



Universidad Nacional Autónoma de México

Posgrado en geografía

Instituto de Geografía
Facultad de Filosofía y Letras

Análisis y cartografía de riesgo de desastre por procesos de remoción en masa en el municipio de Pahuatlán, Puebla.

Que para optar para el grado de maestra en Geografía

Presenta:

Franny Giselle Murillo García.

**Tutora: Dra. Irasema Alcántara Ayala.
Instituto de Geografía, UNAM.**

México D.F., Junio de 2013.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria.

Este trabajo está dedicado a mis padres y familia.

Agradecimientos.

Esta tesis no hubiese sido posible sin la coordinación, asesoramiento y ayuda de varias personas:

Dra. Irasema Alcántara Ayala¹, asesora de la investigación.

Dr. Fausto Guzzetti², asesor durante la estancia académica en el CRN-IRPI, Perugia, Italia.

A los sinodales de este trabajo:

Dr. Manuel Suárez Lastra¹

Mtro. Ricardo Javier Garnica Peña¹

Mtra. Oralia Oropeza Orozco¹

Dra. Minerva Rebollar Plata³

Al CONACYT y a sus sistema de becas de posgrado y mixta que permitieron llevar a cabo este trabajo y la estancia (Beca Mixta) en el CNR-IRPI, Perugia Italia por cuatro meses y al proyecto CONACYT 156242: "MISTLI: Monitoreo, Instrumentación y Sistematización Temprana de Laderas Inestables".

Glga. Francesca Ardizzone², por la supervisión y asesoramiento en la elaboración del inventario de PRM.

Dra. Federica Fiorucci², por su ayuda y asesoramiento con el uso de las imágenes de Muy Alta Resolución (MAR) GeoEye1.

Glgo. Mauro Cardinali² por su ayuda y asesoramiento en la identificación de PRM en modo 3D.

Glgo. Mauro Rossi² por su ayuda, asesoramiento en la parte de los modelos de Susceptibilidad y probabilidad de área de PRM.

Glga. Paola Reichenbach² por su asesoramiento en el tema de Susceptibilidad.

Fis. Alessandro Mondini² por su ayuda con el proceso de Pan-Sharpning de las Imágenes de Satélite de MAR.

Dr. Ivan Marchesini² por su ayuda con la partición de la zona de estudio en unidades de ladera.

Dr. Francesco Bucci² por su ayuda con la interpretación geológica de la zona de estudio.

Fis. María Teresa Brunetti² y a la Ing. Silvia Peruccacci por la información brindada para el análisis de la precipitación.

A Glga. Paola Salvati² por la información otorgada sobre la revisión y compilación y de los archivos históricos de PRM.

A Frida Clerissi² por su invaluable ayuda en todo lo respectivo a mi estancia en Italia.

A Cinzia Bianci, Haydar Hussin, Glgo. Michele Santangelo y general a todos los del CNR-IRPI, Perugia por darme su amistad y amabilidad.

Al profesor Martín Cabrera Aparicio por darme alojamiento, información y todas las facilidades durante mis visitas a Pahuatlán. A él y a toda su familia: su esposa Magda y sus hijos Celia, Martín y Magda.

Al secretario del Municipio de Pahuatlán Gustavo Lazcano por la información valiosa que otorgó a este trabajo.

A los señores Raúl López Lira y Enrique Franco y en general a todos los habitantes de Pahuatlán entrevistados en este trabajo, por la información histórica proporcionada.

A Susana Cruz, Karen Flores, Adriana Maren, Luisa Rebeca Garza López, Anabel Lizbeth Aguilar García, Bárbara Tello, Miriam Nazario, Sandra Tenorio, Guadalupe Hernández, Idalia Esmeralda Rodríguez Martínez y Alejandro Martínez Lucio, mi hermano Carlos Eduardo Murillo García e Israel Zumaya Sandoval por el financiamiento económico otorgado cuando ya no había beca y había que imprimir la tesis.

A Anabel Muro Lezama, Abigail Murillo García, Ilallali Sarmiento y Alejandro Martínez Lucio por su ayuda en las visitas a campo y la elaboración del inventario de PRM, también a Matilde Cruz por las fotos aportadas.

A todos los profesores que me dieron clases durante los cuatro semestres que duró la maestría así como al personal de la coordinación de Posgrado en Geografía.

A todos mis compañeros de la maestría: Lupita, Karen, Iskra, Jesús.

A mis amigas de Perugia, Italia: Cristel, Daniela e Ilaria.

Y a Milla Paulette Vega Arriaga por la revisión de formato final.

¹Instituto de Geografía de la UNAM, México.

²CNR-Instituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI), Perugia, Italia,

³CIIEMAD, IPN, México.

Índice

Introducción..... 8

- Características generales de Pahuatlán.....8
- Delimitación de la zona de estudio.....11
- Geología de Pahuatlán.....11
- Breve historia del municipio.....13
- Estructura capitular de la tesis.....18

Capítulo 1. Marco teórico, histórico y metodológico de la estimación de riesgo por procesos de remoción en masa..... 19

- 1.1 Breve historia de los desastres..... 19
 - Antes de las sociedades industriales..... 19
 - La visión de desastres en el posmodernismo..... 22
 - El desarrollo y el paradigma estructuralista..... 23
 - La institucionalización del problema (1980 -2010)..... 29
- 1.2 Marco teórico.....31
 - Teoría de sistemas.....31
 - Los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.....33
 - Procesos de remoción en masa.....39
- 1.3 Metodología general.....47

Capítulo 2. Construcción del inventario de Procesos de Remoción en Masa (PRM)..... 52

- 2.1 Tipos de inventarios y mapas de inventario de PRM.....52
- 2.2 Percepción remota..... 54
 - Generalidades.....54
 - Sensores remotos.....56
 - Imágenes de satélite de muy alta resolución.....58
- 2.3 Identificación de PRM en las imágenes de satélite de muy alta resolución.....62
 - Antecedentes.....62
 - Pre-procesamiento.....64
 - Construcción del modelo 3D.....66
 - Identificación.....69
 - Ventajas del uso de imágenes de satélite de muy alta resolución.....73
- 2.4 Revisión de archivos históricos y visitas a campo.....74
 - Archivos históricos.....74
 - Visitas a campo.....77

2.5 Construcción del mapa de inventario de PRM de Pahuatlán.....	81
• Registro y estructura de la base de datos del inventario.....	81
• Resultados del inventario.....	87

Capítulo 3. Determinación del grado de susceptibilidad a PRM.....89

3.1 Generalidades.....	89
3.2 Construcción de un Modelo Digital de Elevación (DEM).....	90
• Definición.....	90
• Construcción del modelo.....	91
3.4 División de la zona de estudio en unidades cartográficas.....	92
• Generalidades.....	92
• Unidades de ladera.....	94
• Procesamiento.....	94
3.5 Compilación de los datos geo-espaciales complementarios o variables explicativas.....	95
• Relieve.....	96
• Litología.....	99
• Presencia de fallas y fracturas.....	103
• Vegetación y uso de suelo.....	103
• Procesos de remoción antiguos.....	105
3.6 Aplicación de los modelos estadísticos.....	105
• Introducción.....	105
• Determinación de la variable dependiente.....	107
• Análisis discriminante Lineal (ADL).....	107
• Análisis discriminante cuadrático (ADC).....	108
• Regresión logística (RL).....	109
• Redes neuronales (RN).....	109
3.7 Análisis y cartografía de los resultados.....	109
• Resultados de los tres modelos individuales.....	109
• Resultados de la combinación de modelos.....	114
• Resultados de la validación.....	120

Capítulo 4. Determinación de la amenaza por PRM.....122

4.1 Introducción.....	122
4.2 Modelos de amenaza por PRM.....	122
4.3 Determinación de la magnitud.....	123
• Área de los PRM.....	123
• Velocidad del movimiento.....	126
4.4 La frecuencia de ocurrencia de PRM.....	129

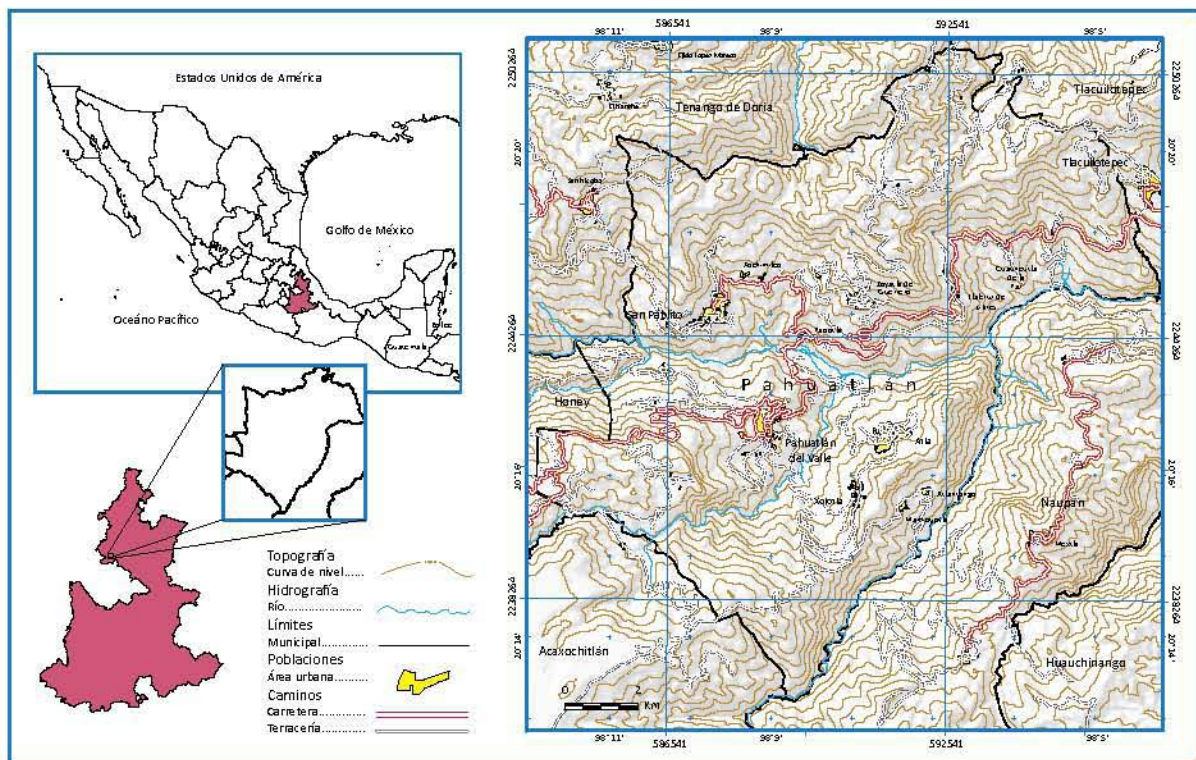
• Análisis de los datos meteorológicos.....	129
• Determinación de la frecuencia.....	136
4.5 Resultados del grado de amenaza.....	137
Capítulo 5. Estimación de la vulnerabilidad.....	141
5.1 Introducción.....	141
5.2 El enfoque de vulnerabilidad de Turner.....	141
5.3 Enfoque Spatial Analysis of the Vulnerability (SAVE).....	142
5.4 Metodología para estimar la vulnerabilidad.....	145
• La amenaza para establecer el tipo de daño.....	145
• Definición de los sujetos de vulnerabilidad.....	146
• Definición espacial de los sujetos de vulnerabilidad.....	147
• Definición de la Exposición.....	148
• Definición de la Sensibilidad.....	154
• Definición de la falta de Resiliencia.....	158
5.5 Resultados e identificación de patrones.....	161
Capítulo 6. Discusión y conclusiones.....	181
6.1 Resultados del análisis de riesgo.....	181
6.2 Discusión.....	187
6.3 Conclusiones.....	187
Bibliografía y referencias.....	190

Introducción

Características generales de Pahuatlán

Pahuatlán del Valle es un municipio del Estado de Puebla, localizado al Oeste de la región de la Sierra Norte de Puebla (figura i). En esta región del centro de México continuamente se presentan Procesos de Remoción en Masa (PRM) además de ser una de las regiones más pobres del país. En el año de 1999, la Depresión Tropical n° 11 ocasionó lluvias que detonaron PRM e inundaciones que causaron la muerte de cientos de personas y múltiples daños materiales. Posterior a ese evento, que en su momento fue catalogado como el peor desastre en la historia de México luego del terremoto de 1985 en Ciudad de México, se han presentado eventos de magnitud menor, que han afectado la región en 2005 y 2007, aunque prácticamente cada temporada de lluvias en la región ocurren PRM.

Figura i. Localización de Pahuatlán.



El municipio solo reportó un muerto en el evento de 1999, lo que pareciera sugerir que el riesgo de desastre por PRM es menor que en otros municipios, pero esta percepción podría ser equivocada. El problema de los PRM ha sido constante para las autoridades municipales y la población que ya han perdido una escuela primaria (Esc. Leandro Valle), dos clínicas de salud y al menos dos docenas de viviendas a causa de los movimientos de ladera. Además, constantemente los caminos deben ser reparados pues se ven bloqueados por estos fenómenos lo que dificulta el desarrollo del municipio. En el año 2012, Pahuatlán, la cabecera municipal del municipio, fue declarada por el Gobierno Federal como Pueblo Mágico, una categoría turística que supone un apoyo económico importante para la promoción turística del municipio. Es de esperarse que

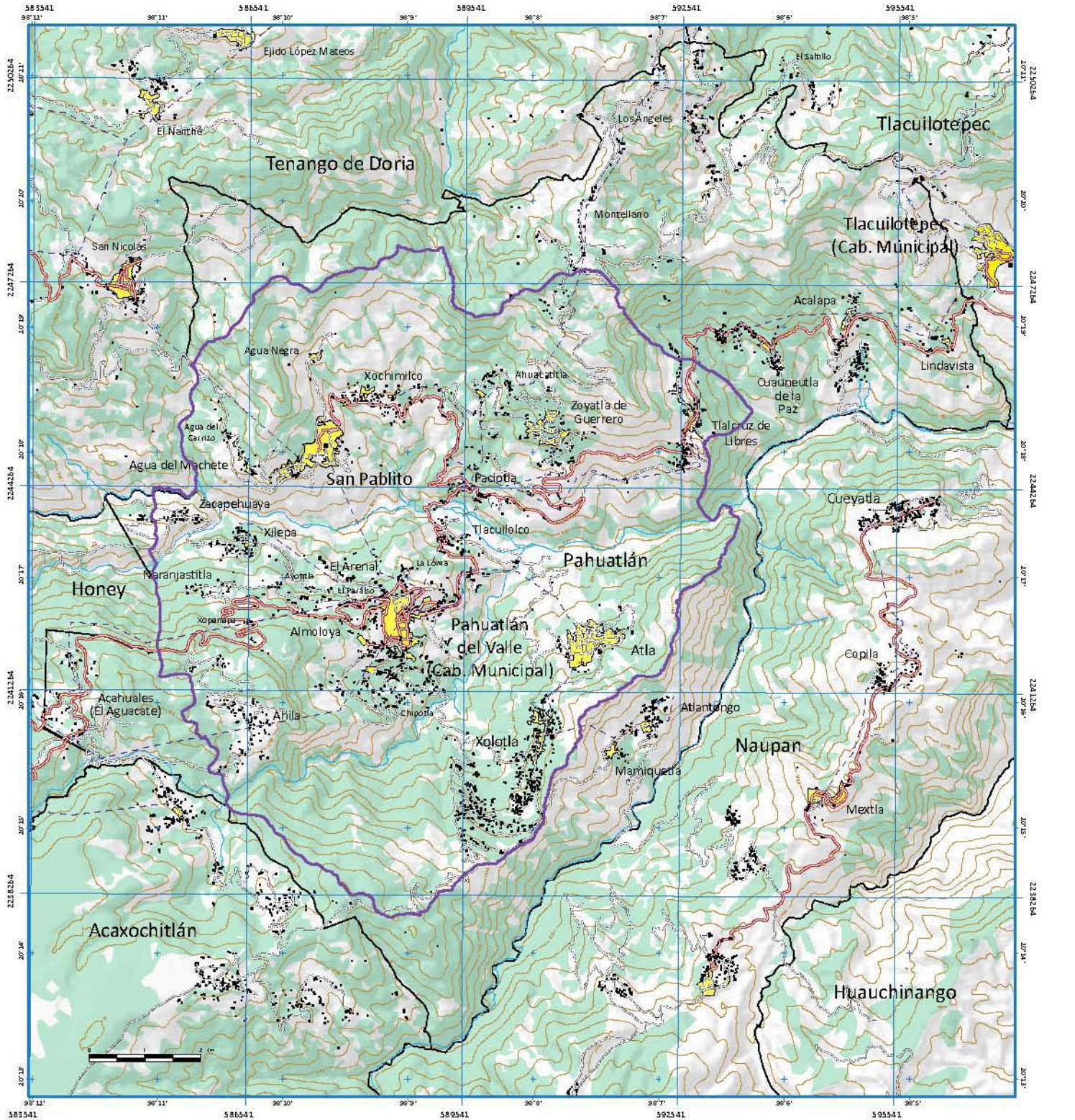
debido a esto, la población y la infraestructura y el equipamiento del municipio aumenten. La situación de Pahuatlán en relación con los PRM, hace que el desarrollo urbano que pudiese tener el municipio, a mediano y largo plazo, deba realizarse con sumo cuidado y con una planeación que tome en cuenta las zonas con un grado de amenaza a PRM más alto. Más de la mitad de los poblados del municipio, incluyendo la cabecera municipal y San Pablito, la segunda localidad más poblada del municipio, están asentados sobre los depósitos de antiguos deslizamientos; esto último, no tiene porque representar necesariamente una condición de riesgo, sin embargo el hecho se suma a otra serie de características ambientales que hacen suponer que un evento de magnitud considerable podría ocurrir en el municipio. Por lo tanto, estas condiciones y las características sociales e históricas del municipio, lo hacen un escenario de estudio para el riesgo de desastre por PRM, por ello su elección para este trabajo.

El relieve del municipio está conformado por depresiones y elevaciones con un intervalo de altitud que varía entre los 450 y los 1500 msnm. Dentro de su relieve, destacan el cerro de Ahila, en el que en la ladera Noreste se localiza la cabecera municipal, Pahuatlán del Valle (ver figura ii). El municipio está dividido en dos grandes vertientes por el río San Marcos, tributario del río Cazonos que desemboca en el Golfo de México. El clima es templado con lluvias casi todo el año (2500 mm/año) lo que permite el desarrollo de bosque de lluvia o mesófilo de montaña, aunque la mayor parte del mismo se encuentra perturbado o ha sido deforestado.

El municipio tiene una superficie de 80 km² y cuenta, de acuerdo al último Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI, con 20 618 habitantes distribuidos en 34 localidades (INEGI, 2011). La principal actividad económica es la agricultura. Entre los productos más importantes que se cultivan están el maíz, frijol, chile verde y tomate verde, todos cultivos de temporal. Anteriormente uno de los cultivos más importantes era la caña de azúcar, pero en los últimos años este producto ha perdido fuerza en el municipio y, el café ha permanecido como uno de los cultivos más comunes (cultivado en la zona desde el siglo XIX) y recurridos a pesar de la crisis de precios de este producto a nivel mundial y del bajo precio en que lo compran los intermediarios a los productores.

La ganadería en el municipio es principalmente de autoconsumo, aunque en el último censo registró una modesta producción de carne de ovino, gallina, leche, huevo y principalmente miel. Además, algunos productos agrícolas y ganaderos son utilizados para la fabricación de licores, prendas de vestir y artesanías a pequeña escala (INEGI, 2011). En este sentido, el papel amate elaborado en San Pablito en talleres familiares ha atraído la atención de antropólogos, etnólogos y toda una serie de científicos sociales, además de coleccionistas y turistas. Es este elemento uno de los pilares que podrían ayudar a impulsar la actividad turística que se pretende lograr al nombrar a la cabecera municipal como “Pueblo Mágico” en 2012. La situación económica en el municipio no es la mejor, todas las localidades que lo componen tienen índices de marginación de medio hasta muy alto (ver tabla i) (CONAPO, 2006). Las actividades terciarias no alcanzan para satisfacer las necesidades de empleo de la población, se tienen tres tianguis y un mercado en el municipio, algunos negocios, restaurantes, tiendas de abarrotes y dos hoteles. Por lo anterior, la población busca emigrar, y aunque muchos de los pobladores tienen familiares trabajando en Tulancingo, Puebla o la Ciudad de México, no son pocos los que tienen algún conocido o familiar que ha emigrado a Estados Unidos; esto último, principalmente en las comunidades indígenas de San Pablito, Xolotla y Atla.

Figura ii. Mapa base topográfico del municipio de Pahuatlán y delimitación de la zona de estudio.



Poblaciones

- Menos de 100 habitantes.....Agua del Carrizo
- De 101 a500 habitantes.....Cuauqueutla de la Paz
- De 501 a1000 habitantes.....Acalapa
- De 1001 a 2500 habitantes.....Atlá
- Más de 2500 habitantes.....**Pahuatlán**

Vías terrestres

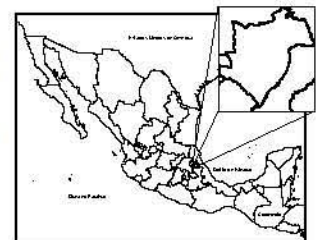
- Carretera asfaltada.....
- Terracería.....

Líneas de conducción

- Eléctrica.....
- Límites
- Municipal.....
- Rasgo culturales
- Áreas urbanas.....
- Casa aislada.....

Representación del relieve

- Curva de nivel acotada en metros.....
- Curva de nivel cada 100 m.....
- Rasgos hidrográficos
- Río permanente.....
- Áreas simbolizadas
- Bosque.....
- Área de estudio.....



Cerca del 50% de la población del municipio es indígena (INEGI, 2011). Los poblados al Este, Atla y Xolotla, se caracterizan por ser de población nahua; en cambio, los poblados al Suroeste, San Pablito y Xochimilco, son de población otomí. En el resto de los poblados, incluida la cabecera municipal, predomina la población mestiza. Esta composición étnica de la población ha generado diferencias en el grado de desarrollo de las comunidades en Pahuatlán. La discriminación de la población indígena por parte del gobierno, de los pobladores y de los prestadores de servicios tiene como base algunos prejuicios muy arraigados. Por ejemplo, la gente mestiza considera que los otomís son muy belicosos y nunca se puede llegar a acuerdos con ellos, en cambio piensan que los nahuas son más “tranquilos” y que con ellos si se puede negociar. Generalizaciones como la anterior, han hecho que la separación entre los tres grupos de personas sean bastante marcadas. A estas fronteras se suman los conflictos electorales o religiosos, pues en las comunidades indígenas se tiene una postura política distinta a la de las comunidades mestizas. En el capítulo dedicado a la vulnerabilidad se analiza esta situación más a fondo.

Delimitación de la zona de estudio

Uno de los aspectos más importantes que deben ser aclarados en esta investigación es que no se ha realizado el inventario de PRM en todo el territorio del municipio aunque las herramientas de percepción remota así lo hubiesen permitido, debido a que no se contaba con el tiempo suficiente.

La elaboración del inventario llevó al menos tres meses y los posteriores procesos de la estimación de la susceptibilidad, vulnerabilidad y riesgo llevaron más de seis meses. Por ello y si se toma en cuenta que para obtener el grado de maestría se tiene dos años solamente, se decidió seleccionar solamente un área de 54 km². Para delimitar ese polígono se decidió utilizar las líneas de parteaguas y los cauces de los ríos, una delimitación hidrológica en todo caso. Se procuró que el polígono incluyera los dos poblados más grandes del municipio: Pahuatlán del Valle y San Pablito. Se debe mencionar que lamentablemente no se pudo analizar el área de Cuenautla de la Paz, zona del municipio que presentó varios PRM en 1999. Queda como meta a futuro completar el estudio para todo el municipio.

Geología de Pahuatlán

La geología de un lugar está directamente relacionada con la ocurrencia de PRM por ello en este apartado se da una rápida visión de cómo es la geología de la zona de estudio. La mayor parte de la información presentada en este texto proviene del Servicio Geológico Mexicano.

La zona de estudio pertenece a la región fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, y colinda hacia el Sur-Oriente con el Eje Volcánico Transmexicano. La Sierra Madre Oriental está compuesta por depósitos marinos que datan del Mesozoico, específicamente en la zona de Pahuatlán los depósitos que afloran abarcan desde el Jurásico Inferior hasta el Cretácico Superior. La unidad más antigua en la zona de estudio es la Formación Huayacocotla, una secuencia arrítmica de arenisca y lutita. La sobreyacen, diferentes unidades constituidas por limonitas, conglomerados, areniscas, caliza y lutita calcárea con una fuerte esquistosidad. Estas formaciones son, en orden cronológico: la Formación Cahuas, arenisca y limonita del Jurásico Medio; Formación Tepéxic,

Tabla i. Índice de Marginación 2005 en el municipio de Pahuatlán por localidad. (Fuente: CONAPO, 2006.)

Localidad	Población total (2010)	IM 2005	GM 2005
Ciudad de Pahuatlán de Valle	3523	-0.799385	Medio
Acalapa	623	0.006026	Alto
Ahila	257	0.144281	Alto
Ahuacatitla	211	0.439587	Alto
Los Ángeles	265	0.367989	Alto
Atla	2172	0.008919	Alto
Atlantongo	906	0.239329	Alto
Cuauneutla de la Paz	713	-0.231826	Alto
Mamiquetla	359	0.268083	Alto
Montellano	279	0.38686	Alto
Naranjastitla	122	-0.526997	Alto
Paciotla	572	0.182422	Alto
San Pablito	3178	0.057343	Alto
Tlalacruz de Libres	893	0.03832	Alto
Xilepa	183	-0.52382	Alto
Xolotla	2770	0.165943	Alto
Zacapehuaya	163	0.114914	Alto
Zoyatla de Guerrero	999	-0.17662	Alto
Xochimilco	805	0.484256	Alto
Lindavista	163	0.401642	Alto
Acahuales (El Aguacate)	225	0.063673	Alto
Agua del Carrizo	22	0.936093	Muy alto
Agua Negra	126	0.386693	Alto
Almoleya	151	-0.056001	Alto
El Arenal	154	0.332799	Alto
Ayotitla	56	0.019071	Alto
Chipotla	146	0.086707	Alto
La Loma	65	-0.249746	Alto
El Paraíso	42	-0.527349	Alto
Agua del Machete	292	0.536267	Alto
Tlacuilolco	38	-0.653499	Alto
Xopanapa	38	0.376355	Alto
Cruz Santa	79	1.779874	Muy alto
San Pablito	28	0.201151	Alto

calizas del Jurásico Medio; Formación Tamán, caliza arcillosa intercalada con lutita, del Jurásico Superior; Formación Pimienta, caliza negra con intercalaciones de lutita del Jurásico superior; Formación Tamaulipas, caliza y lutita del Cretácico Inferior. Por otra parte, en algunas porciones de la zona de estudio, al Sur-Este y al Norte, sobreyacen diferentes paquetes masivos de un complejo volcánico en forma de basalto, andesita y depósitos de piroclásticos compuestos

por tobas pumicíticas pseudoestratificadas del Plioceno (Sánchez Rojas, *et al.*, 2004). Finalmente, hacia el centro de la zona de estudio se localizan las unidades más recientes conformada por depósitos cuaternarios producto de la denudación de las rocas preexistentes; también, asociados a los principales ríos, hay depósitos aluviales conformados por bolos y gravas.

Estructuralmente destacan en la zona el Anticlinorio de Huayacocotla, macroestructura con eje NNW-SSE conformado con rocas de la formación Huayacocotla, y el sinclinal San Pablo conformado por rocas más recientes. Respecto a las discontinuidades, la falla inversa Xolotla, al Sur-Centro de la zona de estudio, superpone rocas de la formación Huayacocotla a las de unidades más recientes. La falla normal de nombre Paciotla, al Norte-Centro de la zona de estudio, representa una reactivación de la falla inversa Xolotla poniendo en contacto las mismas rocas que esa estructura (Sánchez Rojas, *et al.*, 2004). Todas las rocas en esta área han sido alteradas por variados procesos geotectónicos, conformando un relieve mucho más fracturado (Oliva Aguilar, *et al.*, 2010). Especialmente, el metamorfismo que ha sufrido la lutita ha hecho de este tipo de litología un paquete débil, incrementando la susceptibilidad a la ocurrencia de PRM.

Breve historia del municipio

Los antecedentes más antiguos de población en la región de la Sierra Norte de Puebla datan desde el segundo milenio antes de nuestra era (Arizpe 1989). Se trataba de nómadas que sobrevivían de la caza y la recolección. Durante la época prehispánica la región fue conocida como parte del Totonacapan, ligado al señorío de Zempoala (Reyes, 2005). Los totonacas fueron anteriores a los chichimeca e incluso a los olmecas, algunos les atribuyen el haber sido los primeros en construir en lo que hoy es Teotihuacán. Posteriormente, la región tuvo conflictos geopolíticos y militares con los distintos grupos que durante algún tiempo tuvieron la supremacía en la región del México central: chichimecas, huastecos, otomíes, toltecas y finalmente con los nahuas mexicas. Entre los siglos XIII y XIV la región fue conquistada por el reino de Xaltocan, capital de los otomíes, replegando a los totonaca y su lengua fuera de la zona de lo que hoy es Pahuatlán. El primer contacto que tuvo la región con el pueblo mexica se debió a una masiva migración de nahuas a causa de una invasión chichimeca en el siglo XV y posteriormente otra gran migración debido a la gran hambruna de 1454 en Tenochtitlán (Masferrer, *et al.*, 1995). El pueblo totonaca decayó por las constantes guerras contra los chichimecas, los otomíes y los mexicas, finalmente, el territorio fue conquistado por Nezahualcóyotl, rey de Texcoco, y fue obligado a pagar tributo. Hay registros de un hecho relacionado con la ocurrencia de procesos de remoción en masa (PRM) en Pahuatlán en tiempos prehispánicos. Hacia el siglo XIII un líder guerrero chichimeca, de nombre Xolotl, conquistó casi toda la Sierra Norte de Puebla con ayuda de sus aliados, los otomíes, cerca del año 1120. Fundó el pueblo de Xolotla en lo que actualmente es el municipio de Pahuatlán (Meade, 1942; García Martínez, 1987), hasta ahí los hechos históricos. El mito cuenta que este gran rey fundó un gran centro ceremonial y un palacio en la ladera que hoy ocupa el pueblo de Xolotla, pero un terremoto ocasionó que el cerro “se viniera abajo” y sepultara el palacio y la comunidad que se había asentado a su alrededor. Los sobrevivientes volvieron a reconstruir el pueblo, pero más arriba de la ubicación original. Es importante notar como los PRM están ligados desde hace mucho tiempo a la población del lugar y ocupan un lugar relevante en su cultura. Por otro lado, queda abierta una posibilidad para futuros estudios arqueológicos y hay un hecho que podría apoyar la leyenda: El actual poblado de Xolotla está construido sobre los depósitos de un antiguo y muy grande deslizamiento.

