas y constituyen ambientes propicios para el desarrollo de sistemas palustres. Su superficie cubre un área de 169.2 Ha.

II.1.1 .2 Geomorfología

Para este trabajo se definieron 3 unidades geomorfológicas principales:

- 1) Llanura costera, área sometida a intenso proceso de depósito y acumulación de los ríos Ameca, Pitillal y Santa Martha. Las pendientes dominantes son menores a 5° y las altitudes van desde los 0 hasta los 20 msnm.
- 2) Lomeríos, corresponden a terrazas marinas formadas por secuencias terrígenas, las cuales están compuestos por arenas de distinta granulometría, conglomerados y limos; tiene una fuerte

disección, además de presentar una densidad alta de morfolineamientos. De acuerdo a Aragon (2006) son producto del retroceso de las aguas de mar y de levantamientos rápidos asociado a actividad tectónica. Sus altitudes oscilan entre los 20 hasta los 100 msnm. Las laderas presentan pendientes en un rango entre los 15° a los 30°.

- 3) Zona de montañas complejas, se encuentra orientada en sentido SW-NE, con pendientes fuertes mayores de 35° y presenta una diferencia en altitud que va de los 10msnm en su base, hasta los 1,100 msnm en su parte más alta. Las rocas que lo componen están dominadas por cuerpos intrusivos de granito y a la secuencia vulcanosedimentaria. Presenta un drenaje detrítico con una disección muy alta al igual que la densidad de morfolineamientos. Valdivia (2001) describe que la parte Sur de esta zona se encuentra en contacto directo con las aguas del mar y denomina a ésta como “una costa abrasiva, modelada por la caída abrupta de las sierras del Tuito y el Cuale, cuyas entrantes se conocen como ensenadas formadas por los escurrimientos fluviales inundados y controladas por el sistema de fractura del cuerpo intrusivo”. La unidad de montaña es la que tiene mayor interés para este estudio.

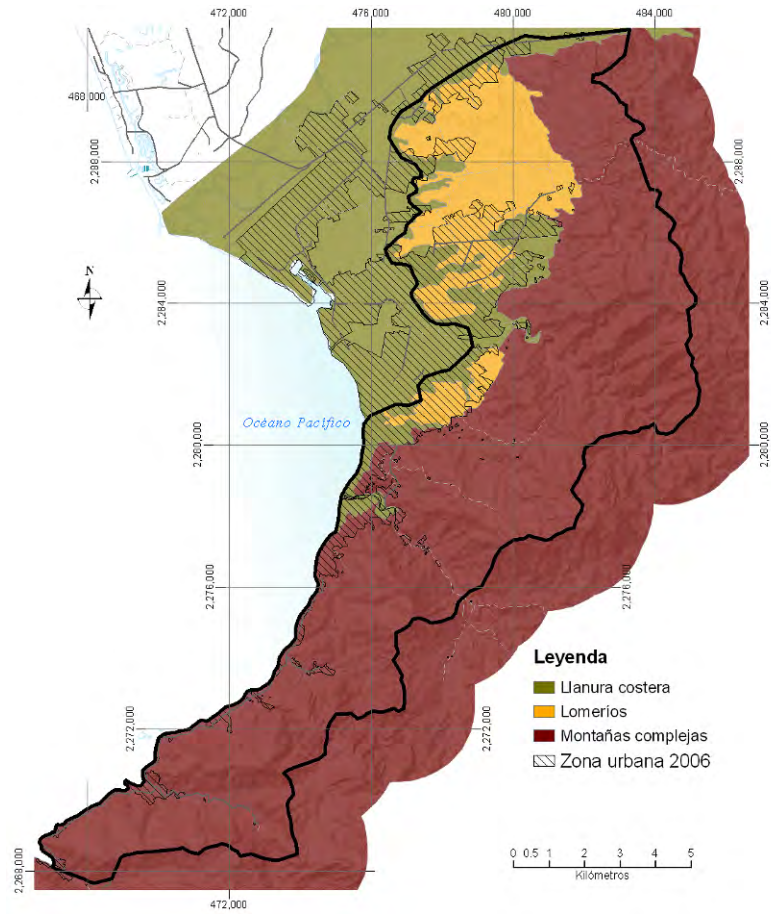


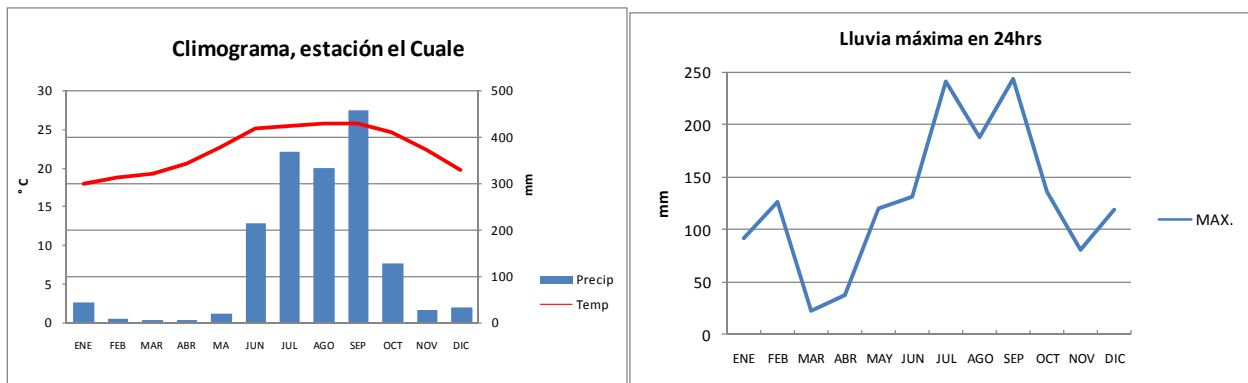
Figura 14. Mapa de unidades geomorfológicas.



Figura 15. Vista en perspectiva del relieve en la zona de estudio.

II.1.1 .3 Clima (precipitaciones)

El clima de la zona se clasifica en base al sistema Koeppen modificado por Enriqueta García como un Aw2(w)(i'), interpretado como un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, esto para los datos de la estación Puerto Vallarta. Se registra una precipitación media anual de 1,649 mm, el periodo de lluvias abarca los meses de junio a octubre, donde se concentra el 90% de la precipitación. El mes más lluvioso es septiembre con una precipitación promedio de 409.6 mm. Las precipitaciones máximas promedio están en el rango de 200.5 mm/24 horas (Ruiz, 2003). Los meses donde se tienen registradas las mayor cantidad de lluvias máxima en 24 horas, es julio con una máxima de 241 mm; y septiembre con una máximas de 243.5 mm, esto indica que estos meses pueden ser los más críticos, en particular septiembre, al reunirse en éste tres condiciones: el mes de mayor precipitación, el hecho de que ya pasaron 3 meses de precipitaciones continuas y por lo descrito a continuación. (Ver gráfica 1)



Gráfica 1a. A la izquierda se presenta el climograma para la ciudad de Puerto Vallarta. Gráfica 1b. A la izquierda se presentan las lluvias máximas en 24 horas para cada mes del año. Fuente: elaboración propia con base en series climáticas (1980-2001) de la estación El Cuale.

La última parte del periodo de lluvias está muy influenciada por la presencia de ciclones tropicales. Si bien Vallarta, por su posición, rara vez llega a ser golpeada directamente por este tipo de fenómenos (Atlas de Riesgo del Estado de Jalisco, 2007), sí reciente efectos como son fuertes y constantes precipitaciones. Otro fenómeno que ocurre son trombas también identificadas por la población como “culebras”. Se sabe que estas trombas tienen su formación sobre las aguas en la bahía, las cuales al dirigirse hacia tierra se impactan en las escarpadas laderas de la zona de montaña, donde descargan con gran fuerza importantes cantidades de agua.

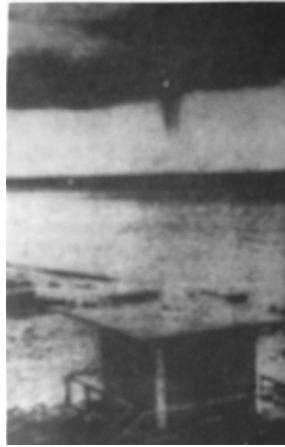


Figura 16. Formación de una tromba frente a las playas de Vallarta en 1959. Fuente: Montes, 2002.

II.1.1 .4 Vegetación

El tipo vegetación que se presenta en la zona, de acuerdo al INEGI (1975) corresponde al tipo selva mediana sub-caducifolia que se distribuye en la mayor parte del área de montaña y se puede encontrar desde los 0 msnm hasta los 400 msnm en promedio. Ésta se combina con selva baja caducifolia que se encuentra limitada a algunas zonas principalmente dentro de las zonas de los cañones. En las partes más altas por arriba de los 300 msnm existen comunidades de bosque de encino.

En algunas partes la vegetación original fue sustituida por cultivos permanentes, correspondiendo a huertos de árboles frutales. Se presenta también pastizales inducidos que usados para la ganadería.



Figura 17. Vegetación del tipo selva mediana sub-caducifolia.

Para algunas áreas el problema de deforestación se presenta de manera importante, principalmente en las laderas que caen al río Pitillal, tanto como en la zona del río Santa Martha y el río el Cuale, en la parte media de la zona de estudio. En zonas muy sectorizadas la causa de la deforestación ha sido la urbanización en zona de montaña.



Figura 18. Sitio que fue desprovisto de la vegetación para el desarrollo de construcciones. Fuente: Periódico *NoticiasPV.com*; 15 de mayo 2007.

II.1.2 TIPOS DE MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA IDENTIFICADOS EN PUERTO VALLARTA

II.1.2.1 Caída de detritos en bloque

Estos movimientos fueron identificados en la secuencia terrígena inferior dado su composición de arenas y conglomerados de forma estratificada, que facilita el desprendimiento y caída de bloques. Estos pueden ser causados por la pérdida de la base que soporta el bloque por erosión diferencial (Figura 19), o por excavaciones en la parte baja del talud para la extracción de material.

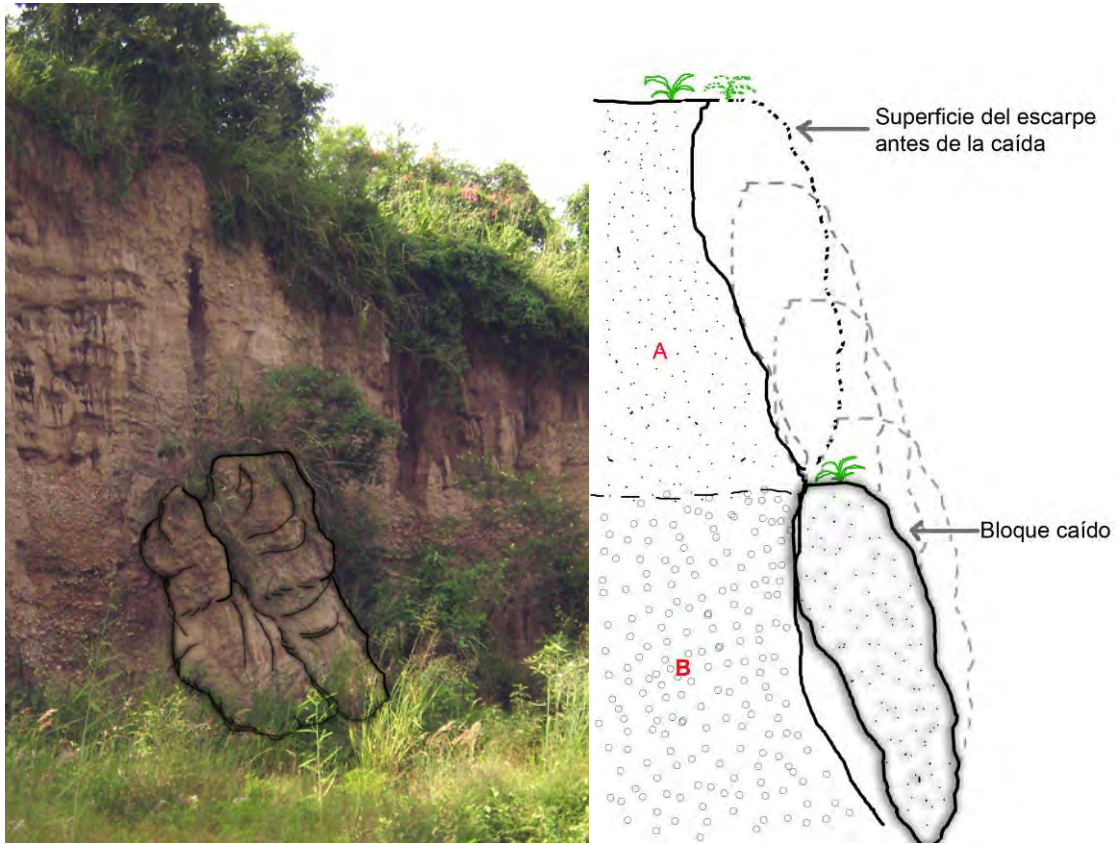


Figura 19. Se ilustra el movimiento de caída en bloques encontrado en un banco de material en la zona del poblado de Ixtapa (El bloque fue resaltado para su mejor visualización). A la derecha se ilustra en perfil el movimiento ocurrido que fue provocado por la erosión de la base que corresponde a una capa de clastos (B), provocando la pérdida del soporte de un bloque de arenas (A) y por consiguiente la caída de este .

II.1.2.2 Caída de rocas

Este movimiento ocurre cuando un material se desprende de escarpes o laderas y cae pendiente abajo a partir de donde toma otro movimiento como puede ser el rodar o rebotar. Las caídas de roca detectadas en campo fueron de dimensiones pequeñas, las cuales van de los 3 m de ancho por 4 m de alto, en promedio. Se presentan en escarpes rocosos con pendientes altas ($>70^\circ$), en taludes de carreteras y bancos de materiales, principalmente en unidades de andesitas (Figura 20).

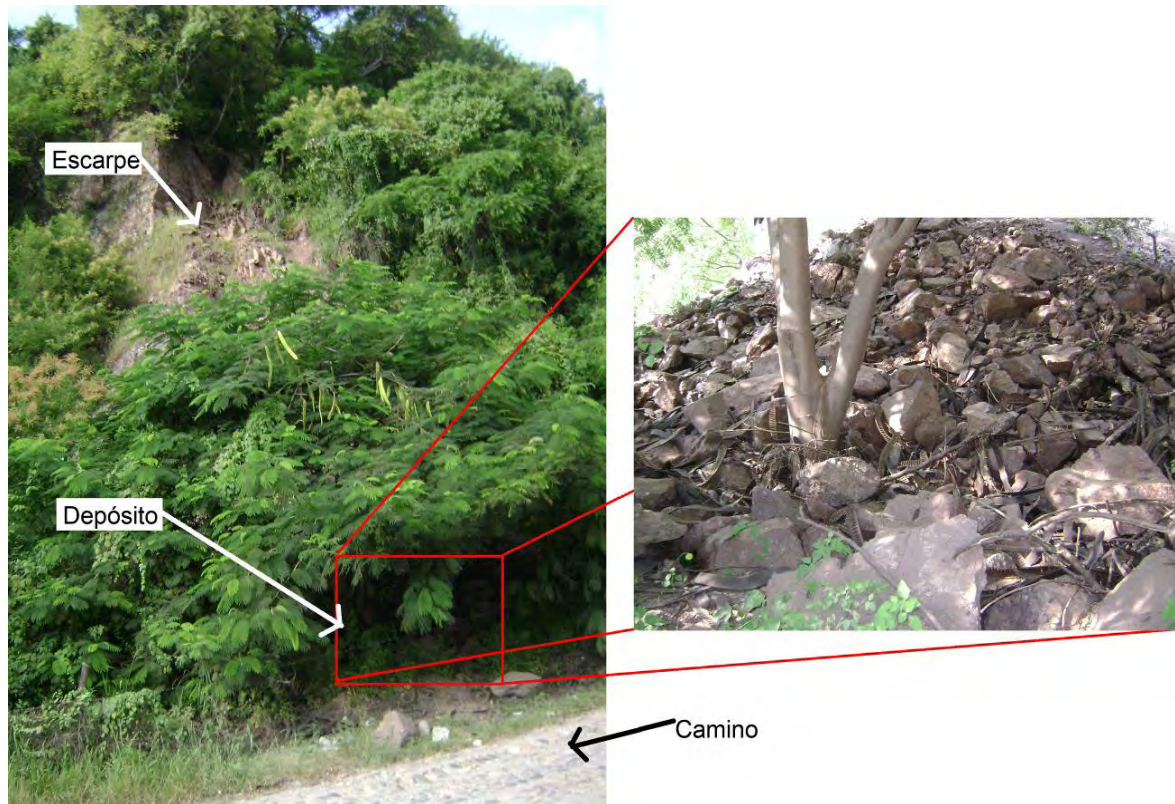


Figura 20. Caída de rocas en un escarpe de andesitas. El tamaño promedio de las rocas caídas es de 30 cm. Se localizó en el camino a la colonia Buenos Aires al salir del Libramiento.

II.1.2.3 Deformaciones gravitacionales profundas de ladera (flujo de rocas)

Las deformaciones gravitacionales profundas de ladera fueron identificadas durante la interpretación de fotografías aéreas (Figura 22) y del modelo sombreado del terreno. Los rasgos morfológicos que evidenciaron la presencia de este tipo de fenómeno fue primeramente la presencia de contrapendientes las cuales forman depresiones cercanas a la o en las cimas, esto mismo puede expresarse en el relieve originando múltiples crestas y la forma de la pendiente en masa desplazada es convexa. Otra característica es su gran volumen por lo que estos fenómenos de remoción en masa son las de mayores dimensiones en la zona de estudio, algunos llegan a tener extensiones de más de 700 m; con desniveles altitudinales de 400 m. Se presentan principalmente en el área donde predomina la secuencia vulcanosedimentaria y en menor proporción en los afloramientos de granitos. Estas deformaciones se identificaron esencialmente en los cañones del río Pitillal (Figura 21) y del río Cuale. Uno de los peligros que representa este fenómeno es la posibilidad que al deslizarse caigan sobre el cauce, formando una represa por el taponamiento del río, ocasionando el aumento del nivel del agua en

la parte alta. Existe también, la posibilidad de crear un efecto de crecida de las aguas que afectaría a las partes bajas del cauce. Buma y Van (1996) señalan que este tipo de movimientos suelen ser producto de debilidades estructurales de la roca y pueden ser desencadenados por sismos.

Es de resaltar que en la zona no se tenían reportados este tipo de fenómenos de remoción en masa, por lo que es importante establecer la necesidad de ampliar su estudio para detallar sus características y comprender su comportamiento.

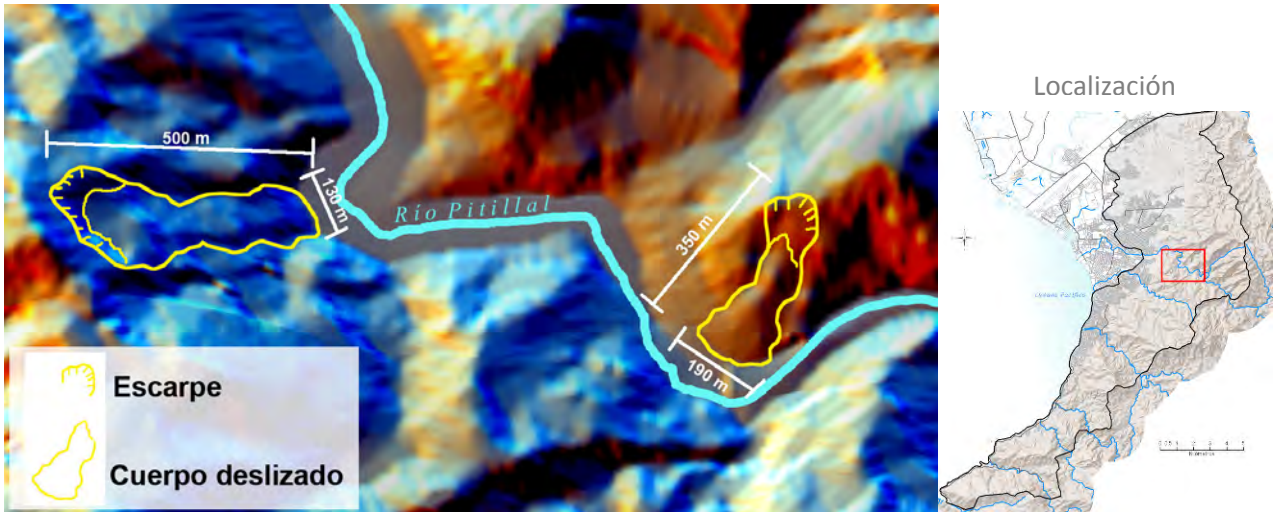


Figura 21. Dos deformaciones gravitacionales profundas de ladera, identificadas en la cuenca del río Pitillal. Las medidas que se presentan son aproximadas y la escala dentro de la misma imagen puede variar ya que es una vista en perspectiva. En el mapa de localización de la izquierda se señala la ubicación exacta del sitio.



Figura 22. Par estereoscópico de las dos deformaciones gravitacionales profundas (figura 21). Los deslizamientos se señalan con una flecha.