Con la llegada de los españoles, éstos fundaron el poblado de Pahuatlán. El primer español que llegó a la zona fue Fray Alonso de Borja, cura agustino, a finales de la década de 1530 (García Martínez, 1987). El edificio más antiguo de Pahuatlán es la iglesia de la cabecera municipal y data al menos desde el año de 1555, año en que aparecen registros de una ampliación aprobada por las autoridades eclesiásticas de aquel entonces (Vargas Serna, 2012). El poblado era ya para entonces cabecera doctrinal. Los curas que fundaron el poblado eligieron también la zona de depósito de un antiguo deslizamiento cercana al escarpe principal. Durante los primeros años de la conquista el territorio de Pahuatlán perteneció al menos a dos encomenderos (Agustín de la Torre y Don Luis Villanueva) que aplicaron el sistema de encomiendas que permitía la esclavitud de los indios. Luego de la abolición de las encomiendas, en 1593, la cabecera doctrinal pasa a ser el poblado de Naupan, lo que derivará en los años siguientes en disputas por el territorio entre los pahuatecos y los habitantes de Naupan, especialmente por las tierras en las cuales se encuentran los poblados de Atlaltongo y Mamiquetla. El conflicto se resolvió hasta 1804 en que Pahuatlán y Naupan quedaron como dos territorios separados. Es también en el periodo colonial en que comienzan a arribar los primeros pobladores mestizos a la región; además, para principios del siglo XVII la población española era de al menos 400 individuos (García Martínez, 1987). Posteriormente, en la guerra por la Independencia, los indígenas del territorio toman parte, su movimiento comenzó en 1813 y duró cuatro años en los cuales obtuvieron importantes victorias y varias veces se apoderaron de Tulancingo y de Pachuca (Cruz, 1938). Años después, en la guerra de Reforma, el territorio tomó parte por los liberales y sus logros en esta guerra el gobierno liberal otorgó el título de Villa a Pahuatlán.

Durante la Invasión Francesa de 1862, varios pobladores del municipio lucharon contra las tropas francesas en la famosa batalla de Puebla del Cinco de Mayo, se convirtieron en héroes y hubo una serie de batallas en contra de los franceses, austriacos y mexicanos conservadores, muy cerca del municipio en las que las fuerzas del ejército liberal de Pahuatlán derrotaron a los imperialistas el 28 de enero de 1865 (Granados Chapa, 1984). La primera fotografía de Pahuatlán data de esos tiempos, del año 1869 (figura iii), en ella se observan las precarias condiciones del poblado y el tipo de construcciones que lo constituían. La mayoría de estas construcciones son de una sola planta y están hechas a base materiales locales y en el modo tradicional. Poco después de esa primera toma fotográfica, fue construido el primer camino que comunicó a Pahuatlán con el centro del país, fue llamado camino Mancera ya que su trazo y planeación se le debió al famoso ingeniero mexicano Gabriel Mancera; por ese camino llegaron a Pahuatlán los primeros automóviles (Vargas Serna, 2012). Ese camino actualmente está en desuso pero aún se puede ver su trazo, y ya desde entonces, las crónicas revelaban que continuamente era obstruido por la ocurrencia de PRM. Se adjudica al mismo ingeniero, la traza y construcción del primer cuadro del poblado de Pahuatlán, con su plaza, su kiosco y su jardín.

En 1905 se terminó la construcción del ferrocarril de Honey, poblado cercano a Pahuatlán por lo que los tiempos para poder viajar a Pachuca, Tulancingo o la propia ciudad de México se acortan a tan sólo un día. El servicio de correos se hizo más eficiente, tanto, que se podían conseguir en Pahuatlán los periódicos de la Ciudad de México el mismo día en que eran publicados. Esto, aunado a la neutralidad del poblado durante la Revolución Mexicana (1910-1917) propició un crecimiento económico y comercial en Pahuatlán, o al menos en su cabecera (Vargas Serna, 2012). Pahuatlán se convirtió así en un punto estratégico importante para los productos que provenían de la llanura costera del golfo en Veracruz o de las inmediaciones del río Cazones. Era

Figura iii. Pahuatlán en 1869. (Fuente: del archivo de Raúl López).



un poblado que tenía una escuela primaria funcionando desde 1888, otro símbolo importante de estatus y desarrollo en aquel entonces. Además, gracias a su cercanía con la presa hidroeléctrica Necaxa, Pahuatlán pudo contar desde 1917 con energía eléctrica, una característica poco común para los poblados de aquel entonces. Con la energía eléctrica, llegaron también el telégrafo, el cine y la radio. Esto generó una gran afluencia no sólo de mercancías sino también de personas que se quedaron a vivir en Pahuatlán y que abrieron nuevos negocios en la cabecera municipal (Vargas Serna, 2012). Para principios de 1940, cuando fue construida la carretera asfaltada México-Tuxpan, Pahuatlán era uno de los poblados más importantes de la región, no así los otros poblados del municipio en los cuales la luz eléctrica llegó hasta los años 70 del siglo XX. En San Pablito, Xolotla y Atla, las condiciones de vida seguían siendo muy precarias en comparación con lo que sucedía en la cabecera municipal. Para entonces, Atla y Xolotla se caracterizaban por ser poblados nahuas, y San Pablito por ser un poblado otomí. A finales del siglo XIX, el antropólogo y etnólogo, Frederick Starr, arribó a San Pablito y observó que en este poblado aún se elaboraba papel como antes de los tiempos de la Conquista. Sus estudios fueron la base para que nuevos antropólogos, nacionales y extranjeros, visitaran el poblado. Otro hecho importante para todos estos poblados fue la implementación del programa Bracero que permitía a los mexicanos trabajar legalmente durante una temporada en Estados Unidos de América, no fueron pocos los hombres del municipio que tomaron esa oportunidad. Luego de que el programa terminó al final de la Segunda Guerra Mundial, la emigración a Estados Unidos de América continuó ilegalmente y se arraigó ya no sólo como necesidad económica sino como elemento cultural convirtiéndose en un aspecto que perdura hoy en día y que tiene relación con la vulnerabilidad de la población en estos poblados.

El evento de desastre que más recuerdan los pobladores es el de 1955, ocasionado por el paso del huracán Janet. En este evento, lo que posiblemente fue un flujo de lodo, sepultó la parte Norte del centro del poblado. Los habitantes recuerdan que pasaron hambre y penurias mientras se normalizó la situación, también que recibieron ayuda de los pueblos nahuas y otomíes. Además, se informó de otro gran movimiento de ladera que ocurrió no muy lejos del pueblo, en una parte que en aquel entonces estaba deshabitada, pero que hoy en día alberga varias casas y dos escuelas. Al parecer se trató de un movimiento complejo que se originó en la parte alta en donde se localiza el poblado de Ahila y que movilizó rocas tan grandes como una casa.

En la segunda mitad del siglo XX se da un crecimiento de población en todos los asentamientos del municipio. Se construye la carretera asfaltada hasta la cabecera del municipio lo que permite el establecimiento de corridas de autobús diarias hasta el Distrito Federal. El café poco a poco se convierte en el principal cultivo del municipio desbancando al cacahuete y la caña. Paulatinamente, los poblados indígenas comienzan un proceso de aculturación no proveniente de la Ciudad de México, mas si de sus familiares que emigraron a Estados Unidos de América y que han regresado, sincretizando las fiestas y ceremonias indígenas. La forma en cómo son construidas las viviendas cambia de forma radical en estos tiempos: el adobe, la madera y los techos de palma o teja se sustituyen por el cemento, las rocas y la mampostería, lo que permite casas más grandes, de dos o hasta tres niveles, que a su vez incrementan el peso sobre el inestable sustrato de Pahuatlán. Es hasta la década de los 80 que son abiertos los caminos de Pahuatlán del Valle hacia San Pablito y hacia Atla y Xolotla.

En 1999, la Región de la Sierra Norte de Puebla es afectada por una serie de lluvias extraordinarias que ocasionaron numerosos daños y pérdidas en la región. Según afirman los propios pobladores, en esa ocasión el daño no fue grande en la cabecera municipal, pero si en las otras comunidades, especialmente las indígenas. En Cueunautla de la Paz es en donde se registraron los mayores PRM y daños, varios pobladores fueron evacuados y posteriormente reubicados. Actualmente las nuevas casas de los reubicados aún están habitadas y los depósitos de los PRM que ocasionaron los daños en aquella ocasión son prácticamente imperceptibles debido a la densa vegetación que ha crecido en ellos. Aunque los pobladores señalan que en la cabecera no hubo grandes daños, es de notar que en aquel año se reactivó un deslizamiento cercano al centro del pueblo (según algunas fotografías y testimonios de los pobladores el deslizamiento apareció antes de 1955, en 1947), en aquel entonces los daños que causó no parecían de consideración, pero en el futuro la inestabilidad de esa ladera representaría un problema para la población y gobiernos de Pahuatlán, el movimiento sería conocido más tarde como el deslizamiento de la calle 5 de mayo.

En 2005, las lluvias generadas por el huracán Stan ocasionaron nuevamente fuertes lluvias en la Sierra Norte de Puebla. Dos años después, se incrementó el problema del deslizamiento de la calle Cinco de Mayo (figura iv). El deslizamiento comenzó a intensificar su movimiento ladera abajo y pronto afectó a las casas de la calle Cinco de Mayo destruyendo dos o tres de estas y afectando a una decena más; lo que más causó desanimo en la población fue que el deslizamiento destruyó la clínica de salud del poblado. El deslizamiento de la calle Cinco de Mayo es un movimiento lento con algunos episodios en los que incrementa su actividad, por ello no se registraron pérdidas humanas pues siempre hubo el tiempo para poder evacuar. En 2007, otro movimiento de ladera muy cercano al de la calle Cinco de Mayo, hizo que la escuela primaria

Figura iv. Vista del deslizamiento de la calle Cinco de Mayo. (Foto tomada por Matilde Cruz).



Leandro Valle fuera evacuada y finalmente abandonada. Este problema ha causado mucha molestia entre la población de Pahuatlán, pues ni las autoridades federales, estatales y municipales se han encargado de construir un nuevo plantel escolar. Pero también ha generado molestia en contra no sólo de estas autoridades sino también del personal de Protección Civil, que han sido vistos negativamente por parte de la población pues “ellos sólo vienen y clausuran pero no resuelven nada”. El problema se hizo más grande cuando en 2010 nuevamente Protección Civil declaró otra zona de riesgo por PRM en el lugar donde se localizaba la nueva clínica de salud del municipio. Los movimientos de ladera que afectaron a la escuela primaria y a la clínica del municipio son movimientos lentos también por lo que las construcciones tanto de la escuela como de la clínica tienen tan sólo algunas cuarteaduras, esto da la impresión a la población de que el problema se ha exagerado. Esta tesis no tiene como objetivo un monitoreo geotécnico de estas laderas, que según se tiene registrado lo realiza Protección Civil, pero es un hecho que la situación del riesgo de desastre por PRM ha sido mal gestionado por los distintos tomadores de decisiones y niveles de gobierno. Si esto no se resuelve, la cultura de la prevención de desastres entre la población del municipio podría verse seriamente afectada.

En el año 2012 Pahuatlán fue nombrado “Pueblo Mágico”, un programa desarrollado por la Secretaría de Turismo para fomentar la actividad económica en varios poblados del país. De acuerdo a la Secretaría de Turismo un Pueblo Mágico es aquel que:

“...es una localidad que tiene atributos simbólicos, leyendas, historia, hechos trascendentes, cotidianidad, en fin MAGIA que emana en cada una de sus manifestaciones socio - culturales, y que significan hoy día una gran oportunidad para el aprovechamiento turístico”, (http://www.sectur.gob.mx/wb2/sectur/sect_Pueblos_Magicos).

El programa da incentivos económicos por parte del gobierno federal para la reparación y re-mozamiento de la infraestructura y equipamiento del lugar, de este modo se pavimentan calles, se construyen tuberías, se arreglan jardines, etc., todo para favorecer la actividad turística. El cambio más significativo que se hace es sin duda la reinstalación de todo el cableado eléctrico y de comunicaciones en el subsuelo. Es de esperar que si el proyecto avanza, Pahuatlán incrementará su afluencia de visitantes en los próximos años; tiene los atractivos naturales y culturales necesarios para ello, pero le hace falta mucha infraestructura turística. Esto podría generar la creación de nuevos comercios, hoteles (ya se construye un nuevo hotel con más de tres niveles) y más viviendas de gente que llegará al poblado atraídos por la dinámica económica. Dicho desarrollo podría tener serios problemas si no se planea adecuadamente y, especialmente, si no se toma en cuenta el riesgo de desastre por PRM.

Estructura capitular de la tesis

La tesis se compone al menos de dos partes fundamentales: la determinación de la amenaza y el análisis de vulnerabilidad y riesgo. En el primer capítulo de la tesis se analiza el marco teórico-metodológico de manera detallada. En el segundo capítulo se describe cómo se obtuvo, un inventario multi-temporal de PRM para la zona de estudio, y se revisan los recursos principales que para su elaboración se utilizaron, es decir, los pares estereoscópicos de imágenes de satélite de muy alta resolución. En el capítulo 3 se describe el grado de susceptibilidad por PRM y su obtención por medio de modelos estadísticos de probabilidad. Posteriormente, en el capítulo cuatro se calculan la magnitud y frecuencia de los PRM en la zona y se combinan con la susceptibilidad para obtener un grado de amenaza. La segunda parte de la tesis se dedica a la vulnerabilidad, por ello, en el capítulo 4 se describe la forma en cómo se obtuvo un índice de vulnerabilidad para la población y para la infraestructura con base en la visión de Turner *et al.*, 2003. Finalmente, en las conclusiones se hace un esbozo general del cálculo de riesgo, o al menos, un acercamiento a éste pues como se explica en esa parte de la tesis, queda pendiente mejorar los datos y procedimientos para la estimación del riesgo por PRM en la zona.

Capítulo 1. Marco teórico, histórico y metodológico de la estimación de riesgo por procesos de remoción en masa

1.1 Breve historia de los desastres

Antes de las sociedades industriales

Conceptos como riesgo, vulnerabilidad o amenaza son relativamente recientes y obedecen a un momento histórico específico, pero el término desastre ha tenido una presencia constante en el imaginario de las distintas culturas durante la historia de la humanidad. En este capítulo se revisan de forma muy breve los paradigmas y visiones desde los que se han observado a los desastres para comprender y establecer las bases del marco teórico que rige este trabajo.

El concepto de desastre es complejo y no siempre tiene el mismo significado. Cardona (1993) menciona que los efectos de los desastres varían ampliamente en términos espaciales, temporales y de volumen, razón por la cual su definición es relativa y depende de la valoración social que se le asigne. Las distintas definiciones de desastre se centran fundamentalmente en sus efectos y las consecuencias negativas que traen consigo estos eventos (Wilches-Chaux, 1993). Analizando la historia se pueden esbozar los paradigmas que se han ocupado de los desastres. Los seres humanos han estado expuestos a fenómenos naturales del ambiente como sequías, plagas, terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas y hambrunas entre muchos otros que han tenido consecuencias negativas y a veces tan graves como la desaparición de civilizaciones enteras. Un fenómeno natural se define como toda manifestación del medio natural, una expresión de éste como resultado de su funcionamiento interno; algunos son previsible, otros no (Wilches-Chaux, 1993). En la antigüedad los fenómenos naturales que ocasionaban desastres eran explicados comúnmente como la “ira de los dioses” desencadenada por alguna acción incorrecta de la sociedad. Esta idea tuvo varios matices a lo largo del tiempo y de una civilización a otra; incluso, entre la filosofía estoica griega se recurría a fuerzas desconocidas y superiores para explicar estos sucesos. De manera general se partía de un universo modelo y en orden, una naturaleza digna de ser imitada por su perfección. Tal perfección era explicada muchas veces como emanada de un ser o seres superiores que además controlaban el destino. Muchas veces, a estos dioses se les asignaban distintos humores y sentimientos humanos, por lo tanto se les podía ofender. Al haber un destino trazado o una fuerza de voluntad superior, los desastres se concebían como inevitables. Aunque parezca poco probable, esta concepción de los desastres no ha desaparecido del todo, y no se limita solo a comunidades aisladas o fuera de la cultura occidental, tampoco está restringida a la gente común sin acceso a instrucción escolar. Como menciona Salvano Briseño (2011), hoy en día, hay gobiernos enteros que se apegan a preceptos religiosos o autoridades religiosas que cada que ocurre un desastre, como el tsunami en Japón del 2011, advierten sobre apocalipsis o castigos por una supuesta desviación de los fieles a las leyes religiosas.

Tampoco se puede considerar superficialmente que este punto de vista sea en su totalidad negativo en todas sus facetas; por ejemplo, en algunos pueblos originarios de América o África (incluso en la cultura oriental actualmente), la ocurrencia de desastres era vista como parte de un ciclo, aquí se incluía la idea de la renovación, de aprovechar la destrucción como punto de partida para un nuevo comienzo. Este tipo de cosmovisiones crearon un efectivo sistema de prevención de desastres basado en la experiencia y en la comunicación de ideas prácticas a través de leyendas, historias, dichos y refranes. En su mayoría, estos sistemas de conocimientos ancestrales hoy en día se encuentran fragmentados por múltiples razones, entre las cuales destacan la aculturación, la explotación, la esclavitud y en general el proceso de conquista y exterminio al que varios de esos pueblos han sido sometidos durante varios siglos. Sin embargo, aún hay vestigios de estos conocimientos en varias localidades de México y otros países de Latinoamérica en donde las leyendas y la información han sobrevivido (Wilches-Chaux, 1998). La visión de perfección del universo, ya fuera cíclica o estática, en varias de las cosmovisiones del mundo antiguo no significaba una total falta de adaptación al ambiente; al contrario, en gran parte de las sociedades preindustriales existe un proceso evolutivo de mecanismos de adaptación para mitigar los riesgos a los que cada comunidad estaba expuesta (Maskrey, 1993). Parece haber una contradicción en lo anterior pero lo cierto es que, si bien varias de estas culturas se consideraban a expensas de sus dioses, no se exponían abiertamente al desastre ni mucho menos.

La forma en cómo se concebía al ambiente durante la etapa del cristianismo es una variante de lo que se ha dicho anteriormente; aunque con una marcada carga de fatalidad. De acuerdo a la cosmovisión judeo-cristiana este mundo es en sí mismo un sufrimiento, por lo tanto, nuevamente hay una naturaleza a la que hay temer y la ira de Dios desencadena desastres. De esta forma, la caída de las murallas de Jericó, la destrucción de Sodoma y Gomorra o el Diluvio Universal tienen una gran carga de castigo. Esta visión permeó durante muchos siglos en el imaginario colectivo y solo sería derribada por la ciencia positivista del siglo XVIII. Pero esto sólo ocurrió en parte, aún hoy en día se escuchan afirmaciones, incluso de autoridades eclesiásticas, con respecto a los desastres como castigos de Dios por las faltas morales de la población mundial. Una concepción similar a la anterior, es que los desastres ocurren meramente por la mala fortuna. Esta visión también implica una imposibilidad de evitar los desastres. La calamidad se considera mala suerte y por tanto su ocurrencia es aleatoria. También se trata de una idea que no ha desaparecido del todo. Es importante mencionar que este tipo de concepciones, como menciona Maskrey (1993), son convenientes para los grupos que están en el poder pues los exenta de responsabilidad antes, durante y después del desastre; luego de ocurrido el desastre les permite reconstruir la estructura social que los sostiene en el poder (Maskrey, 1993).

Como explica Lavell (1993) la conceptualización del desastre depende y a la vez influye en la organización del pensamiento dominante en un cierto momento y lugar, y esto implica también la manera en que se investigan y se enfrentan. Esto último se observa en la forma en cómo la sociedad industrial occidental o capitalista ha conceptualizado y enfrentado los desastres, organizando el espacio geográfico de una manera muy específica.

Los desastres en la sociedad industrial.

En los últimos doscientos años la sociedad experimentó una de las grandes revoluciones económicas: la Revolución Industrial. De acuerdo a Childe (1986) ha habido cuatro revoluciones económicas: la revolución paleolítica, cuando los seres humanos aparecimos como tales

y poblamos el mundo; la revolución agrícola, la revolución urbana y la revolución industrial (tabla 1.1). Los cambios económicos y tecnológicos producidos en estas etapas de la humanidad reaccionan sobre la concepción que el ser humano tiene sobre el medio natural y definen el desenvolvimiento de la ciencia. El medio natural se mediatiza y se percibe a través de las ideas culturales (Redman, 1990). Con la llegada de la Revolución Industrial y su sistema de producción capitalista, la percepción de los desastres comenzó a cambiar. Los avances científicos de la edad del Renacimiento y posteriores, fueron haciendo a un lado la explicación divina de los fenómenos naturales y comenzaron a darse explicaciones racionales. El modelo de universo perfecto, imitable y divino fue cuestionado luego de los descubrimientos astronómicos de Galileo y Copérnico. Esta visión fue sustituida por la de un universo en caos, una naturaleza conflictiva. A ese nuevo universo había que ponerle leyes y descubrir su funcionamiento, y para eso surgió la ciencia. Hay dos obras claves en este momento: *El discurso del Método de Descartes* (1637) que puso las bases de la filosofía moderna anteponiendo la duda y la búsqueda de la verdad, y que además esboza que el ser humano se convertirá en algo similar a un amo y señor de la naturaleza para servirse de ella; y *La crítica de la razón pura de Kant* (1781) que marca la pauta de lo que será la nueva ciencia que tendrá en el método experimental su mejor herramienta. Con esta nueva concepción aparecen nuevas ideas como: todo en la naturaleza tiene una causa y un efecto, es el principio de causalidad por el cuál es posible entender el origen de todas las cosas. En el centro de todo ya no está la divinidad ni el cosmos perfecto, ahora se coloca al ser humano en ese lugar. En este nuevo orden, el ser humano saltó en la escala moral de ser un subordinado más a un ser superior con la libertad de aprovechar los recursos naturales.

Tabla 1.1. Revoluciones económicas. (Fuente: elaborado con base en datos de Redman, 1990).

Periodo	Revolución	Algunas características
600 000 a.C. – 15 000 a.C.	Paleolítica	Aparición de homínidos intelectuales. Dominio del fuego. Se pobló el mundo.
15 000 a.C. – 7 000 a.C.	Agrícola	Domesticación de plantas y animales. Sedentarismo. Surge la religión institucionalizada. Primera alteración irreversible de ecosistemas.
7 000 a.C. – 1500 d.C.	Urbana	Primeras ciudades. Aparición de la rueda, la escritura, los códigos morales, la guerra y la conquista. Estratificación social. Producción artesanal.
1500 d.C. al presente	Industrial	Producción en masa. Explosión demográfica. Desigualdad económica. Deterioro ambiental. Desarrollo tecnológico.

En 1775 un terremoto y tsunami arrasó con Lisboa en Portugal, murieron miles de personas y varios filósofos, incluyendo a Kant, se cuestionaron el porqué de los desastres de origen natural, se llegó a la conclusión de que la naturaleza ya no solamente no era perfecta ni un modelo a seguir, era amenazante, había que oponérsele y combatirla para alcanzar cualquier tipo de bien (Ferry, 2011). Esta nueva percepción es radical al momento de explicar los desastres ya que por primera vez aparecen como sucesos evitables. El periodo dónde esta visión tiene su clímax es el siglo XIX, en pleno auge de la Revolución Industrial, ya que se incentivó el entusiasmo en la técnica, el progreso y la verdad científica que sustituían a las explicaciones mágico-religiosas.

Comenzaron a estudiarse los fenómenos naturales, realizando mediciones, tratando de entender su mecanismo y la forma en cómo causan daño. Se empezaron a entender las causas, los periodos de recurrencia y la magnitud de algunos fenómenos naturales.

A la par de este auge de la ciencia y la técnica, ocurre otro cambio de igual importancia en el pensamiento: la religión durante el siglo XIX seguía teniendo una influencia notable en todos los actos del ser humano pero la aparición de la religión protestante es el suceso que marcó en los siglos posteriores la forma en que cierta porción del mundo observó el ambiente y por ende los desastres naturales. Esta bifurcación del cristianismo tradicional tuvo importante auge en la Europa del Norte y en Inglaterra, por inercia llegó a Las Trece Colonias, hoy Estados Unidos de América. Existen muchas formas de analizar estos cambios religiosos pero interesa particularmente una idea de la religión protestante, la que dicta que: Dios puso a la naturaleza al servicio del ser humano. Esta idea no existía en el cristianismo y tiene relación con el llamado “Destino manifiesto” del pueblo de Estados Unidos de América, forjado y aplicado a rajatabla durante los siglos XIX y XX: el protestante siente un derecho y una obligación hacia los recursos naturales y considera que la tierra debe trabajarse porque para eso fue dada por Dios. Esto coloca al ambiente natural como una fuente infinita de recursos mientras que las amenazas deben ser algo que debe eliminarse. Hay que recordar que en Inglaterra, país protestante, se inició la Revolución Industrial, y ahí se puede apreciar la nula preocupación por la sustentabilidad de los recursos naturales; además, se creía que el ambiente tenía la suficiente capacidad para asimilar todo tipo y volumen de contaminación. La ciencia no se ve exenta de esta concepción y de hecho es la principal herramienta del progreso en aquellos tiempos para dominar a la naturaleza. Durante un tiempo el entusiasmo se mantuvo, pero pronto hubo detractores.

La visión de desastres en el posmodernismo

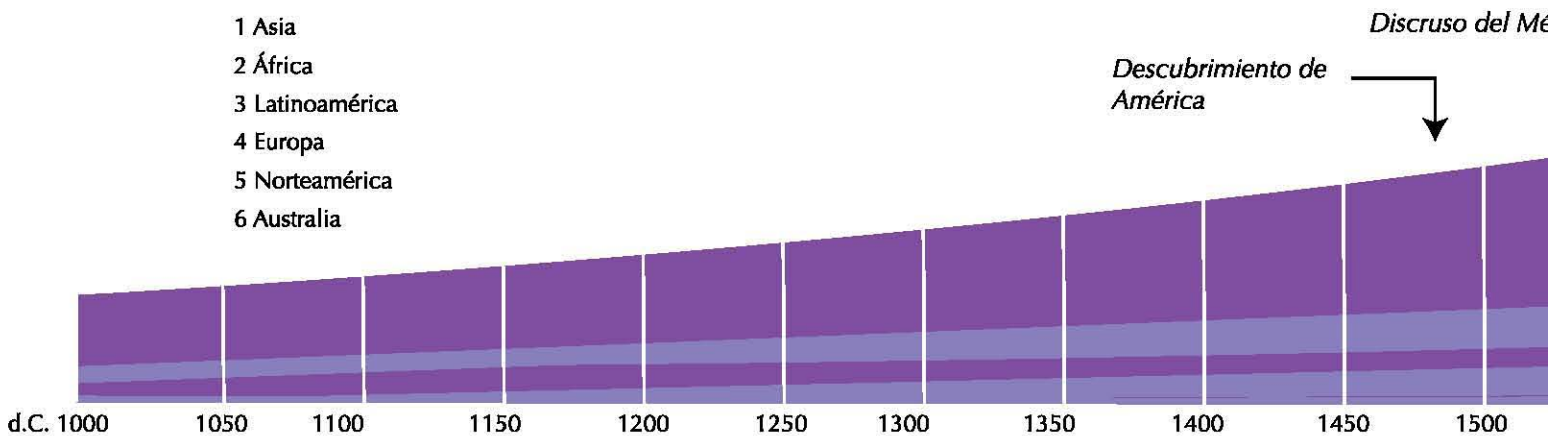
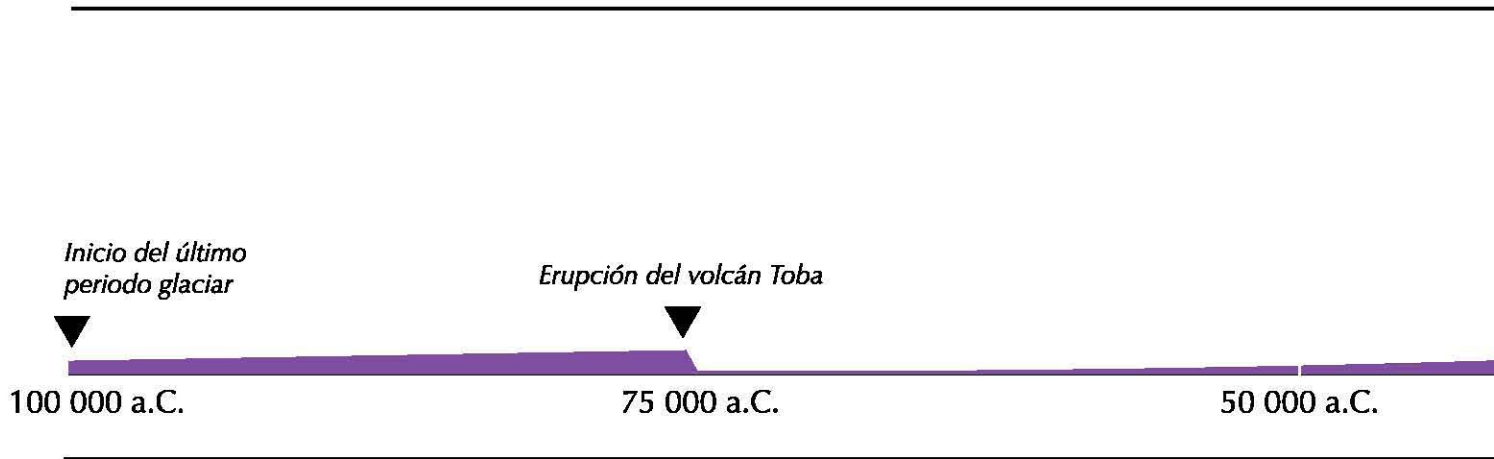
El positivismo, con su progreso y su técnica, pronto encontró detractores. La filosofía posmodernista del siglo XIX representada por Nietzsche, Hegel y Marx, entre otros, cuestionó muchos de los supuestos y valores enaltecidos (ídolos les llamaba Nietzsche) del positivismo. Esta confrontación derivó en varias ramas de pensamiento que en lugar de derribar, cómo era el objetivo de Nietzsche, la base del humanismo, enriquecieron los puntos de vista sobre las distintas problemáticas sociales. Específicamente, el marxismo jugó un importante papel en la decodificación de los desastres, pero todo esto sucedió hasta mediados del siglo XX. Otro punto importante relacionado con los desastres fue la aparición de *El origen de las Especies* de Charles Darwin en 1859. Es una obra que abrió de nueva cuenta el debate sobre el lugar del ser humano en el ambiente y su relación con este. El concepto de la selección natural, que en un principio fue propuesto por Jean-Baptiste Lamarck, fue acompañado de otro descubrimiento importante: la edad de millones de años de la Tierra. Esto dio a Charles Lyell, padre de la geología moderna, la base para proponer que en el planeta se repiten los mismos procesos una y otra vez; a su vez, esto dio a Darwin el sustento para poder plantear la Teoría de la Evolución que requería de una concepción distinta del tiempo mucho más amplia que la propuesta por la Biblia para poder ser posible. Al final, Darwin establecía que a pesar de su inteligencia, del dominio de la técnica y su capacidad afectiva, todo ser humano cargaba con su modesto origen que lo colocaba como un elemento más del medio natural. Las ideas de Darwin fueron malinterpretadas en más de una ocasión, utilizadas como justificación de abusos, pero también fue el punto de partida de varias disciplinas: entre ellas la ecología.