II.1.2.4 Deslizamientos traslacionales

Este tipo de movimientos se observaron de manera frecuente en la zona de estudio. Se puede decir que se trata de deslizamientos superficiales y sub-superficiales esto por su poca profundidad, la cual oscila en el metro de profundidad. De acuerdo a lo observado en campo el movimiento se presenta al existir discontinuidades paralelas a la superficie del escarpe (principalmente entre suelo y roca) (Figura 24a); cuando la dirección de rompimiento de las diaclasas es favorable a la pendiente (Figura 24c) y por factores de debilidad de la roca subyacente como la existencia de arcilla dentro de las diaclasas (Figuras 23 y 25 derecha), lo que produce debilidad en las rocas al expandirse esta arcilla. Este tipo de deslizamiento se presentó en particular sobre andesitas, las cuales se encontraban muy fracturadas. Los deslizamientos traslacionales encontrados ocurrieron a causa de fuertes precipitaciones o por la acumulación de humedad en el suelo, producto de constantes lluvias así también se presentaban a consecuencia de excavación en laderas, debido a la construcción de caminos y por asentamientos humanos o bien pueden ser provocados por la pérdida de la cubierta vegetal.



Figura 23. Rocas de un deslizamiento traslacional en Conchas Chinas las cuales presentaban arcilla (delimitado por la línea blanca) dentro de las diaclasas, este posible factor que contribuyó al debilitamiento de la masa de rocas. En la arcilla se presentan marcas de estrías que señalan la dirección del deslizamiento que se indica con las flechas.

Se encontró dos variedades de deslizamientos traslacionales los cuales se clasifican como:

Deslizamientos traslacionales superficiales o deslizamientos de detritos (Figura 24), estos son desprendimientos de material no consolidado compuesto por suelos y fragmentos de rocas fracturadas. La superficie de falla se presenta en el contacto entre la capa de suelo y la roca subyacente. Su ocurrencia en temporal de lluvias es alta.



Figura 24. Deslizamientos superficiales (detritos). (a) Deslizamiento de suelo y detritos sobre andesitas, causado por el debilitamiento de la base de la pendiente debido a la construcción de un camino en un cerro contigua a la comunidad de Playa Grande. (b) Deslizamiento de suelo y detritos sobre andesitas en camino hacia la población de Paso Ancho, que se puede catalogar como remóntate ya que es causado por la pérdida de su base posiblemente por un deslizamiento anterior. (c) Deslizamiento de suelo sobre granito en Mismaloya, aquí el material que se desliza contiene pocos fragmentos de roca en comparación de lo que se presenta en andesitas. (d) Deslizamiento ocurrido en condiciones naturales dentro del cañón del río Cuale, donde aparentemente no existió alguna intervención antrópica, lo que puede indicar que no es necesaria una modificación de las condiciones naturales para que se presente un deslizamiento en la zona.

Deslizamientos de roca. Estos se presentan con mayores dimensiones que los deslizamientos de detritos. Los deslizamientos de roca ocurren cuando el ángulo de la pendiente es paralelo al plano de falla de la roca (Figura 25). Este tipo de deslizamientos fueron se observaron en granitos y andesitas. Las condiciones climáticas son las principales causantes de las debilidades de la roca que posteriormente provocan su deslizamiento, otro factor a considerar es la presencia de arcillas en las diaclasas de las rocas. Estos movimientos también pueden ser desencadenados por vibraciones.



Figura 25. Deslizamientos (traslacionales) de roca. En la imagen de la izquierda se presenta la cicatriz de un deslizamiento de rocas en la carretera federal 200, este deslizamiento se presentó sobre granitos. En la imagen de la derecha se muestra un deslizamiento sobre andesitas muy fracturadas que presentaban arcillas dentro de diaclasas. El deslizamiento pudo ser causado por las modificaciones a la pendiente por la construcción de un edificio de departamentos el cual se puede observar a la izquierda de la imagen.

II.1.2.5 Deslizamientos rotacionales

Se observó principalmente en terraplenes o terrazas artificiales en la zona urbana, donde el material de relleno colapsa en forma de deslizamiento a través de una superficie curva, el movimiento se hace evidente en superficie a través de grietas y escarpes con proyección horizontal en forma de “herradura” o “media luna” Generalmente, este tipo de inestabilidad es propiciado por obras de contención (muros, anclajes) insuficientes o mal diseñados, con carencias importantes de drenaje superficial e interno.

En la zona de estudio se encontró en 2 sitios, uno fue en el conjunto residencial Villas de la Colina II en Conchas Chinas a causa de cortes realizados, los cuales forman taludes de más de 40 metros de alto, que han desestabilizado la pendiente (Figuras 26). El segundo caso corresponde al andador de la calle Olas Altas punto que se encuentra sobre la unidad litológica de la secuencia terrígena superior (Figura 28).



Figura 26. En la imagen de la izquierda se muestra un deslizamiento rotacional que ocurrió en residencial Villas de la Colina II en el 2007. A la derecha se muestra una fotografía tomada en octubre de 2008 de un muro bajo una terraza la cual presenta agrietamientos por el desplazamiento del talud, este también se encuentra en residencial Villas de la Colina II lo que hace pensar en que de nuevo se está presentando el fenómeno deslizamiento rotacional.

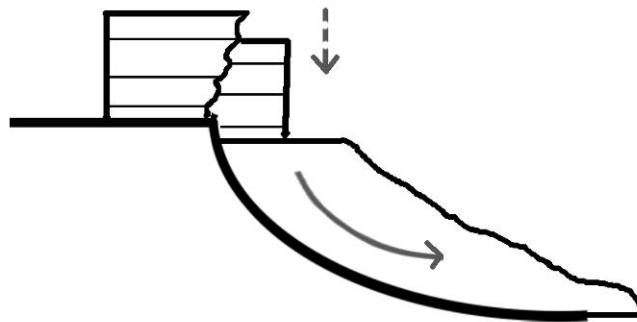


Figura 27. Se ejemplifica el proceso que ocurre en residencial Villas de la Colina II y en el andador Olas altas donde parte del talud se esta deslizando, ocasionando que las constricciones que se encuentra en la parte superior presenten agrietamientos por el hundimiento en su cimiento.



Figura 28. La imagen de la izquierda muestra una serie de escalones que presentan deformación debido a desplazamientos en el andador Olas Altas.

II.1.2.6 Flujo de detritos (*debris flow*)

Esta clase de fenómeno ha ocasionado los mayores desastres registrados en Puerto Vallarta, dada la rapidez y la energía con la que se desplazan así como por la extensión que puede alcanzar. Estos son movimientos pendiente abajo de una mezcla de materiales de consistencia lodosa con tamaño de fragmentos que van, desde arcillas hasta grandes bloques de roca de más de 5 metros de diámetro (Figura 29). Los factores que se deben reunir para que presente un flujo de detritos son (Carominas et al., 1996): la acumulación de material (rocas, detritos, rocas) en las cañadas y una repentina presencia de agua. En algunos de los eventos que ocurrieron en Vallarta, se tiene el registro de precipitaciones por arriba de los 100 mm, en 24 horas. Estos detritos suelen fluir por los drenajes naturales por donde normalmente escurre el agua. La ocurrencia de los flujos de detritos en la zona de estudio puede estar relacionada con movimientos de tierra y la eliminación de la cubierta vegetal. Lo que suele suceder es que al caer una fuerte precipitación el agua arrastra todo el material suelto formando una mezcla que arrolla todo lo que hay a su paso.



Figura 29. Restos dejados por un flujo de detritos que ocurrió en el año 2005 después que una tromba golpeará sobre la ladera de un cerro cercano al poblado de Playa Grande. En la imagen se distingue en primer plano un bloque con un tamaño cercano a los 2 m de alto por 3 de ancho, que fue arrastrado y refiere a la fuerza con la que bajan los flujos de detritos.

II.2 DESASTRES OCURRIDOS POR FENÓMENOS DE INESTABILIDAD DE LADERA EN PUERTO VALLARTA

A continuación se presentan un recuento de eventos de inestabilidad de laderas que causaron importantes pérdidas materiales y humanas. Esto basado en la revisión de documentos periodísticos, tanto como en entrevistas abiertas realizadas en campo a pobladores del lugar y al personal de la Unidad Municipal de Protección Civil, con la cual se realizó un recorrido por las zonas afectadas por estos fenómenos. En la última parte de esta sección se muestra la localización (Figura 36) de los desastres que a continuación se describen.

II.2.1 JULIO 1975

El primer registro con el que se cuenta es del 4 de julio de 1975, cuando un flujo de detritos que bajó a la pequeña bahía donde se encuentra el entonces hotel Camino Real (hoy llamado “Dreams”) afectó la zona de estacionamientos del hotel, cubriéndolo con una capa de detritos que semi-sepultó a los autos que ahí se encontraban. También provocó una serie de derrumbes sobre la carretera 200. Se señala que fue a causa de la presencia de torrenciales lluvias (Figura 30). Los registros de lluvia muestran una

precipitación para ese día 142 mm y que antes de este evento hubo dos días de precipitaciones seguidas el primero con un registro de 68 mm. Los daños reportados sólo fueron a los vehículos afectados, a las instalaciones del hotel, y afectaciones y cierres de la carretera 200, sin que se hayan reportado víctimas.



Figura 30. Nota periodística de *El Informador* con fecha del 7 de julio de 1975, de la cual se extrajo la información del evento de flujo que afectó al hotel Camino Real.

II.2.2 SEPTIEMBRE 1993

Este desastre ocurrió el 18 de septiembre de 1993 cuando una serie de flujos de detritos en varias partes de la ciudad causaron graves afectaciones. La información de este suceso fue obtenida tanto de una nota periodística de *El Informador* (1975) como de la información proporcionada por los pobladores. El desastre ocurrió después que cayó una tromba que fue seguida por constantes precipitaciones. Dos sitios presentaron las afectaciones más importantes; uno fue en el centro de la ciudad, siendo la calle Abasolo la más afectada (Figura 31). Se reporta un flujo de detritos que bajó por una cañada que llegó hasta el malecón. La gente comenta que el flujo fue capaz de arrastrar por varias cuadras los vehículos que se encontraban estacionados sobre la calle. El suceso causó la muerte de dos personas perteneciente a la misma familia que había construido su casa sobre el canal de escurrimientos de la cañada. El flujo derrumbó la vivienda sepultando al jefe de la familia y a uno de sus hijos.

El segundo sitio que sufrió fuertes afectaciones fue la Colonia Buenos Aires, que se localiza en las márgenes del río Cuale. Al parecer otro flujo de detritos que bajó de las parte altas de los cerros

contiguos a esta colonia provocó, de acuerdo al reporte periodístico, la muerte de una persona y la afectación a 20 familias que perdieron su hogar.

Para este caso se reportó: 3 muertos, 35 heridos, 60 familias damnificados, y daños por 4 millones de pesos. En la parte del centro 10 calles quedaron totalmente destruidas, 40 casas quedaron semisepultadas y 10 viviendas totalmente destruidas, dejando parcialmente incomunicada la parte Sur de la ciudad (El Informador, 1993). Los registros de precipitación para esos días reportan para el día 18, 200.5 mm seguido de dos días con lluvias de 13.5 y 23.5 mm, respectivamente.



Figura 31. La imagen de la izquierda muestra la cañada por donde bajo el flujo de detritos en la calle Abasolo. La imagen de la derecha muestra una barda que fue parte de la casa que fue derrumbada por el flujo de 1993 sepultando y matando a dos de sus habitantes en la calle Abasolo en las partes altas del centro de la ciudad.

II.2.3 TEMPORAL 2005

No se tiene la fecha precisa de cuando ocurrió este evento. Fueron afectados dos distintos sitios en la zona conocida como Playa Grande a causa de un flujo de detritos provocado por una tromba, que la gente la identifica como culebra. Uno de ellos afectó a una granja piscícola (Figura 32). Este flujo corrió a lo largo de una cañada terminando en la granja señalada, dejando a su paso una gran cantidad de fragmentos de rocas, algunos de ellos con diámetros por arriba de los 5 m, al igual que árboles arrancados de raíz.



Figura 32. En la imagen de la izquierda se muestran detritos y bloques de rocas arrastrados por el flujo que afecto la granja piscícola. La imagen de la derecha de Google Earth (2006) muestra el canal seguido por el flujo y su respectiva zona de depósito en el año 2005. El punto amarillo indica el lugar y la dirección donde fue toma la imagen de la izquierda.

En el segundo punto afectó a una serie de casas en la colonia Playa Grande (Figura 33). El flujo alcanzó una mayor distancia a comparación con lo sucedido en las granjas piscícolas, los tamaños de los detritos fueron menores pero presentan tamaños uniformes. Fluyó por el cauce de un arroyo que desemboca sobre esta colonia, semisepultando a las casas que se localizaban sobre la desembocadura. En este caso se construyó un canal con la intención de encausar la salida de este arroyo.



Figura 33. Imagen que muestra los detritos dejados sobre el lecho de arroyo por el paso del flujo de detritos en el año 2005. Las flechas señalan la dirección del flujo.

II.2.4 ABRIL 2007

El 17 de abril de 2007 un departamento en construcción en Villas de la Colina II dentro de la zona conocida como Conchas Chinas, se colapsó al perder sus cimientos (Figura 34). Esto se debió a un deslizamiento rotacional en el talud, producto del corte y excavación de la ladera. Este caso en particular es relevante dado que sucedió en plena época de estiaje y no existió el factor lluvia a comparación de los otros desastres ocurridos. No hubo víctimas ya que el departamento afectado aún no se encontraba en uso, sólo ocurrieron daños materiales.



Figura 34. Imagen tomada del periódico *El Faro* (2007) donde se muestra el deslizamiento ocurrido en Villas de la Colina II.

II.2.5 AGOSTO 2007

Este desastre ocurrió el 23 de agosto del 2007, donde un flujo de detritos en la colonia El Calaso, sobre el cerro de La Cruz, causó la muerte de una persona. Aquí sucedió algo similar al caso de 1993 donde la persona fallecida construyó su casa sobre el canal natural del escurrimiento. Al bajar el flujo derrumbó la casa atrapando a la persona que falleció. Los materiales arrastrados afectaron más casas en las partes bajas del cerro (Figura 35). Las lluvias que ocasionaron el flujo de detritos fueron provocadas por los remanentes del Huracán Dean, el cual tuvo su origen en aguas del Golfo de México, se adentró al país y salió al Pacífico por la zona de Vallarta ya como tormenta tropical. Los pobladores del lugar al ser

entrevistados mencionan que antes del suceso, existieron excavaciones en la parte más alta de la cañada, siendo el producto de estas excavaciones el material que fue desplazado posteriormente en forma de flujo de detritos.



Figura 35. En la imagen de la izquierda (Noticiaspv.com, 2007) se puede observar el material que fue arrastrado por el flujo. En la imagen de la derecha se muestra parte de la casa que fue destruida por el flujo de detritos.

II.2.6 JULIO 2008

El 7 de julio del 2008 sucedió un flujo de detritos en una cañada incrustada en la colonia El Cerro, muriendo una persona al ser atrapada por el colapso de una barda que fue derribada por el flujo. Uno de los habitantes del sitio comentó que sucedieron dos deslizamientos, el primero provocó el colapso de una barda, quedando una persona atrapada y posteriormente un segundo flujo sepultó a la víctima, siendo esto la causa de su muerte. La peculiaridad de este caso se atribuye al movimiento de tierras y eliminación de la cubierta vegetal en la parte alta del cerro por la construcción que se realizaba, y que se encontraba clausurada por irregularidades (Figura 36).



Figura 36. En la imagen de la izquierda se muestra las alteraciones a la ladera del cerro realizadas por una construcción. En la imagen de la derecha se muestra el material deslizado y los fragmentos de la barda que fue tirada por un flujo de detritos en julio de 2008.

Los desastres que se han presentado, indican a los flujos de detritos como el principal peligro en materia de deslizamientos. La mayoría ocurrieron debido a que asentamientos humanos se localizaban dentro de cañadas, así también comparten los señalamientos que indican modificaciones antrópicas en las partes altas de la cuenca, que debilitaron el estado original de los materiales que formaban la ladera. El único caso que rompe con este esquema es el sucedido en abril de 2007, el cual únicamente se puede explicar por las afectaciones antrópicas que lo desencadenaron. Bien puede ser este el indicador de un posible cambio en la tendencia mostrada hasta el momento de los desastres por inestabilidad de ladera en Puerto Vallarta.

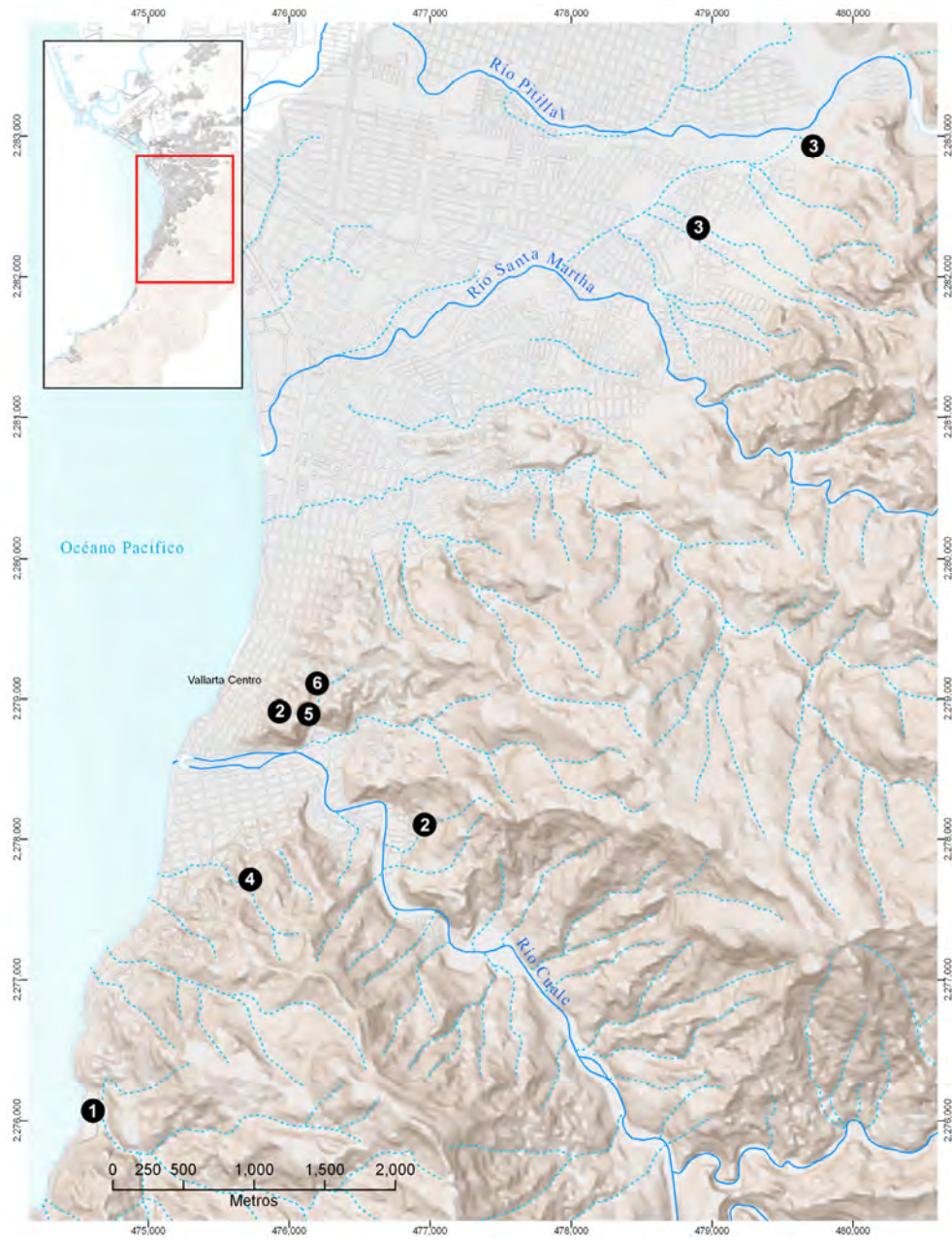


Figura 37. Mapa de localización de los desastres descritos.

- 1) Julio 1975 (Flujo de detritos).
- 2) Septiembre 1993 (Flujo de detritos).
- 3) Temporal 2005 (Flujo de detritos).
- 4) Abril 2007 (deslizamiento rotacional)
- 5) Agosto 2007 (Flujo de detritos).
- 6) Julio 2008 (Flujo de detritos).

II.3 INESTABILIDAD DE LADERAS Y CRECIMIENTO URBANO

Actualmente en Puerto Vallarta existe una gran polémica por las políticas de crecimiento urbano que se quiere implementar. Desde la administración Municipal 2003-2006 se intentó crear un nuevo Plan de Desarrollo Urbano (PDU). El proyecto que se presentó causó una gran polémica en la sociedad civil dado que permitía la construcción de condominios verticales en algunos sitios sobre la zona de montaña. El objetivo de construir en esta zona es por su alto valor paisajístico, ya que se encuentran lugares donde se puede divisar gran parte de la bahía tanto como de la ciudad (Figura 38). Además ya no se cuenta con muchos espacios dentro del municipio que puedan ser atractivos para la industria del turismo de playa, por lo que una posibilidad atractiva es la zona de montaña.



Figura 38. Vista desde la zona de montaña hacia el centro histórico y bahía del Puerto.

En esa misma administración se autorizaron construcciones en la zona conocida como Conchas Chinas, como fue el caso de Villas de la Colina II, que representó una modificación muy agresiva al realizar excavaciones y cortes dejando taludes de pendientes muy altas (Figura 39). Esto ya ha causado afectaciones a la estabilidad de la pendiente ocurriendo los casos ya comentados con anterioridad.



Figura 39. Cortes realizados a los cerros para la construcción de edificaciones.

El PDU fue aprobado por el ayuntamiento semanas antes de que terminara la administración. Pero el gobierno entrante lo invalidó, y comenzó a construir uno nuevo. A mitad del año 2008 presentó el nuevo PDU para consulta pública. De nuevo generó polémica porque esta versión no sólo contempló algunas zonas cercanas a Conchas Chinas sino que va más allá y propone que toda la vertiente meridional de la zona de montaña desde Conchas Chinas hasta Boca de Tomatlán, que es el límite del municipio, pueda ser usado con una vocación turística lo que da la pauta para que se edifique infraestructura para el turismo. Esta última versión se presenta entonces más agresiva para esta zona. Este PDU se presentó a finales del 2008 para su aprobación, lo cual no sucedió y se sometió a una revisión. La presente administración termina su periodo de gobierno al final del 2009 y hasta el momento no existe un nuevo PDU aprobado.

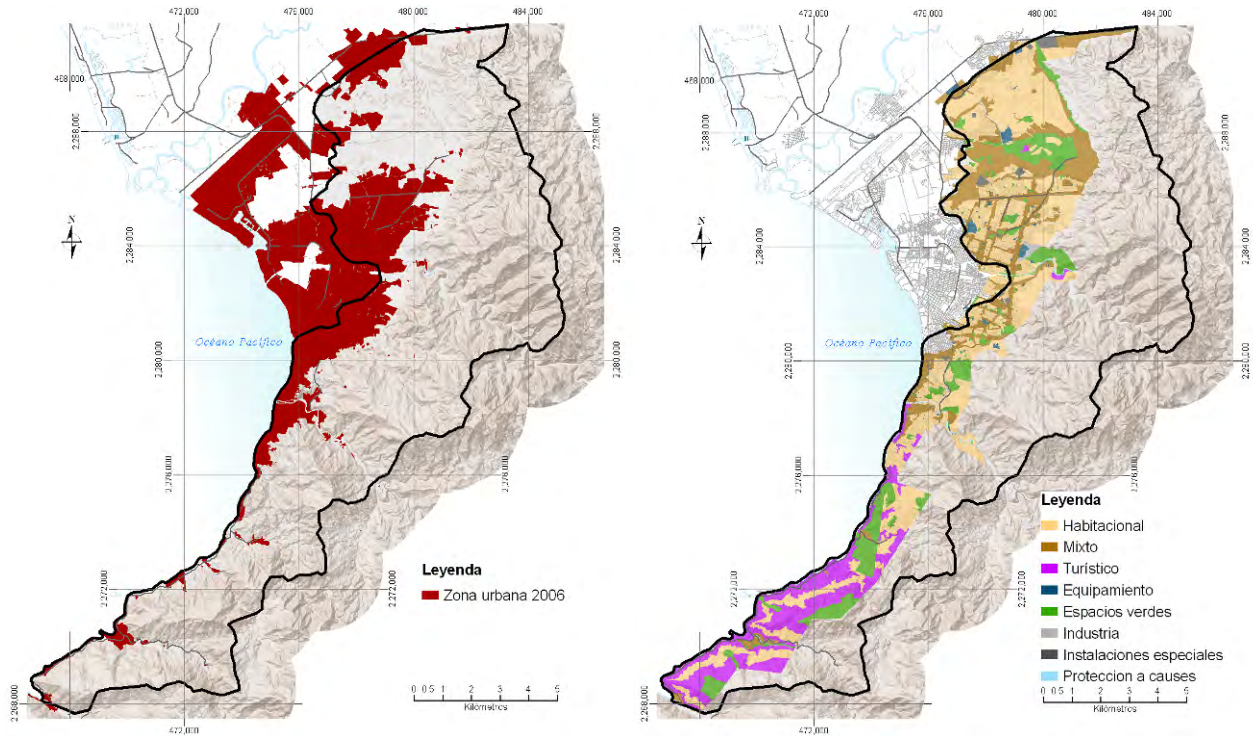


Figura 40. En la imagen de la izquierda se presenta la extensión urbana para el año 2006. En la imagen de la derecha se muestra la última versión del PDU. En este se observa que en el área al sur antes una zona de conservación, se proyecta que exista uso urbano, en especial turístico, (en color morado).

Existe también un proyecto para construir un camino que funcione como libramiento de la ciudad. Sin embargo el proyecto presentado no sólo contempla construir el tramo que dará la opción a los vehículos que no tienen necesidad de llegar a la ciudad porque sólo van de paso, sino que se proyecta que pase al pie de toda la zona de montaña y se adentre a ella en la parte Sur. Ahí correría de forma paralela a la carretera 200 prácticamente hasta llegar a Boca de Tomatlán, zona en la que no existe mancha urbana que librar y parece no haber justificación del último tramo. En la figura 41 se presenta el mapa que indica el trazo proyectado del libramiento.

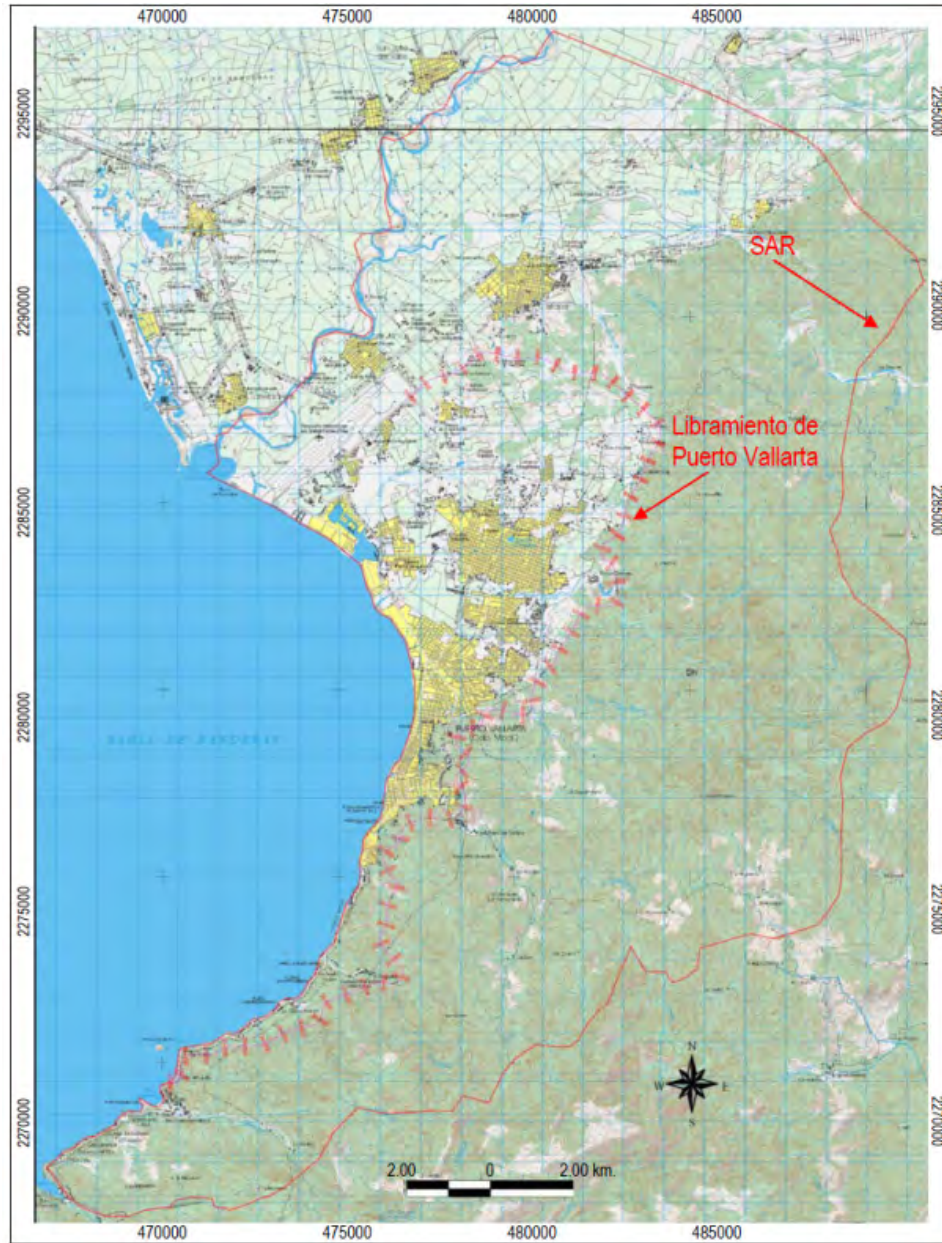


Figura 41. Imagen extraída de la manifestación de impacto ambiental (MIA) presentada a la Secretaría de Comunicaciones y Transporte donde se establece el trazo proyectado para el libramiento.

En una de las conclusiones de la MIA se establece que:

“La construcción de la carretera traerá consigo importantes impactos ambientales, la mayoría de ellos prevenibles o mitigables; es decir, su magnitud puede ser disminuida. Entre los más importantes destacan la pérdida de cobertura vegetal, la pérdida y susceptibilidad a la erosión del suelo, pérdida del hábitat, efecto barrera para el desplazamiento de fauna además de mortandad de fauna por

atropellamientos. No obstante, con la correcta ejecución y cumplimiento de las medidas de mitigación, la mayoría de estos impactos serán previsibles o mitigables, disminuyendo su magnitud.”

Esta conclusión deja en claro lo que puede ocasionar esta obra, sin tomar en cuenta el argumento de que es mitigable. Si se tiene en cuenta como han sucedido desastres por deslizamiento en Vallarta, estas alteraciones sin duda, serán factor para que se presentes flujos de detritos u otros tipos de deslizamiento que tendrán su principal afectación en la parte baja de ladera donde se encuentra la carretera 200 y algunos asentamientos humanos, como la zona de Conchas Chinas y el fraccionamiento Amapas, al inicio de la carretera. También es posible que el trazo del libramiento cruce por deslizamientos como es caso de los flujos de roca, lo que ocasionaría su activación o en su caso, aceleraría su movimiento.

Sin duda este proyecto también puede servir como indicador de lo que se proyecta para zona al Sur de la ciudad que, junto con las intenciones reflejadas en los PDU dan pauta para suponer un posible escenario de alteraciones al estado actual de este sitio. En materia de inestabilidad de laderas esto puede implicar un incremento de la presencia de estos fenómenos como ya está sucediendo en zonas de ladera como el caso de Conchas Chinas.

III. ELABORACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

Esta sección tiene el objetivo principal de explicar los procedimientos que se realizaron y cuáles fueron los temas considerados para determinar la susceptibilidad a deslizamientos dentro de la zona de estudio. La metodología desarrollada está basada en el modelo heurístico del tipo Combinación de Mapas Cualitativos. Una parte esencial para este tipo de metodología es el uso del SIG, herramienta que se ha convertido en esencial para la identificación y predicción de los procesos de remoción en masa (Carrara y Pike, 2008). El SIG permitió manejar la información de manera espacial, así como modelar las condiciones que son causantes de inestabilidad de laderas en la zona de Puerto Vallarta. Para este trabajo el uso del MDT, es base y por tanto de gran importancia al derivarse de este (como se verá más adelante), varias de las capas temáticas elaboradas.

De manera general la metodología consistió (Figura 42) primero en buscar y recolectar información de la zona de estudio que fue variada en proyecciones geográficas, escalas y presentaciones, por lo que fue necesario editarlas para que pudieran ser manejadas dentro de un mismo estándar (digitalización, georeferenciación, cambio de datum, actualización y corrección). Esta información que fue reunida se usó para realizar interpretaciones, tanto como para desarrollar análisis espaciales a través de un SIG. Con base a estos dos procesos principales de la información base (interpretación y procesamiento digital del MDE), se elaboraron, lo que nombro subproductos temáticos. Estos se encontraban tanto en formato vectorial como raster, generalizando todo en formato raster. El siguiente paso consistió en desarrollar una serie de procesos digitales con el objetivo de modelar factores que condicionan y detonan inestabilidad de ladera en la zona de estudio. Lo que dio como resultado capas temáticas donde cada una contempla una condición que incide en que suceda fenómenos de inestabilidad de ladera. Los valores de las capas fueron normalizadas conforme al método del valor máximo, que consiste en dividir a cada mapa por su valor máximo, lo que da como resultado valores en una escala de 0 a 1, esto con el propósito de trabajar sobre una misma escala (Castellanos y van Westen, 2008), independientemente de sus valores de medida originales, facilitando así la comparación entre capas (Roa, 2006). En esta escala el valor 1 representa la susceptibilidad más alta, y conforme los valores se vayan acercando a 0 se irá disminuyendo el grado de susceptibilidad, según el tema que le corresponda.

Después de la estandarización de los valores en rangos de 0 a 1 cada capa fue ponderada con un peso determinado, según su nivel de relevancia. Finalizando con el cruce de todas las capas que dio como resultado el mapa de susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de ladera de Puerto Vallarta en dos versiones uno contemplando la extensión actual de la mancha urbana y otra contemplando la mancha urbana contemplada por el PDU.

Las herramientas utilizadas para el procesamiento de información geográfica, fueron el software ArcGis 9.2 y Arcview 3.2, ambos de la empresa ESRI. Se trabajó tanto con información vectorial como raster, cuya resolución de pixel fue de 10 metros. Para obtener mejores resultados y evitar faltantes de información se estableció un área de trabajo que abarcó 2 kilómetros más que el límite fijado para la zona de estudio.

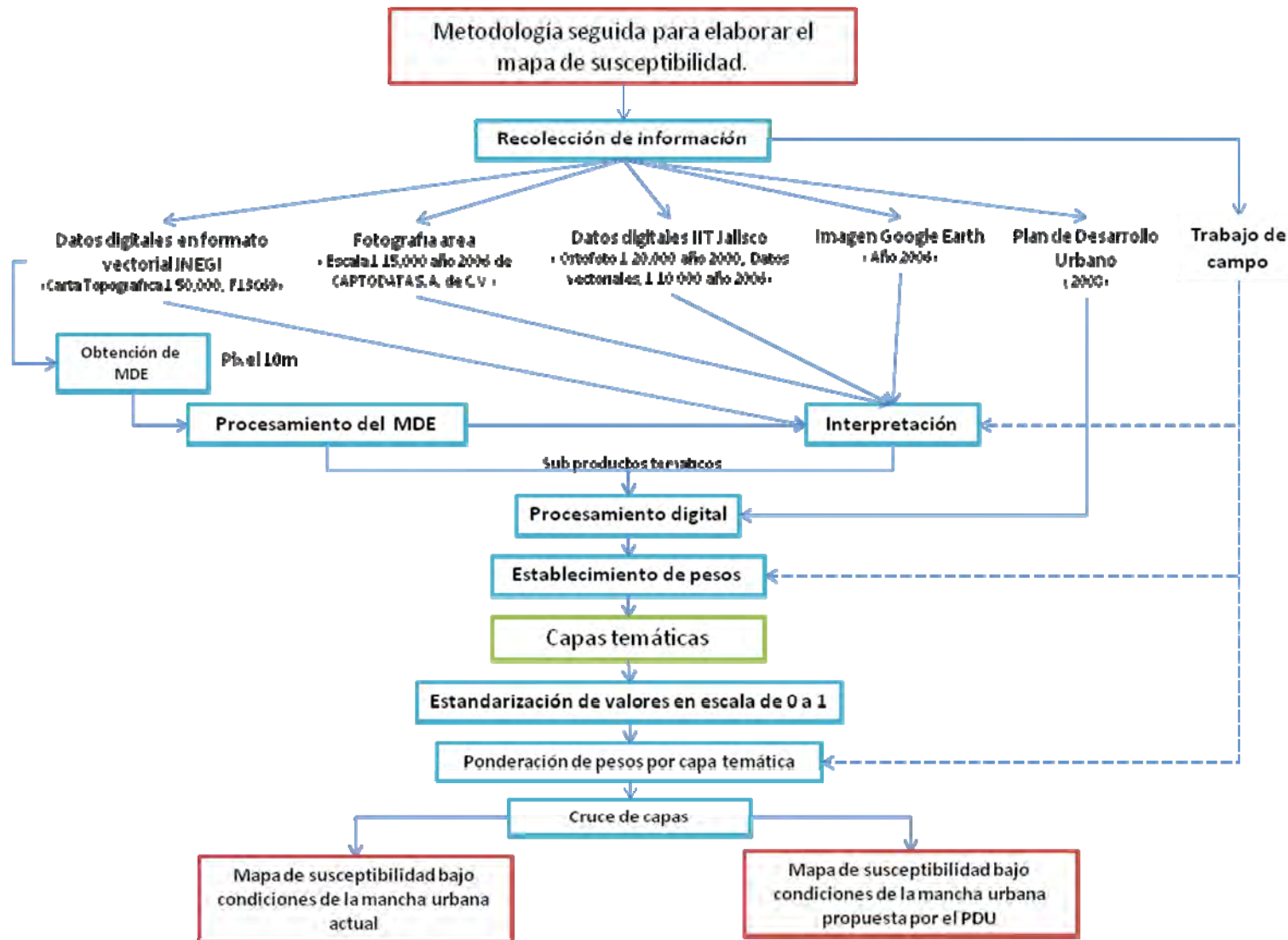


Figura 42. Esquema metodológico seguido para la elaboración del mapa de susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de ladera en Puerto Vallarta

III.1 ELABORACIÓN DE CAPAS TEMÁTICAS

III.1.1 LITOLOGÍA

El propósito de incluir esta capa es porque la litológica es un factor que contrala la presencia de inestabilidad (Lan et al., 2004). La información litológica utilizada tiene como base el mapa geológico escala 1:20,000 del Atlas de Peligros Naturales de Puerto Vallarta (2006), al cual se le realizaron modificaciones de acuerdo a lo verificado en campo.

Para otórgale pesos al grado de cohesión de los materiales que lo forman, el grado de fracturamiento de las rocas y el grado de intemperización, que fueron características que pudieron ser observadas en campo. Los valores se encuentran en una escala de 0 a 1, donde el valor 0 corresponde a la menor susceptibilidad y el valor 1 a la mayor susceptibilidad de producir deslizamientos (Tabla 1).

Tabla 1. Pesos otorgados a cada unidad litológica

<i>Unidad litológica</i>	<i>Peso</i>
Aluvión	1
Sedimento fluvial	0.9
Secuencia terrígena superior	0.8
Secuencia terrígena inferior	0.7
Secuencia vulcanosedimentaria andesítico	0.6
Granito	0.5
Secuencia vulcanosedimentaria	0.5

El siguiente paso fue agregar dichos pesos al archivo para posteriormente rasterizarlo (Figura 43).

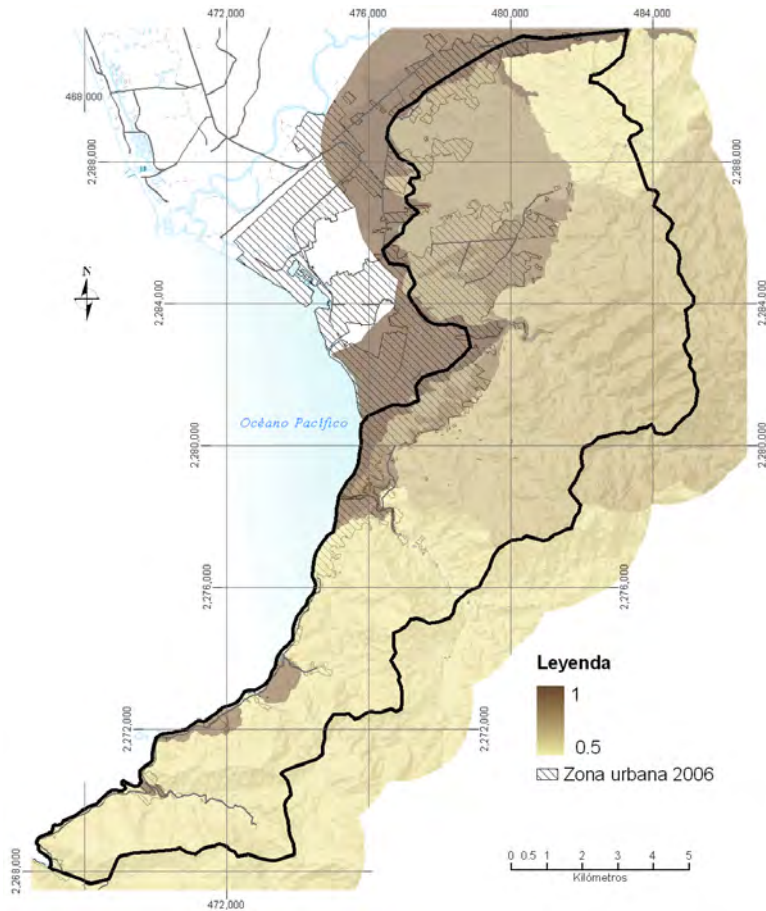


Figura 43. Capa de litología con pesos

III.1.2 ÁREAS DE DESMONTE

La razón para usar esta información estriba en la idea de que una ladera desprovista de vegetación con una pendiente alta, puede ser más susceptible a la erosión y a movimientos en masa, en especial flujo de detritos (O’Loughlin, 2005; Lukose, 2006).