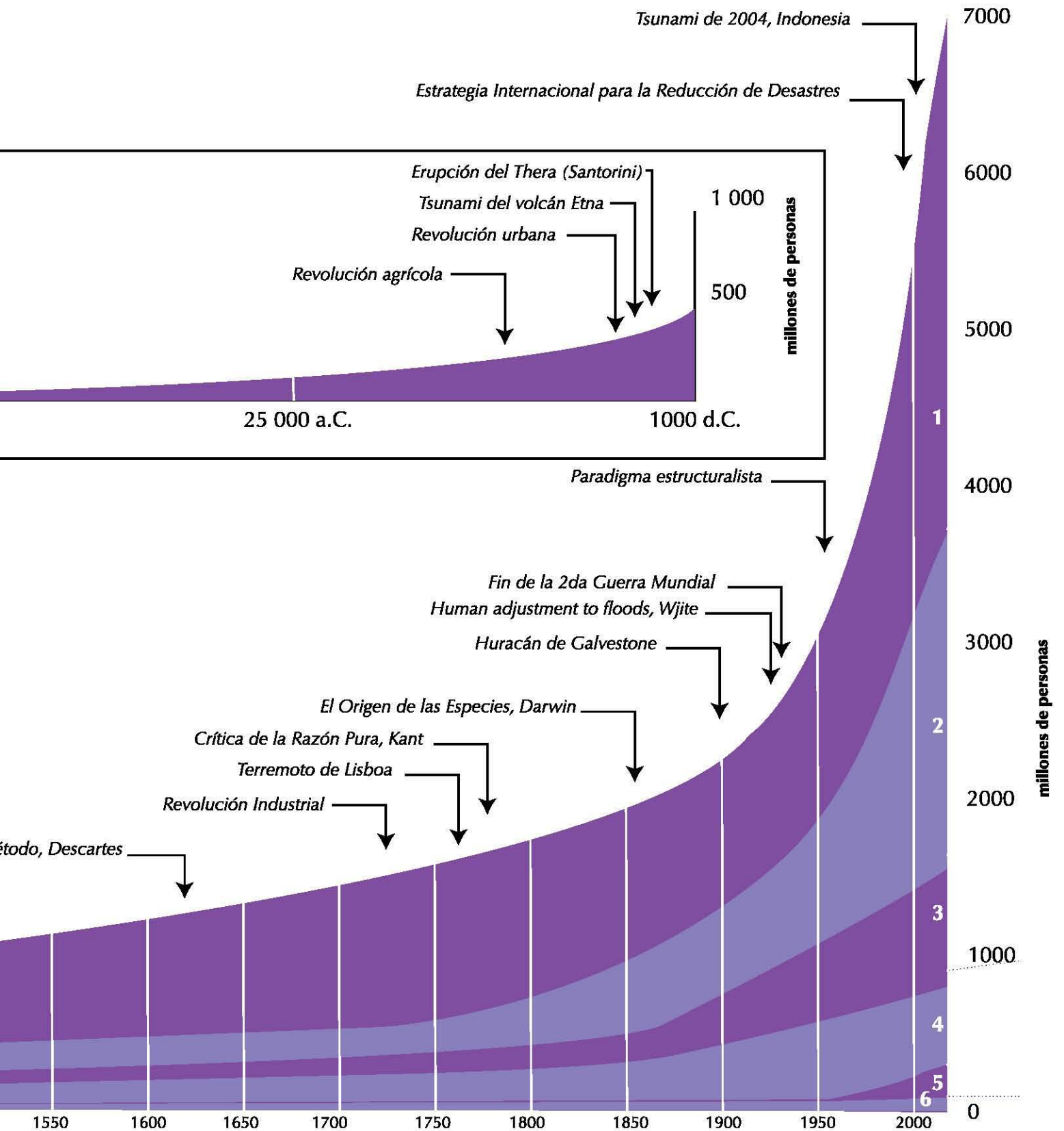
Durante la confrontación de la edad moderna con el posmodernismo, sucedieron eventos como el paso del huracán de Galvestone en 1900, la erupción del Monte Pelee en Martinica en 1901, el terremoto de San Francisco de 1906, la gran inundación del Río Amarillo de 1931 y de 1936 (<http://www.emdat.be/database>, 2012) que tuvieron repercusiones positivas en cuanto a la aplicación de la ciencia y la ingeniería para mitigar futuros eventos como estos. Se construyeron rompeolas, diques, se crearon sistemas de alarma y se procuró que las nuevas construcciones fueran más resistentes a los peligros. Fueron estos los primeros antecedentes del intento del ser humano por controlar la fuerza de los peligros naturales, tendencia que se incrementaría luego de la Segunda Guerra Mundial. Las dos Guerras Mundiales frenaron el entusiasmo en la técnica y la tecnología: la naturaleza se había vuelto caótica y amenazante, y la tecnología también podía serlo. Casi a la par del crecimiento industrial mundial aparecen de forma mucho más significativa lo que se llama amenazas de origen antrópico, asociadas a fallas humanas y a la tecnología, pero también a la crueldad y negligencia humana. También aparecen los primeros intentos de lograr la predicción de la ocurrencia de las amenazas, cuestión que se intensificó en el siguiente periodo, en donde ya hubo todo un mosaico de corrientes de pensamiento. Muchas de estas corrientes de pensamiento como la Ecología Humana, desarrollada por la Escuela de Chicago en la década de los 20 del siglo pasado fueron la base para nuevas formas de abordar los desastres. También surgieron cuestionadores directos de la ciencia: La filosofía analítica de principios del siglo XX y hasta principios de los 60, representada por Habermas, Karl Poper y John Rawls criticó la fe ciega que se tenía en el método experimental (Ferry, 2007). Muchos de los fundamentos de la filosofía analítica, como el énfasis en el concepto de la falsación, serían rescatados por las ciencias sociales, disciplinas en ese entonces totalmente desinteresadas de los desastres. Por su parte, la geografía, a pesar de estar enfrascada en una búsqueda de identidad y de objeto de estudio, también hacía aportaciones: algunos geógrafos como Joerg W.L.G., que en 1912 realizaban análisis del funcionamiento físico, distribución y mitigación de los sismos, trabajaban en el análisis de las amenazas. Una publicación clave que fue adelantada a su tiempo: *Human adjustment to floods* (1945) de Gilbert White, geógrafo de la escuela de Chicago, incluyó un concepto revolucionario en el estudio de las amenazas: propuso analizar la dimensión social de los desastres por inundaciones (Burrell, *et al.*, 2011).

El desarrollo y el paradigma estructuralista

Luego de la Segunda Guerra Mundial los gobiernos y organizaciones del mundo colocaron en escena un término bastante polémico hasta nuestros días: el desarrollo. Fue la respuesta ante el fracaso del progreso. De acuerdo a la forma en que el concepto de desarrollo se ha entendido, se han guiado las políticas económicas y sociales en la mayor parte del mundo. De hecho, el mundo se dividió en países desarrollados y no desarrollados (más tarde “en desarrollo”). Múltiples teorías al respecto fueron elaboradas, desde el desarrollo lineal de Rostow hasta el Sistema de Sustitución de Importaciones de la CEPAL. La Organización de las Naciones Unidas también nació en este periodo y desde entonces se volvió la organización impulsora del desarrollo en el mundo. Desde las distintas teorías del desarrollo los desastres representan un freno, cuando no un destructor del desarrollo de un país o una región. Por ello era necesario e indispensable evitar los desastres. Irónicamente, y debido a que equivocadamente se entendía al desarrollo como un simple crecimiento económico, las acciones tomadas en su nombre hicieron más vulnerable a la población del mundo, una población que crecía exponencialmente (figura 1.1) en número en las regiones más pobres concentrándose cada vez más en centros urbanos.

Figura 1.1 Crecimiento de la población mundial en los últimos 100 000 años y algunos de los desastres históricos más importantes.



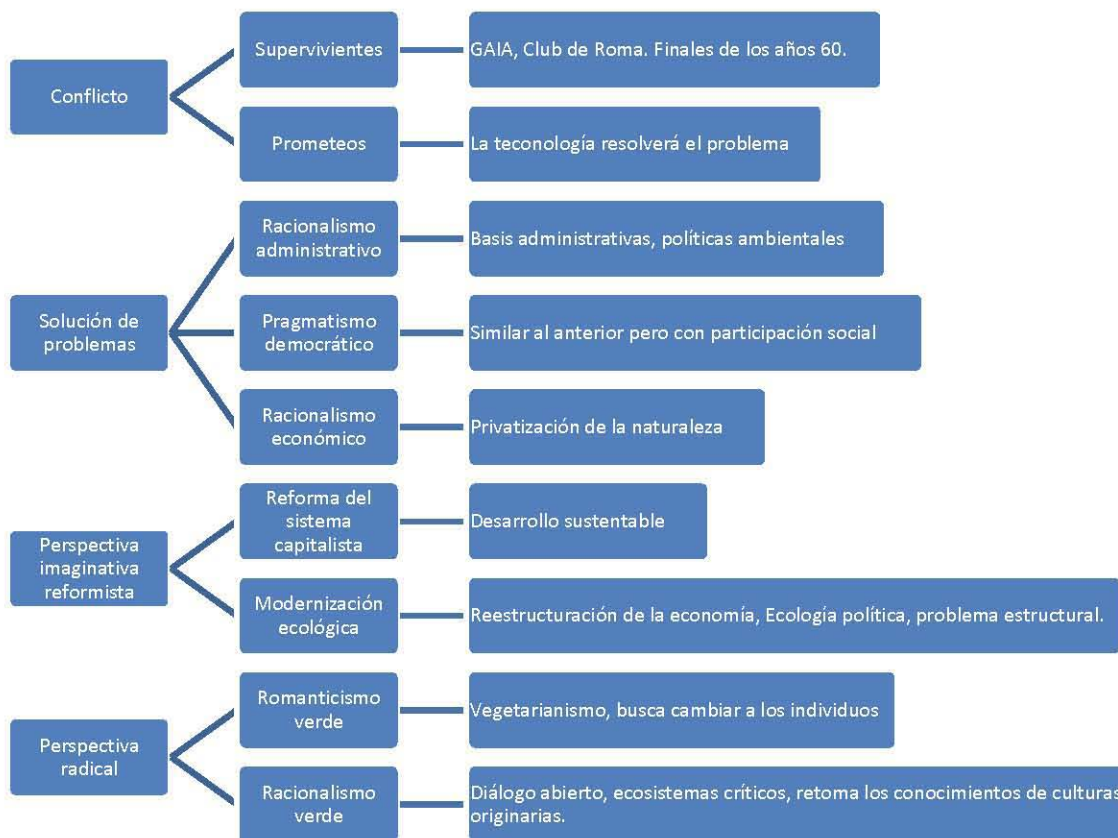


Antes de la Segunda Guerra Mundial ya había una diferencia marcada entre pobres y ricos. Para 1945 había una serie de países industrializados que, como decía Rostow (1991), hacía tiempo habían despegado, y un conjunto de países que apenas comenzaban, si es que habían comenzado pues algunos apenas nacían como naciones, como es el caso de gran parte de los países de África. Estas diferencias ya revelaban un mundo donde gran parte de la población era vulnerable a los desastres de origen natural. Quizás el primer tipo de desastre atendido de manera masiva fueron las epidemias, los avances médicos de fines del siglo XIX y hasta antes de la Segunda Guerra habían logrado crear vacunas para algunas de las mortíferas enfermedades mundiales como la viruela, la poliomielitis o el sarampión. Estas vacunas, que también venían acompañadas de otros avances en la higiene y sanidad, no llegaban a todos los lugares pero a donde llegaron elevaron la esperanza de vida de la población, incluso de la población más pobre. La esperanza de vida se incrementó pero no disminuyó la alta tasa de natalidad que se justificaba por la alta tasa de mortalidad que había antes; en consecuencia, la población del mundo aumentó y ésta comenzó a establecerse en lugares inseguros, compuestos básicamente de cinturones de miseria alrededor de las grandes ciudades. Para la década de los 70 había cada vez más gente viviendo en lugares de riesgo, sin embargo, esto último no explicaba del todo el aumento de los desastres y sus consecuencias.

Numerosos especialistas que trabajaban en las regiones de desastre comenzaron a darse cuenta de que para mitigar los desastres hacía falta algo más que simplemente técnica. Es en los 60 que hubo un cuestionamiento intenso al pensamiento político tradicional, a la pobreza, al deterioro ambiental, a la bipolaridad del mundo, a la energía nuclear y a la guerra. Este ambiente de oposición al orden establecido generó nuevas discusiones y abrió debates que antes no se tenían contemplados. Por ejemplo, en 1972 en Estocolmo, Suecia, se llevó a cabo la primera Conferencia Mundial sobre el Medio Ambiente (<http://www.unep.org>, 2012), un hecho sin precedentes ya que hasta entonces la cuestión ambiental había estado fuera de la agenda internacional. Pocos años antes, un grupo de empresarios promovió un informe de varios académicos que en su conjunto fueron conocidos como el Club de Roma. Aquel informe, de título: Los límites del Crecimiento, llamó la atención y puso un límite al crecimiento económico basado en hechos científicos. Por primera vez el crecimiento económico era cuestionado en una de sus premisas fundamentales: el crecimiento ilimitado. El ambientalismo había nacido, la figura 1.2 muestra las diferentes perspectivas que sobre el ambiente aparecieron en los últimos cuarenta años.

El auge del ambientalismo es importante porque coincide con el momento en que los desastres por peligros naturales se intensificaron. El tratamiento que se les daba a los peligros era meramente técnico e ingenieril y casi exclusivamente atendido por las ciencias naturales de manera cuantitativa. Ni siquiera las medidas de atención durante la emergencia eran tratadas con el debido cuidado. Las distintas corrientes ambientalistas que colocaban al ser humano como parte del ambiente y no como un ente aislado fueron una influencia clave, esta visión tuvo una base teórica muy sólida pues se apoyó en la Teoría General de los Sistemas, creada a partir de los años 50 y difundida ampliamente en la siguiente década. Esta teoría enmarca la complejidad del medio en una serie de sistemas y subsistemas que dependen y se alteran uno al otro, el universo es un sistema infinito de relaciones que determinan las condiciones de existencia de todos los elementos y del sistema en su totalidad. Algunos especialistas de las ciencias naturales comenzaron a ya no predecir los peligros o tratar de controlarlos, sino a tratar de aplicar el concepto de adaptación del ser humano a ellos. Otros autores fueron más allá, Ian Davis(1981), Fred Cuny

Figura 1.2. Perspectivas ambientales, el paradigma estructuralista coincide con la perspectiva imaginativa reformista. Fuente: Dryzek, 2000.



(1983); Hewitt (1983), Andrew Maskrey (1989), Alexander (1993), Terry Canon, Keith Smith, Piers Blaikie (1994) y otros, afirmaron que los desastres naturales no son naturales sino sociales. Advertían que era demasiada casualidad que los peores desastres tuvieran sede en países del entonces llamado tercer mundo. Varios de estos autores habían vivido estos desastres de primera mano mientras se encontraban trabajando para las Naciones Unidas, por lo tanto se habían dado cuenta de cómo las condiciones sociales incrementaban el efecto de los desastres hasta situaciones indignantes. A esta nueva visión, que se le llamó en un principio alternativa, hoy se le conoce como estructuralismo porque integra a la cuestión del estudio de los riesgos la dimensión social, económica, política y cultural. Esto significó tomar en cuenta el contexto donde la población vive su día a día. De esta forma, variables como la clase social, el nivel de ingreso, la educación, la ocupación, la casta, la etnicidad, la salud, la edad y el estatus de migración fueron integradas al análisis de los riesgos (Hufshmidt y Glade, 2010).

El estructuralismo tiene un sesgo marxista y basa muchas de sus interpretaciones en observaciones empíricas. Quizás el esquema más representativo de esta corriente sea el expuesto por Blaikie Piers, et. al. (1994) en su modelo de presión y liberación (fig. 1.3). Los desastres ocurren, según el modelo, por la convergencia entre las llamadas causas de fondo, las condiciones inseguras de la población y un peligro. Las causas de fondo se refieren a las condiciones que hay en la sociedad como producto del sistema económico mundial, es decir, la desigual distribución de la riqueza, la pobreza y las diversas formas culturales con que los pueblos viven en el mundo.

Otra causa de fondo es la historia del país o la región que sufre un desastre porque de ello depende su habilidad y sus posibilidades para enfrentarlo adecuadamente. De manera intermedia, hay procesos y actividades que agudizan los efectos de las causas de fondo haciendo vulnerable a la población. Por ejemplo, la falta de inversión por parte del gobierno en planes y programas para prevenir desastres. Esto lleva a una serie de condiciones de inseguridad para la población, como malos caminos y asentamientos en zonas de riesgo. Todo ello, en su conjunto, define si una población está preparada para enfrentar un desastre, esto es, su vulnerabilidad. Por el otro lado se presentan los peligros y la amenaza. Cuando una población vulnerable se encuentra ante un peligro, se considera que está en riesgo, si el riesgo se concreta, se habla de la ocurrencia de un desastre. De esta forma, el sistema económico limita el acceso a los recursos para gran parte de la población, lo cual la hace vulnerable. En aquel entonces (y aún hoy en día) los países pobres debían grandes cantidades de dinero al Banco Mundial y otros organismos financieros internacionales, esa deuda era una nueva forma de opresión que mantenía a los gobiernos de esos países pagando intereses por la “ayuda” que habían recibido, dicho sistema dependía de que los países endeudados pudieran pagar, esto se aseguraba haciendo que los países aumentaran sus exportaciones de materias primas hacia el mundo rico, a precios muy reducidos y en cantidades de volumen que dañaban el medio natural de los países deudores. Como menciona Porto Gonçalves, el nuevo colonialismo: la colonialidad (Gonçalves, 2006).

Figura 1.3. Esquema de presión y liberación. Fuente: Blaikie Piers, et. al. 1994.



Es simplista decir que sólo los pobres sufren en los desastres, la situación es más compleja. Los países ricos no están exentos de sufrir por desastres de origen natural, sin embargo, estos tienen una población menos vulnerable (aunque la historia se repetía, el sector más pobre de estos países era el que más sufría a causa de estos eventos). Además, estos países poseen la estructura económica para recuperarse, los países endeudados no pueden recuperarse y debido a los efectos del último desastre la población se hace cada vez más vulnerable. Un país rico puede perder una cantidad considerablemente mayor de capital durante un desastre que un país pobre, la diferencia estribaba en que el país rico apenas pierde una parte de sus recursos totales; por el contrario, el país pobre puede perderlo casi todo.

Además, también había toda una serie de aspectos que agravaban la vulnerabilidad de estos países pobres. Las crisis económicas de 1976 y 1986 eran resentidas en los países en desarrollo, que

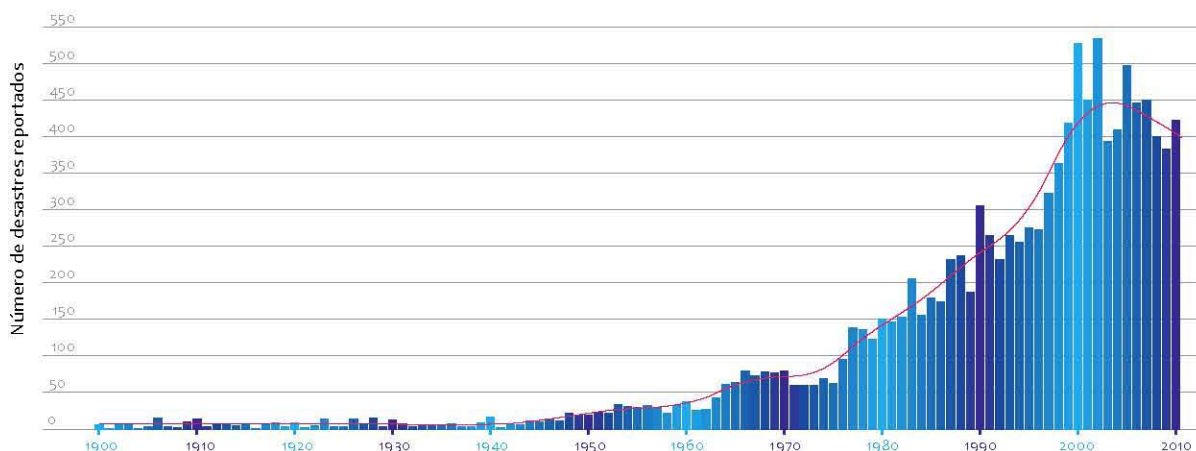
aumentaban su deuda externa a cifras imposibles de pagar. Ante este escenario económico, había sectores de inversión que quedaban al margen, por ejemplo: la educación. Durante la época del colonialismo se había fragmentado todo el conocimiento que tenían los pueblos originarios respecto a las amenazas naturales con las que convivían. Sus descendientes habían olvidado los aspectos básicos que sus ancestros habían aprendido por siglos en convivencia directa con el medio natural. Esto dejó a millones de personas sin el conocimiento de los riesgos a los que estaban expuestos, difícilmente una persona que no sabe qué hacer ante un evento de desastre podrá salvar la vida y dejará el asunto a la suerte o “a la buena de dios”. El factor educación es vital en una cultura de la prevención y como los países endeudados necesitan dinero para pagar a los acreedores (Banco Mundial y Fondo Monetario Internacional, principalmente), el gasto en educación sólo es solventando de forma superficial. La población no tiene de esta forma acceso al conocimiento que podría salvarle la vida.

La institucionalización del problema (1980 -2010)

El estructuralismo complementó a la visión fisicalista, también llamada tradicional, del estudio de los desastres. Sin embargo, su efecto tardó en permear del ámbito académico al ámbito institucional. En este sentido, los avances en las telecomunicaciones y en los procesadores computacionales abrieron un abanico de análisis nunca antes visto, en poco tiempo podían aplicarse técnicas estadísticas de correlación más complejas para el análisis de diversas variables. Además, las estadísticas básicas vitales de cada país estaban notablemente más disponibles y los vacíos en información iban llenándose con cada nuevo estudio. Se creó también el EM-DAT, una base de datos exclusiva de desastres y daños por estos eventos (Guha-Sapir, et. al. 2011). En revistas científicas comenzaron a publicarse estudios sobre riesgo, ya no sólo de amenaza. Nunca antes se había contado con tanta información, bases de datos más completas y mejores herramientas pero, contradictoriamente, es en este periodo (1980-2010) donde los desastres se multiplican cada vez más: Nevado de Ruiz en Colombia, Terremoto del 85 en México, Erupción del Pinatubo en Filipinas, huracán Gilberto en el Caribe en 1988, terremoto de Kobe en 1995, huracán Paulina en México en 1997, son sólo algunos ejemplos. Las cifras de pérdidas se habían incrementado, por ello la ONU decidió nombrar a la década de los noventa del siglo pasado como el Decenio Internacional para la Reducción de Desastres Naturales. En Yokohama, en 1994 se llevó a cabo la primera Conferencia Mundial para la Reducción de Desastres Naturales en donde se establecieron los lineamientos a seguir, participaron 138 países. Desde el principio hubo una recopilación frágil de recomendaciones para atender emergencias, nunca una estrategia de fondo. El resultado fue que irónicamente el número de desastres aumento más que nunca durante esa década (fig. 1.4).

El fracaso de la Década Internacional para la Reducción de Desastres llamó la atención sobre lo que se estaba haciendo mal. Era evidente que la atención de las emergencias no era prevención de desastres. Esto fue acompañado de un mayor auge de estudios sobre riesgo y la creación de instituciones públicas en cada país dedicadas a la atención de este problema (en México CENAPRED y Protección Civil). Cada vez más disciplinas se acercaron al estudio de los riesgos desde su particular punto de vista. En este sentido, la geografía tomó un papel preponderante y aplicó el análisis espacial al estudio de los riesgos, además se desarrolló la cartografía de peligros y amenazas y más tarde la de riesgos haciendo de los Sistemas de Información Geográfica y de la Percepción Remota herramientas valiosas para su estudio. Además, las técnicas geoespaciales

Figura 1.4. Desastres de origen natural reportados de 1900 a 2010.
(Fuente: The OFDA/CRED *International Disaster Database*).



demonstraron su valía a la hora de modelar y monitorear las amenazas (prácticamente en tiempo real con ayuda de los SIG) (Burrell, *et al.*, 2011).

La teoría de riesgo se hizo más sólida apoyándose en los conceptos de la teoría de sistemas, el desarrollo sustentable y la calidad de vida. En el año 2000 nació la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres cuyo eje conceptual era el desarrollo sustentable, esto fue un gran avance.

En la actualidad, la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, es donde la ONU plasma las recomendaciones a los gobiernos de los distintos países en materia de reducción de desastres, además de organizar anualmente campañas de educación en todo el mundo concierne a la prevención de desastres, sigue vigente. Su misión es:

“Catalizar, facilitar, movilizar los recursos y el compromiso a nivel nacional, regional e internacional de los actores del Sistema de la EIRD para construir resiliencia en las naciones y las comunidades ante los desastres a través de la implementación del Marco de Acción de Hyogo” (<http://www.eird.org/index-esp.html>).

El Marco de acción de Hyogo es un instrumento global de referencia para la reducción de riesgos. Fue adoptado por 168 países (incluido México) en la conferencia de 2005. Su principal objetivo es lograr una reducción de pérdidas por desastres para el año 2015. En estos eventos se denota un avance con respecto a la década anterior: cada vez se toma más en cuenta a la vulnerabilidad y la cultura de la prevención de desastres. Específicamente, estos son los tres grandes objetivos que se plantearon en Hyogo:

- La integración de la reducción de desastres y desarrollo sostenible en las políticas y la planificación.
- El fortalecimiento de instituciones y mecanismos para desarrollar la resiliencia a las amenazas.
- La incorporación sistemática de enfoques de reducción de riesgo en la implementación de

programas de preparativos en la emergencia, la respuesta y la recuperación después de los desastres.

Se buscaba ante todo que los gobiernos de los países se comprometieran realmente con la prevención de desastres. Sin embargo, lo ocurrido con el tsunami de 2004 en Banda Aceh en Indonesia demostró que a nivel general la sociedad no está preparada para los desastres y que otros aspectos, como el económico, siguen teniendo prioridad sobre la vida humana.

En relación con lo anterior está el cambio climático, es en esta década cuando se le tomó especial atención. La mediatización de este proceso ha llegado al punto de ser bastante discutible: los gobiernos y empresas encontraron en este proceso el culpable para continuar con su evasión de la culpa que tienen ante los desastres. Más allá de la polémica de si es el ser humano el causante o no, o si son los países ricos o los pobres los que tienen o no responsabilidad, la realidad es que está ocurriendo, pero no explica por sí solo el aumento significativo de los desastres a partir de la década de 1970 que es cuando comenzó el aumento más acelerado de la temperatura global del planeta. Un hecho relacionado es que han aparecido amenazas naturales donde antes no las había y han dejado de ocurrir otras en donde antes se daban (Sálvano Briseño, 2011). En el caso de esta tesis, los procesos de remoción en masa están relacionados con el cambio climático pues su ocurrencia está relacionada con otras amenazas de origen meteorológico que en teoría se ven intensificadas en su magnitud y frecuencia por el cambio climático.

Por otro lado, han aparecido otros sucesos que pueden influir en la aplicación del Marco de Hyogo: La crisis económica de 2007 volvió a sacudir el orden económico mundial y generó toda una serie de movimientos sociales cuyo alcance y significación todavía es temprano para evaluarse. Además, el terremoto de Haití en 2010 hizo hincapié en las enormes diferencias socioeconómicas y la vulnerabilidad que generan. Por su parte, eventos como el huracán Katrina en 2005 en Nueva Orleans, Estados Unidos de América o el tsunami de Japón de 2011 mostraron nuevas dimensiones del concepto de vulnerabilidad que antes no se habían tomado en cuenta. Un dato impresionante y anómalo es que en el año 2010 los desastres fueron más intensos que en todo el periodo de 2000 a 2009 (tsunami de 2004 incluido), desafiando las explicaciones que los especialistas podían dar a esto. Todos estos eventos dejan más preguntas que respuestas, una tarea apasionante pero a su vez apremiante queda para el futuro.

1.2 Marco teórico

Teoría de sistemas

La base fundamental de este trabajo es el paradigma estructuralista. Sin embargo, como toda generalidad, la visión estructuralista contiene a su vez una gran diversidad de variantes, todas adscritas a la idea general de: Los desastres no son naturales. Otro elemento importante es la Teoría General de Sistemas, que es el gran receptáculo que permitirá mantener una cohesión entre cada uno de los elementos de análisis de este trabajo.

Un sistema según Wilches-Chaux (1993) es un conjunto cuyos elementos se hallan en permanente interacción. La interacción es una pluralidad y variedad dinámica de vínculos activos

entre todos y cada uno de los elementos. Estas relaciones son a su vez parte del sistema y si una es alterada, todo el sistema se altera, por ello, los sistemas están en constante cambio, no son estructuras estáticas.

Cuando dos o más sistemas interactúan dan lugar a la aparición de nuevos sistemas cualitativamente superiores en el orden jerárquico. Los diferentes sistemas ecológicos o ecosistemas de nuestro planeta se integran dinámicamente en un sistema jerárquicamente superior y cualitativamente distinto, conocido como biosfera. El ser humano está incluido aquí (Wilches-Chaux, 1993).

Los cambios en las partes se traducen en cambios en el todo que a su vez generan cambios en las partes. Esto es importante porque permite entender el concepto de coevolución. Este concepto está relacionado obviamente con la evolución de la vida, pero incluye la concepción de que con los cambios que realiza la biosfera para adaptarse al ambiente físico éste también cambia, y ese cambio es el motor de nuevas adaptaciones de la biosfera. Ambas esferas, ambos sistemas, relacionados entre sí, coevolucionan. Todo esto permite entender en gran parte el lugar del ser humano en estos sistemas. A diferencia de las demás especies biológicas, el *homo sapiens*, recarga su capacidad adaptativa ya no en su adaptación biológica al medio sino en un elemento de reciente aparición: la cultura (Childe, 1986). En un principio las adaptaciones físicas de los primeros seres humanos: cambios lentos y graduales, como la pérdida del pelo o la motorización bípeda fueron determinantes en la supervivencia de la especie, sin embargo, poco a poco, el cerebro del *homo sapiens* fue creciendo, la comunicación fue más efectiva, los seres humanos comenzaron a trabajar en equipo, a fabricar herramientas y plantear estrategias. Se establecieron vínculos afectivos y relaciones con los otros grupos humanos, y en ese contexto hubo un intercambio de conocimiento. Todo ese conjunto de características que definen a un grupo humano es lo que se llama cultura y ésta poco a poco fue siendo más determinante en la supervivencia y adaptación del ser humano al ambiente. Por lo tanto, la coevolución del ser humano con el ambiente está más determinada por la cultura, situación que modificó el sistema general y lo hizo de manera mucho más rápida que la adaptación físico-biológica.