Esta capa fue hecha con base en la interpretación de la imagen de Google Earth que tiene la fecha de enero y febrero del 2006. Se identificó en las zonas de montaña áreas desprovistas de una cobertura arbórea o de matorral.

La capa con las áreas interpretadas fue cruzada con el mapa de pendientes normalizado (dándole el valor de 1 a la mayor pendiente y 0 a la menor) con el objetivo de darle pesos a

estas áreas, bajo el criterio de que es más susceptible un área desprovista de vegetación en pendientes altas que una en pendientes bajas (Figura 44).

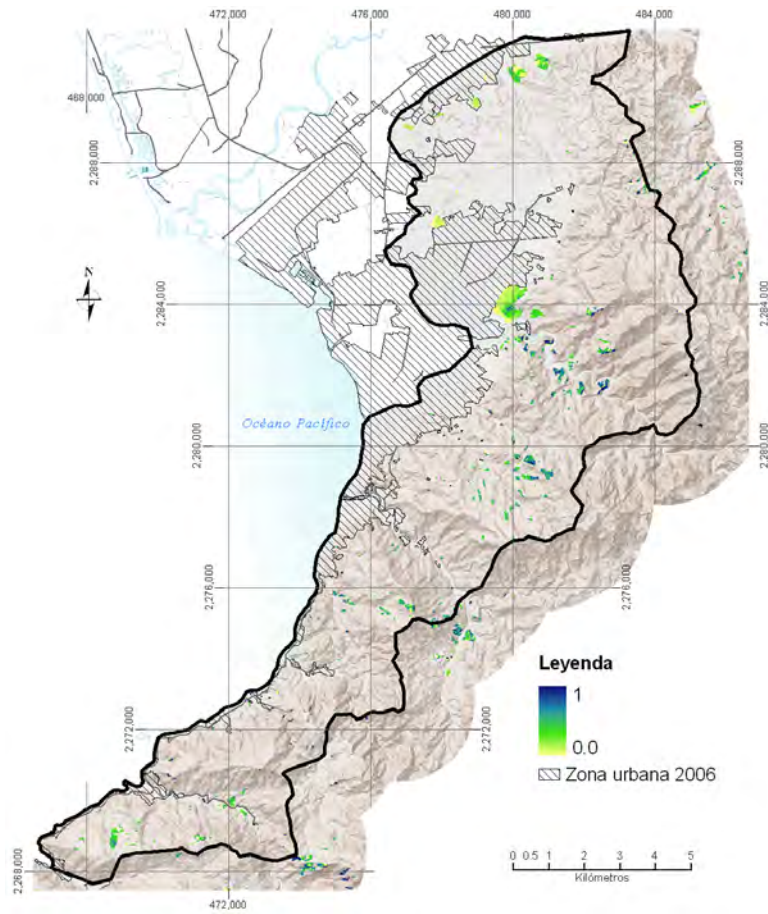


Figura 44. Capa de áreas de desmonte con pesos

III.1.3 ZONAS INESTABLES POR CAMINOS

En Puerto Vallarta ocurren en cada temporada de lluvia deslizamientos que están asociados al corte de taludes por caminos. Con esta capa de zonas inestables se hace énfasis en esta realidad. El supuesto tomado para modelar tal efecto es; si una zona tiene una pendiente alta y está cercana o contigua al camino la susceptibilidad es alta.

La capa de caminos utilizada para el análisis, fue construida con base en los datos vectoriales del Atlas de Caminos y Carreteras 1:20,000 (2006) del Instituto de Información Territorial del estado

de Jalisco (IIT), utilizando la información sobre caminos rurales, la cual fue complementada con fotointerpretación de la imagen de Google Earth (2006), esto con el fin de identificar todos los caminos sobre la zona serrana. Se tipificaron los caminos de la siguiente manera: calles, que se encuentran dentro de zonas urbanas; carretera, que se refiere a la carretera 200, la cual es de 2 carriles; libramiento, que representa al libramiento de la ciudad y llega a ser de 4 carriles; terracería, que se refiere a caminos no cubiertos por asfalto o concreto, (estos son los que más se adentran a la zona de serranía es decir existe la presencia de altas pendiente y que posiblemente carecen de algún tipo de planeación); por último vereda, que son caminos de un sólo paso.

Dado que la capa vectorial original marca la parte central de los caminos, se decidió establecer un ancho promedio por tipo de camino. Después se procedió a establecer una zona de afectación aproximada, para lo cual se tomó como referencia los puntos tomados en campo que presentaban deslizamientos. En la tabla 2 se indican los valores establecidos.

Tabla 2. Tipología de caminos y su área de afectación a la estabilidad de laderas

<i>Tipología</i>	<i>Ancho promedio</i> <i>(m)</i>	<i>Área de afectación</i> <i>(m)</i>
Calles	8	10
Carretera	8	20
Libramiento	15	20
Terracería	8	30
Vereda	5	10

La capa de la zona de afectación de caminos a la inestabilidad de ladera fue rasterizada. Con dicha capa se extrajo del mapa de pendientes la información correspondiente a la zona de afectación. Del resultado se eliminó las pendientes menores a 15° por considerar que en éstas no ocurren deslizamientos, de modo que a las pendientes de menores de 15° se les otorgó el

valor de pendiente 1, esto para evitar pérdida de información al cruzar capas. Por último está capa correspondiente a pendientes se normalizó de 0 a 1.

El siguiente paso fue obtener el mapa de distancia lineal (usando el paquete ArcGis con la extensión "Spatial Analyst"), del cual se extrajo la información correspondiente a la zona de afectación establecida. Para facilitar el manejo de los valores se normalizó en una escala de 0 a 1. Dado que en el mapa de distancias originalmente los valores aumentan conforme se aleja del camino, se invirtieron los valores. Esto causó que la superficie correspondiente al ancho del camino tuviera el valor 1. Con el propósito tener la información correspondiente sólo al área de influencia (no así área del ancho del camino) se cambió el valor 1 por valor 0, para después volver a normalizar. Así se obtuvo un área de influencia con valores de 0 a 1.

Con la capa de pendientes y distancia a caminos en la zona de afectación ya normalizada, se cruzaron con una multiplicación para conseguir que el valor de pendiente fuera aumentado por la cercanía al camino (Figura 45).

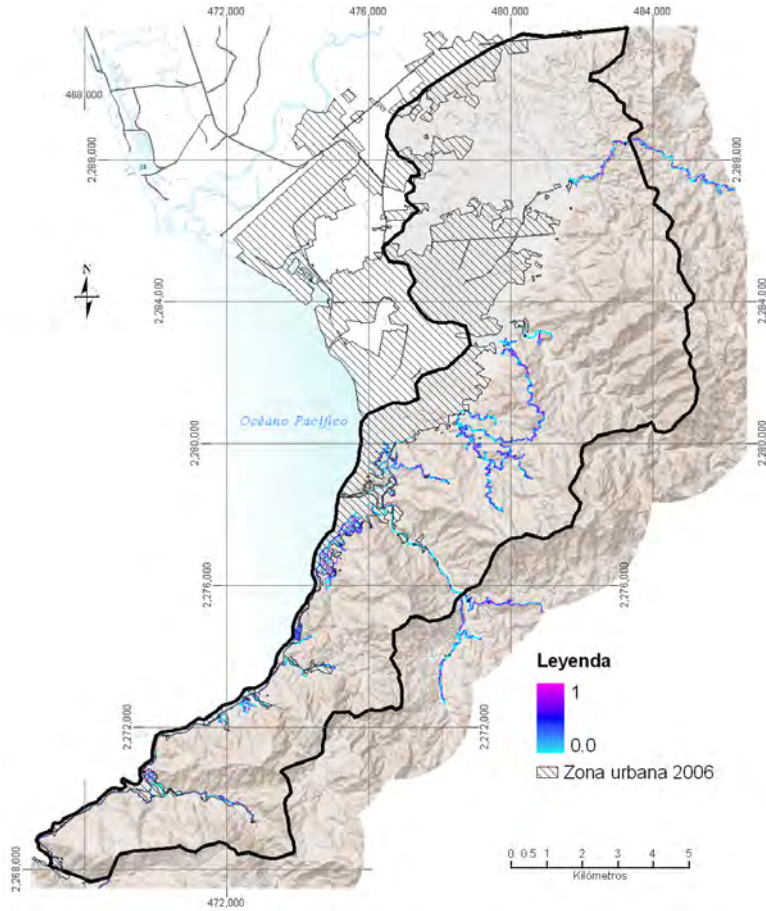


Figura 45. Capa de zonas inestables por caminos con pesos

III.1.4 DISTANCIA A MORFOLINEAMIENTOS

Los lineamientos corresponden a la interpretación de tendencias lineales expresadas en el relieve. La presencia de lineamientos refiere la existencia de fallas o fracturas, es decir, zonas de debilidad que pueden influir en la inestabilidad de laderas (Sarkar, 2008). La interpretación fue hecha a partir de fotografías aéreas escala 1:15,000 del año 2006 de la empresa CARTODATA, y del modelo sombreado del terreno obtenido de la interpolación de curvas de nivel del INEGI escala 1:50,000.

Para esta capa sólo fue necesario calcular el mapa de distancia lineal con ArcGis. Después se normalizó los datos de 0 a 1 y por último se invirtieron los valores.

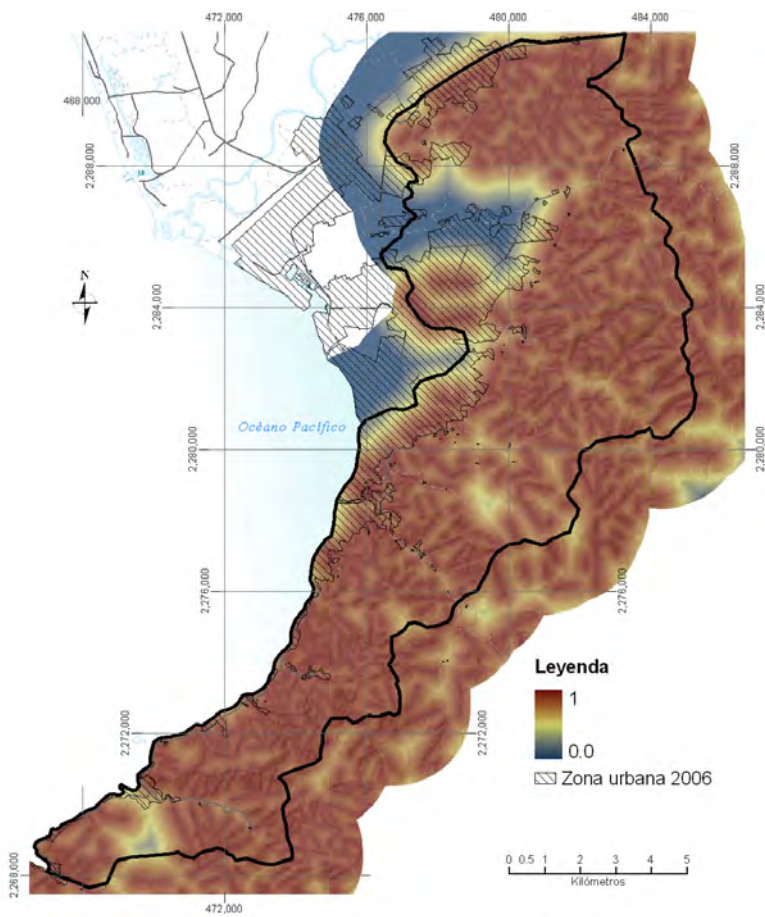


Figura 46. Capa de distancia a morfolineamientos con pesos

III.1.5 RADIACIÓN SOLAR

Se consideró usar esta capa con el objetivo de determinar las zonas que pudieran concentrar mayor humedad al tener menor insolación. La aplicación de este modelo tiene mayores ventajas que el típico modelo de orientación de la ladera, debido a la posibilidad de determinar la insolación con base en la latitud del lugar, además de considerar que la insolación no es la misma durante el año.

El mapa de radiación solar fue calculado con la función "Area Solar Radiation" que se encuentra dentro del ArcToolbox del programa ArcGis. Las unidades en que se calcula la insolación son en Watts hora por metro cuadrado. El insumo para el cálculo del modelo de insolación fue el modelo digital de elevación, contemplando un período de tiempo del 5 de junio al 15

noviembre para el año 2009, lapso que corresponde al tiempo de lluvia en la zona. Para fines de usar esta información se normalizaron los valores de 0 a 1. Para lo cual al modelo se restó conforme a su valor más bajo, para tener como valor mínimo 0 y posteriormente poderlo normalizar. El último paso fue invertir los valores dado que se buscó tener el mayor peso en las áreas donde la insolación es mínima.

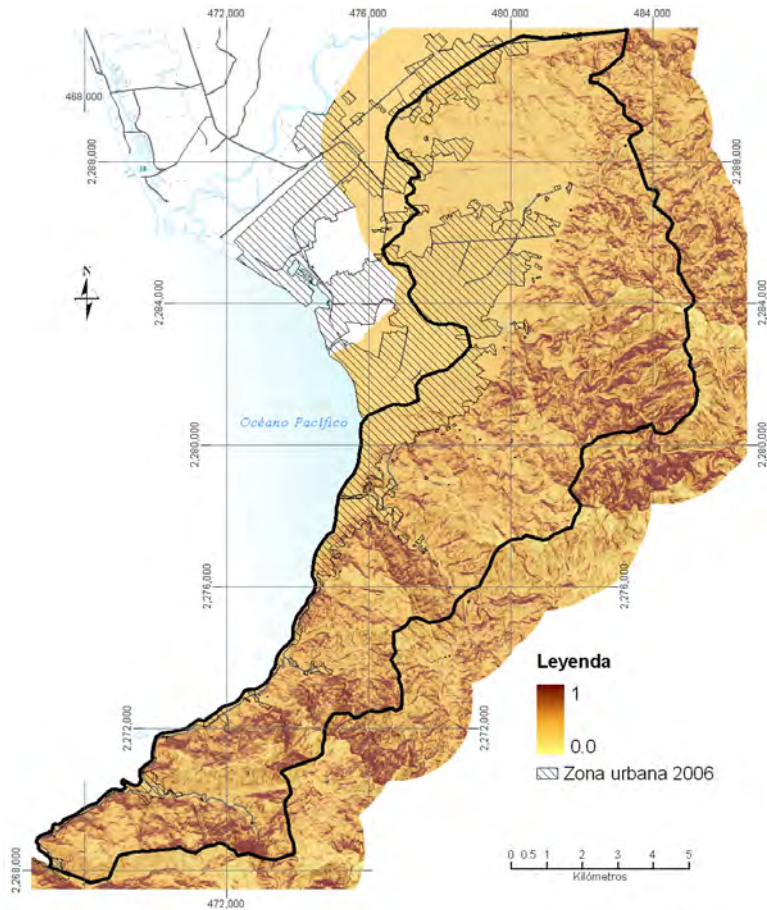


Figura 47. Capa de radiación solar con pesos

III.1.6 INVENTARIO DE DESLIZAMIENTO Y SU ZONA DE INFLUENCIA

Esta capa indica los sitios donde ya ocurrieron fenómenos de inestabilidad de ladera. Para elaborar el inventario de deslizamientos se realizó la interpretación de fotografías área escala 1:15,000 del año 2006 de la empresa CARTODATA S.A. de C.V. Se trabajó con un estereoscopio

de espejos con el cual se identificó tanto grandes deslizamientos como cicatrices de flujos de detritos, rasgos hidrológicos y rasgos geomorfológicos. El papel principal de esta fotointerpretación fue delimitar los grandes deslizamientos, que por su dimensión y poca accesibilidad no fue posible trabajar en campo, dada las limitaciones de esta investigación. Junto con este proceso se trabajó con curvas de nivel digitales con equidistancia a cada 20 metros de la carta topográfica f13C69, escala 1:50,000 del INEGI en formato vectorial. El proceso consistió, en una primera etapa de interpretación, sobre imágenes aéreas, de rasgos morfológicos asociados a la inestabilidad de laderas. En la segunda etapa, se realizó la digitalización de los cuerpos inestables identificados, con base en rasgos morfológicos identificables tanto en el MDE, como en la imagen aérea. El inventario se complementó con aquellos deslizamientos de los cuales se tienen un registro histórico. Las fuentes fueron: notas periodísticas que reportaron desastres ocurridos a causa de deslizamientos; información obtenida en campo a partir de los datos proporcionados y de los recorridos hechos con la Unidad Municipal de Protección Civil Puerto Vallarta; información proporcionada por la gente afectada por desastres ocurridos; e información que de manera individual encontramos en campo.

Para asignarles un peso a los deslizamientos del inventario, se otorgó un valor entre 0.5 y 1, en función a su grado de certeza (Tabla 3) de la fotointerpretación y registros en campo. Obviamente deslizamientos registrados históricamente alcanzaron valores de 1, junto con los que se pudieron observar en campo; a los grandes deslizamientos que no fue posible verificar en campo se les otorgó el valor más bajo de certeza.

Tabla 3. Peso otorgados a deslizamientos

<i>Certeza</i>	<i>Peso</i>	<i>Criterio</i>
Alta	1	Deslizamientos registrados
Media	0.75	Deslizamientos identificados en fotografía aérea y en curvas de nivel
Baja	0.5	Deslizamientos identificados en fotografía aérea ó en curvas de nivel

Otro elemento que se incluyó en esta capa fue considerar una zona de influencia de los deslizamientos. Para establecer tal zona a partir del cuerpo del deslizamiento se consideró, conforme a experiencia, darle un menor margen a los deslizamientos pequeños que corresponden a flujos de detritos, deslizamientos rotacionales superficiales, de vuelco y de caída y otorgar la mayor distancia a los grandes deslizamientos que corresponden a los grandes deslizamientos del tipo flujo de rocas. En la tabla 4 se muestra las distancias utilizadas:

Tabla 4. Distancia considerada como zona de influencia para los deslizamientos

<i>Tamaño del deslizamiento</i>	<i>Zona de influencia (m)</i>
Pequeño	20
Grande	50

La idea de contener en una sola capa tanto el grado de certeza de los deslizamientos como su margen de influencia, implicó seguir el procedimiento que a continuación se describe.

Primero se preparó la capa de deslizamientos agregando la información de grado de certeza y el margen a considerar como zona de influencia. Este archivo en formato vector sirvió como base para generar 3 archivos de deslizamientos, uno para cada grado de certeza. Con el fin de acortar el proceso la forma seguida para extraer estos 3 archivos fue: obtener los buffer de las zonas de influencia de los deslizamientos, esto para cada grado de certeza. Resultando 3 archivos, donde cada uno consideraba tanto la superficie de los deslizamientos como la extensión de la zona de influencia.

La siguiente capa utilizada fue el mapa de distancias lineales de los deslizamientos, esto con el propósito de tener un efecto gradual en la zona de influencia. Por lo que se extrajo la información de distancia por cada archivo, según su grado de certeza, los cuales; como se explicó, ya contaban con el margen correspondiente a la zona de influencia. En la capa resultante la superficie que abarca los deslizamientos tenía el valor 0 y la zona de influencia

contaba con los valores de distancia desde el deslizamiento. Por lo que la información de la capa fue normalizada de 0 a 1. Lo siguiente fue invertir los valores. Dando como resultado que estimado con valor 1 correspondió a los deslizamientos y según aumentara la distancia desde el cuerpo del deslizamiento el valor iría en decremento.

Una vez obtenido este resultado para cada una de las tres capas, se les multiplicó por su grado de certeza según les pertenecía. Al final, estas tres capas que ya contenían grado de certeza y el efecto de influencia de acuerdo a su cercanía, se sumaron para tener una sola capa, la cual se normalizó (Figura 48).

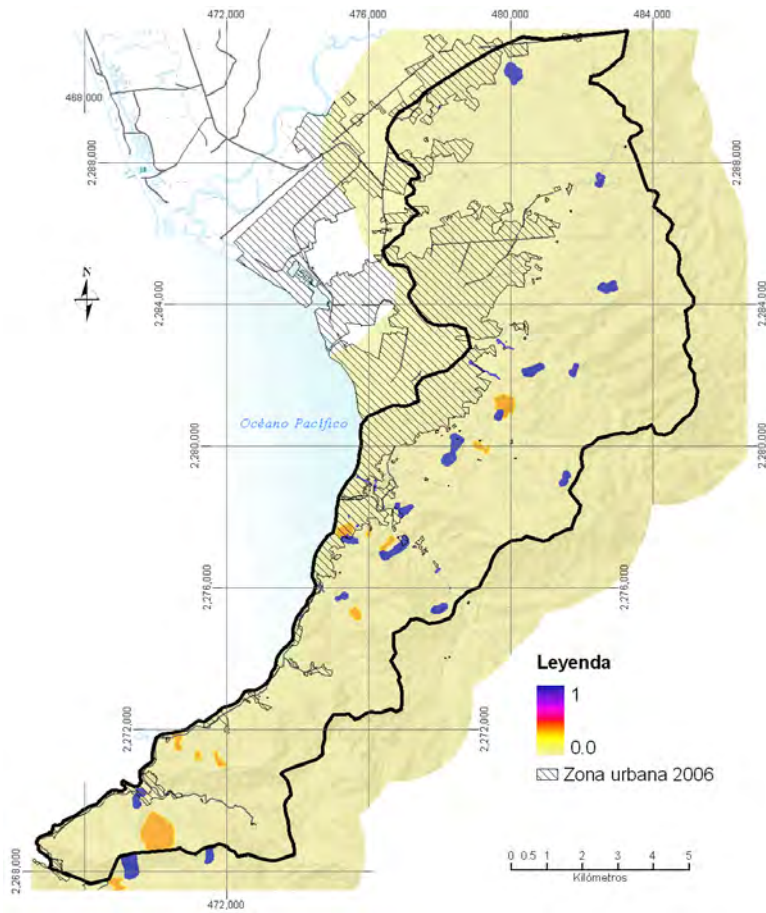


Figura 48. Capa de deslizamiento y su zona de influencia con pesos

III.1.7 CORTES EN TALUD

En esta capa se identificaron las zonas que presentan cortes en talud debido a actividad de extracción de material, o construcciones en zonas urbanas con la excepción de los realizados por la construcción de caminos.

La identificación visual se hizo con base al modelo de sombreado con una resolución de 2 m, que fue interpolado con curvas de nivel a con equidistancia a cada metro (IIT Jalisco, 2006). A esta capa se le otorgó el peso de 1, dada la alta susceptibilidad que presentan al ser sitios que han tenido importantes modificaciones de su estado original. Después fue rasterizada (Figura 49).

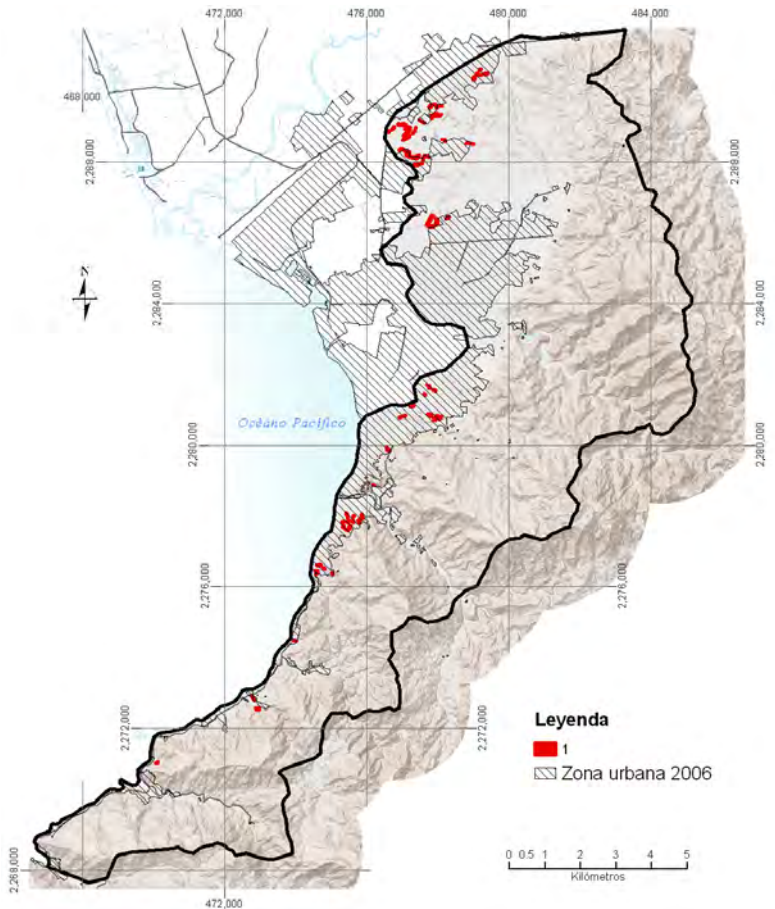


Figura 49. Capa de cortes en talud con pesos

III.1.8 INESTABILIDAD POR DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES

El propósito de esta capa es el identificar zonas potenciales a presentar deslizamientos superficiales, que son los más frecuentes en la zona de estudio. Con este objetivo se decidió hacer uso de manera exploratoria del software SINMAP (Stability Index Mapping) que es una extensión, que se trabajo para la versión de ArcView 3.x. El programa se adquiere de forma gratuita en la página de la Utah State University, lugar donde se desarrolló este programa junto con C.N. Goodwin Fluvial System Consulting (Pack et al., 2005).

Hacer uso de este programa tiene la ventaja de analizar la inestabilidad a partir del cálculo del ángulo de la pendiente, el cual es señalado como el principal factor que condiciona la presencia de fenómenos de inestabilidad (Barredo et al. 2000; Carrara et al., 1992; Chacón, 2006; Donati y Turrini, 2002; Guzzeti et al., 2006; Schulz et al. 2008; Yiping y Beighley, 2008). Otra ventaja que proporciona es que esta herramienta utiliza un algoritmo que calcula un índice de humedad que determina las áreas potenciales a la concentración de humedad. Juntas estas dos ventajas, antes descritas del SINMAP hacen pensar que es un modelo idóneo para detectar zonas potenciales a deslizamientos traslacionles superficiales.

SINMAP trabaja con un modelo que pide parámetros geotécnicos, pero este no requiere de mediciones o cantidades precisas (Pack et al., 2005), ya que el software trabaja con base a rangos, estableciendo valores máximos y mínimos, esto es para subsanar el hecho que la distribución de los parámetros es variable en tiempo y espacio (Zaitchik et al., 2003).

Otra cualidad del SINMAP es que permite calibrar los resultados del modelo. Para ello este programa necesita una capa de puntos donde se señale los deslizamientos que previamente fueron identificados en campo o con otros recursos como puede ser fotointerpretación. El procedimiento que indica SINMAP para la calibración de los resultados es primero comparar el resultado del modelo con la capa de deslizamientos, si el modelo no concuerda con los deslizamientos ya identificados, el programa tienen un modulo donde se puede modificar los valores de los parámetros geotécnicos y actualizar los resultados, esto se repite hasta que el modelo resultante se ajuste con los puntos de los deslizamientos identificados, esperando con

esto la mayor coherencia del modelo resultante con las condiciones del sitio estudiado. El proceso de calibración de resultados se hace con los módulos: “Calibration parameter Adjust y Update Grids and lines”

En términos prácticos lo que se obtiene con el uso del SINMAP es un índice de inestabilidad que se calcula a partir de evaluar un factor de seguridad, que se expresa con la siguiente relación:

$$FS = \frac{\text{Fuerzas estabilizadoras}}{\text{Fuerzas desestabilizadoras}}$$

Donde las fuerzas desestabilizadoras son:

- Componente del peso actuando en la dirección del plano de rotura
- Resultante de las presiones intersticiales o del agua, que actúan en la posible superficie de rotura.
- Cargas exteriores estáticas y dinámicas ejercidas sobre el talud contrarias a la estabilidad

Y las fuerzas estabilizadoras son:

- Resistencia al esfuerzo cortante del terreno, debida a la cohesión y rozamiento interno a lo largo de la superficie de rotura.
- Componente del peso actuando de forma normal a la superficie de rotura.
- Fuerzas exteriores a favor de la estabilidad.

Esto quiere decir que si el factor de seguridad es mayor que 1, la pendiente se considera en equilibrio, si menor que 1 se considera inestable y si es igual a 1 se considera en equilibrio crítico. Este factor se consigue a partir del modelo del talud infinito, el cual se basa en la hipótesis de que la longitud de una rotura plana superficial paralela al talud, puede considerarse infinita con respecto al espesor deslizado (González, 2002).

SINMAP hace uso de la siguiente ecuación simplificada para calcular el factor de seguridad teniendo como base el modelo del talud infinito:

$$FS = \frac{C + \cos \theta [1 - wp] \tan \phi}{\text{sen } \phi}$$

Donde:

C = Cohesión del suelo

w = Humedad relativa

ρ = Densidad relativa del suelo del talud

θ = Angulo de la pendiente

ϕ = Angulo de fricción interna del suelo

Además del factor de seguridad SINMAP calcula el “Índice Topográfico de Humedad” usando la ecuación:

$$w = \text{Min} \left(\frac{R a}{T \text{sen}\theta}, 1 \right)$$

Donde

R = Recarga (m/h)

a = Área de la cuenca

T = Transmisibilidad del suelo (m²/h)

Este índice de humedad sustituye el valor de w en la ecuación del factor de seguridad quedando la ecuación de la siguiente forma:

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

Donde las variables a y θ son derivados de la topografía, y C, $\tan\phi$, ρ , y R/T son parámetros. La densidad relativa (ρ) es una constante con el valor 0.5, lo cual es parte de la simplificación del modelo.

A partir de esta última fórmula, SINMAP calcula el Índice de Inestabilidad, que es definido como “la probabilidad que un punto sea estable, asumiendo que la distribución de los parámetros es uniforme en el espacio” (Pack et al., 2005).

III.1.8.1 Aplicación del modelo

Los insumos que requiere SINMAP para determinar el Índice de Inestabilidad son: el modelo digital de elevación (MDE) y el inventario de deslizamientos en forma de puntos. Para el cálculo del modelo en la zona de estudio se utilizó un MDE que fue interpolado a partir de curvas de nivel con una equidistancia de 20 m, en formato digital de vectores de la carta topográfica F13C69 de INEGI, 1:50,000.

Para establecer los valores geotécnicos requeridos, se recurrió a la función del SINMAP que permite calibrar el modelo resultante, teniendo como referencia los deslizamientos ya identificados, lo que permitió modificar los rangos de valores que contiene por default el programa. Esto siempre se hizo cuidando que las cantidades fueran lógicas. Los rangos de valores se fueron modificando hasta resultar un modelo de inestabilidad coherente con los deslizamientos encontrados en el recorrido que se hizo en campo. Los valores finales para los parámetros son los que se presentan en la tabla 5.

La razón de seguir este procedimiento fue que estuvo fuera de los alcances de este estudio realizar análisis geotécnicos. Otra razón es porque con la aplicación de este modelo se buscó identificar zonas con potencial a la inestabilidad considerando el ángulo de la pendiente en las laderas y recordando que esta capa es una pieza más que formara el mapa de susceptibilidad, esto es, no es resultado final del trabajo y no es el objetivo de esta investigación un análisis del tipo determinístico. Es importante recordar que el programa trabaja con rangos de valores y no con datos precisos lo que permite el manejo de los datos. También es necesario hacer notar que dentro del mismo manual de usuario del SINMAP se ejemplifica el uso del programa, con un

caso verídico, donde se siguió el mismo procedimiento aquí realizado por la falta de análisis de suelo (Pack et al. 2005).

Tabla 5. Parámetros usados para correr el modelo de inestabilidad de SINMAP

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
Gravedad	9.8	m/s ²
Densidad del agua	1,000	kN/m ³
Densidad del suelo	1,200	kN/m ³
Cohesión (Límite inferior)	0.01	kPa
Cohesión (Límite máximo)	0.5	kPa
Angulo de fricción del suelo (Límite inferior)	25	grados
Angulo de fricción del suelo (Límite máximo)	45	grados
T / R (Limite inferior)	2,000	metros
T / R (Limite máximo)	3,000	metros

Los valores resultantes del índice de inestabilidad van del factor 0 al 10. Para el manejo de los valores se establecieron 6 rangos, tomando como base de referencia el factor 1.5, que si bien la teoría señala que debería de ser 1, se decidió tomar un valor más alto, debido al margen de error que pudiera existir asociado a la simplificación del modelo y a la generalización de las propiedades mecánicas de los suelos. Así, los valores por debajo de 1.5 se les consideraron como zonas de inestabilidad de media a muy alta y valores por encima de 1.5 como zonas de inestabilidad baja a estables. Conforme a esto, los rangos quedaron como se muestra en la tabla 06. Ya establecidos los rangos, el modelo de inestabilidad fue reclasificado asignándoles un peso de acuerdo a su categoría, que va de 1 para inestabilidad muy alta, hasta 0 que fue calificado como estable y para el caso de los rangos intermedios, los valores se repartieron de manera uniforme de acuerdo a esta escala (Tabla 6).

Tabla 6. Rangos y pesos establecidos para la inestabilidad por deslizamientos superficiales

<i>Rango</i>	<i>Inestabilidad</i>	<i>Peso</i>
0 - 0.5	Muy alta	1
0.5 - 1	Alta	0.8
1 - 1.5	Media	0.6
1.5 - 2	Baja	0.4
2 - 5	Muy baja	0.2
5 - 10	Estable	0

El procedimiento seguido para reclasificar y asignar pesos al modelo de inestabilidad fue: primero se reclasificó en 6 rangos y dado que la función de reclasificar no aceptó de manera directa valores en decimales, se procedió primero a reclasificar con valores del 0 hasta el 5. El valor 0 le correspondió al rango de 5-10, para el rango de 2-5 se le otorgó el valor de 1 y así hasta el valor 5 que le correspondió al rango de 0-0.5, esto con el propósito de tener como base el valor 0, que es necesario para los pasos siguientes. Para poder trabajar con cantidades decimales en el modelo, se multiplicó la capa reclasificada por el valor de 1.00, para posteriormente normalizar los valores a una escala de 0 a 1, lo que dio como resultado la asignación de pesos como se señala en la tabla 6.

Por último se aplicó una máscara a esta capa dado que el modelo al correr en zonas de pendientes menores a los 5 grados presentaba errores y determinaba valores muy altos para estas zonas, por lo que se decidió que de manera manual todas las pendientes menores de 5 grados corresponderían al rango de Estable.

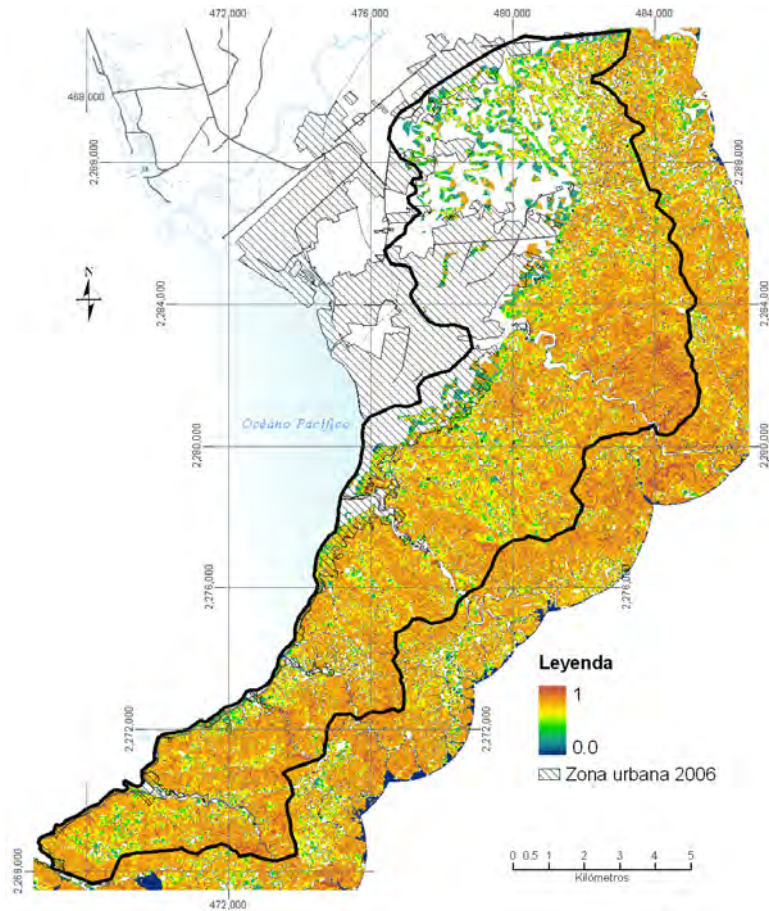


Figura 50. Capa inestabilidad por deslizamientos superficiales con pesos

III.1.9 CONCENTRACIÓN DE FLUJOS

Con la capa de concentración de flujos se buscó reconocer áreas dentro de cañadas, donde es común la concentración del escurrimiento antes de llegar a confinarse en algún canal natural, ya que en estas zonas es donde suelen presentarse deslizamientos traslacionales que posteriormente evolucionan a los flujos de detritos.

Para obtener esta capa se utilizó la extensión HydroTool 1.0 para ArcView3.x, que es una herramienta de distribución gratuita desarrollada por Holger Schäuble. Dicha extensión contiene varias herramientas para calcular funciones hidrológicas a partir de análisis de un MDE.

La función utilizada fue “Flow Accumulation” la cual determina la cantidad de agua o partículas desplazadas desde el parteaguas a los valles de una cuenca. Para realizar el cálculo se tienen tres opciones. Cada una trabaja con algoritmos distintos, el primero es “D8 –Single Flow” que calcula la concentración con un algoritmo llamado D8. Este es muy usado para varias funciones hidrológicas a partir de MDE y se basa en determinar la dirección del flujo del centro del pixel hacia ocho direcciones posibles (rumbos 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°), concentrado el flujo en una dirección según la diferencia de altitud. La siguiente opción se llama “MD-MultipleFlow”, algoritmo que calcula el flujo de manera dispersa, y la última opción “MDD8-Combined Flow” que calcula la acumulación con un algoritmo que es combinación de los otros dos. Este inicia el cálculo de concentración con el “Multiple Flow” cambiando después a “Single Flow”, que correspondería a las mayores concentraciones.

En la figura 51 se ilustra cómo funcionan los algoritmos de la función “Flow Accumulation”. En el cuadrículado de la izquierda se representan los pixeles de un MDE con sus valores de altitud, donde los pixeles de gris más claro serían las posibles direcciones del flujo. En el cuadrículado de en medio se representa la dirección que puede tomar el flujo según la diferencia de altitud con referencia al pixel central y ésta es ajustada con base a la distancia a cada pixel. El cuadrículado superior a la derecha representa cómo el algoritmo “Multiple flow” distribuye el flujo y el cuadrículado inferior de la derecha muestra la manera en qué el algoritmo “Single flow” toma una sola dirección para concentrar el flujo basado en el principio que señala que el 100% del flujo se pasará a la celda descendente.

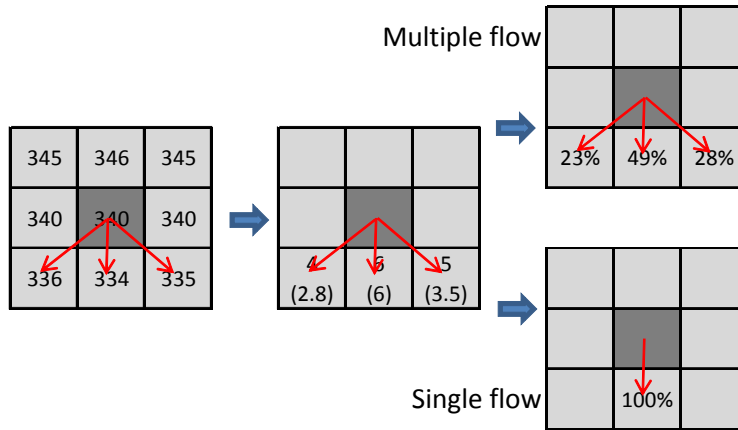


Figura 51. Figura tomado del manual de usuario del HidroTool donde se ilustra la forma cómo es calculada la concentración para cada tipo de algoritmo usado por la función de “Flow Accumulation”.

III.1.9.1 Procedimiento

Antes de usar la función de concentración de flujos, al MDE se le aplicaron correcciones, mismas que proporciona HidroTool. Ya realizado este paso, se calculó la concentración con el algoritmo “MDD8-Combined Flow” ya que este facilita determinar los puntos donde el flujo deja de ser disperso y puede comenzar a confinarse.

Del modelo resultante se extrajeron los valores que correspondió a las zonas donde se apreciaba de forma clara la concentración de flujos, pero aún dispersa, hasta el punto donde la concentración se acumulaba en una línea (Figura 52). A estas zonas le correspondieron los valores de concentración de flujo de 50 a 500. Para esto fue necesario reclasificar el modelo de concentración, con el objeto de tener una capa que tuviera únicamente los valores dentro del rango determinado. Lo realizado en este paso fue otorgarle el valor de 0 tanto al rango más bajo como al más alto, dejando en blanco (sin clasificar) el rango de 50 a 500 para que respetara los valores de esta sección. Dado que esto genera una capa que sólo considera números enteros, se le multiplicó por 1.00 para el pixel considerará decimales, ya que si no se realiza esto, al ser cruzada esta capa el resultado sería una capa con valores booleanos, es decir 0 y 1. Terminado este procedimiento, el último paso fue normalizar dentro de un rango de 0 a 1, correspondiéndole el valor 1 a las mayores concentraciones (ver figura 53).

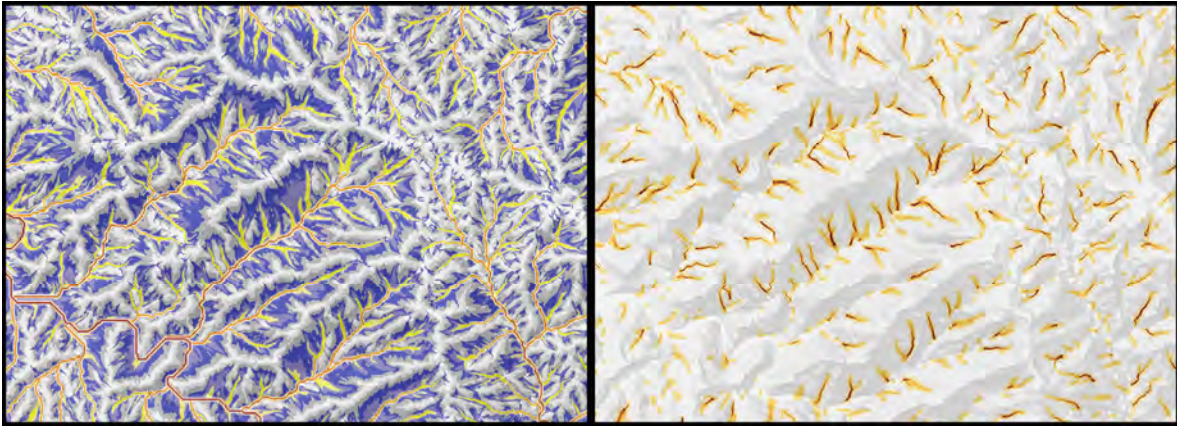


Figura 52. En la imagen de la izquierda se presenta el modelo de concentración resultado de aplicar el algoritmo "Flow Accumulation" y en la imagen de la derecha se presenta el resultado al extraer los rangos de valores de 50 a 500, considerados como aquellos que representan las zonas donde se pueden presentar los flujos de detritos.