La aparición de estas nuevas relaciones genera un autoajuste en todo el sistema porque este es flexible. Por lo tanto, el sistema general absorbe mediante cambios grandes o pequeños en su estructura los nuevos cambios. Este autoajuste del sistema biosfera no siempre va en consonancia con lo que el ser humano plantea como su bienestar o el buen funcionamiento de su sistema, el sistema humano. Por eso, cuando se observan los desastres desde el paradigma tradicional, la naturaleza aparece como algo que hay que combatir y de lo que hay que cuidarse.

Finalmente, los desastres son cambios inidentificables en el tiempo y el espacio en los que el sistema humano o parte del sistema humano (una comunidad es un sistema humano) se ve afectado su funcionamiento normal. Cuando el sistema humano no es flexible y no puede absorber dichos cambios aparece la crisis, cuando la crisis acarrea daños aparece el desastre (Wilches-Chaux, 1994). Por sistema humano se entiende a las personas que lo conforman, pero también a los aspectos tangibles: sus edificaciones públicas y privadas, vías y medios de comunicación, servicios públicos, toda la infraestructura física; igualmente a los aspectos no tangibles como la forma de organización, las instituciones, la religión, el estado, las leyes, las tradiciones, el sistema económico, la ciencia, la historia y la cultura.

La visión de la Teoría de Sistemas permite reconocer que los desastres pueden evitarse si se encuentran las estrategias y cambios en la estructura del sistema humano para absorberlos. Desde esta óptica un mundo sin desastres es teóricamente posible. El reto está en la capacidad del sistema humano para afrontar el cambio, sobrevivir y a su vez conservar su identidad dentro del cambio (no confundir esto con la utopía de que “todo sea como antes”). Esto se logra eliminando los componentes que hacen que aparezca la crisis: rigidez en el sistema e incapacidad de coevolucionar (Wilches-Chaux, 1994).

El Desastre nace de la relación entre un peligro (o varios) y una condición de vulnerabilidad (Cuny, 1983). No se trata de una estimación del daño o un conteo del número de muertos (aunque algunas definiciones, incluso de instituciones oficiales, así lo manejan), se trata de una valoración y por lo tanto es relativa. La complejidad surge cuando se hace mención a los desastres locales, esos que no siempre son noticia en los medios de comunicación, o cuando se hace referencia a los desastres que están más diluidos en el tiempo como las sequías, las hambrunas; más controversial aún, cuando las crisis surgen de manera indirecta o directamente provocadas por el ser humano: la pobreza, las guerras. Por ello, no resulta éticamente aceptable colocar un número de muertos mínimo para que un cambio se considere un desastre.

Al hablar de desastre siempre hay un daño implícito y un impacto. En ese sentido el daño se define como el cálculo de la pérdida de: vidas, económicas, de infraestructura y equipamiento o del ambiente. El concepto de impacto es más amplio y abarca no sólo el daño sino las consecuencias positivas. Es difícil pensar que un desastre puede traer consigo aspectos positivos para una sociedad, pero sí es posible (Cardona, 1993).

Los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo

Amenaza.

El concepto de amenaza está directamente relacionado con los fenómenos naturales (y algunos aspectos sociales) y con otro término que comúnmente se utiliza como sinónimo: el peligro. Hay fenómenos naturales o aspectos sociales que por su magnitud, recurrencia o lo inesperado de su ocurrencia pueden causar daños al sistema humano, este tipo de fenómenos naturales son lo que se denomina un peligro. Cuando la ocurrencia de un peligro pasa de la mera posibilidad a una probabilidad muy concreta entonces surge el concepto de amenaza (Wilches-Chaux, 1998). Entonces como el concepto de amenaza y el de peligro son distintos, la amenaza implica una probabilidad de ocurrencia y el peligro está más enfocado al fenómeno natural y sus características; así mismo, su expresión cartográfica también es distinta. Ésta es una distinción bastante reciente y aún no aceptada o adoptada por todos los especialistas.

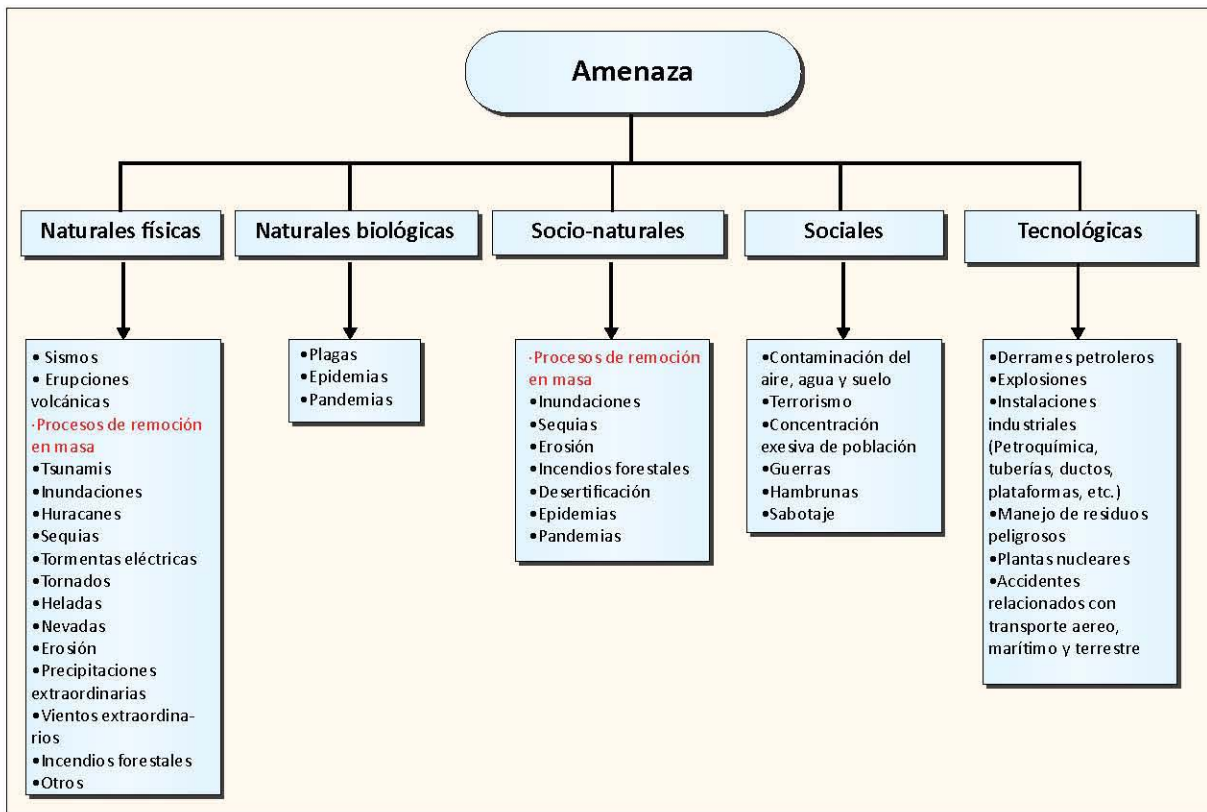
Un concepto relacionado a lo anterior es el de susceptibilidad, concepto que tiene diferentes matices dependiendo de la amenaza a la que esté relacionado. En el caso de los procesos de remoción en masa, la susceptibilidad es el grado inherente de inestabilidad de una ladera asociada a todos aquellos factores que puedan desencadenar un movimiento de ladera en la misma (Crozier y Glade, 2004). Desde un punto de vista cuantitativo, la susceptibilidad es el grado de probabilidad de que una unidad de área presente o no en el futuro un proceso de remoción en masa. La susceptibilidad responde a la pregunta de dónde podemos esperar futuros procesos de ladera (Guzzetti, 1999).

Hay distintos tipos de amenaza, los procesos de remoción en masa son una de ellas y pertenecen a un tipo de amenaza geológica pero su ocurrencia está relacionada con otras amenazas o fenómenos naturales tales como lluvias extraordinarias o los sismos (figura 1.5). Estos fenómenos son llamados factores detonantes y por si mismos pueden representar una amenaza como es el caso de los huracanes. Los factores detonantes de los procesos de remoción en masa pueden ser terremotos, huracanes u otros fenómenos atmosféricos relacionados con una alta pluviosidad, explosiones ocasionadas por el ser humano o la desestabilización de una ladera por la construcción de una carretera o camino. Estos factores son tomados en cuenta para estimar la susceptibilidad.

Además, la ocurrencia de los procesos de remoción en masa también está relacionada en ocasiones con procesos sociales tales como la deforestación, estos procesos se engloban en los llamados factores preliminares (Crozier y Glade, 2004). Los factores preeliminarios también se toman en cuenta para estimar la susceptibilidad.

En el siguiente esquema (figura 1.5) se muestra una clasificación de amenazas propuesta por la autora y Guadalupe Hernández basada en lo recomendado por Wilches-Chaux (1998).

Figura 1.5. Clasificación de amenazas.



En el esquema de la figura 1.5 los procesos de remoción en masa están en dos sitios distintos de la clasificación, ya que pueden tener un origen completamente natural o ser la combinación entre procesos naturales y antrópicos. Esto es así porque las amenazas socionaturales se expresan a través de fenómenos que parecen ser producto de la dinámica de la naturaleza, pero que en su ocurrencia o agudización de sus efectos interviene la acción humana (Wilches-Chaux, 1998).

Por consenso se consideran los términos de –proceso de remoción en masa, procesos de ladera, procesos gravitacionales y movimientos de ladera- correctos para referirse al fenómeno al que se hace referencia (Alcántara, 2000). Ya en 1894, Penck, distinguía entre movimientos en masa y transporte en masa, identificando a la gravedad como el principal agente de remoción en masa (Hansen, 1984). Actualmente se considera a los procesos de remoción en masa como aquellos que involucran el movimiento hacia abajo de los materiales que forman los declives montañosos bajo la influencia de la gravedad y sin la asistencia primordial de un transporte fluido (Brundsen, 1979, en Alcántara, 2000).

En el Capítulo II de este trabajo se expondrán de forma detallada los tipos de procesos de remoción en masa, su clasificación y características particulares.

Vulnerabilidad

El concepto de vulnerabilidad es eminentemente social y se entiende como la probabilidad de sufrir daño y tener dificultad o incapacidad para recuperarse de ello (Maskrey, 1994). La vulnerabilidad ha sido abordada desde diferentes perspectivas, algunos autores distinguen diferentes niveles de daño. Varias razones explican esta heterogeneidad, en primer lugar no existe una metodología uniforme y muchos valores se dan por sentados, además, muchos estudios se basan en observaciones empíricas. En segundo lugar, es un concepto que depende de la escala y por lo tanto es dinámico ya que cambia a lo largo del tiempo. Por esta multidimensionalidad y diferencialidad, la vulnerabilidad es complicada de representarla cuantitativamente (Crozier, *et al.*, 2004).

El concepto de vulnerabilidad no puede limitarse a las fragilidades sociales, también incluye edad, el género, el grado de urbanización, los aspectos económicos como el ingreso, la capacidad de compra, o los aspectos culturales como la cosmovisión y la cultura de prevención de desastres que se tenga (Birkman, 2006). Es un concepto que hace referencia a todo aquello que le impide a un determinado sistema humano adaptarse a un cambio en su ambiente. Quizás el modelo que más cuenta da de las distintas caras de la vulnerabilidad sea el propuesto por Wilches-Chaux (1998) que propone la vulnerabilidad global que a su vez está conformada de varios tipos de vulnerabilidades que no están aisladas entre sí.

- Vulnerabilidad natural. Todos los seres humanos son vulnerables en algún grado a sufrir daño por algún peligro, no existe en el planeta un lugar completamente seguro exento de la ocurrencia de amenazas de algún tipo. Esta vulnerabilidad por tanto no se puede eliminar.
- Vulnerabilidad física. Se refiere a la localización de un sistema humano en el contexto espacial en el que podría ocurrir una amenaza. Además se incluyen también el tipo de construcciones, infraestructura y equipamiento con las que se cuenta o no se cuenta.
- Vulnerabilidad económica. Es el eje más significativo de la vulnerabilidad. Se expresa en desempleo, insuficiencia de ingresos, inestabilidad laboral, acceso a servicios y educación, recreación y salud, además de inexistencia de control local sobre los medios de producción. Esto último a escala nacional se llama dependencia económica.

- Vulnerabilidad social. Nivel de cohesión interna que posee una comunidad. Aquí también se incluyen los aspectos de salud de la población así como la igualdad de género.
- Vulnerabilidad política. Nivel de autonomía que posee una comunidad para la toma de decisiones que la afectan.
- Vulnerabilidad técnica. Dominio de técnicas constructivas que permiten edificar viviendas o estructuras que garanticen la debida seguridad a sus habitantes.
- Vulnerabilidad ideológica. La cosmovisión, filosofía o creencias religiosas que determinan la forma de ver al ambiente y el lugar de los seres humanos dentro de éste.
- Vulnerabilidad cultural. Se refiere a las características particulares de la “personalidad” de un pueblo a partir de las cuales se edifica el modelo de la sociedad. Aquí entra una cuestión bastante polémica: los medios de comunicación. Los medios de comunicación representan un negocio, se rigen por las leyes del mercado y su objetivo primario no es el de informar sino el de lograr la mayor audiencia que permita ofrecer mejores condiciones a los patrocinadores. Para lograr esto último se valen de varias estrategias que van desde la publicidad clásica, el uso del color en el caso de los periódicos, imágenes sugestivas y de impacto que hagan que la gente voltee a ver el producto y encabezados llamativos y sugerentes que interesen a la audiencia. Pero, también hay medios de comunicación que también tienen una ética de trabajo y mantienen un nivel en sus reportajes y notas. Este tipo de medios tiene más cuidado al mostrar su información. El texto de las notas da las generalidades del evento pero rara vez analiza causas. Por todo lo anterior los medios de comunicación en algunas ocasiones incrementan la vulnerabilidad de la población haciendo parecer los desastres como inevitables, de mala suerte o muy lejanos.
- Vulnerabilidad educativa. Aquí se incluye el proceso de información con el que se busca reducir la vulnerabilidad. Lamentablemente, en muchas ocasiones, el sistema educativo fomenta lo contrario o no da las herramientas básicas. Existe un desprecio por el conocimiento local a favor de la técnica académica promovida por el Estado a pesar de que muchas veces estos instrumentos no corresponden a la realidad de las comunidades. En el caso específico de México, el tema de riesgos sólo se da a los alumnos en dos meses de nueve años que componen la educación básica.
- Vulnerabilidad ecológica. Ecosistemas altamente vulnerables incapaces de auto ajustarse internamente y altamente riesgosos para las comunidades que los aprovechan o habitan. Este tipo de vulnerabilidad también se relaciona con la interpretación de la función y posición en el planeta del ser humano, a nivel local y a nivel de la biosfera.
- Vulnerabilidad institucional. Obsolescencia y rigidez de las instituciones, especialmente las jurídicas.

Es probable que, luego de los desastres ocasionados por los sismos de Haití (2010), Chile (2010) y Japón (2011) la lista de factores de la vulnerabilidad aumente. Además de que los efectos sociales y económicos de los desastres cobran diferentes matices de acuerdo al momento histórico

Tabla 1.2. Modelos de vulnerabilidad. (Fuente: Birkman, 2006.).

Año y autor	Nombre del modelo
Bohle, 2001.	De la doble estructura de la vulnerabilidad
Department of International Development, 1999.	La verosimilitud sustentable
Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (ISDR por sus siglas en inglés), 2000.	Visión de la vulnerabilidad de la ISDR
Turner <i>et al.</i> , 2003	Cambio Global del Ambiente o simplemente el Esquema o Modelo de Turner
Universidad de las Naciones Unidas, 2005.	Esquema de las capas de cebolla
Blaikie Piers, <i>et al.</i> , 1994.	Esquema de Presión y liberación (ya explicado en páginas anteriores)
Birkman, Bogardi, Cardona, 2006.	Modelo BBC

en el que se presentan. También, se trata de elementos dinámicos, en constante cambio lo que hace que identificar y verificar las causas de la vulnerabilidad sea algo casi imposible (Birkman, 2006). Por esto y más, la complejidad del concepto de vulnerabilidad deja abierta una gran interrogante: ¿Cómo poder estimarla? ¿Cómo poder reducirla a un valor cuantitativo para poder manejarla en modelos matemáticos y así poder optimizar la planeación y la gestión del los diferentes espacios en riesgo?

Para responder a ese reto se han creado diferentes modelos, en la tabla 1.2 se exponen sólo algunos de ellos. En este trabajo, se optó por utilizar el modelo de vulnerabilidad propuesto por Turner *et al.*, ya que parte de la ecología humana y considera la existencia de una sinergia entre el sistema humano y su potencial a ser afectado en diversas escalas espacio-temporales (Morales, 2009). En el capítulo de esta tesis dedicado a la vulnerabilidad se explicará detalladamente el modelo.

El riesgo

El concepto de riesgo también es complejo y se confunde muchas veces con el de amenaza o peligro. El riesgo es la probabilidad de consecuencias nocivas y pérdidas resultado de la interacción entre un peligro natural o humano y situaciones de vulnerabilidad (ONU/ISDR, 2002). Más simple: el riesgo es la probabilidad de que ocurra un desastre. El concepto es mucho más complejo y tiene varias dimensiones, desde su aparición ha sido manejado de distintas maneras, desde sinónimo de peligro hasta un recuento de daños en sus concepciones más simplistas. El riesgo se obtiene de la relación entre la amenaza y la vulnerabilidad.

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Elementos en riesgo.}$$

Una población puede ser vulnerable pero si no está expuesta a una amenaza no hay riesgo, por el otro lado una amenaza que no se cruza con una sociedad vulnerable no representara un riesgo. Por lo tanto, se requiere que ambos aspectos estén presentes para hablar de riesgo. De esta forma el concepto de riesgo no parece tan complicado pero tiene sus matices y circunstancias. Primero que nada el riesgo dependerá en gran parte de la amenaza a la que esté relacionado, por ello, no

es lo mismo estar en riesgo de desastre por procesos de remoción en masa que a inundaciones o a huracanes, en los tres casos se deberán tomar medidas distintas para mitigarlo y gestionarlo, pero de hecho lo común es que una sociedad este expuesta a diferentes tipos de amenaza lo que hace más complejo estimar el riesgo. Además, es importante conocer quién o qué está en riesgo. Los elementos expuestos al riesgo son distintos en cada sociedad, básicamente son todos aquellos atributos valorados por el ser humano y van desde la propia vida humana hasta la propiedad, los modos de producción, los recursos naturales o los sitios o lugares con valor religioso o cultural (Crozier y Glade, 2004). En el esquema de Turner et. al. (2003) estos elementos se engloban en cuatro grupos:

- Las personas (su vida o su salud)
- Las actividades económicas.
- El equipamiento y la infraestructura (vivienda, equipamiento urbano, carreteras, caminos, escuelas y en general todo tipo de construcción humana).
- Los recursos naturales (elementos biofísicos relacionados con las actividades económicas: el suelo, las fuentes de agua, la vegetación, etc.).

Aquí radica la diferencia entre lo que llamamos riesgo específico y riesgo total. El riesgo específico es el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento en particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad. El riesgo total es la cuantificación acumulada del riesgo específico de cada uno de los sujetos o elementos expuestos.

Varios autores como Lavell, Wilches-Chaux, Macías o Cardona exponen que el riesgo en realidad nunca podrá ser eliminado al 100%. Pero además, sucede que la gente no siempre es ignorante de los riesgos a los que está expuesta, y parece contradictorio que en algunos casos la gente prefiera vivir en lugares extremadamente riesgosos, esto es lo que se llama riesgo aceptable, un valor admisible de probabilidad de consecuencias sociales y económicas que la población está dispuesta a tomar debido a que los beneficios de permanecer en ese lugar son importantes (Cardona, 1993).

De esta manera no sólo basta con cuantificar el riesgo (estimación del riesgo), se debe evaluar el riesgo (evaluación del riesgo) y de esta manera poder establecer los beneficios y consecuencias de estar expuesto a éste, determinando si el riesgo es tolerable, intolerable o aceptable. La implementación de medidas racionales apropiadas para la reducción del riesgo es el manejo o administración del riesgo (Crozier y Glade, 2004). Como el riesgo no puede ser totalmente eliminado, no se puede hablar de eliminación del riesgo sino de mitigación del riesgo, que son todas las medidas encaminadas a reducir el riesgo al que una comunidad está expuesta y que, desde el punto de vista del paradigma estructuralista, estas acciones deben encaminarse a la reducción de la vulnerabilidad, sin desestimar las medidas ingenieriles o técnicas que puedan aplicarse a las amenazas.

Luego de que ocurre un desastre hay ciertas etapas que es necesario definir. La más notable y a la que ponen atención los medios de comunicación y los gobiernos en general es a la emergencia que es el momento en que el desastre se manifiesta con toda claridad. Entonces se hacen evidentes las condiciones de vulnerabilidad y se evalúa la eficacia de las medidas preventivas. Al ser una etapa que rompe con la normalidad de una sociedad la rutina se interrumpe, lo

cual afecta a la economía, además es en esta etapa en dónde la relación entre la sociedad y su gobierno pueden afianzarse o romperse (Macías, 1993). Posteriormente, pasadas una semanas puede hablarse del periodo de retorno a la normalidad, aunque esto es totalmente subjetivo y en muchas ocasiones no es algo que suceda ya que como menciona Blaikie et. al. (1994) en algunos lugares la recuperación nunca llega y al contrario, el daño del último desastre se suma a las condiciones de vulnerabilidad de la población para enfrentar el siguiente peligro. La tabla 1.3 muestra de manera teórica las diferentes etapas y amenazas relacionadas luego de la ocurrencia de un evento de procesos de remoción en masa como el ocurrido en la Sierra Norte de Puebla en el año de 1999. La emergencia comúnmente se confunde con la prevención de desastres, pero esta es algo totalmente distinto pues la prevención de desastres se trata de acciones dispuestas con anticipación con el fin de evitar un impacto negativo (Cardona, 1993).

Tabla 1.3. Amenazas posteriores relacionadas a los PRM y sus consecuencias.

	Fenómeno detonante (Lluvia extraordinaria)	Inmediatamente después del PRM	En las primeras dos semanas	De dos semanas a un año
Amenaza subsecuente	PRM	Inundaciones, explosiones, incendios, derrames y fugas de sustancias peligrosas, más PRM.	Inundaciones, epidemias, hambrunas, contaminación del agua, suelo y aire, saqueos, sabotajes.	Erosión, hambruna, malnutrición.
Consecuencias en el sistema humano	Pérdida de vidas, destrucción del equipamiento e infraestructura, interrupción de los servicios y actividad económica, destrucción de los medios de subsistencia, pérdida de bienes.	Pérdida de vidas, destrucción del equipamiento e infraestructura, interrupción de los servicios y actividad económica, destrucción de bienes. Pérdida de suelo.	Emergencia sanitaria, interrupción del comercio y la actividad económica, falta de empleo, inseguridad, dependencia de la ayuda externa.	Descenso en la actividad económica, emigración, falta de empleo, falta de recursos, dependencia de la ayuda externa. Pérdida de los medios de subsistencia
Escala	Desde escala local hasta regional (se considera la ocurrencia de varios PRM)	Local	Local o regional	Local o regional

Existen numerosos trabajos que se pueden enfocar a una u otra etapa de la valoración o gestión del riesgo. En sentido general para evaluar el riesgo se debe evaluar la amenaza, analizar la vulnerabilidad y de esta forma estimar el riesgo. Luego de esa estimación están los pasos correspondientes a la gestión del riesgo, esto último debe entenderse como las herramientas de administración y decisión que facilitan a los actores sociales analizar su situación de riesgo y tomar de manera consiente las mejores decisiones (Wilches-Chaux, 1998).

Los procesos de remoción en masa

Clasificación

Los procesos de remoción en masa (PRM) son aquellos que involucran el movimiento hacia abajo de los materiales que forman los declives montañosos bajo la influencia de la gravedad

y sin la asistencia primordial de un transporte fluido (Brundsen, 1979, en Alcántara, 2000). Su clasificación ha sido motivo de polémica y confusión desde que se comenzaron a estudiar. La obra de Varnes y Cruden, *Landslide types and processes*, de 1978, presentó una clasificación que ayudó a definir de manera más clara a los PRM, esa clasificación es la base de muchas de las clasificaciones que hoy en día se utilizan, incluida la de este trabajo. De manera general, la clasificación de Varnes y Cruden excluye a la subsidencia y a las avalanchas de nieve, dando el primer paso para acotar lo que son los PRM. Como criterios de clasificación Varnes y Cruden tomaron en cuenta el tipo de movimiento, el tipo de material acarreado y la velocidad del movimiento para definir los distintos tipos de PRM. Otra clasificación importante es la propuesta por Hutchinson (1988) que difiere de la de Varnes y Cruden en que incluye a las expansiones laterales. La clasificación que se utiliza en este trabajo está basada en estas dos clasificaciones y fue propuesta por el proyecto EPOCH (*The Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community*) en 1993 (ver tabla 1.4).

Tipología de los PRM

A continuación se presenta una rápida descripción de los diferentes tipos de PRM que hay en la clasificación de la EPOCH.

Tabla 1.4. Clasificación de PRM. (Fuente: EPOCH, 1993, a partir de la clasificación de Varnes y Cruden, 1978 y Hutchinson, 1988, en Alcántara, 2000).

Mecanismos de movimiento		Tipo de material involucrado	
Tipología	Roca	Derrubios	Suelo
Caída	Caída o desprendimiento de roca	Caída o desprendimiento de derrubios	Caída o desprendimiento de suelo
Vuelco o desplome	Vuelco o desplome de rocas	Vuelco o desplome de derrubios	Vuelco o desplome de suelo
Deslizamiento rotacional simple	Individual Múltiple Sucesivo	Individual Múltiple Sucesivo	Individual Múltiple Sucesivo
Deslizamiento transnacional	Deslizamiento de roca en bloque	Deslizamiento de derrubios en bloque	Deslizamiento de roca en suelo
Flujos	Flujo de rocas	Flujo de derrubios	Flujo de suelo
Expansión lateral	Expansiones laterales en rocas	Expansiones laterales en derrubios	Expansiones laterales en suelos
Movimientos complejos	Ejemplo: alud de rocas	Ejemplo: flujo deslizante	Ejemplo: rotación con flujo de tierras

Caídas o desprendimientos. Se originan por el desprendimiento del material de una superficie inclinada o vertical que puede rodar, caer o fluir ladera abajo.

Debido a que se presentan en laderas generalmente mayores a 30° (Lugo, 1989), la velocidad de estos movimientos puede ser rápida o muy rápida. En los cortes de carretera y cortes de loma se crean masas inestables de material sin apoyo descendente propensas a presentar caídas. Su identificación en imágenes de satélite de muy alta resolución se complica en las condiciones mencionadas los depósitos sobre caminos o carreteras son rápidamente removidos para restaurar el tránsito.

Vuelcos o desplomes. Los vuelcos son movimientos de roca, suelo o detritos ladera abajo pero con la distinción de que la masa se precipita rotando a partir de un eje pivote determinado por su centro de gravedad. Este tipo de movimiento se presenta más frecuentemente sobre laderas con materiales que presentan diaclasas, grietas o superficies columnares (Lugo, 1989). Por lo anterior, la identificación de este tipo de movimientos en sensores remotos dependerá mucho del conocimiento del ambiente geológico sobre el que se está trabajando en determinada zona.

Deslizamientos. Se denomina de este modo a los movimientos ladera abajo de rocas, detritos o suelos sobre una superficie reconocible de fractura o de deslizamiento. Se dividen en deslizamientos rotacionales y translacionales.

En los **deslizamientos rotacionales** se identifican atributos morfológicos que distinguen a esta tipología, como son: la zona de hundimiento, uno o más escarpes menores y un pie o pedestal en el material desplazado. Sucede que en el movimiento la superficie de ruptura no es plana sino curva; esto hace que el material rote hacia atrás sobre un eje paralelo a la ladera. En las imágenes de satélite de alta resolución estos atributos mencionados pueden no estar todos presentes, o pueden haber sido borrados o modificados por las actividades humanas o la erosión, por lo que el análisis visual en 3D debe realizarse cuidadosamente.

En los **deslizamientos translacionales**, también llamados deslizamientos de bloques no rotacional, la superficie de ruptura se presenta más uniforme siendo plana con una ligera ondulación. De esta forma la masa se desplaza paralela a la superficie original del terreno. Son fácilmente identificables en sensores remotos cuando su ocurrencia es reciente y su magnitud es considerable.

Flujos. Este tipo de movimientos se asemeja al movimiento que presenta un fluido viscoso porque son espacialmente continuos. Debido a que la velocidad de los materiales no es uniforme en todo el movimiento se forman lóbulos en la superficie del movimiento, característica por la que es posible distinguirlos de otros movimientos (Alcántara, 2000). En la zona de estudio de este trabajo se identificaron gran cantidad de flujos de detritos, en algunos casos la zona de depósito no es identificable pues ha sido borrada por la erosión fluvial o las actividades humanas por lo que sólo se puede señalar el canal por donde se supone debió haber descendido el material.

Expansión lateral. Se caracterizan por ser movimientos difíciles de identificar a través de sensores remotos. Se presentan cuando existen materiales gruesos contenidos en una matriz de materiales más finos; el suelo se fractura y se expande debido a la licuefacción del material que se encuentra debajo.

Movimientos complejos. Se definen como aquel proceso en el que se presentan más de uno de los tipos mencionados anteriormente. El material acarreado se desplaza primero de una forma y durante el recorrido ladera abajo se transforma en otro movimiento. Su identificación en imágenes de satélite de alta resolución es posible pero la frontera entre un movimiento complejo no siempre es clara, por lo que la verificación en campo es recomendable.

Dentro de este tipo de movimientos cabe mencionar algunos ejemplos como los aludes de rocas, los flujos deslizantes y la rotación con flujo de tierras (Alcántara, 2000).

En la zona de estudio se identificaron todos los tipos de PRM mencionados excepto las expansiones laterales, no sólo porque no se lograron identificar estos procesos a través de la percepción remota sino también porque no hay reportes en la zona por parte de los archivos históricos y de los pobladores de que hayan ocurrido este tipo de movimientos. Debe señalarse también que la clasificación de PRM requiere de deducción geomorfológica y por lo tanto es subjetiva (Guzzetti *et al.*, 2012).

Velocidad del movimiento

Algunas clasificaciones han tomado en cuenta la velocidad del movimiento (ver tabla 1.5), este aspecto es muy importante cuando se trata de establecer la amenaza de los PRM ya que los movimientos extremadamente rápidos son mucho más destructivos que los movimientos lentos o muy lentos. La razón de la última afirmación radica en que los movimientos extremadamente rápidos pocas veces permiten la evacuación de la población que se ve afectada por el movimiento.

En la zona de estudio se ha identificado que la mayoría de los movimientos que afectan a la población se encuentran en los intervalos de velocidad rápido y moderado, lo que ha ayudado para que en la zona las bajas humanas por PRM no sean frecuentes. Sin embargo el daño a construcciones si ha sido considerable.