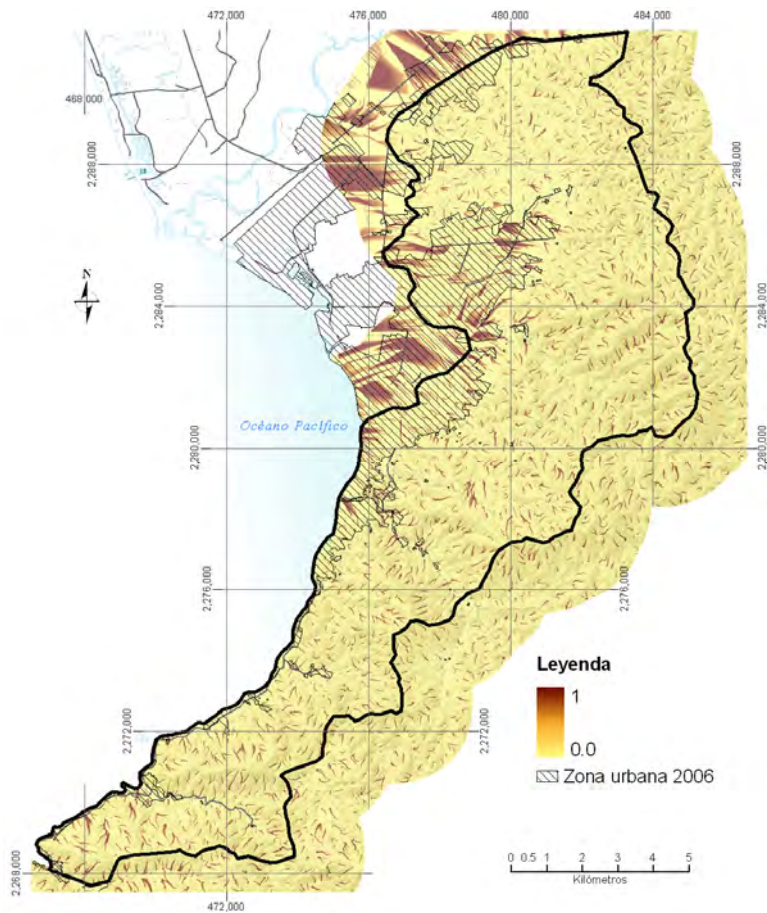


Figura 53. Capa de concentración de flujos con pesos

III.1.10 ASENTAMIENTOS HUMANOS

Esta capa tiene el propósito de identificar las zonas con asentamientos humanos tanto urbanos como rurales, las cuales corresponden en gran medida a usos habitacionales, turísticos y comerciales. La intención de contemplar este tema fue por el hecho que en las zonas de laderas existen construcciones que modificaron la forma original de la pendiente, lo que puede causar afectaciones a su estabilidad, esto a causa de la remoción de materiales, el aumento del peso sobre la ladera, a la pérdida de la cubierta vegetal, el recubrimiento de la superficie por capas impermeables, etc. En términos generales los asentamientos urbanos representan la modificación casi en su totalidad del medio natural.

Para realizar la capa de asentamientos humanos se utilizaron 2 fuentes de información; una fue la imagen de Google Earth que tiene la fecha de enero y febrero del 2006 y la otra, fue el proyecto de Plan de Desarrollo Urbano (PDU) sometido a consulta pública el año 2008. Este PDU se encuentra aún en revisión, pero se consideró prudente utilizar esta información ya que refleja la tendencia del crecimiento de la zona urbana de Puerto Vallarta. La idea de tomar como referencia a este documento es porque en él se determinan las densidades permitidas de habitantes y de construcciones, el uso de suelo y las zonas propuestas para el crecimiento urbano. Esta información fue utilizada para darle pesos a los asentamientos humanos según la densidad de construcción permitida, buscando con esto diferenciar un posible nivel de impacto que dependería de la superficie construida. El criterio para otorgar pesos se basó en el siguiente supuesto: entre mayor densidad mayor será el grado de alteración a las condiciones naturales.

En el PDU se indica una intensidad de uso permitida por tipo de uso urbano, basándose en dos criterios distintos. El primero se refiere al valor de densidad de construcciones, que la categoriza en: mínima, baja, media y alta; y el segundo cuando se refiere a intensidad de uso, distinguiendo las mismas categorías de mínima a alta, que es el caso de usos mixtos. Si bien los criterios no son similares, si lo son las categorías, por lo que a partir de las categorías señaladas se establecieron los pesos, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Intensidades que indican el PDU y pesos asignados según su tipo de intensidad

<i>Uso</i>		<i>Intensidad</i>			
		Densidad mínima	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
<i>Turístico</i>	Hotelero	15 cuartos por hectárea	30 cuartos por hectárea	60 cuartos por hectárea	100 cuartos por hectárea
	Campestre	Densidad máxima de viviendas/ ha. 4			
<i>Habitacional</i>	Jardín	Densidad máxima de viviendas/ ha. 4			
		Densidad mínima 10-20 viviendas/ ha.	Densidad baja 19-28 viviendas/ ha.	Densidad media 39-54 viviendas/ ha.	Densidad alta 58-112 viviendas/ ha.
	Mixto	Intensidad mínima	Intensidad baja	Intensidad media	Intensidad alta
		Dependerá de la zona a la que le de servicio			
Peso otorgado		0.25	0.5	0.75	1

Fuente: Propuesta de Reglamento Municipal de Zonificación, Plan de Desarrollo Urbano Puerto Vallarta. Versión para Consulta Pública 2008.

III.1.10.1 Procedimiento

Primero se creó la capa donde se delimitó el área urbanizada con base en la imagen de Google Earth, 2006. El hecho que fuera con la imagen y no únicamente con el PDU es porque este último no es muy preciso en algunos sitios. Se encontró que existen zonas ya urbanizadas que el PDU no considera dentro de la categoría de “Áreas Urbanizadas” y, de forma contraria, existen casos donde lugares que se contemplan como “Áreas Urbanizadas”, aún no presentan construcciones. Ya elaborada esta capa se cruzó con la capa del PDU con el propósito de tener la información de usos y densidades dentro del área urbana considerada actual.

A la capa resultante se le asignaron pesos de acuerdo con la intensidad marcada (Ver tabla 7), para posteriormente rasterizarla. A esta capa se le multiplicó por el mapa de pendientes normalizado para otorgar un mayor peso a las zonas que se encontraran en las pendientes altas. La capa resultante se normalizó de 0 a 1.

Teniendo la capa de asentamientos humanos actual, fue necesario elaborar la capa que marcara las zonas donde se puede extender el crecimiento urbano de acuerdo a lo que proyecta el PDU. Para ello se usó tanto las zonas categorizadas como “Reservas urbanas”, como las zonas contempladas como “Áreas Urbanizadas” pero donde aún no existen construcciones.

De igual forma que la capa anterior, se le asignaron pesos de acuerdo a su intensidad programada, datos con los cuales se rasterizó, para posteriormente cruzarla con el mapa de pendientes normalizado. Dado que el resultado de este cruce dio un valor más alto a comparación del cruce con la capa del área urbana actual, se decidió normalizar teniendo como referencia el valor más bajo de los dos cruces, ya que eran décimas las diferencias. A los valores que resultaron por arriba de 1 se les asignó el valor de 1, quedando así normalizado en una misma escala de 0 a 1. Este procedimiento fue necesario ya que se necesitaba que tanto la capa de asentamientos actual como proyectada tuvieran los mismos valores en las áreas que comparten, porque con base en estas dos capas se realizó un mapa de susceptibilidad para la situación actual y otro para un posible escenario (Figura 54).

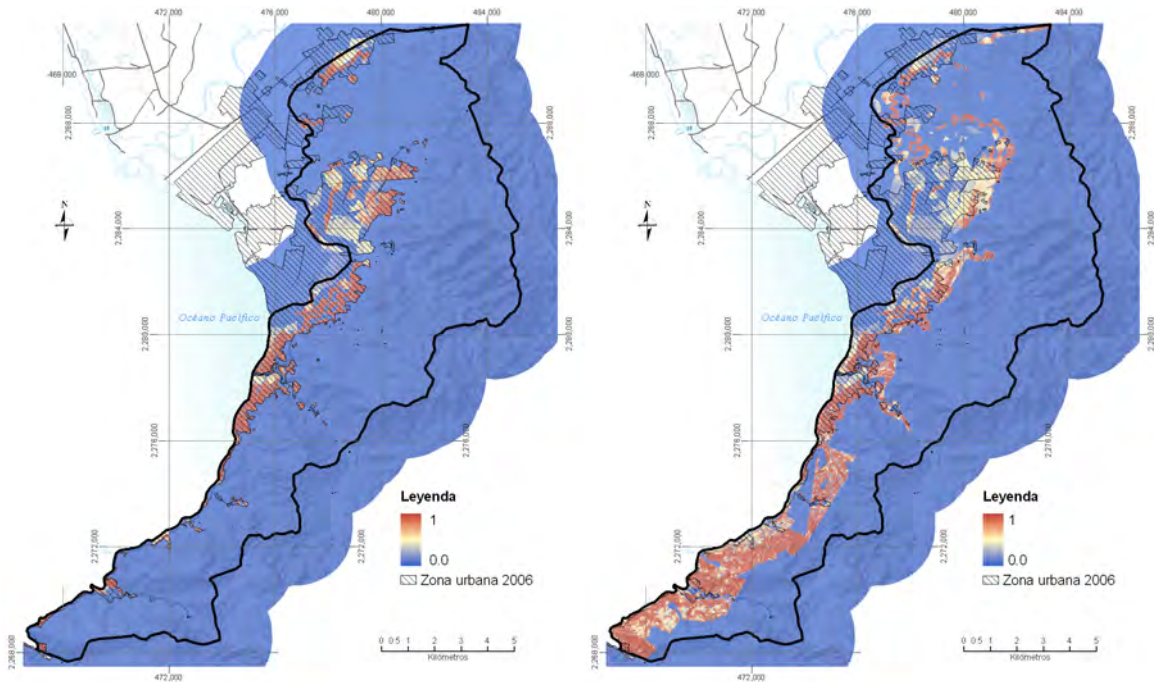


Figura 54. En la imagen de la izquierda se presenta la capa correspondiente a las zonas con asentamientos urbanos actuales. En la imagen de la derecha se presenta la capa que corresponde a los asentamientos actuales más la zona proyectada para el crecimiento urbano.

III.2 OBTENCIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

En total se contemplaron 10 capas temáticas para elaborar el mapa de susceptibilidad:

1. Litología
2. Áreas de desmonte
3. Zonas inestables por caminos
4. Distancia a lineamientos
5. Radiación solar
6. Inventario de deslizamiento y su zona de influencia
7. Cortes en talud
8. Inestabilidad por deslizamientos superficiales
9. Asentamientos humanos

Como ya se mostró, cada una de las capas temáticas se estandarizó dentro de un rango de 0 a 1. Y posteriormente a cada uno de los temas se le otorgó un peso (Tabla 8) a partir de evaluar capa contra capa de acuerdo al nivel de relevancia para definir la ocurrencia fenómenos de inestabilidad de laderas en la zona de estudio (Tabla 9), esto con base en las observaciones de campo y experiencia personal. Este proceso se realizó a través del uso del software “Expert Choice 2000”, el cual se basa en el llamado “Proceso Analítico Jerárquico” diseñado por Thomas Saaty (1980) Esta es una técnica de análisis multicriterio que jerarquiza a partir de evaluar la importancia de un elemento con respecto al otro, formando una matriz de valores, para posteriormente aplicar un algoritmo que pondera la importancia de cada criterio. Esto bajo cálculos de álgebra matricial que dan como resultado los valores de importancia y el índice que consistencia (García, 2006).

Tabla 8. Valores de medición de parámetros

		Valor	Nivel de relevancia
Más relevante	9		Extremo
	7		Muy fuerte
	5		Fuerte
	3		Moderado
	1		Igual
Menos relevante	3		Moderado
	5		Fuerte
	7		Muy fuerte
	9		Extremo

Tabla 9. Matriz de comparación de capas según su nivel de relevancia considerado para definir la ocurrencia fenómenos de inestabilidad de laderas

Temas	Litología	Inestabilidad de pendientes	Concentración de flujos	Radiación solar	Distancia a lineamientos	Inventario de deslizamiento y su zona de influencia	Áreas de desmonte	Cortes en talud	Zonas inestables por caminos	Asentamientos humanos
Litología		3	5	7	3	5	3	3	3	3
Inestabilidad de pendientes			7	7	5	3	7	2	4	7
Concentración de flujos				5	2	7	2	5	5	3
Radiación solar					6	7	5	5	5	5
Distancia a lineamientos						5	1	3	3	3
Inventario de deslizamiento y su zona de influencia							7	7	7	7
Áreas de desmonte								3	2	2
Cortes en talud									2	3
Zonas inestables por caminos										2
Asentamientos humanos										

La evaluación de las capas temáticas dio como resultado la siguiente ponderación:

Tabla 10. Ponderación de valores a partir del análisis de temas en "Perfect Choice"

<i>Temas</i>	<i>Ponderación</i>
Inventario de deslizamiento y su zona de influencia	0.34
Inestabilidad por deslizamientos superficiales	0.203
Litología	0.123
Cortes en talud	0.092
Zonas inestables por caminos	0.069
Asentamientos humanos	0.053
Distancia a lineamientos	0.04
Áreas de desmonte	0.034
Concentración de flujos	0.031
Radiación solar	0.015
Total	1

Cabe mencionar que el índice de consistencia resultante en la evaluación fue de 0.09, que se considera como aceptable, ya que de acuerdo al método de "Proceso Analítico Jerárquico" no debe ser mayor de 0.1.

Teniendo los valores de ponderación, cada capa temática fue multiplicada según el valor que les correspondía y posteriormente fueron sumadas todas las capas y divididas entre 10. Este procedimiento se aplicó tanto en el caso de los asentamientos humanos actuales, como en el caso de los asentamientos humanos que proyecta el Plan de Desarrollo Urbano.

Los mapas resultantes fueron categorizados en 5 rangos utilizando una clasificación de "Natural Breaks", para poder identificar patrones en la distribución de los datos. Estos mismos rangos fueron calibrados con el propósito de tener la mayor coherencia posible, como fue el buscar que las zonas de pendientes planas correspondieran a la categoría de susceptibilidad más baja.

Las categorías de susceptibilidad designadas fueron:

- Muy alta
- Alta
- Media
- Baja
- Muy baja

Y finalmente, los productos obtenidos fueron dos: primero, el mapa de susceptibilidad para condiciones actuales y el segundo, un mapa de susceptibilidad bajo el escenario hipotético en el que la mancha urbana ocupara la zona como lo proyecta el Plan de Desarrollo Urbano.

IV. SUSCEPTIBILIDAD A FENÓMENOS DE INESTABILIDAD DE LADERA EN PUERTO VALLARTA

IV.1 RESULTADOS

IV.1.1 SUSCEPTIBILIDAD A FENÓMENOS DE INESTABILIDAD DE LADERA BAJO LAS CONDICIONES ACTUALES (2006) DE LA ZONA URBANA

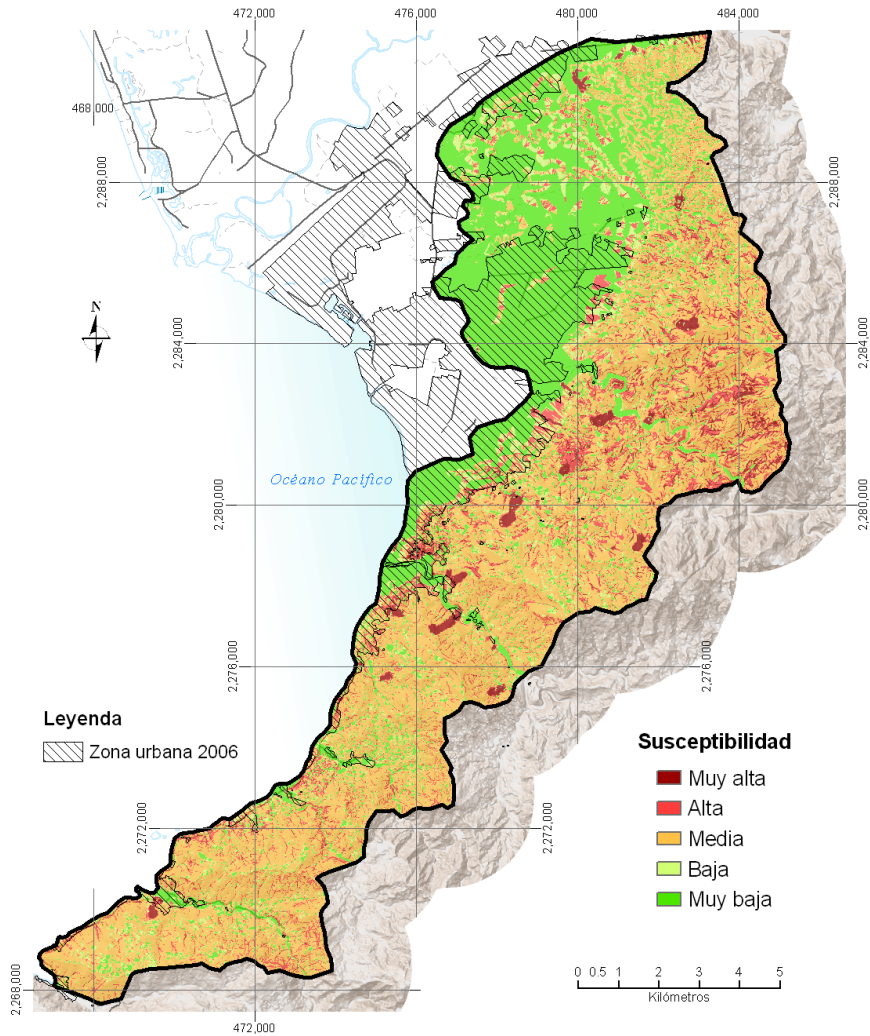


Figura 55. Mapa de susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de laderas de Puerto Vallarta, bajo las condiciones actuales de la zona urbana (Mapa con mayor detalle en anexo)

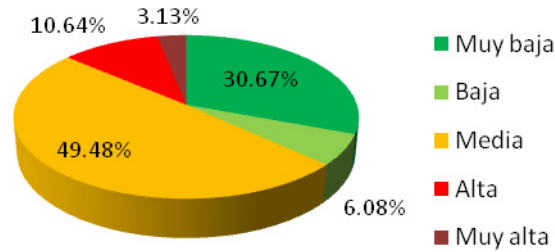
El mapa de susceptibilidad resultante (para las condiciones actuales de zona urbana), (Figura 55) arroja que para la zona de estudio que corresponde a una superficie de 13,702 ha, el 49.48% se encuentra dentro de una categoría de susceptibilidad media; el 10.64% de la superficie tiene

una susceptibilidad Alta; y el 3.13% tiene una susceptibilidad Muy alta. El restante 36.75% corresponde a las categorías Baja y Muy baja (Tabla 11). La zona que se presenta más susceptible corresponde a la cuenca del río Pitillal que se localiza en al Noreste de la zona de estudio.

Tabla 11. Superficies resultantes según su susceptibilidad bajo las condiciones actuales de la zona urbana

<i>Susceptibilidad</i>	<i>Superficie (Ha)</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy alta	428.41	3.13%
Alta	1,458.42	10.64%
Media	6,779.62	49.48%
Baja	833.2	6.08%
Muy baja	4,202.38	30.67%

Gráfico 2. Distribución de las superficies según su nivel de susceptibilidad bajo las condiciones actuales de la zona urbana



IV.1.2 SUSCEPTIBILIDAD A FENÓMENOS DE INESTABILIDAD DE LADERAS PARA LA ZONA URBANA BAJO CONDICIONES DE LA ZONA URBANA PROPUESTA

El mapa de susceptibilidad resultante (bajo condiciones de la zona urbana propuesta) (Figura 56), da como resultado, en un área de 13,702 ha, que el porcentaje para susceptibilidad Muy alta es de 3.53%, el 11.42% corresponde a la categoría Alta, el mayor porcentaje corresponde a

la susceptibilidad Media con 48.44%; la susceptibilidad Baja cubre el 6.13% y la susceptibilidad Muy Baja un 30.48% (Tabla 12). Los cambios más relevantes los muestra la vertiente de la zona de montaña al Sur de la zona de estudio.