Tabla 1.5. Velocidad de los PRM. (Fuente: Cruden y Varnes, 1996, en Alcántara, 2000).

Velocidad	Descripción	Naturaleza del impacto
3 m/s	Extremadamente rápido	Catástrofe de gran violencia por el impacto del material desplazado o por la disgregación del material desplazado.
0.3 m/min	Muy rápido	Pérdida de vidas debido a la velocidad del movimiento que no permite que todas las personas escapen.
1.5 m/día	Rápido	Posible escape y evacuación. Infraestructura y equipamiento destruidos por la masa desplazada.
1.5 m/mes	Moderado	Estructuras poco sensibles y a una distancia considerable pueden ser mantenidas. Estructuras localizadas en la masa desplazada son dañadas en gran medida.
1.5 m/año	Lento	Estructuras poco sensibles y a una distancia considerable pueden ser mantenidas con trabajo de mantenimiento si el movimiento no es de mucha duración.
0.06 m/año	Muy lento	Algunas estructuras permanentes no son dañadas y si son agrietadas por el movimiento pueden ser reparadas.
	Extremadamente lento	No hay daño en las estructuras construidas con precaución.

Atributos morfológicos

A partir de Varnes (1984) y Brunsden y Prior (1984) se construyó un esquema básico de los atributos morfológicos ideales de un deslizamiento, este esquema ha sido utilizado con algunas variantes en la literatura especializada del estudio de los PRM y representa otro aporte a la homologación de conceptos en el estudio del PRM. En este sentido, el trabajo de Alcántara (2000) establece la utilización correcta del vocabulario referente a los PRM en el idioma español y sirve como guía para este trabajo. La conjunción de estas definiciones y el diagrama se pueden observar en la figura 1.6.

Para los deslizamientos, no todos los atributos morfológicos son apreciables en campo o por medio de la Percepción Remota. En ocasiones, se presentan de forma poco clara o simplemente no se presentan. En este trabajo, los atributos morfológicos que fueron de mayor utilidad para la identificación de PRM fueron el escarpe, la corona y el material de depósito.

Causas de los PRM

Las causas que ocasionan los PRM son muy variadas y dependen de las condiciones geográficas de cada lugar. Cruden y Varnes (1996) las organizaron en causas de índole geológica, causas por procesos físicos, causas morfológicas y causas de origen antrópico (ver tabla 1.6). Algunos PRM pueden tener más de una causa que incrementa la probabilidad de su ocurrencia, pero para el caso de registro en un inventario de PRM solo se toma en cuenta la causa que detona al PRM en el momento en que ocurre. En el caso de este trabajo la mayoría de los PRM fueron causados por eventos de precipitación extraordinaria y precipitaciones intensas, algunos pocos por causas de origen antrópico. En la tabla 1.7, en color rojo, se señalan algunas otras causas relacionadas con los PRM que ocurren en Pahuatlán.

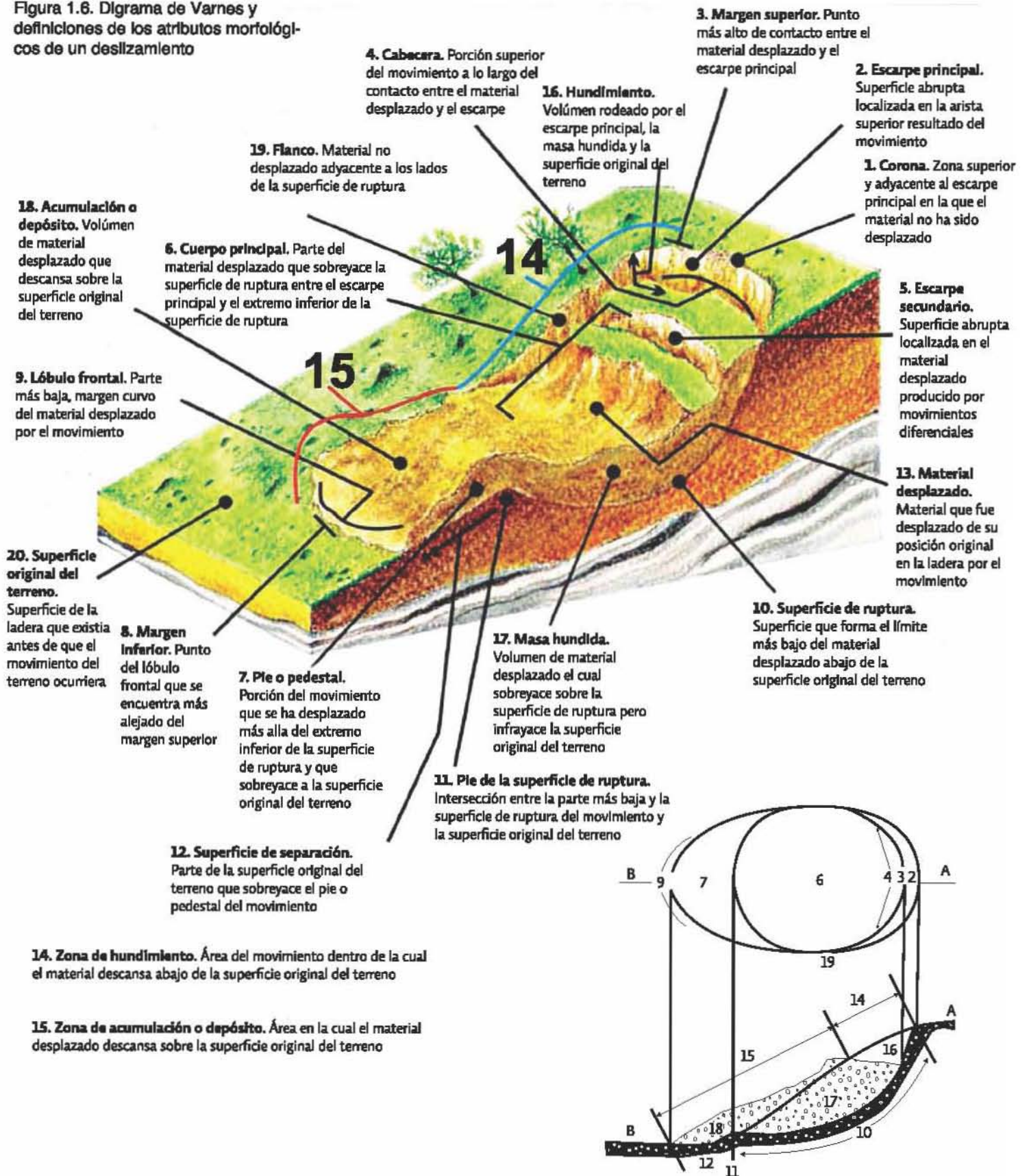
Estado de actividad y edad de los PRM

Se refieren a aspectos diferentes aunque relacionados entre sí. Básicamente un PRM es activo cuando registra movimiento (aquí se incluyen los PRM que ocurren por primera vez o son reactivados), y es inactivo cuando no registra movimiento. Dentro de la inactividad existen, de acuerdo a Cruden y Varnes (1996), algunas variantes. Al PRM que no ha registrado movimiento

Tabla 1.6. Causas de los PRM. (Fuente: Cruden y Varnes, 1996).

Causas de índole geológica	Causas por procesos físicos
Materiales débiles	Precipitación intensa
Materiales sensibles	Derretimiento rápido de nieve y hielo
Materiales intemperizados	Eventos de precipitación extraordinaria
Materiales sujetos a cizallamiento	Actividad sísmica
Materiales con fisuras y diaclasas	Erupciones volcánicas
Discontinuidades orientadas adversamente (Esquistosidad, planos de inclinación)	Gelifracción
Discontinuidades estructurales (fallas, discordancias, contactos)	Expansión e hidratación de arcillas
Permeabilidad contrastante	
Contraste de materiales con diferente plasticidad.	
Causas morfológicas	Causas de origen antrópico
Levantamientos tectónicos o volcánicos	Excavación de las laderas o del pie de las laderas
Erosión glacial	Incremento de peso en las laderas
Erosión pluvial al pie de las laderas	Desecación de cuerpos de agua
Erosión marina al pie de acantilados	Deforestación
Erosión glacial al pie de las laderas	Irrigación
Erosión en márgenes laterales	Actividad minera
Erosión subterránea	Vibraciones artificiales
Remoción de la vegetación (por incendios y sequías)	

Figura 1.6. Diagrama de Varnes y definiciones de los atributos morfológicos de un deslizamiento



Inspirado en Varnes (1996) y Alcántara-Ayala (2000)

Fuente: IAGG Comission on Landslides, (1990)

en la última temporada de lluvias pero que al momento de ser inventariado no se encuentran evidencias de movimiento alguno se le llama suspendido. Se dice que un PRM es inactivo cuando ha pasado más de un año del evento que lo causó y no ha presentado movimiento desde entonces. Si este último tipo de movimiento está expuesto en los siguientes años al fenómeno que lo detonó, entonces se le llama dormido. Si existe una corriente fluvial y esta cambia su curso debido a la acumulación de material de depósito de un PRM, tanto que el río en cuestión no erosione el pie del PRM, se llama abandonado. Si además de esto último se han aplicado medidas ingenieriles para evitar que el PRM se mueva o se reactive se le llama estabilizado. Finalmente, cuando ha pasado la cantidad de tiempo suficiente (por lo general, más de cien años) para que sobre el PRM original ocurran otros PRM más pequeños, y las condiciones geomorfológicas o incluso climáticas hayan cambiado, el PRM original será llamado relicto. Por increíble que parezca la misma fuente de Cruden y Varnes (1996) señala que la construcción de caminos en Inglaterra realizada en los últimos años ha reactivado movimientos relicto.

Para el inventario de PRM de este trabajo el estado de actividad de los PRM sólo se clasificó en activo e inactivo, los PRM activos aparecen frescos en las imágenes de satélite (WP/WLI, 1993). El estado de actividad tiene relación directa con la edad del movimiento. Los PRM generalmente se clasifican en recientes, antiguos y relictos. La frontera para definir a PRM recientes varia de un estudio a otro pero por lo general son los PRM suspendidos, es decir, aquellos que han ocurrido en el último año. Sin embargo, para esta investigación, dicho intervalo fue ampliado hasta el año de 1994, fecha de la que data el registro fotográfico más antiguo con el que contó esta investigación. Además, debido a actividades antrópicas o a la erosión fluvial, algunos de los PRM ocurridos en 1994, siguen activos.

Respecto a los PRM antiguos o viejos, corresponden con los estados de actividad abandonados o estabilizados. Estos PRM son todavía identificables por medio de la percepción remota cuando se analizan detalladamente las características geomorfológicas de una ladera. De esta manera, aunque los atributos morfológicos aparecen suavizados o borrados por la erosión, la vegetación u otros procesos, el área de afectación de este tipo de PRM puede ser delimitada. En este trabajo se consideraron como PRM antiguos o viejos a aquellos anteriores a 1994.

Finalmente, los PRM relictos pueden identificarse en las imágenes de satélite de alta resolución cuando se trata de PRM de magnitud considerable, es decir, PRM con un área de afectación bastante extensa. Son PRM con cientos o quizás miles de años de antigüedad. En esta investigación se tomó criterio para definir a este tipo de PRM lo que señalan Cruden y Varnes (1996) sobre que el tiempo que ha pasado ha sido el suficiente para que sobre el área de afectación de estos PRM ocurran otros PRM más recientes.

Los materiales de las laderas en donde ocurren PRM

En la clasificación de Cruden y Varnes se toman en cuenta los materiales de acuerdo a su grado de agregación: rocas, detritos y suelo. Consideran a los detritos y suelo (earth) como un solo conjunto: suelo (soil). Como roca se debe entender a la masa dura y firme que de manera intacta se desplaza hacia abajo. Como suelo o tierra se debe entender aquel material en el que más del 80% de las partículas que lo conforman no rebasan los 2 mm de dimensión (Cruden y Varnes, 1996), que es justamente el límite que define a las arenas. Cuando se dice que el material son detritos es porque más del 80% de las partículas que lo conforma sobrepasan los 2mm de diámetro.

Profundidad de los PRM

Los PRM pueden ser superficiales o profundos, esta distinción es más clara en los deslizamientos. La determinación de la profundidad es complicada y se basa en el tipo de falla y la morfología del PRM. En una imagen de satélite o fotografía aérea, la determinación de la profundidad, depende de la apariencia de éste y de relacionar las características litológicas y estructurales de la zona, además de la fecha de adquisición de la imagen (Antonini, *et al.*, 2002; Fiorucci *et al.*; 2011).

Algunos supuestos importantes para el estudio de los PRM

Para poder estudiar el riesgo por PRM se deben establecer algunos supuestos. Los más comunes en la literatura dedicada al tema son, según Guzzetti *et al.*, 2009:

- Donde ya han ocurrido PRM seguramente volverán a ocurrir. El pasado es la clave para el futuro (Varnes, 1984; Hutchinson, 1995; Aleotti y Chowdhury, 1999; Guzzetti, *et al.*, 1999).
- Los PRM ocurrirán en el futuro en las mismas condiciones que en el pasado porque los factores que los producen son los mismos que en el pasado.
- La frecuencia con la que han ocurrido los PRM en el pasado se mantendrá muy similar en el futuro.
- Las estadísticas relacionadas con los PRM no cambian con el paso del tiempo.
- La magnitud con la que han ocurrido los PRM en el pasado se mantendrá similar en el futuro.
- El área de afectación de un PRM es una aproximación muy cercana al concepto de magnitud de PRM, por lo que puede ser tomada como tal.
- La magnitud de los PRM, su frecuencia y la probabilidad de que ocurran PRM en una determinada ladera son independientes entre sí.
- La evidencia geomorfológica de un PRM depende de su tipología y la velocidad de movimiento (Cruden y Varnes, 1996; Dikau *et al.*, 1996).
- El tamaño, la forma, y la evolución espacial y temporal de los PRM puede ser determinada o inferida por métodos empíricos, estadísticos y determinísticos (Crozier, 1986; Hutchinson, 1988; Dietrich *et al.*, 1995).
- La distribución y el tipo de PRM reflejan el control estructural ejercido por la orientación planos de estratificación y las fallas de un lugar determinado (Guzzetti, *et al.*, 1996).
- Los PRM son más frecuentes donde abundan los paquetes de roca débil intercalados con paquetes muy voluminosos de roca dura (Guzzetti, *et al.*, 1996).
- Los mayores deslizamientos ocurren donde la estratificación es paralela, o muy cercana a serlo, al ángulo de la pendiente (Cardinali, *et al.*, 1994; Guzzetti, *et al.*, 1996).
- Amplias laderas de geometría plana están asociadas a la ocurrencia de deslizamientos translacionales (Guzzetti, *et al.*, 1996).
- Las partes altas de los valles o las laderas con geometría cóncava están asociadas con flujos y movimientos complejos (Guzzetti, *et al.*, 1996).
- Se consideran como rocas duras: la arenisca, caliza, conglomerados y depósitos de sedimentos piroclásticos ya petrificados (Guzzetti, *et al.*, 1996).
- PRM superficiales son más frecuentes en laderas con un ángulo de pendiente moderado o medio, áreas de cultivo y en la superficie de antiguos PRM (Guzzetti, *et al.*, 1996).

Estos supuestos fueron utilizados al momento de identificar y clasificar PRM en las imágenes de satélite de muy alta resolución.

1.3 Metodología general

Para este trabajo se siguió el modelo metodológico sugerido de manera general por Varnes (1978) y esquematizado por la Australian Geomechanics Society, 2000 (figura 1.7) que está diseñado específicamente para las amenazas y riesgo por procesos de remoción en masa. En esta metodología se trabaja el análisis de amenaza, de la vulnerabilidad y del riesgo, además de la evaluación del riesgo, la gestión. Esta estructura es muy similar a la propuesta general de autores como Cuny, Keith Smith, Cardona o Wilches-Chaux para amenazas y riesgo en general.

El objetivo de este trabajo no es abarcar todas las fases que abarca el modelo de Varnes hasta la aplicación de un plan de mitigación de riesgo. El trabajo se limita a la parte del análisis de riesgo, con un énfasis especial en la cartografía de sus elementos (parte verde claro en la figura 1.7).

Esta metodología incluye la identificación del peligro, el análisis de la vulnerabilidad y los elementos en riesgo, el análisis del peligro y la estimación, evaluación y tratamiento del riesgo. Todo esto con el fin de establecer un plan de prevención de desastres por procesos de remoción en masa. Existe una gama muy amplia de posibilidades para lograr cada una de las fases de esta metodología. Yin y Yan (1998) clasificaron los tipos de acercamiento al estudio de los procesos de remoción en masa en tres tipos:

- Heurístico. Observación directa y subjetiva.
- Estadístico. Basado en análisis estadísticos y cuantitativos.
- Determinístico. Modelos matemáticos que estiman la probabilidad de que los deslizamientos ocurran en una ladera. Modelos infinito de ladera de Skempton & Delory (1957).

La mejor de estas tres opciones para escalas regionales es el método estadístico. Muchos inventarios de deslizamientos se basan en este tipo de metodologías: Yin y Yan (1998), Dahal et. al. (2008). En su artículo Landslide hazard assessment and risk evaluation: Limits and prospective, Guzzetti (2003b) describe las diferentes maneras de construir un inventario de deslizamientos y un mapa de amenaza. La elaboración del inventario y el mapa de amenaza de este trabajo están basados en los planteamientos que da Guzzetti y en el análisis de imágenes de satélite de alta resolución GeoEye cuyas características serán explicadas ampliamente en el capítulo sobre la amenaza (ver figura 1.8).

Para la estimación de la vulnerabilidad se utilizará el modelo de Turner et. al. 2003. En este caso gran parte de la información para lograr este objetivo se tomó de los datos de fuentes indirectas, datos del INEGI a nivel localidad (ver figura 1.9).

La figura 1.10 establece las etapas a través de los productos que se obtienen en cada fase. De los datos geoespaciales complementarios y el inventario de PRM, resulta el mapa del grado de amenaza, que combinado con el mapa de vulnerabilidad resulta en la posible estimación del riesgo específico a PRM. Las etapas concenientes a la gestión del riesgo ya no corresponden a los objetivos de este trabajo, sin embargo es necesario que los resultados de esta investigación lleguen hasta las autoridades municipales de Pahuatlán, municipio que carece de un Atlas de riesgos, para que los resultados puedan servir como base para futuros estudios más detallados o para la gestión del riesgo de desastre por procesos de remoción en masa en el municipio.

Figura 1.7. Metodología para el estudio de riesgo por procesos de remoción en masa. (Fuente: Australian Geomechanics Society, 2000, en Crozier, 2004. Editada por la autora.)

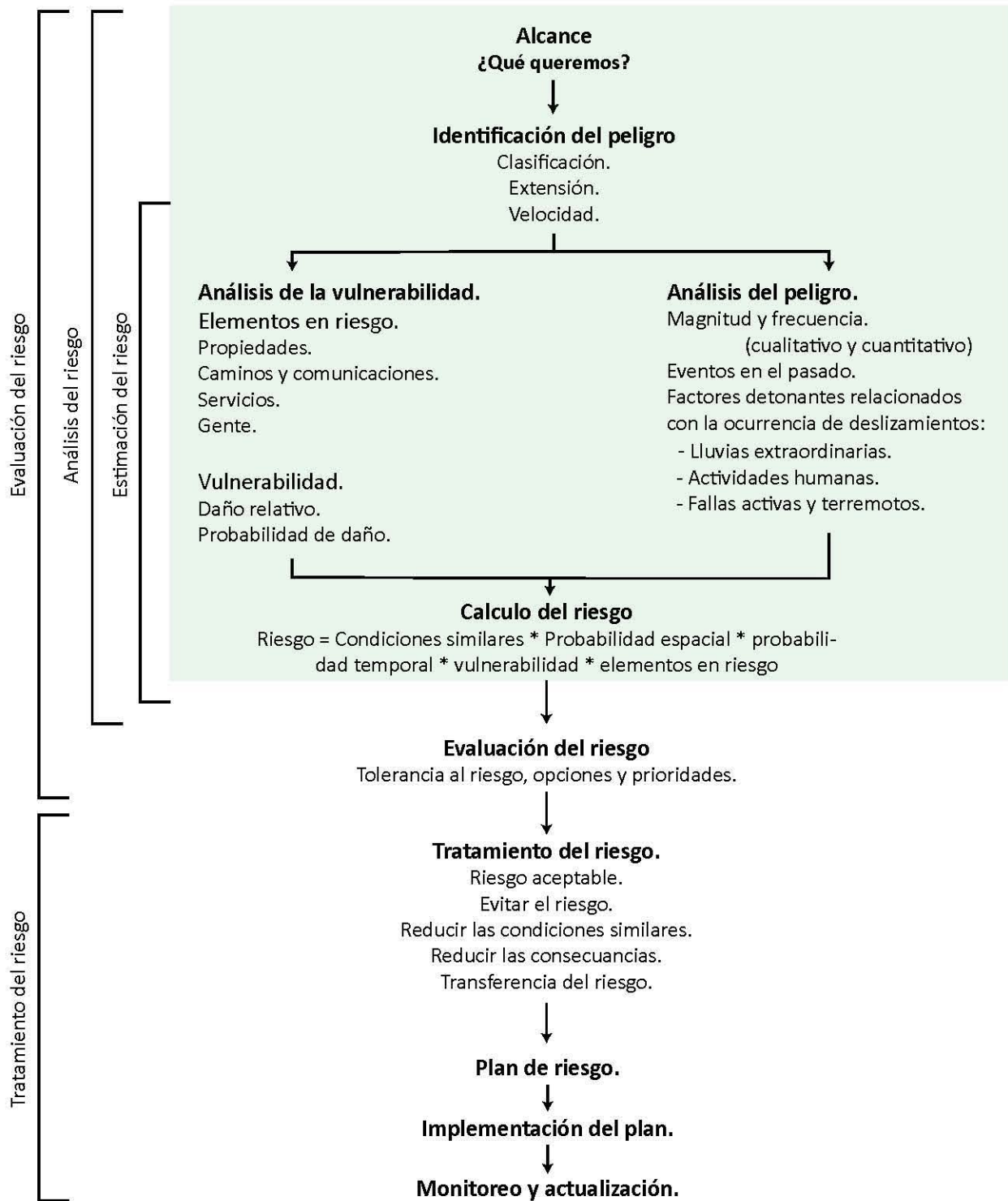


Figura 1.8. Metodología para la estimación y cartografía de la amenaza.

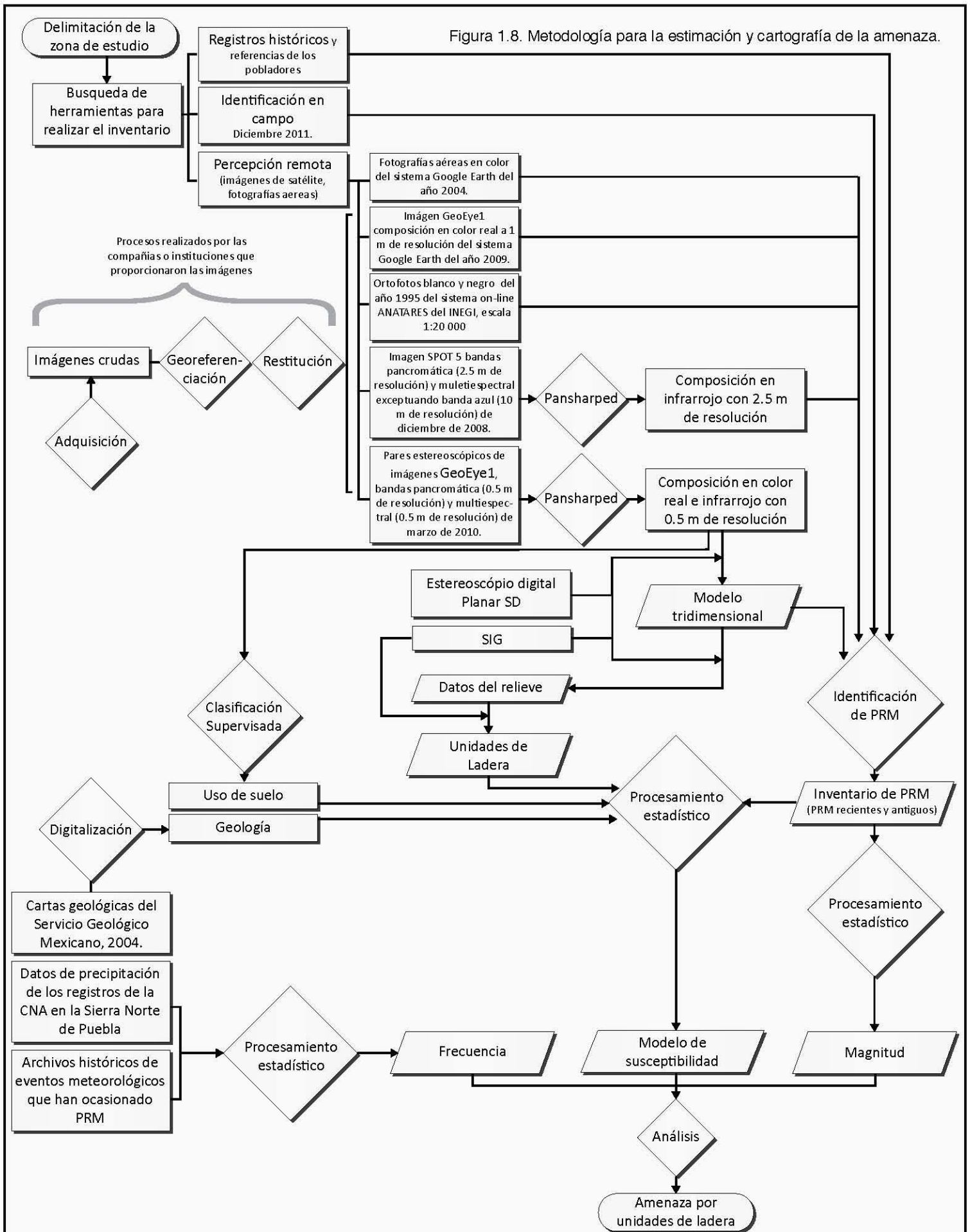


Figura 1.9. Metodología para la estimación y cartografía de la vulnerabilidad.

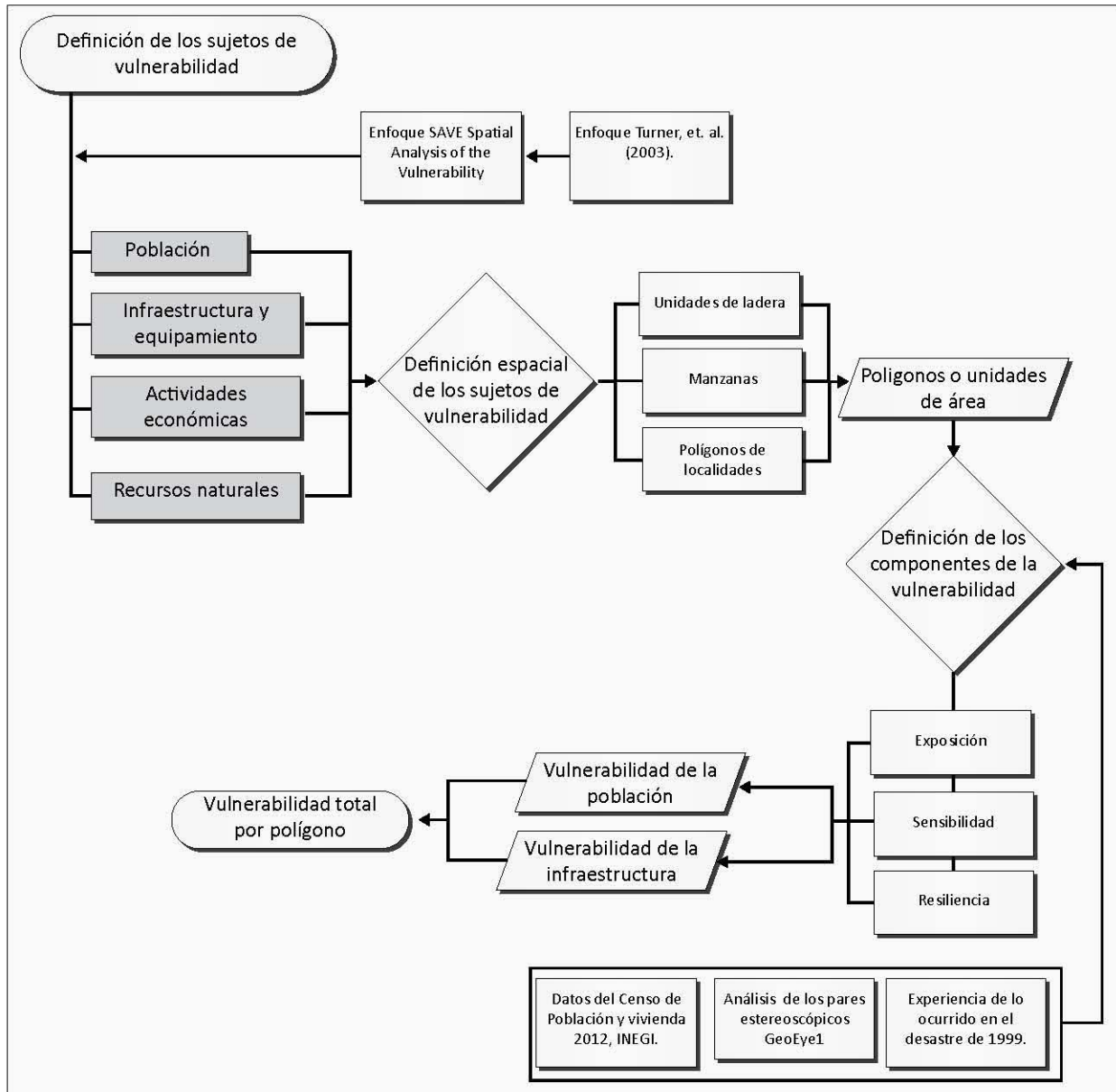
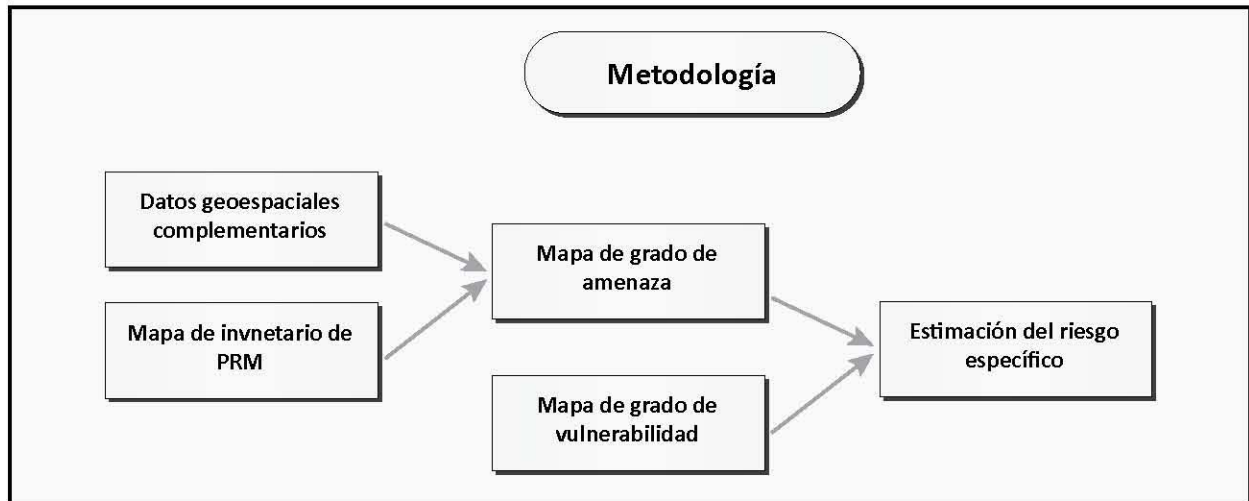


Figura 1.10. Esquema metodológico general de este trabajo.