Tabla 12. Superficies resultantes según su susceptibilidad bajo condiciones de la zona urbana propuesta

<i>Susceptibilidad</i>	<i>Superficie (Has)</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy alta	484.31	3.53%
Alta	1,564.16	11.42%
Media	6,636.94	48.44%
Baja	840.34	6.13%
Muy baja	4,176.28	30.48%

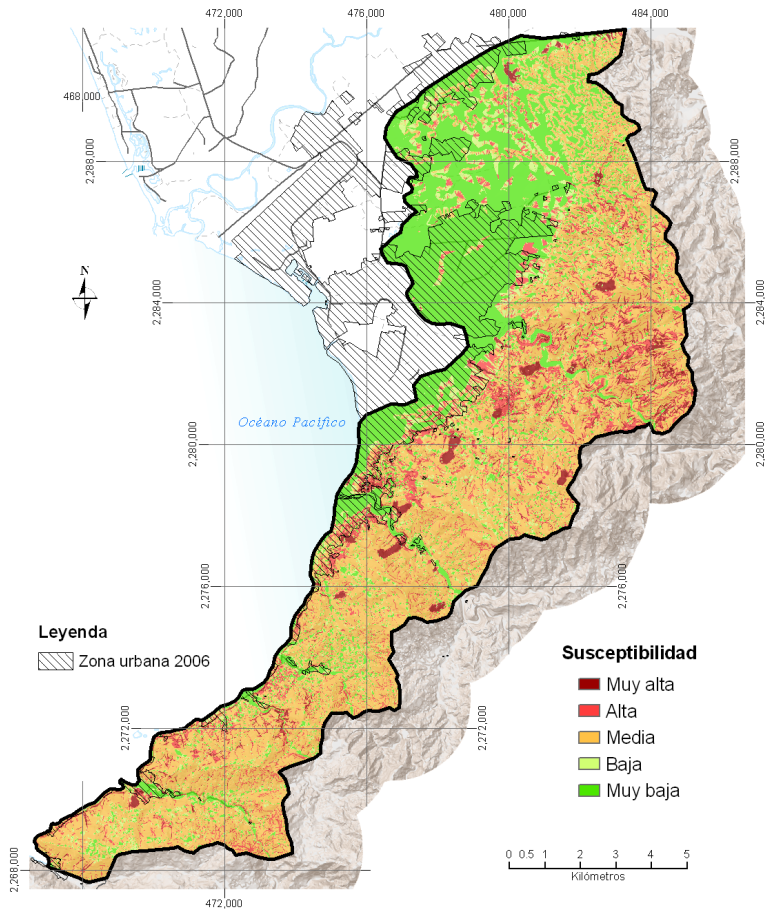


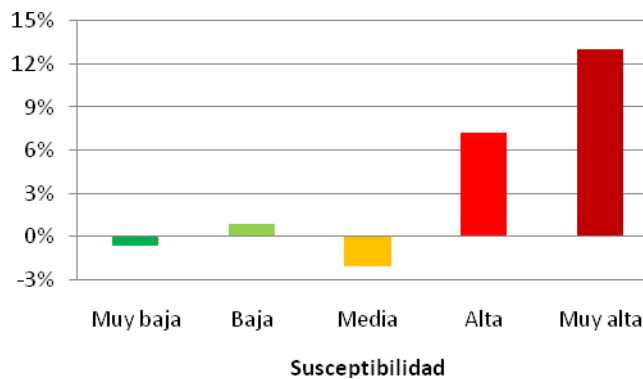
Figura 56. Mapa de susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de laderas de Puerto Vallarta, bajo las condiciones de la zona urbana proyectada

IV.2 CRECIMIENTO URBANO Y SUSCEPTIBILIDAD A FENÓMENOS DE INESTABILIDAD DE LADERAS, PUERTO VALLARTA

IV.2.1 CAMBIOS ENTRE LA SUSCEPTIBILIDAD GENERAL BAJO LAS CONDICIONES DE LA ZONA URBANA ACTUAL Y LA SUSCEPTIBILIDAD GENERAL BAJO CONDICIONES DE LA ZONA URBANA PROPUESTA

Los cambios más importantes que muestra el mapa de susceptibilidad bajo las condiciones de la zona urbana propuesta son en las categorías de Muy Alta y Alta (Gráfico 3), las cuales ganaron superficie en 13.05 y 7.25% respectivamente. La categoría de susceptibilidad Media perdió un 2.10% de su superficie, al igual que la susceptibilidad Muy baja en un 0.62%.

Gráfico 3. Cambios que presentaron las categorías de susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de laderas de las condiciones actuales de la zona urbana a las condiciones de la zona urbana propuesta



IV.2.2 SUSCEPTIBILIDAD A FENÓMENOS DE INESTABILIDAD DE LADERA PARA LA SUPERFICIE QUE CUBRE LA ZONA URBANA ACTUAL (2006)

Tomando en cuenta sólo el área que cubre la zona urbana correspondiente al 2006 (Figura 57), la cual tiene una superficie de 2,179 has; los resultados indicaron que el 82.63 % de la zona urbana se encuentra en una clase de susceptibilidad Muy Baja y Baja, el 9.02 % en una susceptibilidad Media, 6.29% en Alta, y para susceptibilidad Muy Alta le corresponde el 2.06% (Tabla 13).

IV. Susceptibilidad a Fenómenos de Inestabilidad de Laderas en Puerto Vallarta

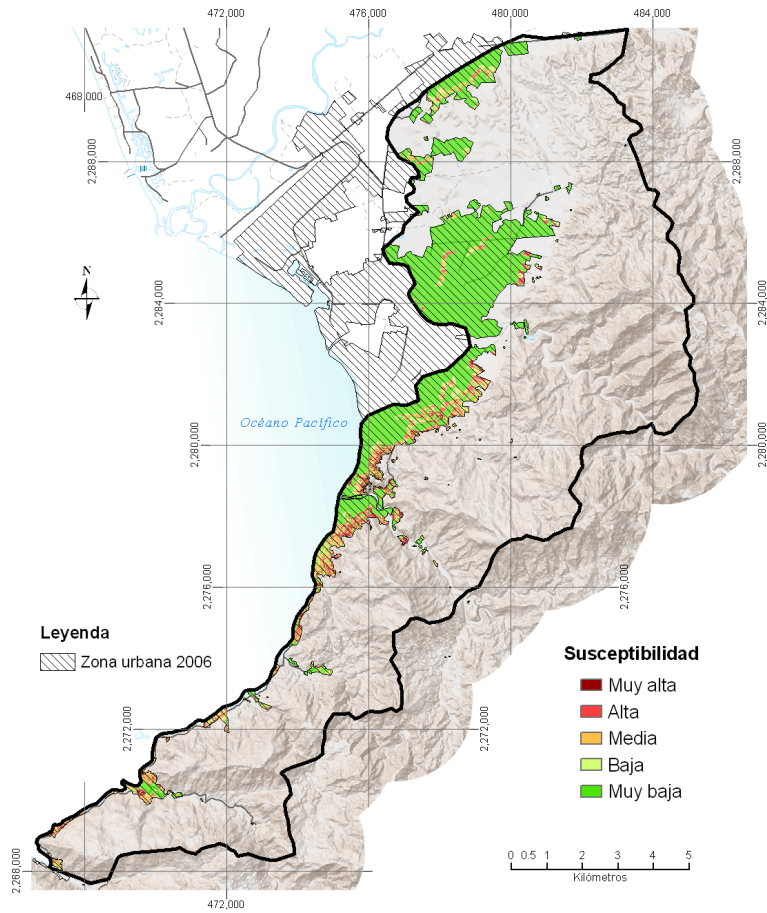
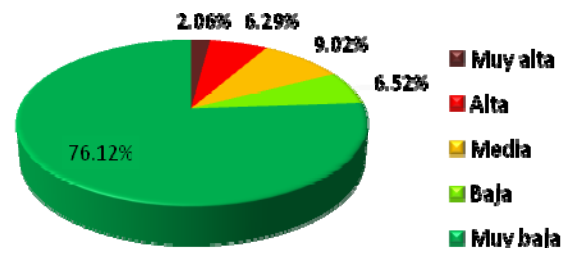


Figura 57. Corte que cubre la zona urbana 2006, marcada con el límite del área de estudio

Tabla 13. Superficies resultantes según su susceptibilidad para la superficie que cubre la zona urbana 2006

<i>Susceptibilidad</i>	<i>Superficie (Has)</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy alta	44.98	2.06%
Alta	137.04	6.29%
Media	196.48	9.02%
Baja	142	6.52%
Muy baja	1,658.80	76.12%

Gráfico 4. Distribución de las superficies según su nivel de susceptibilidad para la superficie que cubre la zona urbana actual (2006)



La zona urbana que presenta mayor concentración de áreas con susceptibilidad Alta y Muy alta es el sitio llamado Conchas Chinas, localizada al inicio de la carretera 200 (ver mapa base en anexo) al Sur de la desembocadura del río Cuale (Figura 58).

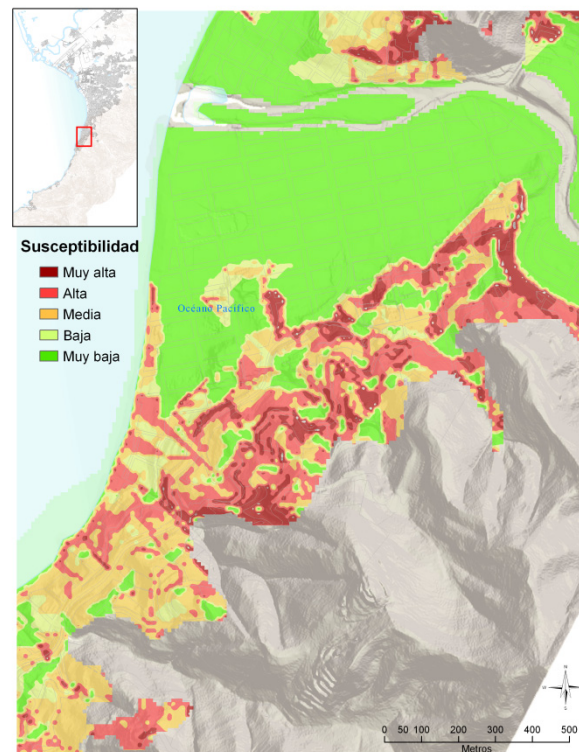


Figura 58. Sitio que presenta actualmente una importante superficie con susceptibilidad Alta y Muy alta a fenómenos de inestabilidad de laderas en Puerto Vallarta.

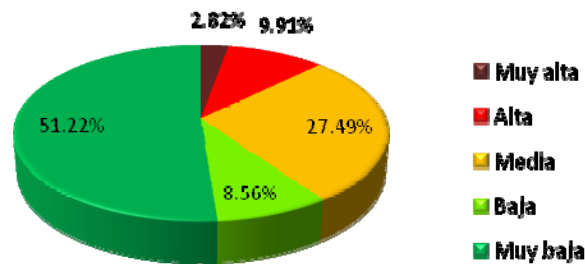
IV.2.3 SUSCEPTIBILIDAD A FENÓMENOS DE INESTABILIDAD DE LADERAS PARA LA SUPERFICIE QUE CUBRE LA ZONA URBANA QUE PROYECTA EL PDU

Tomando en cuenta el área de la mancha urbana que propone el PDU (Figura 59), la cual mide 6,262 has, los resultados indicarían que el 59.78 % de la zona urbana se encuentra en una clase de susceptibilidad Muy Baja y Baja, el 27.49 % en una susceptibilidad Media, 9.91% en Alta, y para susceptibilidad Muy Alta le corresponde el 2.82% (Tabla 14).

Tabla 14. Superficies resultantes según su susceptibilidad para el área que cubre la zona urbana propuesta por el PDU

<i>Susceptibilidad</i>	<i>Superficie (Has)</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy alta	176.57	2.82%
Alta	620.26	9.91%
Media	1,721.30	27.49%
Baja	536.19	8.56%
Muy baja	3,207.59	51.22%

Gráfico 5. Distribución de las superficies según su nivel de susceptibilidad para la superficie que cubre la zona urbana propuesta por el PDU



IV. Susceptibilidad a Fenómenos de Inestabilidad de Laderas en Puerto Vallarta

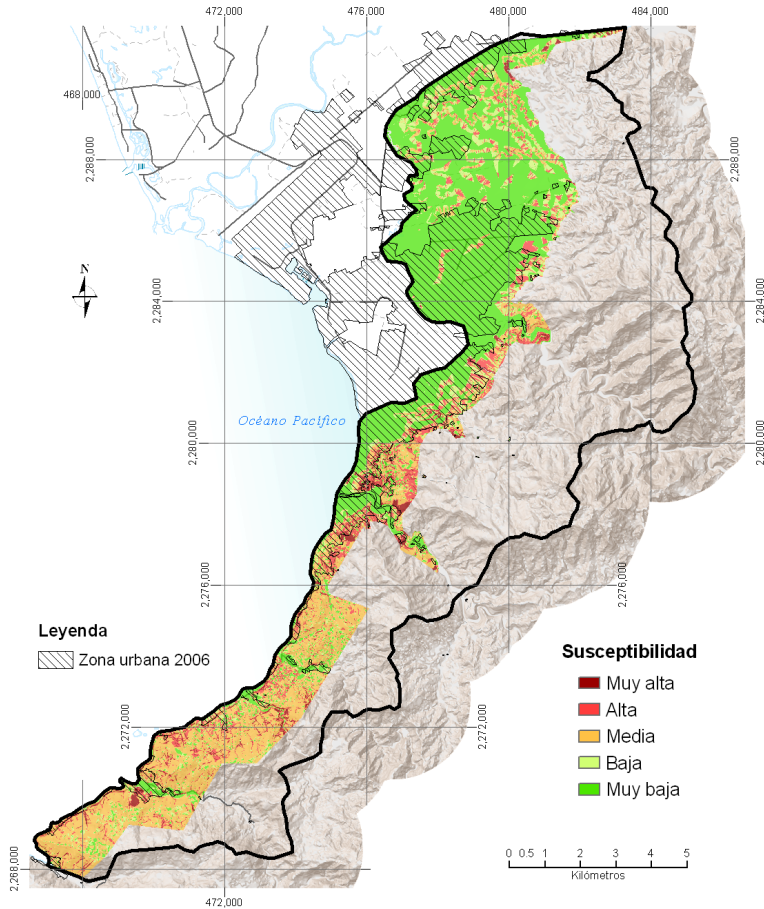


Figura 59. Corte de la superficie que cubre la zona urbana propuesta por el PDU

IV.2.4 LA EXPANSIÓN PROYECTADA DE LA ZONA URBANA Y SUSCEPTIBILIDAD A FENÓMENOS DE INESTABILIDAD DE LADERAS

Al comparar el mapa de susceptibilidad según el área urbana 2006 y el mapa de susceptibilidad según el área urbana que proyecta el PDU, se tiene como resultado que la zona urbanizada que actualmente se extiende sobre 2,179 has, aumentaría su superficie a 6,262 has; lo que señala que tendría una expansión del 187%. El mayor crecimiento lo tendría la porción Sur de la zona de estudio.

El cambio más importante lo tiene la susceptibilidad Media (Gráfico 6) que pasa del 9.02 % a 27.49% y al comparar superficies se indica un aumento del 776% con relación a lo que presenta para 2006. La susceptibilidad Muy baja presenta una pérdida en la distribución de las clases,

pasando de un 76.12% a un 51.22%, y su superficie aumentaría un 93% con relación a lo que presenta para 2006. La clase Baja aumentó de 6.52 a un 8.56% y en su superficie un 278%. Para la clase Alta pasa de 6.29% a un 9.91% teniendo un incremento en su superficie del 353% y para la clase Muy alta pasa de un 2.06% a un 2.82% con un incremento de su superficie del 293%.

Gráfico 6. Incrementos presentados por clases de susceptibilidad para la superficie que cubre la zona urbana proyectada por el PDU

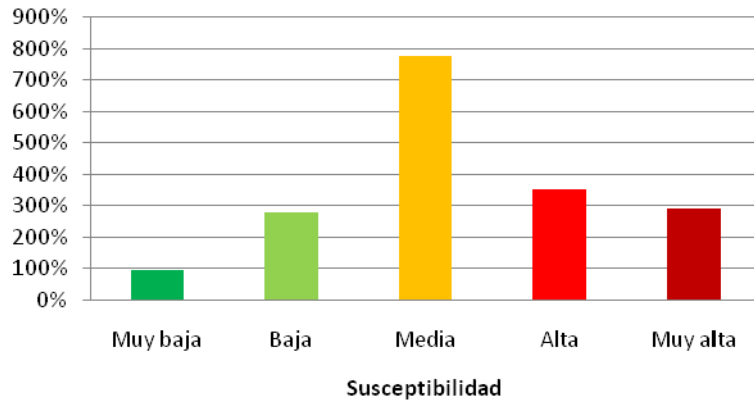
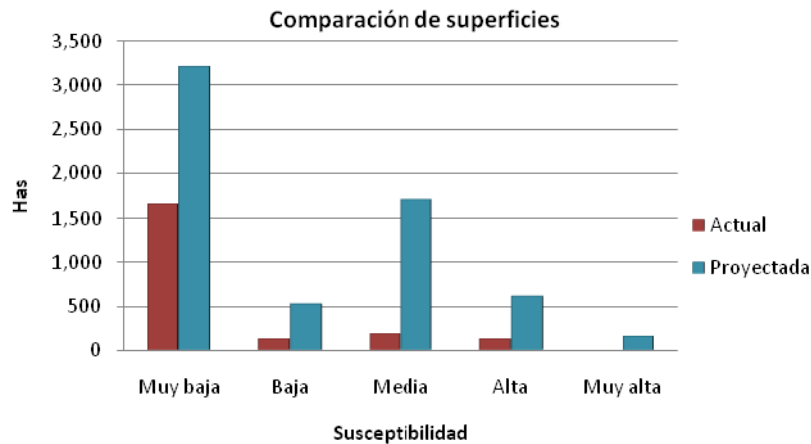
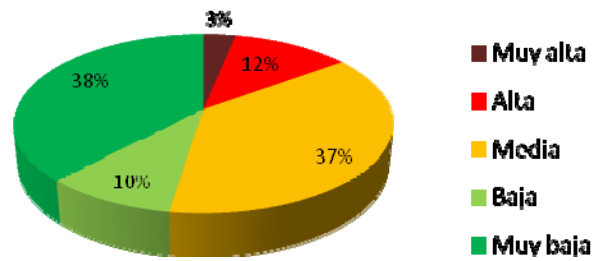


Gráfico 7. Comparación de las superficies por clase de susceptibilidad de la zona urbana actual (2006) y la zona urbana proyectada por el PDU.



La distribución de la susceptibilidad tomando sólo la susceptibilidad de las 4,083 ha, de superficie en la que se expandiría la zona urbana muestra que el 38% correspondería a una susceptibilidad Muy Baja, el 37% a una susceptibilidad Media, un 12% para Alta, 10% le correspondería a una clase Baja y el 3% a una clase Muy Alta (Gráfico 8).

Gráfico 8. Distribución de las categorías de susceptibilidad sólo para la superficie que de nuevo crecimiento de la ciudad de acuerdo con el PDU



DISCUSIÓN

Los resultados arrojan que las condiciones actuales de la zona estudiada son de una susceptibilidad media (49.5% del área). Si a ésta se suma la superficie de la susceptibilidad Alta (10.64%) y Muy alta (3.13%), resulta que actualmente el 63.27% de la superficie en la zona de estudio tiene probabilidad de presentar problemas por inestabilidad de ladera.

Los cambios en la distribución de las clases de susceptibilidad cuando se comparan las zonas urbanizadas 2006 y las proyectadas en el PDU, indican que se proyecta que la ciudad se expanda sobre zonas predominantemente con susceptibilidad media.

Los resultados muestran que el 15.06% del área de reserva para el crecimiento urbano presenta susceptibilidades Altas y Muy altas, que al ser sumado con el 37.34% de la susceptibilidad Media, indica que el 52.4% del área en la que se estima crecerá la ciudad tiene probabilidades de tener inestabilidad de laderas.

El hecho que la cuenca del río Pitillal se distinga por presentar un mayor número de zonas con susceptibilidades Altas, es respaldado por la morfología del sitio que indica su potencial a la erosión al observarse una red de escurrimientos muy desarrollada con un alto potencial para producir flujos de detritos.

El hecho que la zona que presenta los valores más altos de susceptibilidad sea la cuenca del río Pitillal es debido a sus factores naturales (pendiente, geología, radiación solar, presencia de morfolineamientos y concentración de flujos).

La coherencia que presenta el resultado del modelo con relación a lo observado en campo y los registros históricos se puede considerar alta, con excepción de las zonas con pendientes bajas. Esto pudo deberse al modelo de inestabilidad y al modelo de concentración cuyos resultados sobre pendientes por debajo de los 5° presentaban resultados anormales.

La razón del por qué la zona de Conchas Chinas resulta con susceptibilidades altas es debido a las intensidades de uso de acuerdo al PDU en pendientes inclinadas, y a la red de caminos que presenta, los cuales tienen taludes con pendientes altas.

CONCLUSIONES

Las condiciones físicas en la zona de montaña son propicias para los fenómenos de inestabilidad de ladera por la elevada pendiente de sus laderas, su condición geológica y sus condiciones climáticas.

La realización de inventario de deslizamientos permitió conocer, identificar y espacializar los tipos de remoción en masa que se presentan en Puerto Vallarta.