Capítulo 2. Construcción del inventario de Procesos de Remoción en Masa (PRM)

2.1 Tipos de inventarios y mapas de inventario de PRM

Un inventario de PRM es la relación ordenada de la ocurrencia y características de los PRM en un territorio determinado, y durante un período específico el cuál debe permanecer actualizado detalladamente (Alcántara y Murillo, 2008).

El mapa de inventario es la forma más básica de la cartografía relacionada con los PRM (Guzzetti, *et al.*, 2000). Un inventario de PRM registra la localización, la fecha de ocurrencia y la tipología de los PRM (Pašek, 1975; Hansen, 1984; McCalpin, 1984; Wicczorek, 1984; Guzzetti, *et al.*, 2000). Los inventarios de PRM se realizan aproximadamente desde hace cuarenta años (Guzzetti, *et al.*, 2012) pero existen registros históricos de PRM con cientos de años de antigüedad (principalmente en Europa) de los cuales se han valido los distintos inventarios para completar sus bases de datos.

Los mapas de inventario documentan la extensión de un evento de PRM en un área o región. Son utilizados de forma general para investigar la distribución, tipología, patrones, recurrencia y estadísticas básicas de los PRM, todo ello con el fin de determinar la susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgo de una población por PRM. La elaboración de inventarios también puede generar información complementaria como la localización de escarpes, conos aluviales, zonas de malpaís y otras superficies de erosión y depósitos aluviales (Guzzetti *et al.*, 2012).

A su vez, existen diferentes técnicas para elaborar inventarios de PRM y la elección de una de éstas estará en función del objetivo del inventario y la extensión de la zona de estudio, además también es importante considerar la escala de la cartografía base y temática referente a los PRM y las características de las imágenes disponibles (fotografías aéreas, imágenes de satélite, modelos LIDAR), la habilidad y experiencia del investigador, y el presupuesto con el que se cuenta (Guzzetti *et al.*, 2000; Van Westen *et al.*, 2006). Las técnicas a las que nos referimos son:

- Análisis estereoscópico de fotografías aéreas.
- Análisis estereoscópico de imágenes de satélite de alta resolución.
- Análisis de Modelos Digitales de Elevación con muy alta resolución.
- Análisis visual de imágenes de satélite monoscópicas de muy alta resolución.
- Análisis automático (clasificación supervisada, técnica de change detection) de imágenes de satélite de alta y muy alta resolución.
- Investigación geomorfológica en campo.
- Análisis de archivos históricos: noticias de periódicos, bases de datos de otras instituciones u organizaciones, crónicas, libros, documentos gubernamentales, etc.
- Análisis de ingeniería geológica en las laderas (con instrumentos de medición como piezómetros, inclinómetros, etc.).

Puede aplicarse una sola de estas técnicas o la combinación de dos o más. Además han aparecido nuevas herramientas para el apoyo o realización de estas técnicas como:

- Sistemas de Posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés).
- Cámaras Digitales.
- Láseres.
- Brújulas digitales.
- Tabletas, computadores personales que pueden llevarse a campo.
- Imágenes de satélite de muy alta resolución.
- Estereoscopios digitales.

La técnica tradicional de identificación de PRM a través del análisis geomorfológico en fotografías aéreas (fotointerpretación) o actualmente en imágenes de satélite de muy alta resolución, combinada con la identificación y corroboración en campo, es la mejor herramienta para cartografiar PRM a escala regional (Ardizzone, *et al.*, 2002). Por ello es la técnica primaria utilizada en este trabajo.

La calidad de un inventario de PRM dependerá del tipo, detalle y exactitud de la información mostrada en el mapa. La exactitud dependerá a su vez de qué tan completo sea el mapa de inventario, esto es, la relación entre los PRM que muestra y los que en realidad existen. Sin embargo, conocer cuántos PRM realmente existen es un dato que no se tiene la mayoría de las veces. También depende del tamaño de los PRM, ya que los PRM de poca extensión casi nunca aparecen en los inventarios (Guzzetti *et al.*, 2012). Además, la exactitud también depende de los siguientes factores:

- La escala, fecha y calidad de las imágenes.
- La resolución radiométrica y la cobertura de nubes en la imagen.
- Tipo y escala de la cartografía base
- Calidad de las herramientas usadas para la fotointerpretación (estereoscopios, software, hardware, etc.)
- La habilidad y experiencia del intérprete.

El inventario de este trabajo es incompleto ya que en México no hay una base de datos previa de PRM con la cual se pueda trabajar, los registros históricos son muy pocos e incluso el material aéreo-fotográfico también es escaso, al menos para la zona de Pahuatlán. A pesar de lo anterior, el inventario realizado es suficiente para los propósitos de esta tesis.

Los inventarios se clasifican por su escala pero también por su tipo. Por su tipo se dividen en de archivo o geomorfológicos. Los de archivo son aquellos en los que la información se obtiene de archivos históricos. Los geomorfológicos a su vez pueden clasificarse en inventarios de evento, estacionales y multitemporales (Guzzetti, *et al.*, 2012).

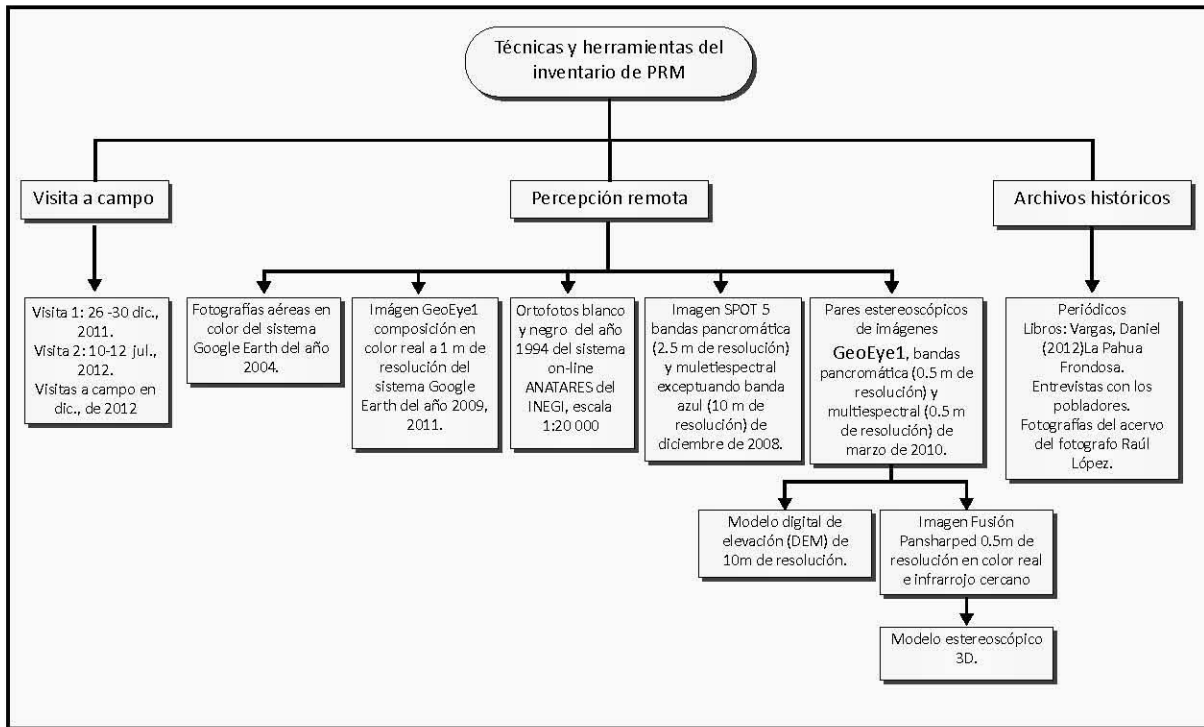
Los inventarios estacionales muestran los PRM ocasionados por uno o varios eventos detonantes en el periodo de una estación. Por ejemplo, un inventario que registre todos los PRM que ocurrieron durante la temporada de lluvias en un determinado año en un determinado lugar.

Los inventarios de evento son aquellos que registran los PRM ocurridos por un solo evento detonante. Por ejemplo, cuando ocurre un evento de lluvia extraordinaria o huracán. Sirven para documentar la extensión y magnitud de un evento y obtener información sobre la vulnerabilidad. Los inventarios multitemporales son aquellos que registran PRM de distintos años, suelen incluir PRM viejos y relictos.

En el caso de este trabajo se realizó un inventario multitemporal que no está completo pues no hubo material ni datos para cubrir todos los años de forma óptima. La figura 2.1 muestra las técnicas y herramientas utilizadas para la construcción del inventario de PRM en Pahuatlán.

A continuación se describen las herramientas utilizadas en este trabajo para la elaboración del inventario multitemporal.

Figura 2.1. Técnicas y herramientas utilizadas para la construcción del inventario de PRM de Pahuatlán.



2.2 Percepción remota

Generalidades

La teledetección o percepción remota es aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. Sin embargo, los especialistas comentan que el concepto incluye no solo la adquisición, sino también los procedimientos y tratamientos dentro de una determinada aplicación (Chuvienco, 2008).

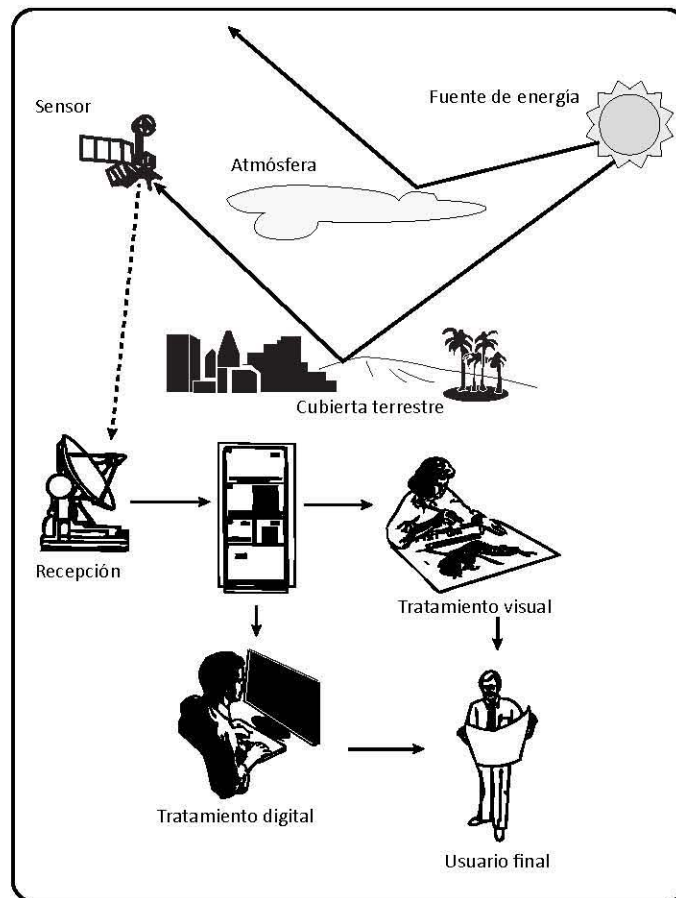
Se asume que entre la superficie terrestre y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético propio a bordo del sensor (Chuvienco, 2008).

Un sistema de teledetección requiere:

- Un foco energético
- La superficie terrestre
- Un sensor

La figura 2.2 muestra con mayor detalle los componentes de un sistema de teledetección.

Figura 2.2. Elementos de un sistema de teledetección. (Fuente: Chuvieco, 2008.)



La fotogrametría es la ciencia, arte y tecnología para obtener medidas y mapas de las fotografías aéreas. (Lillesand, *et al.*, 2007). Toda fotografía aérea e imagen de satélite tiene distorsiones geométricas que deben ser corregidas mediante técnicas fotogramétricas. Estas distorsiones se deben a varios aspectos entre los que se incluyen la normal distorsión de los lentes, la refracción atmosférica y la curvatura de la Tierra. Todos estos factores evitan que, si se mide una distancia sobre una fotografía aérea o imagen de satélite cruda, esta no concuerde con la realidad de manera exacta. Por fortuna existen los procedimientos fotogramétricos automatizados para corregir todos esos errores (Lillesand, *et al.*, 2007). En el caso de este proyecto, todas las imágenes que se adquirieron fueron procesadas fotogramétricamente por las compañías o instituciones de las cuales se adquirieron. Por ello, la corrección fotogramétrica y la georreferenciación de las imágenes satelitales no serán descritas en este trabajo.

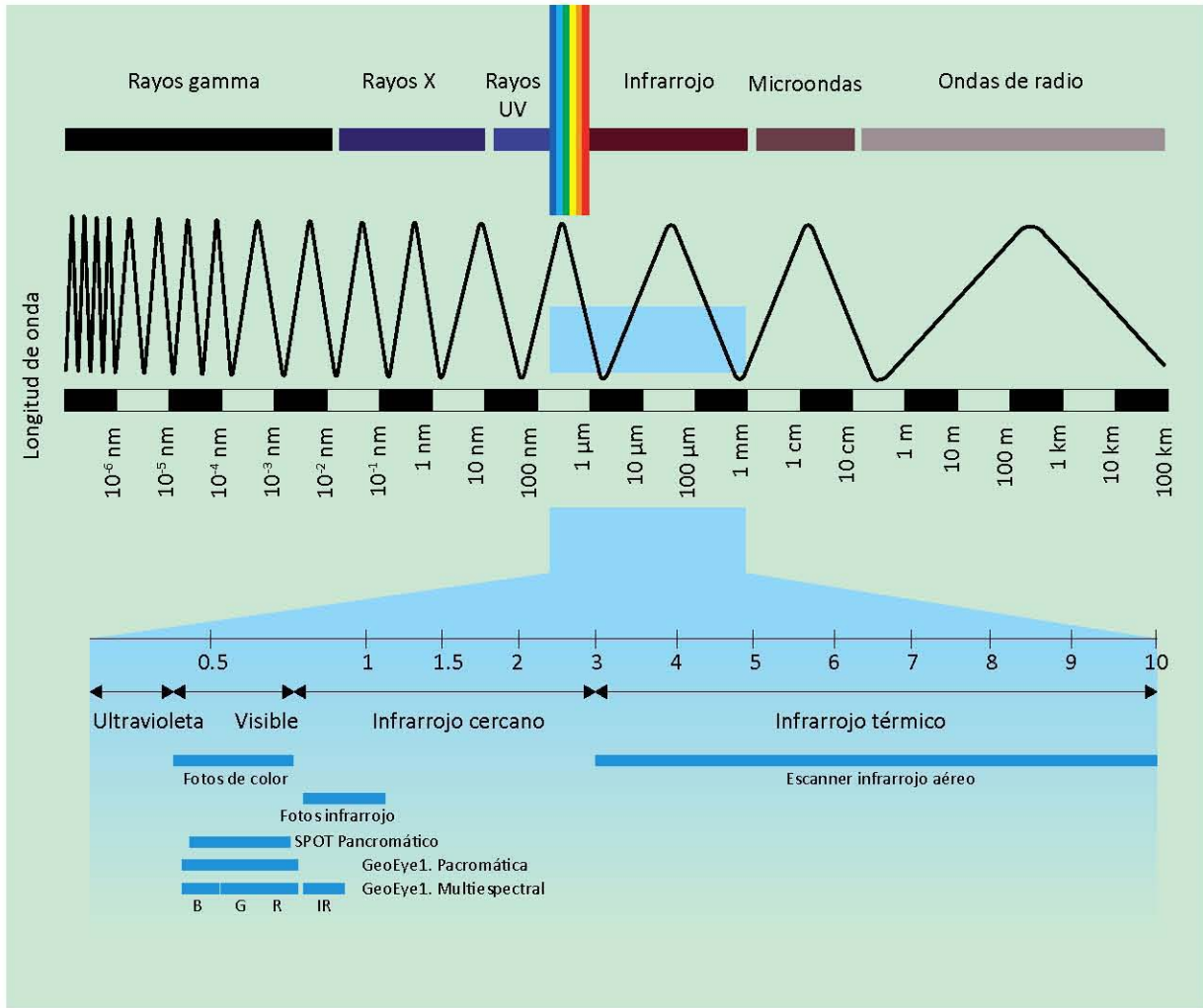
La fotointerpretación es cuando se puede identificar lo que se observa en la fotografía aérea o imágenes de satélite y se comunica la información a los demás (Lillesand, *et al.*, 2007). Abarca, desde poder identificar objetos (algo relacionado directamente con nuestra experiencia previa) hasta la elaboración de interrelaciones y explicaciones complejas sobre los diferentes elementos que aparecen en las imágenes. Esto implica que hay una serie de elementos básicos que son el código a descifrar en cada fotografía. Estos elementos son: la forma, el tamaño, el patrón, el tono, la textura, las sombras, la localización y las asociaciones (Lillesand, *et al.*, 2007). Específicamente en la identificación de PRM la fotointerpretación es una técnica empírica que requiere experiencia, práctica y una metodología sistemática. Además, de un buen criterio a la hora de interpretar (Speight, 1977; Rib y Liang, 1978; Van Zuidam, 1985; Antonini, *et al.*, 2002).

Sensores remotos

Los sensores pueden dividirse en fotográficos, óptico-electrónicos (O-E) y de antena, todos trabajan con la energía electromagnética: la reciben y registran. Cada sensor es diferente pues está construido para captar cierta porción del espectro electromagnético. Su resolución depende de los objetivos para los que fue construido. La resolución es la habilidad para discriminar información de detalle (Chuvienco, 2008). Se reconocen 5 tipos de resolución:

- Resolución espacial. Se refiere al objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen. En las cámaras fotográficas depende de la longitud focal de la cámara y de su altura de vuelo. En los sensores O-E depende de la sección angular que observa el sensor (IFOV por sus siglas en inglés) (Chuvienco, 2008).
- Resolución espectral. Es el número y ancho de bandas de un sensor. Bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio que puede encubrir la diferenciación espectral entre distintas cubiertas de interés. Esto significa que a mayor resolución espectral podrán reconocerse mejor los rasgos de absorción específicos para cada cubierta (Chuvienco, 2008). Los sensores O-E utilizados en este trabajo fueron GeoEye1 que trabaja con cuatro bandas en multispectral, que incluye una banda en infrarrojo cercano y además una banda en pancromático, y SPOT 5 que trabaja en bandas multispectral pero sin la banda azul (ver figura 2.3).
- Resolución radiométrica. Es la capacidad para detectar variaciones en la energía espectral que se recibe. Por ejemplo, en las fotografías aéreas se trata de los niveles de gris, en los sensores O-E depende de la capacidad del sensor en bits. (8 bit, 11 bits, 16 bits, etc.). A 8 bits se pueden reconocer 256 niveles de gris en una imagen, a 16 bits 65 536 niveles de gris. Esta diferencia es notable para cuando se trabaja con ordenadores y no tanto para nuestros ojos que sólo pueden captar 64 tonos de gris y aproximadamente 200 000 colores.
- Resolución temporal. Es la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, es decir, la periodicidad con la que se obtienen las imágenes de un mismo lugar (Chuvienco, 2008). Este tipo de resolución depende de la altura de vuelo del sensor, su velocidad, inclinación y el ángulo total de apertura.
- Resolución angular. Es la capacidad para observar la misma zona desde distintos ángulos. Se infiere que esta capacidad permite tener imágenes estereoscópicas. GeoEye1 puede rotar la cantidad de grados que se requiera, lo cual le permite la adquisición de pares estereoscópicos de imágenes.

Figura 2.3. Espectro electromagnético. (Fuente: Sabins, F., 1987, y Lillesand, T., *et al.*, 1994).



Los sensores O-E tienen ciertas ventajas sobre la fotografía aérea o espacial:

- Permiten ampliar la banda del espectro detectada más allá del visible.
- Tienen capacidad de convertir los datos registrados en radiancias.
- Tienen la posibilidad de realizar coberturas sistemáticas y de grandes espacios gracias a su capacidad de transmitir en tiempo real.

Plataformas

Las plataformas o proyectos más importantes que se han desarrollado hasta ahora, de acuerdo a Chuvieco, 2008, son Landsat, SPOT, IRS, TIROS-NOAA, Satélites meteorológicos geoestacionarios, Tierra y Aqua, RADARSAT y los satélites de muy alta resolución. En el caso de este trabajo se utilizaron únicamente productos derivados de plataformas de muy alta resolución. Los satélites de alta resolución (IKONOS, GeoEye1, SPOT5, Quickbird o EROS) son nombres comunes hoy en día. Son imágenes de uso comercial y de gran resolución espacial que se mide en cm. Se han desarrollado bastante en las últimas décadas, con estos se pueden obtener imágenes de satélite de muy alta resolución.

Imágenes de satélite de muy alta resolución

El origen de los satélites de alta resolución se dio en el ambiente militar con series como el CORONA o Yarebird que eran satélites espías que llevaban a bordo cámaras pancromáticas de alta resolución. Fue en 1992 cuando el espacio aéreo fue abierto para los satélites privados o civiles. Es aquí cuando comenzó la historia de los satélites de muy alta resolución comerciales. El primero de ellos, el IKONOS, cambió la teledetección para siempre. Fue puesto en órbita el 24 de septiembre de 1999. El satélite IKONOS aún está en funcionamiento, tiene la capacidad de captar imágenes en pancromático y multiespectral (tabla 2.1).

Al igual que Orbital Geoimaging Corporation, la compañía Digital Globe también fue fundada en 1992 y de hecho fue la primera de las dos compañías en recibir la licencia para poner en órbita un satélite de alta resolución. El 18 de octubre de 2001 fue lanzado el Quickbird, que de inmediato se convirtió en la principal competencia del satélite IKONOS de Orbital Geoimaging Corporation. Quickbird superó la resolución espacial y el cubrimiento de IKONOS, y también su costo por escena, este satélite aún está en funcionamiento al igual que IKONOS y sus características principales se aprecian en la tabla 2.1. A partir del lanzamiento de estos satélites comenzó una carrera por lograr el mejor sensor comercial de alta resolución entre ambas compañías.

Además de los satélites de las dos compañías mencionadas, los gobiernos de otros países han puesto en órbita satélites de alta resolución comerciales (tabla 2.1). Se hace la aclaración de “comerciales” porque hay otros satélites de alta resolución cuyo uso es militar y sus imágenes no están disponibles al público en general. Las características de todos estos satélites son similares, algunos utilizan sensores óptico-electrónicos, y otros cámaras fotográficas, su resolución radiométrica oscila entre los 8 y 12 bits. Quizás los datos más relevantes sean los de resolución espacial, todos estos satélites tienen la capacidad para adquirir imágenes de alta resolución con coberturas más o menos similares. Casi todos cuentan con una banda en pancromático y la mayoría son multiespectrales, cubriendo el visible; además, en casi todos los casos hay una banda en infrarrojo cercano. El satélite GeoEye1 no se aleja de estas características generales, pero su ventaja estriba en la resolución espacial que llega a medirse en cm y no en metros como en todos los demás satélites mencionados en la tabla 2.5. Debe aclararse que la lista puede estar incompleta ya que en la bibliografía consultada (cuyo cierre de edición oscilaba entre los años 2007 y 2008) se mencionaban intenciones de colocar más de este tipo de satélites en órbita a partir del año 2011.

El satélite GeoEye es el satélite que mayor resolución espacial tiene de todos los sistemas de adquisición de imágenes de alta resolución. Esto ha hecho que sus imágenes sean mundialmente famosas. El sistema GoogleEarth basa su funcionamiento en este sistema. Las características generales del sistema GeoEye se muestran también en la tabla 2.1.

El satélite fue lanzado el 6 de septiembre de 2008 desde Vandenberg, California, Estados Unidos y tiene un peso de 1955 kg. Llevó a bordo tres sensores, un sistema óptico-electrónico pancromático-multiespectral, un sistema sólo multiespectral y uno pancromático. La resolución espacial fue parcialmente censurada por el gobierno de los Estados Unidos que suprimió la venta de imágenes de resolución de 0.4 m por lo que comercialmente se adquieren únicamente las imágenes a 0.5 m. El sistema es capaz de obtener imágenes estereoscópicas ya que su sensor

Tabla 2.1. Características de los satélites y productos de muy alta resolución. (Fuente: elaborado con datos de Satellite Image Corporation: <http://www.satimagingcorp.com/>). PAN, pancromático.

Satélite	País	Año de lanzamiento	Número de bandas	Resolución radiométrica	Bandas (micrómetros)	Resolución espacial
IKONOS	EU	1999	5	11 bits	0.45-0.90 0.45-0.52 0.52-0.60 0.63-0.69 0.76-0.90	0.82 m PAN 4 m
Quickbird	EU	2001	5	11 bits	0.45-0.90 0.45-0.52 0.52-0.60 0.63-0.69 0.76-0.90	0.61 m PAN 2.4 m
WorldView-1	EU	2007	1	11 bits	0.45-0.90	0.50 m
WorldView-2	EU	2008	9	11 bits	0.45-0.80 0.40-0.45 0.45-0.50 0.50-0.58 0.58-0.62 0.60-0.70 0.70-0.74 0.86-1.0	0.46 m PAN 1.8 m
OrbView-3	EU	2003	5	10 bits	0.45-0.90 0.45-0.52 0.52-0.60 0.63-0.69 0.76-0.90	1 m PAN 4 m
SPOT-5	Francia, Bélgica, Suecia.	2002	10	8 bits	0.48-0.71 0.50-0.59 0.61-0.68 0.78-0.89 1.58-1.75 0.49-0.69 0.45-0.52 0.61-0.68 0.78-0.89 1.58-1.75	2.5 a 5 m PAN 10 m 20 m MIR
EROS-A	Israel	2000	1	8 bits	0.48-0.71	1.9 m
EROS-B	Israel	2006	1	8 bits	0.48-0.71	0.7 m
Pleíades-1A y 1B	Francia	20011-2012	5	12 bits	0.48-0.83 0.43-0.55 0.49-0.61 0.60-0.72 0.75-0.95	0.7 m PAN 2.0 m
Resurs-DK1	Rusia	2006	4	10 bits	0.58-0.80 0.50-0.60 0.60-0.70 0.70-0.80	0.8 m PAN 2.0 m
KOMPSAT-2	Corea del Sur	2006	5	8 bits	0.50-0.90 0.45-0.52 0.52-0.60 0.63-0.69 0.76-0.90	1 m PAN 4 m
IRS Cartosat-1	India	2005	1	8 bits	0.50-0.85	2.5 m
IRS Cartosat-2	India	2007	1	8 bits	0.50-0.85	1 m

IRS Cartosat-2B	India	2010	1	8 bits	0.50-0.85	1 m
Formosat	Taiwan	2004	5	8 bits	0.45-0.90 0.45-0.52 0.52-0.60 0.63-0.69 0.76-0.90	2 m PAN 8 m
Theos	Tailandia	2007	5	12 bits	0.45-0.90 0.45-0.52 0.53-0.60 0.62-0.69 0.67-0.90	2 m PAN 15 m
TopSat	RU	2005	4	8 bits	0.50-0.70 0.45-0.50 0.50-0.60 0.60-0.70	2.5 m PAN 5 m
ALOS	Japón	2006	6	8 bits	0.4-0.5 0.5-0.6 0.61-0.69 0.76-0.89 0.52-0.77	2.5 m PAN 10 m
RazakSat	Malasia	2007	5	8 bits	0.51-0.73 0.45-0.52 0.52-0.60 0.63-0.69 0.76-0.89	2.5 m PAN 5 m
GeoEye	EU	2008	5	11 bits	0.45-0.90 0.45-0.52 0.52-0.60 0.62-0.69 0.76-0.90	0.4 m PAN 1.64 m

permite cierto ángulo de movimiento para ello y se puede obtener la sobreposición que se desee. Su tiempo de revista es de 8.3 días (velocidad de orbita 7.5 km/s) por lo que se podría señalar que es razonable, esto le permite procesar 350 000 km² por día (700 000 km/seg. en pancromático). Los datos pueden ser descargados del satélite a 740 mb por segundo (el tiempo estándar de descarga de un sitio web es de 12 mb por segundo). La vida del satélite se estima en 15 años.

Al igual que Orbital Geoimaging Corporation, la compañía Digital Globe también fue fundada en 1992 y de hecho fue la primera de las dos compañías en recibir la licencia para poner en órbita un satélite de alta resolución. El 18 de octubre de 2001 fue lanzado el Quickbird, que de inmediato se convirtió en la principal competencia del satélite IKONOS de Orbital Geoimaging Corporation. Quickbird superó la resolución espacial y el cubrimiento de IKONOS, y también su costo por escena, este satélite aún está en funcionamiento al igual que IKONOS y sus características principales se aprecian en la tabla 2.1. A partir del lanzamiento de estos satélites comenzó una carrera por lograr el mejor sensor comercial de alta resolución entre ambas compañías.

Además de los satélites de las dos compañías mencionadas, los gobiernos de otros países han puesto en órbita satélites de alta resolución comerciales (tabla 2.1). Se hace la aclaración de “comerciales” porque hay otros satélites de alta resolución cuyo uso es militar y sus imágenes no están disponibles al público en general. Las características de todos estos satélites son similares, algunos utilizan sensores óptico-electrónicos, y otros cámaras fotográficas, su resolución radiométrica oscila entre los 8 y 12 bits. Quizás los datos más relevantes sean los de resolución

espacial, todos estos satélites tiene la capacidad para adquirir imágenes de alta resolución con coberturas más o menos similares. Casi todos cuentan con una banda en pancromático y la mayoría son multiespectrales, cubriendo el visible; además, en casi todos los casos hay una banda en infrarrojo cercano. El satélite GeoEye no se aleja de estas características generales, pero su ventaja estriba en la resolución espacial que llega a medirse en cm y no en metros como en todos los demás satélites. Debe aclararse que la lista puede estar incompleta ya que en la bibliografía consultada (cuyo cierre de edición oscilaba entre los años 2007 y 2008) se mencionaban intenciones de colocar más de este tipo de satélites en órbita a partir del año 2011.

El satélite GeoEye es el satélite que mayor resolución espacial tiene de todos los sistemas de adquisición de imágenes de alta resolución. Esto ha hecho que sus imágenes sean mundialmente famosas. El sistema GoogleEarth basa su funcionamiento en este sistema. Las características generales del sistema GeoEye se muestran también en la tabla 2.1.

Figura 2.4. Villa de Wat Tum, Bangkok, Tailandia, luego de una inundación. (Fuente: <http://www.GeoEye.com/CorpSite/gallery/Default.aspx>).



El satélite fue lanzado el 6 de septiembre de 2008 desde Vandenberg, California, Estados Unidos y tiene un peso de 1955 kg. Llevó a bordo tres sensores, un sistema óptico-electrónico pancromático-multiespectral, un sistema sólo multiespectral y uno pancromático. La resolución espacial fue parcialmente censurada por el gobierno de los Estados Unidos que suprimió la venta de imágenes de resolución de 0.4 m por lo que comercialmente se adquieren únicamente las imágenes a 0.5 m. El sistema es capaz de obtener imágenes estereoscópicas ya que su sensor permite cierto ángulo de movimiento para ello y se puede obtener la sobreposición que se desee. Su tiempo de revista es de 8.3 días (velocidad de órbita 7.5 km/s), y cubre 350 000 km² por día (700 000 km/seg. en pancromático). Los datos pueden ser descargados del satélite a 740 mb por segundo. La vida del satélite se estima en 15 años.

Las aplicaciones de estos productos son variadas, la investigación científica requiere cada vez más de este tipo de resolución. En el caso de este proyecto, el producto demostró funcionar de manera eficiente y formidable para la identificación de procesos de remoción en masa. La ventaja de una mayor resolución espacial radica en la identificación más precisa de elementos, combinando esto con la estereoscopia tales imágenes pueden competir de mejor forma con una fotografía aérea.

Respecto a las imágenes del sistema GoogleEarth es difícil conocer qué tipo de sensor las adquirió ya que la compañía no lo menciona. Para este proyecto fueron utilizadas para la identificación de PRM pero siempre con base en los pares estereoscópicos GeoEye-1 con los que se contaba.

2.3. Identificación de PRM en las imágenes de satélite de muy alta resolución

Antecedentes

La identificación de PRM a través de técnicas de Percepción Remota se lleva a cabo sobre fotografías aéreas de distintas escalas, pero actualmente las imágenes de satélite de muy alta resolución representan una alternativa válida (Nale, 2002; Weirich y Bleisus, 2007).

Para este trabajo se han utilizado imágenes de muy alta resolución GeoEye-1 para la generación de nueva información útil para el reconocimiento de los procesos de remoción en masa (PRM) y sus principales características. La resolución espacial de 0.5 m. en pancromático y 1.5 en multiespectral de estas imágenes hacen posible el reconocimiento de las firmas espectrales propias de los PRM. Como menciona Singhroy (2004), una de las grandes limitaciones hasta hace poco años de los productos que se podían obtener por percepción remota satelital era su pobre resolución espacial (lo mínimo requerido para los estudios de PRM son 3 m) por lo que estos productos eran sólo destinados a la generación de inventarios de PRM en escalas nacionales o regionales. Esto ocasionaba que estos productos sirvieran poco para la determinación del tipo PRM que se identificaba. Actualmente, esta carencia está solventada con la aparición de los sensores de muy alta resolución como IKONOS, OrbView, SPOT 5 y GeoEye 1. Además, la posibilidad de obtener estas imágenes con su par estereoscópico, permite obtener otros productos necesarios

para la elaboración del mapa de inventario, la susceptibilidad y la estimación del riesgo en una zona por PRM, específicamente la obtención de un Modelo Digital de Elevación (MDE).

Los primeros antecedentes del uso de imágenes de satélite para la detección de PRM datan de 1975, en estos trabajos se utilizaban imágenes Landsat y SPOT. Algunos de estos trabajos fueron los de: Gagnon, 1975; Sauchyn y Trench, 1978; Stephens, 1988; Scanvic y Girault, 1989. Es solo a partir de la última década que se comienzan a utilizar imágenes monoscópicas de satélite de muy alta resolución en conjunto con DEMs de muy alta resolución. Algunos de esos trabajos son los de: Cheng, *et al.*, 2004; Metternich *et al.*, 2005; Rosini y Hervás, 2005; Barlow *et al.*, 2006; Lee y Lee, 2006; Weirich y Blesius, 2007; Ochoa-Tejeda y Parrot, 2007; Alcántara y Murillo, 2007; Marcelo *et al.*, 2009; Martha *et al.*, 2010; Tsai *et al.*, 2010; Fiorucci *et al.*, 2011; Mondini *et al.*, 2011; Parker, *et al.*, 2011, Stumpf, A., y Kerle, N., 2011. Y solo a partir de hace cinco años el uso de imágenes estereoscópicas de satélite de muy alta resolución se han utilizado para la identificación de PRM. Hasta el día hoy hay pocos trabajos al respecto y destacan los realizados por Nichol, *et al.*, 2006; Alkevli y Ercanoglu, 2011 y el de Fiorucci *et al.*, 2011.

Hasta ahora las imágenes que se han utilizado para realizar inventarios de PRM son: Landsat7, Terra (ASTER), SPOT-5, IRS, ALOS (PRISM), RESOURCESAT-1 (IRS-P6), CARTOSAT-1, FORMOSAT-2, EROS A1, IKONOS-2, Quickbird-2, Worldview1 y GeoEye1 (Guzzetti, 2011). Las técnicas de interpretación de PRM en este tipo de imágenes se agrupan en tres categorías:

- Visual o heurístico. Interpretación óptica de las imágenes monoscópicas o estereoscópicas, en compuestos de falso color o color real.
- Análisis multiespectral. Incluye los métodos de clasificación automáticos como clasificaciones supervisadas o no, métodos de detección de cambios (si se cuenta con imágenes de distintas fechas) y análisis de orientación de objetos.
- Análisis de imágenes de radar SAR de muy alta resolución.

En este trabajo se optó por un método visual y se contaron con las siguientes herramientas señaladas en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Material de percepción remota utilizado en este trabajo para la identificación de PRM.

Imagen	Resolución espacial / escala	Fecha de adquisición	Estereoscopia	Cubrimiento	Bandas
Pansharped de par estereocópico GeoEye1.	0.5 m.	31 de marzo de 2010	Si	Toda la zona de estudio.	Bandas multiespectrales fusionadas con la banda Pancromática.
Imágenes GeoEye del sistema Google Earth.	1 m.	30 de marzo del 2009 9 de octubre del 2011	No	Toda la zona de estudio.	Compuesto en color real.
Pansharped de imagen SPOT 5	2m	15 de diciembre de 2008	No	Toda la zona de estudio	Bandas multiespectrales fusionadas con la banda Pancromática.
Fotografías aéreas en color del sistema Google Earth	1m	25 de noviembre de 2004	No	Sólo la parte sur de la zona de estudio.	Compuesto en color real.
Ortofotos del sistema Antares INEGI.	Escala 1:20 000	Diciembre de 1994	No	Toda la zona de estudio	Blanco y negro.

Pre-procesamiento

Las imágenes deben pasar un pre-procesamiento, ya que la imagen cruda o RAW, adquirida directamente por el sensor del satélite carece de georreferenciación. De acuerdo a Guzzetti *et al.*, 2012; las principales etapas de pre-procesamiento son:

- Georreferenciación
- Ortorectificación.
- Co-registro
- Corrección radiométrica
- Fusión pansharped

Cada uno de estos procesos requiere de información externa, software especializado, habilidad y experiencia de quién lo hace.

En el caso de este trabajo, además de la georreferenciación y el co-registro realizados por la compañías de las cuales se adquirieron las imágenes, se realizó un proceso de fusión llamado Pansharped con el objetivo de aprovechar la más alta resolución espacial de la banda pancromática en las imágenes GeoEye1 y SPOT 5 aplicada a sus respectivas bandas multiespectrales. Para ello, pueden ser utilizados diferentes algoritmos para combinar la imagen pancromática, de mayor resolución espacial, con las imágenes de las bandas multiespectrales (azul, verde y rojo en el caso de GeoEye1, y verde, rojo e infrarrojo cercano en el caso de las imágenes SPOT5) para obtener una sola imagen de muy alta resolución en color real o infrarrojo cercano (Santurri *et al.*, 2010). Esto permite poder trabajar con información adicional que no está disponible por ejemplo en las fotografías aéreas convencionales, las imágenes satelitales pancromáticas o imágenes LIDAR (Guzzetti *et al.*, 2012). La calidad del proceso de pan-sharped depende de los siguientes factores según Guzzetti *et al.*, 2012.

- La GSD (Ground sample distance) de la imagen fusionada como resultado de la GSD de la imagen pancromática y la información multiespectral.
- El tipo y número de bandas espectrales y la resolución radiométrica.
- La complejidad de la topografía y las coberturas de suelo del área de estudio.
- El algoritmo usado para fusionar la información radiométrica.

En el caso de las imágenes GeoEye1 y SPOT 5 se utilizó el software ENVI 4.7© y el algoritmo Gram-Schmidt Spectral Sharpening para generar la fusión. De esta forma se obtuvieron dos composiciones de color, una con cuatro bandas, tres del espectro visible y una infrarroja, con 0.5 m de resolución espacial para las imágenes GeoEye1; y otra de tres bandas, verde, roja e infrarroja, con 2.0 m de resolución espacial, para las imágenes SPOT5.

El archivo resultado del proceso Pan-Sharpening de las imágenes GeoEye1 se utilizó para generar el modelo digital 3D que sirvió para la identificación estereoscópica, esa etapa está descrita más adelante. La imagen pansharped resultado de las imágenes SPOT5 se utilizó para la identificación visual de PRM en modo monoscópico. Otro proceso que se debió realizar para construir la cartografía base del mapa de inventario de Pahuatlán fue la ortorectificación. La ortorectificación es distinta al proceso de georreferenciación aunque ambas son correcciones geométricas.

La georreferenciación consiste únicamente en adjudicar un valor de coordenada geográfica a cada pixel, es una corrección geométrica que implica un cambio en la posición de los pixeles que componen la imagen tratando de modificar lo menos posible su número digital (ND), todo esto para superponer la imagen a una proyección cartográfica. En el caso de la ortorectificación, también se tratan de corregir las distorsiones que pudieran causarse por el efecto del relieve. En el caso de las imágenes de Pahuatlán, por tratarse de un relieve montañoso, la ortorectificación es un proceso indispensable para generar la cartografía de la zona.

Para conocer el proceso de georreferenciación al que fueron sometidas las imágenes GeoEye1 adquiridas en este estudio, sólo basta consultar los metadatos de la imagen. La tabla 2.3 muestra un resumen de estos datos.

Tabla 2.3 Características del pre-procesamiento geométrico aplicado por la compañía Orbital Geoimaging Corporation a las imágenes adquiridas para Pahuatlán.

Nivel de Procesamiento	Corrección geométrica estándar.
Método de interpolación	Convolución cúbica
Proyección geográfica	Geográficas
Latitud de origen	0°
Longitud de origen	0°
Datum	WGS84
Unidades	Grados
Formato	Tiff

Para poder lograr el proceso de ortorectificación es necesario contar con una representación confiable del relieve. En este caso se logró obtener un Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) de 10 m de resolución a partir del par de imágenes estereoscópicas GeoEye1. Para realizar esto último se utilizó el módulo LPS 2011 del software comercial ERDAS IMAGE 2011©, con el archivo DEM y en el software ENVI 4.7© se realizó la ortorectificación automática además de aplicar una nueva georreferenciación para adaptar las imágenes a la proyección UTM. Con las imágenes resultado de este proceso se construyó la cartografía básica y temática de este trabajo. Las características de esta cartografía se resumen en la tabla 2.4. No se aplicaron

Tabla 2.4. Características de las imágenes con el sistema de coordenadas utilizado para la cartografía básica y temática de este trabajo.

Escala a la que se trabajó la cartografía	1:10 000
Esferoide	WGS 1984
Proyección	UTM Zona 14N
Meridiano central	99° W
Falso Este	500 000
Falso Norte	0
Factor de escala	0.9996
Latitud de Origen	0°
Unidades	Metros
Datum	D WGS84
Formato	Tiff

para este caso otro tipo de correcciones radiométricas o geométricas a las imágenes GeoEye1. En el caso de las imágenes SPOT la corrección geométrica de georreferenciación también venía incluida con el producto (Tabla 2.5). Como la imagen ya estaba en proyección UTM no hizo falta hacer una segunda georreferenciación.

Tabla 2.5 Características de la georreferenciación de las imágenes SPOT 5.

Nivel de Procesamiento	Corrección geométrica estándar.
Método de interpolación	No especificado
Proyección geográfica	UTM Zona 14N
Latitud de origen	0°
Longitud de origen	0°
Falso Este	500 000
Datum	WGS84
Unidades	Grados
Formato	Tiff

Hablar del preprocesamiento que fue aplicado a las imágenes del sistema GoogleEarth o las ortofotos del Sistema Antares de INEGI es especulativo ya que dichos sistemas no presentan públicamente dicha información. Sobre las imágenes de Google Earth solo se presenta la fecha de adquisición y se intuye que dichas imágenes tienen al menos un nivel de preprocesamiento básico de georreferenciación ya que sin esta corrección geométrica el sistema no podría otorgar las coordenadas geográficas. Si se les realizaron correcciones radiométricas u otro tipo de correcciones del tipo orto-correctivas no lo sabemos.

En el caso de las imágenes del sistema Antares se trata de ortofotos por lo que estrictamente se les debió aplicar una ortorectificación. Fuera de eso no parece factible que se les hayan realizado correcciones radiométricas pues se trata de fotografías aéreas en pancromático.

Finalmente, debido a que en todos los casos los recursos utilizados en este trabajo fueron adquiridos con un nivel de pre-procesamiento, no son aptos para utilizarse en el reconocimiento de PRM a través de medios automáticos ya que la radiancia registrada en cada pixel está alterada, no es el número digital original pues es resultado de un proceso de interpolación (Convolución cúbica en el caso de las imágenes GeoEye1). Una regla general de la Percepción Remota indica que para correr procesos automáticos lo mejor es contar con las imágenes crudas en formato RAW.

Construcción del modelo 3D

Los modelos estereoscópicos 3D obtenidos a partir de imágenes de satélite de muy alta resolución pueden ser utilizados para detectar PRM y construir mapas de inventario de PRM (Alkev y Ercanoglu, 2011).

Para la construcción del modelo tridimensional, se ingresaron las imágenes pan-sharped en el software comercial ERDAS Imagine®, en su módulo Leica Photogrametry Suite (LPS), para crear un Bloque Orientado, es decir, un archivo que contiene los pares estereoscópicos con sus

datos de georreferencia. Los datos de georreferencia se toman de los Coeficientes Rotacionales Polinominales (RPCs por sus siglas en inglés) que vienen adjuntos con las imágenes de satélite GeoEye. Estos puntos proveen una representación fiel del terreno a la imagen indispensable para los procesos fotogramétricos. Estas referencias puntuales son utilizadas para construir también el modelo 3D de los pares estereoscópicos (Ardizzone, *et al.*, 2011).

Posteriormente, el bloque orientado resultante se utilizó para crear el modelo tridimensional en el software ArcGis®, módulo Stereo Analyst, en dónde se crea la representación visual en 3D. Para que esto funcione, se requiere que esta vista sea observada con el estereoscopio digital Planar StereoMirror PIX2210MN (u otro sistema de percepción estereoscópica digital).

El sistema de estereoscopia digital StereoMirror se basa, como todos los sistemas estereoscópicos actuales, en el principio de estereopsis. Este principio se refiere al fenómeno que nos permite a los seres humanos y otros animales poder observar en tercera dimensión ya que la imagen que percibe cada retina de nuestros ojos tiene una disparidad binocular (cuando dos imágenes son muy similares pero percibidas desde ángulos distintos) y son procesadas por nuestro cerebro que las convierte en una sola imagen en 3D. Cuando esto último ocurre se habla del efecto estereoscópico (ERDAS, 2009).

De la misma forma, cuando se tienen dos imágenes fotográficas de un área común adquiridas desde dos ángulos distintos también ocurre la esteropsis y se produce el efecto estereoscópico, en este caso, el efecto estereoscópico depende del efecto de paralaje que surge cuando se adquieren dos imágenes desde distintos puntos de vista. Si se observa el mundo físico desde dos perspectivas (una imagen derecha y una izquierda) el cerebro automáticamente percibe la variación de profundidad entre los diferentes objetos que se representan en ambas imágenes, creando la sensación de diferencias de alturas. Al mismo tiempo, el cerebro también determina qué objetos están más cerca y cuáles más lejanos (ERDAS, 2009).

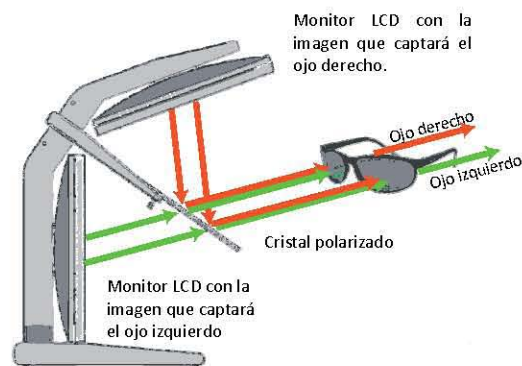
Cuando el cerebro percibe estas dos imágenes como una sola en 3D se dice que se ha creado un estéreo-modelo. Este modo de percibir permite una visión constante en 3D (ERDAS, 2009). La paralaje es el aparente cambio en la posición relativa causada por el cambio de punto de vista del observador. Obteniendo la paralaje se puede calcular la altura de los objetos en la imagen. En las imágenes de satélite este procedimiento lo calcula el software que se utiliza para construir el modelo 3D, pero también se puede ajustar la paralaje manualmente tanto en ERDAS Imagine® como en ARCGIS®, esto para que al momento de ampliar el tamaño de la vista de la imagen en el monitor del usuario (al hacer *zoom*), éste pueda seguir observando un ambiente 3D.

En estos principios también están basados los estereoscopios convencionales de espejos. En dónde dos imágenes (generalmente fotografías aéreas) son colocadas sobre la mesa de trabajo y se reflejan en los espejos laterales del aparato, este reflejo es el que ven los ojos del usuario por medio de lentes de aumento u otra serie de espejos más pequeños.

En el caso de las imágenes satelitales de muy alta resolución de algunos sensores como GeoEye1 o Spot5 el sensor tiene la capacidad de rotar y de este modo registrar dos imágenes de la superficie terrestre desde dos ángulos diferentes. Para poder ver estas imágenes en modo 3D se deben colocar en un software especializado y un estereoscopio digital.

Hay varios tipos de estereoscopios digitales, el más sencillo recurre al sistema de anáglifo, en donde dos imágenes de color (generalmente azul y rojo) se superponen de manera que casi coincidan. Esa pequeña diferencia en su coincidencia es la que genera la sensación de profundidad. Su principal desventaja es que se pierde el color original de la imagen y resultan fatigantes luego de varios minutos (ERDAS, 2009). El sistema utilizado en este trabajo fue EstereoMirror que consiste en dos monitores, uno arriba del otro a 110° de distancia angular, cuyas imágenes se interceptan en un cristal polarizado que está colocado en medio de los dos monitores, bisecando el ángulo de 110° . La imagen del monitor inferior pasa a través de la parte inferior del cristal a 0° y la imagen del monitor superior se refleja en la parte superior del cristal a 90° . El cristal tiene una cubierta reflejante en su parte superior y una cubierta anti reflejante en la parte inferior, eso evita que haya doble reflectancia y se tengan más de dos imágenes (ver figura 2.5). El usuario utiliza un par de lentes polarizadas que hacen que éste solo vea con su ojo derecho una de las imágenes que se conjuntan en el cristal, en este caso la imagen del monitor inferior, y con su ojo izquierdo la imagen del monitor superior. Esto hace que el cerebro lea las dos imágenes simultáneamente y las interprete como una sola lográndose así la estereopsis (Planar, 2008).

Figura 2.5. Sistema Planar StereoMirror. (Fuente: PLANAR, 2008.)



Dentro del ambiente 3D el usuario puede comenzar la identificación de PRM. El módulo Stereo Analyst permite trabajar en el ambiente de capas que caracteriza al software ArcGis, por lo tanto, directamente desde la vista 3D se pueden trazar vectores (shp) de puntos, líneas o polígonos como en el ambiente 2D del software, con el agregado de que en el caso del ambiente 3D el usuario utiliza un cursor flotante. Básicamente, el cursor flotante permite trazar una forma dentro de un ambiente con coordenadas X, Y y Z o 3D. Las formas se trazan tomando en cuenta estas tres dimensiones, para controlar el trazo en el eje de las Z, se utiliza el botón central rotativo del mouse.

La información referente a la geomorfología de los PRM obtenida en el ambiente 3D se almacena directamente en una cobertura de capa vectorial (shp), lo que reduce los tiempos de adquisición y elimina los errores asociados a la digitalización manual en estereoscopios convencionales (Galli, *et al.*, 2008). Sin embargo, para identificar los PRM en el estereoscopio digital StereoMirror, se utilizan los mismos criterios adoptados para la identificación geomorfológica que en los métodos tradicionales, en ese sentido el proceso no cambia. La imagen 2.6 muestra una superposición de una de las imágenes sobre un MDT de muy alta resolución con los polígonos generados para los PRM identificados en el inventario.

Figura 2.6. Los vectores ya trazados sobre la imagen y un MDT. Los polígonos de los PRM se representan con líneas rojas.



Identificación

En la literatura del tema, gran parte de los intentos de detectar y cartografiar PRM en fotografías aéreas o imágenes de satélite consiste en la identificación del escarpe que es generalmente el atributo morfológico más fácilmente reconocible en estas herramientas, especialmente porque hace evidente un cambio en la cobertura de suelo que se está observando. La posibilidad de identificar este atributo morfológico depende de la resolución espacial de las imágenes o fotografías con las que se esté trabajando (Fiorucci, *et al.*, 2011).

Cuando un PRM ocurre, cambia la superficie topográfica dejando una firma distintiva, la magnitud de estos cambios dependerá de la tipología del PRM y su magnitud (Pike, 1988). Para identificar PRM en las diversas imágenes de satélite de muy alta resolución con las que se contó, se tomaron en cuenta los siguientes criterios de acuerdo a Fiorucci, *et al.*, 2011:

- **Forma.** Se refiere a la configuración de los objetos, delimitando su contorno, sus límites de extensión. Debido a que con la fotografía puede analizarse con pares estereoscópicos, la forma puede analizarse en tres dimensiones (Lillesand, *et al.*, 1994). Este elemento resulta fundamental para diferenciar los PRM de otro tipo de fenómenos u objetos como la erosión o las zonas desprovistas de vegetación por el ser humano.
- **Tamaño.** Este elemento está vinculado con la escala (Lillesand, *et al.*, 1994). La magnitud de los PRM está directamente relacionada con este elemento y además con la resolución espacial de las imágenes de satélite. Los PRM de mayor área de afectación pueden tener miles de metros cuadrados y los PRM más pequeños apenas unos pocos metros. De ahí que la importancia de la resolución espacial de las imágenes de satélite. En el caso de este proyecto, la resolución espacial de las imágenes GeoEye1 permitió generar un mapa a escala 1:10 000, pero incluso esta escala puede ser superada si así se requiriera.

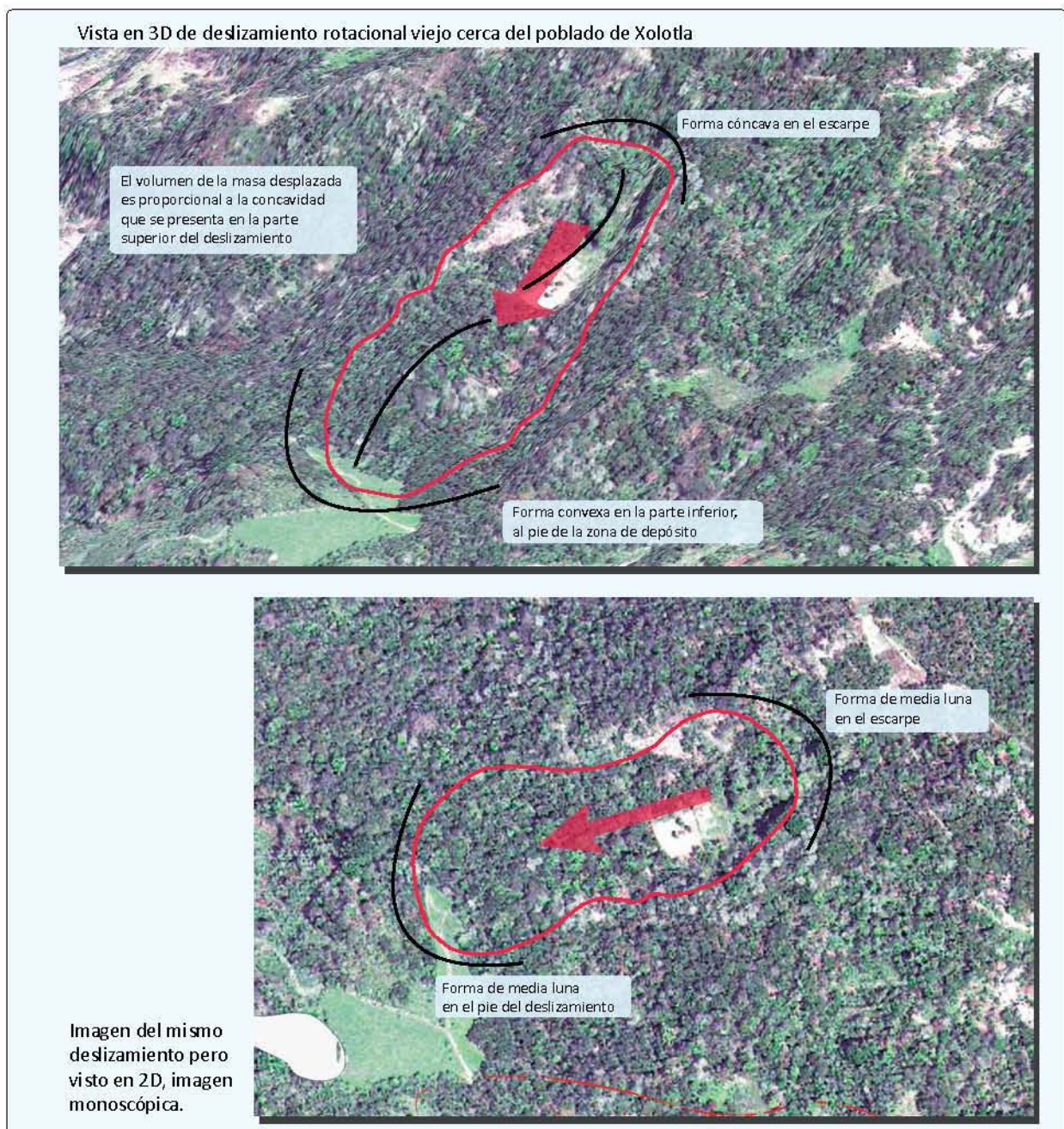
- Tono. Es el brillo relativo o el color que los objetos presentan en la fotografía. Lillesand, et. al. (1994) señalan que mucho brillo indica, de forma general, una mayor altitud (los objetos están más cerca del objetivo de la cámara) o ausencia de humedad. Poco brillo menor altitud o menos grado de humedad en el suelo. En el caso de los PRM el tono está directamente relacionado con el tiempo que ha pasado desde su ocurrencia, esto se afirma porque, por lo general, los PRM están asociados con las precipitaciones pluviales, el material de una ladera se hace más susceptible a caer cuando guarda humedad. Referente a esto, un PRM ocurrido hace pocos días dejará ver un suelo húmedo en su cicatriz. Esto último es relativo pues también la composición química del suelo juega un papel fundamental en el tono que adquirirá la cicatriz de un PRM.
- Textura. Es la frecuencia de los cambios de tono en la imagen, a mayor escala la textura se hace más fina y así a la inversa (Lillesand, *et al.*, 1994). La textura sirve para identificar de forma más veraz el tipo de PRM.
- Patrón. Es el arreglo espacial de los objetos (Lillesand, *et al.*, 1994). En el caso de los PRM su distribución depende del relieve, de la litología y tipo de suelo. Existen otros factores que influyen en ello como el acomodo y la cohesión de los materiales que componen una ladera etc. De esta forma, determinar el patrón en las imágenes de satélite servirá para establecer relaciones con la susceptibilidad.
- Sombras. Le da perfil a los objetos. Las sombras son importantes para poder identificar objetos en las imágenes de satélite, pero también pueden hacer su identificación confusa (Lillesand, *et al.*, 1994). Las sombras de los arboles adyacentes o construcciones puede hacer complicado establecer el área de afectación. Más grave es cuando la sombra de una nube oscurece una porción de la imagen haciendo casi imposible la detección de PRM o de cualquier otra cobertura en la imagen.
- Topografía. Se refiere a la representación de la superficie terrestre (Lugo, 1989). Para el caso de los PRM es fundamental pues estos suelen ocurrir en laderas de montañas, valles o colinas.
- Ambiente (clima, vegetación, geología, uso de suelo). Se refiere a las características físicas de un lugar. Cuando el especialista que identifica los PRM sobre imágenes de satélite conoce el ambiente en el que está trabajando puede discriminar o corroborar posibles PRM o relacionar estos elementos con las causas de los PRM. Esta última característica se relaciona directamente con las asociaciones, es decir, los objetos en el espacio no están aislados, su localización y demás elementos tienen un porque específico y las relaciones que existen son las que deben descubrirse.

Si bien todos los criterios mencionados arriba son útiles, la forma es el criterio fundamental que permite la identificación y de clasificación de los PRM (Ardizzone, *et al.*, 2011). Sin la intención de establecer una receta para la identificación de deslizamientos, es fundamental buscar el escarpe, que generalmente presenta una forma de media luna si se mira en dos dimensiones y una forma cóncava si se observa en un ambiente 3D. Por su parte el depósito presenta también una forma de media luna en la dirección contraria a la del escarpe en un ambiente 2D pero una forma

convexa en un ambiente 3D. Ambas formas deben ser proporcionales, es decir, la magnitud del depósito debe ser similar al área expuesta del escarpe, de lo contrario es posible que no se trate realmente de un deslizamiento (ver figura 2.7).

En el caso de la identificación de los PRM recientes el color, la textura y el patrón ayudan a identificar zonas de discontinuidad de la cobertura original de suelo, por lo que en este tipo de PRM pueden ser identificados a través de métodos visuales o automáticos. Por ejemplo, un escarpe dónde el suelo queda expuesto en un ambiente agrícola o de vegetación densa puede ser identificado por el cambio de color (figura 2.8). Usando este mismo principio, utilizando un software especializado en análisis de imágenes de satélite, se puede detectar por medio de una clasifica-

Figura 2.7. Identificación de PRM en las imágenes GeoEye1.



ción de los píxeles de la imagen la firma espectral que es propia de los PRM. Este último método tiene la desventaja de que otras coberturas como las zonas de erosión o los ambientes urbanos tienen firmas muy similares a las que tienen los PRM recientes y por lo tanto, estas coberturas pueden ser confundidas por el software y ser falsamente clasificadas como PRM. En el caso de este trabajo las imágenes GeoEye1 no fueron sometidas a este tipo de procesos pues al tener un cierto grado de pre-procesamiento, los Números Digitales ya no son los originales (los valores han sido interpolados), para este tipo de procesos automáticos y semiautomáticos se recomienda siempre el uso de las imágenes crudas o en RAW.