Los procesos de remoción en masa identificados en la zona de estudio son: caída en bloques de detritos y arenas, caída de rocas, deformaciones gravitacionales profundas de ladera (flujo de rocas), deslizamientos traslacionales, deslizamientos rotacionales, flujos de detritos (debris flow). Los cuales son resultados de las condiciones naturales tanto como de los procesos antropogénicos a los cuales está sometida la zona de estudio.

Los flujos de detritos se muestran como los principales causantes de desastres en materia de fenómenos de inestabilidad de ladera para Puerto Vallarta.

Los principales desastres han ocurrido como resultado de la existencia de asentamientos humanos dentro o a la salida de cañadas, debido a que se ubicaron directamente en la trayectoria de potenciales flujos de detritos.

Con base a los antecedentes históricos el principal factor desencadenante son las precipitaciones.

Se identifican dos etapas críticas en la ocurrencia de flujos de detritos. La primera es al inicio de la temporada de lluvias, es decir el mes de junio. Esto por la posibilidad de acumulación de material durante la época de estiaje (de forma natural o de origen antrópico), que posteriormente pueda ser desplazado pendiente abajo por las primeras lluvias. La segunda etapa corresponde al mes de septiembre por el factor lluvia, el de mayor precipitación en el año, debido a la ocurrencia de ciclones tropicales, y además de que existe acumulación de

humedad al ser el cuarto mes de la temporada de lluvias, lo que aumenta la probabilidad a que ocurra un flujo de detritos.

Las alteraciones al equilibrio natural de la pendiente como es el caso de la apertura de caminos y la construcción de edificaciones, provocan procesos de remoción en masa, como muestran los casos de eventos reseñados.

Se considera que el modelo utilizado para la elaboración del mapa de susceptibilidad respondió de manera aceptable al presentar resultados que fueron coherentes con lo encontrando en campo y los registros históricos.

La generación del mapa de susceptibilidad representa una importante herramienta para la identificación de zonas potenciales a procesos de remoción en masa, lo que puede ayudar a prevenir futuros desastres y para la planeación de la ciudad.

El uso del método heurístico permitió de manera fácil y coherente integrar mediante el SIG una serie de variables que en su conjunto indicaron el nivel de susceptibilidad. Facilita también la zonificación de las variables, ya que trabaja desde el origen con datos espaciales.

La metodología desarrollada permitió identificar zonas susceptibles a inestabilidad de laderas a partir de representar los procesos que han sido causantes de estos fenómenos.

La tendencia de crecimiento que presenta la Ciudad de Puerto Vallarta, mostrada por el Plan de Desarrollo Urbano, indica que crecerá en zonas susceptibles a fenómenos de inestabilidad de ladera, lo cual incrementará la frecuencia con que éstos ocurren y por lo tanto el número de posibles desastres.

RECOMENDACIONES

El mapa de susceptibilidad no se puede considerar un trabajo concluido ya que debe ser detallado, complementado y actualizado de forma permanente según los eventos que se presenten o las modificaciones que se realicen en la zona de estudio.

Es conveniente que se realice mayor trabajo de campo para la cartografía de litología de Cuaternario e identificación de nuevos cuerpos inestables.

Se debe considerar que para la capa de asentamientos humanos se utilizaron niveles de densidad de ocupación que se pretende que se cumplan. En caso contrario, se puede presentar dos situaciones: una que la densidad sea menor a la propuesta, y dos, que se sobrepase la densidad propuesta. Ambos casos significarían un cambio en los resultados del mapa de susceptibilidad.

Un factor que puede hacer se modifique el resultado del mapa es la modificación de las pendientes que es el caso de las obras de construcción. Esto puede ocasionar un aumento o disminución en los valores de la susceptibilidad.

Dado el tipo y el comportamiento de los procesos de remoción en masa que suceden con mayor frecuencia (flujos de detritos y deslizamientos traslacionales) es necesario trabajar a escalas más grandes para que un mayor detalle de los deslizamientos pueda ser cartografiado.

Es necesario estudiar más a fondo los grandes deslizamientos del tipo flujo de rocas que fueron identificados ya que se consideró su presencia pero no fue posible determinar otras cualidades, como puede ser el estado de su actividad y su tasa de movimiento.

BIBLIOGRAFÍA

Alcántara, I. (2000), "Landslide: ¿Deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, No. 41, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp.07-25.

Aragón, M. (2006), "Geología", *Atlas de Riesgos Naturales*, Ayuntamiento de Puerto Vallarta, Habitat. México.

Aragón, M. y Nuñez, F. (2001) "Geología de los alrededores de puerto Vallarta, Jalisco, aplicada a evaluación de riesgo geológico", *GEOS Unión Geofísica Mexicana, Boletín Informativo*. No. 3, Unión Geofísica Mexicana, p. 218.

Atlas de caminos y carreteras del Estado de Jalisco (2006), Instituto de información territorial del Estado de Jalisco, Gobierno del Estado de Jalisco.

Atlas de Riesgos Naturales de Puerto Vallarta (2006), *Mapa geológico* escala 1:20000, H. Ayuntamiento de Puerto Vallarta.

Atlas Estatal de Riesgos del Estado de Jalisco (2007), Gobierno del Estado de Jalisco - Universidad de Guadalajara.

Ayala-Carcedo, F. (2002), *Riesgos Naturales*. Ariel Ciencia. Primera edición. España.

Barredo et al. (2000), "Comparing heuristic landslides hazards assessment techniques using GIS in Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Issue 1, pp. 9-23

Bisci, C. y Sorriso, M. (1996), "Rock Flow (Sackung)" en Dikau, R. et al. (Eds), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*, (pp. 150-160). John Wiley and Sons, Gran Bretaña.

Budeta et al. (2008), "Landslide hazard mapping along the coastline of the Cilento region (Italy) by means of a GIS-based parameter rating approach", *Geomorfology*, No. 94 Elsevier, Holanda pp. 340-352.

Buma, J. y Van, T. (1996), "Slide (rotational)" en Dikau, R. et al. (Eds), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*, (pp. 42-61). John Wiley and Sons, Gran Bretaña.

Carrara, A. et al. 1992 "Uncertainty in assessing landslide hazard and risk", *ITC Journal*, No. 2, Holanda pp. 172-183.

Carrara, A. y Pike R. (2008), "GIS technology and models for assessing landslides hazards and risk", *Geomorphology*, No. 94, Elsevier, Holanda pp. 257-260.

Castellanos E. y van Westen, C. (2008), "Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba", *Geomorphology*, No. 94 Elsevier, Holanda pp. 453-466.

Chacon, J. (2003), "Los Procesos de riesgo con origen natural: una constante en la relación entre hombre y medio", *Áreas, revista de ciencias sociales*; No. 23, Murcia, España.

Chacón, J. et al. (2006), "Engineering geology maps: landslides and geographical information systems", *Engineering Geology Environment*, No. 65, Springer, pp. 341-411.

Corominas, J. (1996), "Debris flow" en Dikau, R. et al. (Eds), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*, (pp. 161-187). John Wiley and Sons, Gran Bretaña.

Corominas, J. (1996), "Debris slide" en Dikau, R. et al. (Eds), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*, (pp. 97-102). John Wiley and Sons, Gran Bretaña.

Cruden, D. (1991), "A simple Definition of a Landslide", *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 43, pp. 27-29.

Cruden, D. y Varnes, D. (1996), "Landslides types and processes", en Turner, A. K. Schuster R. L. (Eds.), *Landslides. Investigation and mitigation. Special report 247*, (pp. 36-75). National Academy Press. Washington, D.C.

Dai y Lee, (2001), "Terrain-based mapping of landslides susceptibility using a geographical information system: a case study", *Canadian: Geotechnical Journal*; No. 5, Canada. pp 911-923.

Dikau, R. et al. (Eds), (1996), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*, John Wiley and Sons, Gran Bretaña.

Dikau, R. y Schrott, L. (1996), "Topple" en Dikau, R. et al. (Eds),, *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*, (pp. 29-41). John Wiley and Sons, Gran Bretaña.

Donati, L. y Turrin, M. (2002), "An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy)" *Engineering Geology*, No. 63, El server, Holanda, pp. 277-289.

El Faro (2007) *Derrumbe en Conchas Chinas*, El Faro, Puerto Vallarta Jal. 18 de abril No. 473

El Informador: [www.informador.com.mx: marzo 2007]

EPOCH (1993), *Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community*, Flageollet, J. (Ed.) Contract No. 90 0025.

Flageollet, J. y Weber, D. (1996), "Fall" en Dikau, R et al. (Eds), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*, (pp 13-28). John Wiley and Sons, Gran Bretaña

García J. (2006), "Aplicación del proceso de jerarquía analítica en la selección de tecnología agrícola", *Agronomía Costarricense* No. 30, Universidad de Costa Rica, pp. 107-114.

Giorgio, L. y Audisio, C. (2006), "Unesco World Heritage sites in Italy affected by geological problems, specifically landslides and flood hazard", *Landslides*, No. 3 Springer-Verlag, pp. 311-321.

González, L. (2002), *Ingeniería geológica*, Prentice Hall, España.

Google Earth, (2006)

Guzzetti, F. et al. (2006), "Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy", *Natural Hazards and Earth System Science*, No.6, European Geosciences Union, pp. 115-131.

Hábitat (2004), *Puerto Vallarta/Jalisco, Estudios urbanísticos y ambientales en 75 barrios correspondientes a 31 ciudades del Sistema Urbano Nacional (SUN)*, SEDESOL, México.

Hutchinson. J. (1988), "General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrogeology", en Bonnard, C. (Ed.). *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, (pp. 3-35) A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, vol. I.

Ibsen, M. et al. (1996), "Block slide" en Dikau, R. et al. (Eds), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*, (pp. 64-84). John Wiley and Sons, Gran Bretaña.

Informado, El (1975), *Lodos y Piedras sobre Puerto Vallarta*, El Informador, Diario independiente; Guadalajara, Jal. 7 de julio. No. 20,609.

Informado, El (1993), *Tres muertos y 35 heridos por las lluvias en Vallarta*, El Informador, Diario independiente; Guadalajara, Jal. 21 de septiembre. No. 27244.

Lan et al. (2004), "Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China", *Engineering Geology*, No. 76 Elsevier, Holanda, pp. 109-128.

Lukose, S. (2006), *Effect of Vegetation on Debris Flow Initiation: Conceptualization and Parameterization of a Dynamic Model for Debris Flow Initiation in Tikovil River Basin, Kerala*,

India, using PCRaster, Tesis para obtener el grado de M of C in la Geo-information and Earth Observation; ITC, NRSA; Holanda.

Malet et al. (2009), "Landslides susceptibility mapping at 1:1M scale over France: exploratory results with a heuristic model" en Malet et al. (Eds) *Landslides processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling*, (pp. 315-320), University of Strasbourg, France.

Melzeder et al. (2007), "Establishing a qualitative landslide susceptibility approach for a tropical region- Navua Catchment, South Viti Levu, Fiji Islands", *Geophysical Research Abstracts*, No. 11195, European Geosciences Union.

Montes, C. (2002), *Puerto Vallarta en mis recuerdos*, Universidad de Guadalajara, México.

Ni, J.R; Liu, R. Z; Wai, O. W. H. (2006), "Rapid zonation of abrupt mass movement hazard: Part I. General principles", *Geomorphology*, No. 80, Elsevier, Holanda pp. 214-225.

Noticias PV, (2007), *Vecinos Temen Deslave de Cerro*
[\www.noticiaspv.com/Vallarta/Noticias/2007/agosto/24_agosto/n1.htm : agosto 2007]

O'Loughlin, C. (2005), "The protective role of trees in soil conservation", *NZ Journal of Forestry*, Vol 49 No. 49, New Zealand Institute of Forestry, pp9-15.

Pack, R. et al. (2005), *Sinmap 2, A stability index approach to terrain stability hazard mapping*. Utah State University.

Pasuto, A. y Soldati, M, (1996), "Rock spreading" en Dikau, R. et al. (Eds), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*, (pp. 122-134). John Wiley and Sons, Gran Bretaña.

Plan de Desarrollo Urbano Puerto Vallarta (2008), *Plan de Desarrollo Urbano de centro de Población de Puerto Vallarta: Plano de zonificación*, versión para consulta pública. Ayuntamiento de Puerto Vallarta.

Roa, J. (2006), "Aproximación al Mapa de Susceptibilidad y Amenazas por Deslizamientos de la Ciudad de Trujillo, Venezuela", *Ágora-Trujillo*, Año 9, No. 17, Venezuela, pp. 185-205.

Ruff, M. y Czurda, K. (2008), "Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria)", *Geomorfology*, No. 94 Elsevier, Holanda pp. 314-324.

Ruiz, J., (2003), *Estadísticas climáticas básicas para el Estado de Jalisco (periodo 1961-2000)*. INIFAP, México.

Saaty, T. (1980), *The Analytic Hierarchy Process*. Ed. McGrawHill. New York.

Santacana, N., (2001), *Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la cuenca del Río Llobregat*. Tesis para obtener el grado de Doctor Ingeniería del terreno y Cartografía. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

Sarkar S. et al. (2008), "Gis based spatial data analysis for landslide susceptibility mapping", *Journal of Mountain Science*, No. 1, Science Press, co-published with Springer-Verlag GmbH pp. 52-62.

Schäuble, H. (2004), *HydroTools 1.0 for ArcView 3.x*, Alemania.

Schrott et al. (1996), "Soil flow (mudflow)" en Dikau, R. et al. (Eds), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*, (pp. 181-185). John Wiley and Sons, Gran Bretaña.

Schulz, W. et al. (2008), "Modeling the spatial distribution of landslide-prone colluvium and shallow groundwater on hillslopes of Seattle, WA", *Earth Surface Processes and Landforms*, No. 33, Wiley InterScience, pp. 123-141.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, *Elaboración de la Manifestación de impacto ambiental modalidad regional, del proyecto: Libramiento de Puerto Vallarta, con longitud de 32.873 km, en el Estado de Jalisco*. México

SECTUR (2008): [www.sectur.gob.mx: febrero 2009]

SGM, (1999), Carta Geológica Minera F13-11 Escala 1: 250,000, Servicio Geológico Mexicano

SINMAP, Utah State University: [<http://hydrology.neng.usu.edu/sinmap/sinmap.htm>: febrero 2009].

SMIS, (2009), *Sismos más importantes en México*. [<http://www.smis.org.mx/htm/sm15.htm>: Mayo, 2009]

Soeters, R. (1996), "Slope instability recognition, analysis, and zonation" en Turner, A. K. Schuster R. L. (Eds), *Landslides. Investigation and mitigation. Special report 247*, (pp. 129-177) National Academy Press. Washington, D.C.

Sorriso, M. y Gulla, G. (1996), "Rock slide" en Dikau, R. et al. (Eds), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*, (pp. 85-96). John Wiley and Sons, Gran Bretaña.

Suárez J., (1998), *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Universidad industrial de Santander, España.

Turner, A. K. Schuster R. L. (Eds), (1996), *Landslides. Investigation and mitigation. Special report 247*. National Academy Press. Washington, D.C.

UNESCO (1993), *Multilingual Landslide Glossary*. The international Geotechnical Societies' UNESCO Working Party for World Landslides Inventory, BiTech Pubs, Canada.

Valdivia, L. (2001), "Las regiones geomorfológicas del estado de Jalisco", *Geocalli, Cuadernos de Geografía*, No. 3, Universidad de Guadalajara, México.

Van Westen, C. (2008), Apuntes del Curso: Geo-Información para la Evaluación y Manejo del Riesgo a Múltiples Amenazas. ITC-CIGA.

Varnes, D. (1984), *Landslide hazards zonation: a review of principles and practice*, UNESCO, Francia.

Varnes, D. (1978), "Slope Movement Types and Processes" en Schuster, R. and Krizek, R. (Eds.), *In Special report 176: Landslide: Analysis and Control*, (pp. 11-33). TRB, National Research Council, Washington D.C.

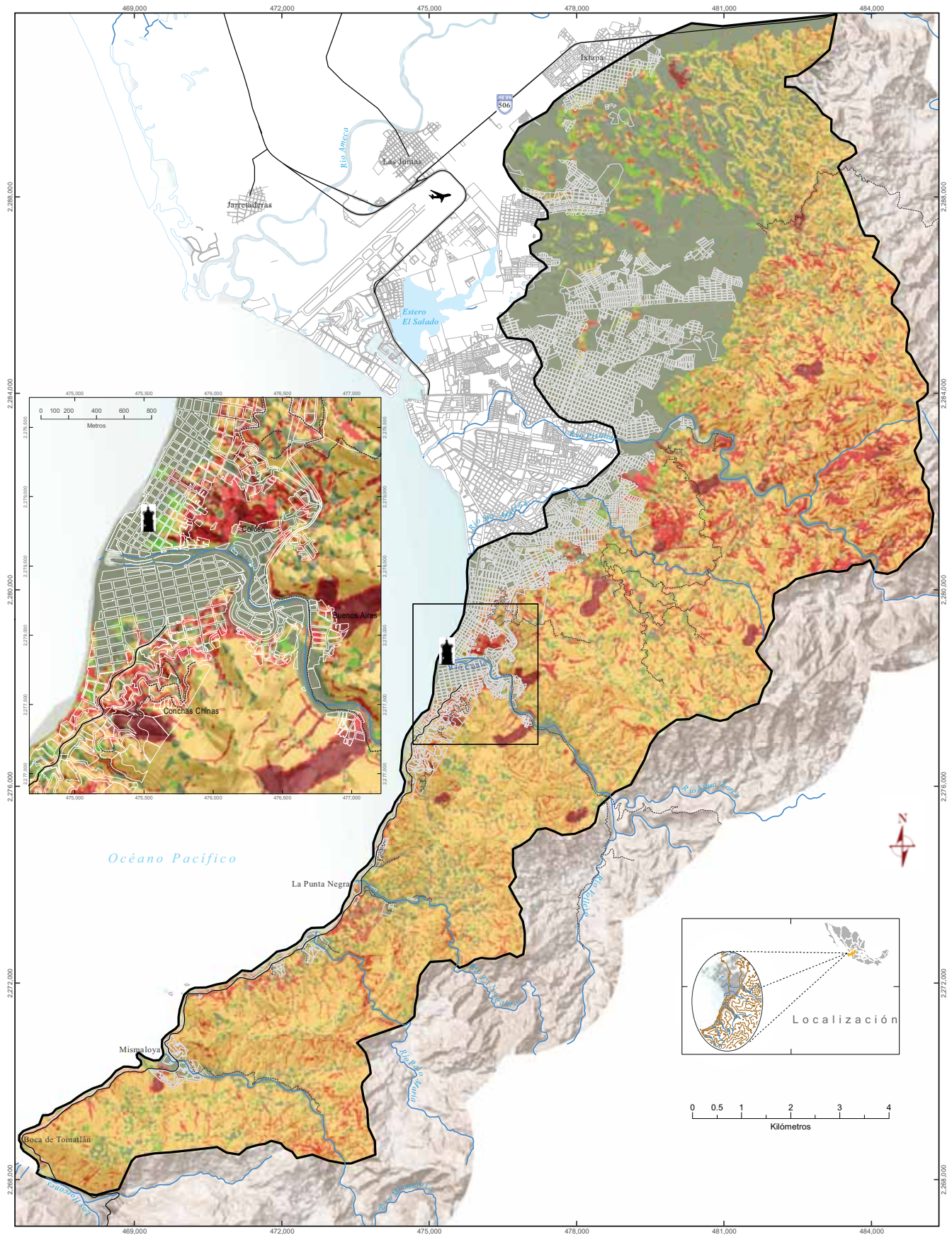
Yiping, H. y Beighley, R. (2008), "GIS-based regional landslide susceptibility mapping: a case study in southern California", *Earth Surface Processes and Landforms*, No. 33, Wiley InterScience, pp. 380-393.

Zaitchik B. et al. (2003), "Modeling Slope Stability in Honduras: Parameter Sensitivity and Scale of Aggregation", *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 67. The Soil Science Society of America, pp. 268-278.

ANEXO CARTOGRÁFICO

Mapa de Susceptibilidad a Fenómenos de Inestabilidad de Ladera

Puerto Vallarta



Universidad Nacional Autónoma de México

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental

Posgrado en Manejo Integrado del Paisaje

Inestabilidad de laderas en la Zona de Montaña de la ciudad de Puerto Vallarta, Jalisco

Caracterización, susceptibilidad e implicaciones relacionadas con el crecimiento urbano

CIGA - 2009

Fuente:

Vectores de la carta F13C69 1:50,000 INEGI.
Vectores Instituto de Información Territorial del Estado de Jalisco, 2006.
Fotografía aérea 1:15,000, 2006, Cartodata S.A. de C.V.,
Imagen Google Earth, 2006.
Plan de Desarrollo Urbano Puerto Vallarta, 2008 (Versión para consulta pública).
Recorrido de campo.

Proyección y Datum: UTM, zona 13N, WGS84
Elaboró: Jesús Arturo Muñoz Jauregui

Leyenda base

- Estero
- Río
- Límite zona de estudio
- Traza urbana
- Camino**
- Carretera
- Terracería

Leyenda temática

- Centro histórico
- Aeropuerto
- Carretera federal
- Carretera estatal
- Conchas Nombre de colonia
- Ixtapa Nombre de población

Susceptibilidad

- Muy alta
- Alta
- Media
- Baja
- Muy baja