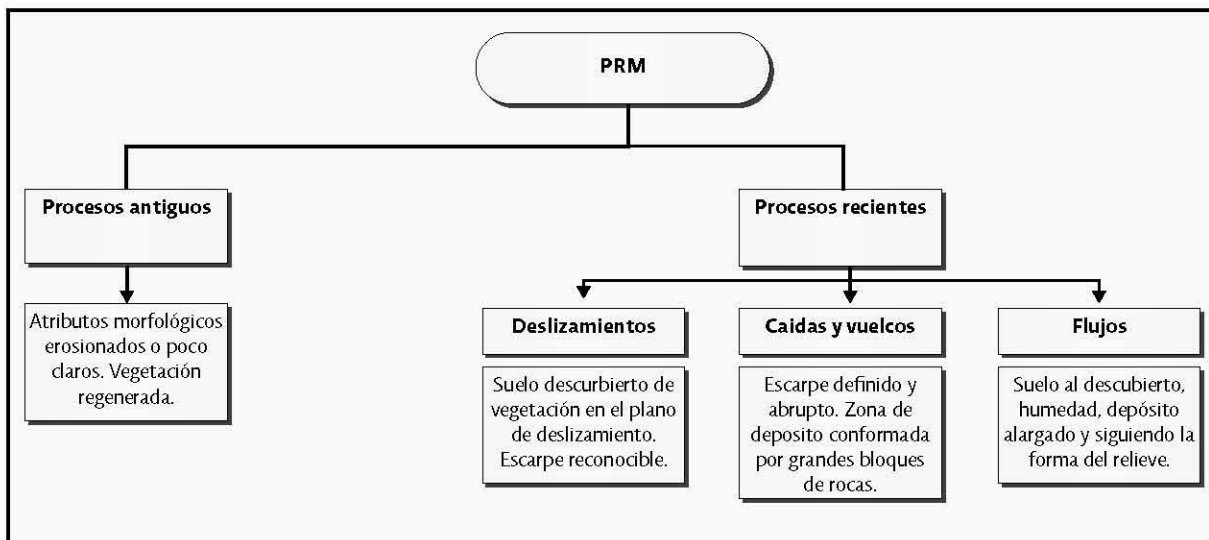
Figura 2.8. Identificación de PRM en las imágenes GeoEye1.



El tipo, altura y densidad de la vegetación y los cambios estacionales que esta pueda tener en un año, afectan la viabilidad de identificar PRM, ya sea en el campo o en las imágenes de satélite (Rib y Liang, 1978). Donde la vegetación crece muy rápido, como es el caso de la zona de Pahuatlán, la firma espectral de los PRM se oculta, esto puede ocurrir en periodos muy cortos de tiempo, un mes o dos son suficientes en Pahuatlán para que luego de ocurrido un PRM esté presente vegetación en su superficie. De la misma forma en que la vegetación natural puede ocultar la firma de un PRM también lo puede hacer la actividad agrícola (Fiorucci, et. al. 2011).

La identificación de PRM superficiales raramente puede realizarse si ha pasado el tiempo necesario para que la erosión o las actividades humanas eliminen la cicatriz de estos PRM (Ardizzone, et al., 2011). La identificación de PRM profundos puede llevarse a cabo con interpretación geomorfológica siguiendo los criterios que ya se han indicado, pero se dificulta en terrenos forestales y espacios urbanos (Guzzetti et al., 2012). La figura 2.9 muestra un esquema dónde se resumen de manera puntual que características se buscan en las imágenes para poder identificar PRM.

Figura. 2.9. Atributos que se buscan para identificar PRM de distintos tipo.



Ventajas del uso de imágenes de satélite de muy alta resolución

El área de cobertura que cubre una sola imagen de satélite es mayor al área que cubre una fotografía aérea de escala grande (22.4 X 28 km de la imagen de satélite contra 6.5 X 6.5 km de una fotografía aérea en el caso de GeoEye1). Esto facilita la cartografía de PRM a escala regional (Fiorucci, et al., 2011). El municipio de Pahuatlán tiene 80km² de extensión, eso significa que harían falta cerca de 20 fotografías para cubrir todo el municipio a escala 1:20 000, que es la escala más adecuada para el estudio de los PRM. Tal cálculo no toma en cuenta el porcentaje de sobreposición de las fotografías.

La resolución espacial de las imágenes de satélite de muy alta resolución es adecuada para la interpretación visual e identificación de PRM y es ideal para la construcción de mapas de inventario con mucho detalle, por ejemplo escala 1:10 000, lo que significa que 1 mm en el mapa corresponde a 10 m de la realidad (Fiorucci, et al., 2011).

Es necesario señalar que las imágenes pancromáticas de las imágenes de satélite, son mejores para el propósito de esta investigación, debido a que tienen mayor resolución espacial y espectral (Fiorucci, *et al.*, 2011). Pero incluso, esta limitante con las imágenes multiespectrales puede subsanarse con la aplicación de la técnica de pan-sharped, proceso automático que permite fusionar las imágenes multiespectrales con la imagen pancromática manteniendo la resolución espacial de esta última.

2.4 Visitas a campo y revisión de archivos históricos

Archivos históricos

En lo referente a los archivos históricos el trabajo fue infructuoso y dio pocos resultados debido a la falta de referencias precisas en los pocos documentos que se encontraron. En primer lugar, a partir de la búsqueda en internet, se encontraron varias notas de periódico que hablaban de manera general sobre lo ocurrido en 1999 en la región de la sierra Norte de Puebla, pero había muy pocas referencias a Pahuatlán. También había varias noticias a partir del año 2007 sobre el deslizamiento de la calle cinco de Mayo; así, se pudo establecer una cronología del deslizamiento, el movimiento apareció por primera vez en 1947 (Castillo Román, J. y Nolasco Valencia, J.V., 2008), en el año 2007 fue realizado un estudio para estabilizar la ladera por gente de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). En los años siguientes, se construyó un talud de 40 m y además se instaló un sistema de 1500 m de drenes y canaletas para reducir los niveles de humedad del subsuelo. Además se construyó más abajo un gavión construido con material suelto sostenido por una malla ciclónica (ver figura 2.10), en el fondo el gavión posee un pequeño desagüe que los especialistas de la BUAP consideran peligroso por ser muy pequeño, el gavión no se sabe quién lo recomendó. Hay alrededor de un centenar de notas al respecto de este deslizamiento, la reubicación de los centros de salud del municipio y la escuela primaria Leandro Valle. Si bien esta información es valiosa y permite conocer mejor tres procesos de remoción en masa en específico (el de la calle Cinco de Mayo, el que afectó a la escuela primaria y el que afectó al nuevo hospital), no hay más material en este medio, el internet, que haga referencia a otros procesos de remoción en masa.

Las notas periodísticas consultadas en la Hemeroteca Nacional, no arrojaron mejores resultados. En primer lugar, no hay un periódico municipal o local en la zona. En los periódicos estatales y nacionales, solo se hacen referencias generales hacia la región de la Sierra Norte de Puebla sin dar mayores detalles. El periódico El Sol de Puebla, habla en tres notas sobre lo ocurrido en Pahuatlán a finales del mes de septiembre y principios de octubre del año de 1955. Destaca que en ese año, debido a las intensas lluvias ocasionadas por el huracán Janet, se contaron 17 derrumbes (sic.) en la carretera Honey-Pahuatlán y 63 PRM en la carretera de Pahuatlán a La Ceiba, pero la nota no indica el lugar de ninguno de estos PRM. También da cuenta de que un barrio entero desapareció, el barrio se llamaba Almocate, pero ninguno de los pobladores actuales conocía el lugar. Del mismo modo, se reportan muertos en las localidades de Ahila y Mamiquetla por PRM pero de igual forma no se dan más detalles que permitan su localización exacta o al menos aproximada.

Debido a la falta de información hemerográfica, se decidió platicar con los pobladores, en especial el maestro Enrique Franco y el maestro Raúl López, quienes recordaban lo ocurrido en el paso por el huracán Janet en 1955. Por ellos se pudo recopilar información respecto a dos posibles PRM

Figura. 2.10. Gavión del deslizamiento de la calle Cinco de Mayo.



ocurridos en aquel suceso. Lo que pasó en el centro del pueblo todos los recuerdan como inundación, sin embargo, debido al declive en el que está localizado el pueblo una inundación de esas dimensiones no parece posible. Por otro lado, sus relatos informan que el material que sepultó las casas se componía de lodo y rocas, situación que se constata en las fotografías, y que el ascenso de esa masa en el centro del pueblo fue súbito (ver figuras 2.11 y 2.12). Cuentan que eran alrededor de las diez de la noche y la lluvia era muy intensa, al sur del centro del poblado había un pequeño arroyo que la mayor parte del año estaba seco, hoy en día una calle ocupa su lugar, en ese día de 1955 (el día exacto debe ubicarse entre la noche del 29 de septiembre y la madrugada del 30 de septiembre) el arroyo comenzó a desbordarse y el agua empezó a meterse a las casas. La altura del agua era poca, no sobrepasaba los tobillos de una persona adulta, de hecho cuentan que la situación no preocupó a los hombres que jugaban billar y dominó en un establecimiento destinado para ello en la calle 2 de Abril, que fue la más afectada. Pasada la media noche fue cuando llegó el lodo y de manera súbita ocupó gran parte de la calle 2 de Abril y siguió bajando por las calles aledañas hasta la calle Cinco de Mayo. Fue entonces que el resto de la gente del pueblo se aprestó a auxiliar a los que habían quedado atrapados en la masa de lodo. Algunas referencias indican que no murió nadie, otros dicen que sólo murió una persona ya anciana, el resto de las personas salvaron la vida. Las fotografías que tomó el maestro Raúl López dan cuenta de la magnitud del evento, sin embargo gran parte de su archivo podría perderse pues no se ha digitalizado.

Interpretando aventuradamente las referencias del hecho todo parece indicar que se trató de un flujo de lodo de mediana intensidad que tuvo su origen no muy lejos de la calle 2 de Abril pues no tuvo la fuerza para dañar las construcciones de Pahuatlán que quedaron únicamente llenas de lodo y pequeñas rocas. Otra posibilidad puede ser que el cauce del arroyo se haya obstruido aguas arriba por algún PRM o por la acumulación de escombros que llevaba la corriente, y que luego con el tiempo el agua haya derribado aquel dique y se haya precipitado con todo y escombros hacia abajo, sin embargo, las referencias indican que el nivel del agua nunca descendió por lo que esta posibilidad pierde fuerza.

Figura. 2.11. Labores de limpieza en la calle Dos de Abril, se observa el tipo de material que bajó por la ladera e ingresó a las casas. (Fuente: Archivo de Raúl López).



Por referencia de otros pobladores se supo de un PRM ocurrido en el mismo evento pero hacía el norte del poblado, en aquel entonces esa zona estaba deshabitada y las personas que vivían cerca recuerdan el estruendo. Con la luz de día fueron a ver qué era lo que había pasado y vieron grandes rocas y escombros que habían caído desde la parte superior del cerro de Ahila. El depósito de ese PRM aún puede observarse. Es probable que parte de los escombros de ese mismo PRM se hayan precipitado al centro del poblado, pero la naturaleza de los depósitos es distinta lo cual diluye tal posibilidad: en el movimiento al norte del pueblo, destacan rocas masivas de grandes dimensiones, posiblemente pertenecientes al paquete volcánico piroclástico terciario que compone la parte superior del cerro de Ahila; en cambio, en las fotografías de Raúl López de las labores de limpieza del centro del pueblo, las rocas se observan apenas como pequeños bolos en color claro en una matriz arenosa con agua.

En lo que respecta al evento de 1999 la gente recuerda los PRM ocurridos en la zona de Cuenautla de la Paz, pero esa porción del municipio quedó fuera de la zona de estudio, por lo que no se describe.

Las referencias mencionadas reportan muy pocos PRM, aquellos que la gente recuerda por la magnitud de su afectación, es de esperarse que otros cientos de PRM hayan sido simplemente olvidados por su poca magnitud e importancia para la población. Por ejemplo, se tienen numerosas fuentes de distintos años que señalan que el camino de Honey a Pahuatlán presentaba

Figura. 2.12. La oficina de correos en la calle Dos de Abril, la mancha negra en la pared indica el nivel alcanzado por el lodo. (Fuente: Archivo de Raúl López).



numerosos “derrumbes”, pero no hay detalles sobre dónde y cuándo ocurrieron esos derrumbes, por lo tanto no pueden ser inventariados. En conclusión, la revisión de archivos históricos debe realizarse de manera más sistemática y profunda para ver si se pueden encontrar mayores referencias. Sin embargo, es muy probable que la información de cientos, y quizás miles, de PRM en la zona de estudio se haya perdido totalmente debido a la falta de registros y fuentes precisas.

Visitas a campo

El trabajo de campo en la elaboración de un mapa de inventario de PRM consiste en:

- Identificar y mapear PRM individuales o por grupos.
- Obtener información general y específica del tipo y características de los PRM.
- Validar los datos del inventario cuando este ya está construido (corroboración).

En el caso de este trabajo se realizaron nueve visitas a campo, en éstas se mapearon algunos PRM ocurridos en la temporada de lluvias 2011 y 2012, además se platicó con algunos pobladores para conocer sus experiencias en los eventos de 1955 (huracán Janet) y 1999. También se visitaron las zonas que actualmente presentan inestabilidad como la calle Cinco de mayo, la Escuela Leandro Valle y la nueva carretera que va de Xolotla hacia Naupan. En un principio los recorridos se hicieron aleatoriamente para reconocer la zona de estudio, posteriormente los recorridos se sistematizaron. En las visitas a campo no solo se identificaron nuevos PRM sino que se corroboró la información de los PRM identificados por percepción remota.

La metodología para lograr el reconocimiento en campo de los PRM, ocurridos principalmente en el año 2012, consistió primero en fotografiar todas las laderas que componían el área de estudio. Posteriormente, estas imágenes se analizaban en la computadora de manera visual en busca de firmas espectrales que pudiesen indicar la presencia de PRM. Cuando se localizaba una cicatriz de PRM se registraba para posteriormente hacer la medición de sus dimensiones en campo. El área de estudio fue recorrida de diversas formas. Primero en automóvil, pero este medio de transporte resulto poco práctico para poder acceder a todos los lugares del área de estudio, el recorrido a pie resultaba por su parte demasiado lento. Por ello, para poder inventariar los PRM localizados en las fotografías y acceder a ellos se optó por utilizar bicicletas de montaña. Cuando se lograba identificar un PRM en campo, se tomaban sus coordenadas centrales, luego las coordenadas de sus flancos y finalmente las coordenadas del límite de la zona de depósito y la corona. Todas estas mediciones, realizadas con un GPS ©GarminDakota, no pudieron ser realizadas para todos los PRM ya que para tomar los puntos con el GPS, se requería recorrer el área afectada por el PRM y en ocasiones esto era peligroso o simplemente imposible sin equipo especial. Por ello, a cada PRM identificado se le tomaban fotografías desde diversos puntos para poder tener la mayor cantidad de referencias al momento de trazar su forma en el SIG, en este caso Quantum GIS 1.7.4. (Quantum GIS Development Team, 2013). Al menos unos seis PRM identificados en campo no pudieron ser medidos con GPS pues acceder a ellos no era posible ya que, o se encontraban en propiedad privada o en lugares sumamente inaccesibles; en estos casos se decidió trazar la forma de los PRM únicamente tomando como referencia las fotografías que se les pudieron tomar.

En total, en las visitas a campo se recorrieron 144 km y se identificaron un total de 43 nuevos PRM. Las siguientes fotografías muestran algunos de los PRM identificados en campo.

Figura. 2.13. Deslizamiento rotacional en la carretera de Pahuatlán a Xochimilco.



Figura. 2.14. Deslizamiento en la carretera de Xolotla a Mamiquetla ocurrido en 2012.



Figuras 2.15 y 2.16. Izquierda, muro de contención construido luego de un deslizamiento sobre la carretera de Honey-Pahuatlán. A la derecha, caída de material en la carretera de Pahuatlán a San Pablito.



Figura. 2.17. Serie de flujos de detritos cercanos al poblado de Xilepa.



Figuras 2.18 y 2.19. Izquierda, deslizamiento translacional en el poblado de Paciotla. Derecha, deslizamiento de suelo en el valle del río San Marcos.



2.5 Construcción del mapa de inventario de PRM de Pahuatlán

Con la identificación de PRM por medio del sistema Stereo-Mirror y el software StereoAnalyst la información de los PRM es mostrada en una combinación de puntos, líneas y polígonos. En un SIG, los diferentes elementos geométricos constituyen el inventario, y a esas formas se les pueden relacionar diferentes atributos a través de una base de datos para describir todas las características posibles de un PRM. Por medio del mismo SIG se pueden calcular el área de cada PRM, bondad primordial para la estimación de la magnitud.

En el caso de este trabajo se realizó dicho inventario y se ligó a una base de datos obtenida por medio de cálculos en el SIG y fotointerpretación de cada una de las formas que representan los PRM. Se marcó para cada PRM, su zona de escarpe y la zona de depósito.

Registro y estructura de la base de datos del inventario

La base de datos del inventario de Pahuatlán comprende ocho categorías: información general, hidrología, geología, edafología, geomorfología, causas, riesgo y otros detalles. Cada categoría contiene sus respectivos campos y variables, algunos de los cuales se estandarizaron a la simple opción “sí o no”, en tanto que otros se dejaron abiertos, dependiendo de las circunstancias particulares (Figura 2.20). Esta estructura está basada en la presentada por Alcántara y Murillo, 2008, con algunas mejoras y actualizaciones.

Información general

La primera categoría se refiere a las características o información general. De manera inicial se le asigna un número de registro a cada proceso de remoción en masa, así como un nombre. Con referencia a la localización puntual del movimiento, ésta se expresa mediante coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) y geográficas. Para ambas situaciones existe una celda de latitud y una de longitud. En el caso de las coordenadas UTM el registro es en metros (numérico) y en el caso de las coordenadas geográficas, el dato se ingresa como grados, minutos y segundos, distinguiendo cada uno con los símbolos convencionales (°, ‘ y “). En este sentido el registro es alfanumérico. El registro de altitud debe corresponder al punto que se determinó con las coordenadas geográficas y UTM que es el centroide del polígono del área del PRM. El dato debe ingresarse como metros sobre el nivel del mar.

En el ámbito de la temporalidad se consideró específicamente la fecha de actividad o activación. Se considera como mínima información a registrar el año de ocurrencia. De manera general, para los procesos de ladera antiguos, este dato es prácticamente inexistente, a menos que se cuente con estudios de datación como el carbono14 o la dendrocronología; en consecuencia, es un dato casi exclusivo de los movimientos recientes.

En relación con el estado de actividad, y de acuerdo con el WP/MLI (1993) tomado de Alcántara (2000), un movimiento de ladera puede ser activo o inactivo. Se incorpora también de manera complementaria la variable de fecha de observación; ésta se refiere al día en que se observó el deslizamiento, ya sea en campo o por sensor remoto para efectos de su registro en el inventario.

Para la edad del proceso, las variables se estandarizaron como “reciente”, “antiguo” y “relicto” o “indefinido”. La primera se refiere a movimientos que como ya se ha dicho, aparecen frescos en las imágenes, en tanto “antiguo” se referirá a PRM anteriores al desastre de 1999. Relicto implica un movimiento que no muestra signo de actividad y/o su edad se estima en cientos de años, además son de un área muy grande y en su interior han ocurrido PRM más recientes. Debido a la complejidad que puede existir para determinar cuándo un proceso deja de ser reciente para ser antiguo o relicto, se incluye el campo “indefinido”.

El área afectada de un proceso de remoción en masa es la extensión espacial del movimiento. Se ingresa como valor numérico en unidad de área (m^2) y el valor puede ser calculado con un SIG. El campo relativo al fenómeno detonante se refiere al evento que ocasionó que el movimiento ocurriera; éste puede ser un sismo, actividad volcánica o un evento hidrometeorológico (Alcántara y Murillo, 2008). Estos eventos también reciben el nombre de “factores desencadenantes” y se diferencian de las causas y los factores determinantes de la inestabilidad (factores geológicos, estructurales, topográficos) debido a que son momentáneos (Alcántara y Echevarría, 2001). De esta forma el campo debe ser llenado con el nombre del evento asociado como por ejemplo “sismo Puebla 1999” o “temporada de lluvias 2007”.

La tipología del movimiento está incluida como un campo numérico con base en la clasificación de Varnes y Hutchinson utilizada para el programa europeo EPOCH (Dikau *et al.*, 1996). De esta forma en la base de datos electrónica del inventario se tienen los siguientes códigos:

- 1 = caída
- 2 = vuelco
- 3 = deslizamiento rotacional
- 4 = deslizamiento translacional
- 5 = flujo
- 6 = movimiento complejo

El tipo de material involucrado también se jerarquiza de acuerdo con la clasificación ya mencionada, las variables son:

- 1 = rocas
- 2 = detritos
- 3 = suelo
- 4 = varios

Este campo puede dar una idea aproximada de la profundidad del proceso de remoción en masa, sin embargo, se decidió incluir un campo específico para la profundidad del PRM con las opciones: profundo o superficial.

El volumen del material involucrado puede calcularse de manera aproximada a simple vista, pero también puede obtenerse a partir de mediciones muy exactas si se conoce la forma de la superficie original del terreno (Alcántara y Murillo, 2008), por ello se dejó abierto el campo a un registro numérico en metros cúbicos.

Una aportación al esquema original del inventario es la incorporación de un campo para la velocidad de movimiento con los siguientes códigos:

- 1 = extremadamente rápido
- 2 = muy rápido
- 3 = rápido
- 4 = moderado
- 5 = lento
- 6 = muy lento

Hidrología

La segunda categoría contiene las variables relacionadas con el aspecto hidrológico, el cual está ligado estrechamente a la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Las características hidrológicas de un sitio influyen en la ocurrencia de movimientos de ladera debido a que cuando un suelo se satura, la presión en los poros aumenta creando condiciones de inestabilidad en el material (Alcántara y Murillo, 2008). El tipo de drenaje se clasificó en natural, artificial, mixto e indefinido. El régimen de precipitación en la zona se refiere a la cantidad de lluvia que cae en un año, el dato es en milímetros anuales (numérico) y se toma de la estación meteorológica de Pahuatlán instalada en 2007.

Geología

Se incluyen dos campos para la litología; uno para aquella obtenida en campo o in situ y otro para la geología derivada de la cartografía del Sistema Geológico Mexicano. La geología del sitio de un proceso de remoción en masa no sólo es importante por el tipo de roca que está involucrado, sino también por su disposición estratigráfica (bedding en inglés). Si el lecho rocoso subyacente presenta superficies por las que se pueda deslizar el material, se incrementa el potencial de ocurrencia de un movimiento. También los planos de estratificación, las fracturas, diaclasas o esquistosidad, entre otros, pueden influir en la ocurrencia de los PRM. Por lo anterior, en el inventario se incluye el campo de “control estructural”, en el cual una respuesta afirmativa implica que la estratificación o los sistemas de fracturas o diaclasas favorecieron la ocurrencia de un proceso de remoción en masa (Alcántara y Murillo, 2008). Para especificar qué tipo de control estructural influyó, se incluyó también un campo abierto.

Edafología

En éste se incluyen dos campos; uno para las características edafológicas obtenidas en el área de interés, y otro para las derivadas de una carta de suelos u otras fuentes. La categoría de edafología es necesaria en el inventario ya que las propiedades físicas y químicas de un suelo influyen y son factor de gran relevancia en la ocurrencia de PRM (Guimaraes *et al.*, 2003). La granulometría y la composición son importantes debido a que por ejemplo, un suelo con materiales poco consolidados como las arenas, o bien de alta plasticidad como las arcillas, puede ser muy propenso a la inestabilidad de laderas (Alcántara y Murillo, 2008). En este sentido se incluye un campo para anotar el coeficiente de infiltración, así como las propiedades físico-mecánicas.

Vegetación.

Uno de los elementos que tiene una función muy importante en la estabilidad de laderas es la vegetación, ya que principalmente a través del sistema de raíces le da cohesión al suelo (Alcán-

tara y Murillo, 2008). Por ende, en este apartado se incluyen campos indicativos de la presencia y tipo de vegetación antes (original) y después de la ocurrencia de un PRM, el uso del suelo, existencia de deforestación, además de un campo abierto para incorporar observaciones.

Geomorfología.

Esta categoría se refiere a las características generales del terreno en donde se localiza el PRM. Los primeros campos de la categoría se dedican al ángulo de la pendiente (slope en inglés) en cuatro posibilidades distintas. Las dos primeras para ingresar el dato como grados de arco, diferenciando si el dato se obtiene directamente en campo o en gabinete, a través de un modelo digital de elevación, u otro método. Los campos de valor de la pendiente también se diferencian por el origen de los datos y se ingresarán en porcentaje (100% significa una pendiente de 45°). No es necesario ingresar los cuatro campos. El ángulo de la pendiente es un dato esencial en el estudio de los PRM, ya que generalmente, aunque con excepción de ciertos materiales, mientras más inclinada sea la pendiente, mayor es la posibilidad de que la gravedad actúe sobre los materiales y éstos se desplacen ladera abajo (Alcántara y Murillo, 2008).

El siguiente campo se refiere al tipo de pendiente, ya sea natural o artificial. Este último tipo se asocia principalmente a cortes de carretera, la construcción de casas en zonas inclinadas y en canteras o bancos de extracción de material. Debido a la multiplicidad de variables que la realidad puede ofrecer a este respecto, se incluyó un campo alfanumérico abierto para los casos en que la ladera en cuestión no se ajuste a alguna de las dos variables preestablecidas, o en caso de que se requiera mayor especificidad. Conocer el tipo de pendiente es importante al momento de determinar las causas del PRM, ya que en las pendientes artificiales los materiales que conforman la ladera son sometidos a una mayor tensión como respuesta al incremento del ángulo original. Por otro lado, las pendientes artificiales suelen carecer de vegetación natural o inclusive secundaria (Alcántara y Murillo, 2008).

La orientación (aspect en inglés) de un PRM se refiere a la disposición que tiene la ladera donde ocurrió el movimiento. El dato puede ser obtenido en campo o en gabinete de manera indistinta. El campo se presenta abierto, pero las variables deben reducirse solamente a las direcciones estándar de la rosa de los vientos (Norte, Noreste, Este, Sureste, Sur, Suroeste, Oeste y Noroeste). La importancia de la orientación de una ladera radica, entre otras cosas, en la cantidad de luz solar que recibe a lo largo del día. Por ejemplo, una ladera con una orientación norte en México es propensa a recibir menor cantidad de luz solar que una ladera orientada hacia el sur (Gómez-Tagle y Chávez, 2004), por lo tanto, y suponiendo que ambos flancos recibiesen la misma cantidad de agua y estuviesen formados de los mismos materiales, el suelo de la ladera norte debería retener mayor cantidad de agua, lo cual puede ser un factor importante de inestabilidad. En este sentido las interacciones con la densidad de vegetación también se verían involucradas en este tipo de análisis (Alcántara y Murillo, 2008).

El perfil de la pendiente se refiere a la forma de la pendiente donde ocurrió el proceso. De esta manera, las variables se estandarizaron como: convexa, cóncava, recta, compleja, vertical y en corte. También se dejó un campo abierto para ingresar otra variable no contemplada en este inventario, y que sea necesariamente útil en un caso particular. Esta información es necesaria para identificar qué tipo de perfil es más susceptible de presentar PRM en función del material y condiciones geográficas del área en cuestión, así como la tipología de los movimientos.

Causas.

Existe una gran diversidad de causas de los PRM, sin embargo, el documento que sirvió de base para construir esta categoría fue el apartado, que para el mismo fin se incluye en el “National Landslides Databank Codes Table” (Ibsen y Brundsen, 1995), adoptado de una forma más simplificada. La estructura de esta categoría se compone de los procesos naturales y antropogénicos y de los cambios debidos a ellos. En los procesos se incluyen el intemperismo, la erosión natural, la erosión artificial, por cambios en el régimen de precipitación, por vibraciones sísmicas y vibraciones inducidas por el ser humano. Respecto a los cambios resultantes, se dividen en dos: cambios en las propiedades físicas y cambios en la geometría de la ladera, cada uno con sus respectivas variables. Todos los campos son de tipo “sí o no”, con excepción del relacionado con las transformaciones producidas por cambios en el régimen de precipitación, cuyo formato es abierto.

Riesgo potencial y daños.

Primero, se ubica al movimiento en relación con su localización en el ámbito urbano o rural. En el primer caso, ámbito urbano, lo más probable es que el movimiento ponga en riesgo una cantidad considerable de vidas humanas y bienes materiales. A continuación, se cuestiona si a estimación del observador, el proceso de remoción en masa representa un riesgo para la población, ya sea en su integridad física o en la infraestructura o propiedad. Los campos siguientes son para especificar en mayor medida estos últimos aspectos. Se debe aclarar que en lo que respecta a la variable “edificio público”, la mayoría de las escuelas estarían incluidas dentro de ese concepto, pero se estimó que la variable “escuela” debería estar por separado debido a la relevancia que implicaría que un PRM pusiese en riesgo a un edificio de estas características y a sus usuarios. Con la finalidad de tener una idea clara del contexto de la amenaza, se incluye también la posición relativa del núcleo de población expuesto con respecto al proceso de remoción en masa, es decir, si se encuentra ladera arriba, ladera abajo, etc. Del mismo modo se introduce un campo referente a las medidas de control –en caso de existir– que se hayan implementado con el afán de mitigar el riesgo que representan los movimientos existentes. Se incluye asimismo el campo “alteración humana” con la intención de especificar si el movimiento pudo estar relacionado con la actividad antrópica, más que con las consecuencias palpables de la dinámica del relieve. En este mismo apartado se incorporaron campos referentes al impacto ocasionado por movimientos previos: “Daños materiales” y “Pérdida de vidas”.

Otros detalles.

La última categoría del inventario sirve para incorporar datos adicionales tales como la fecha de la visita a campo; si el movimiento fue reportado por Protección Civil; o bien, si existen estudios previos de ese proceso de remoción en particular. En caso de contar con antecedentes de investigaciones específicas, es importante añadir las referencias correspondientes (artículo, tesis o publicación). Además, se agregó para esta nueva versión, un campo que indique el método o técnica de identificación y otro en dónde se indique la herramienta utilizada, tipo de imagen de satélite utilizada por ejemplo.

La base de datos resultante se ligó a cada polígono mediante el SIG ARCGIS© 10, algunos de los datos sirvieron para estimar la susceptibilidad a PRM.

Inventario de Procesos de remoción en masa

ID: <input type="text"/>		
Información general		
	Latitud	Longitud
Coodernadas UTM	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Coodernadas geográficas	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Estado	Municipio	
Edad del movimiento	<input type="checkbox"/> Reciente	<input type="checkbox"/> Viejo
	<input type="checkbox"/> Relicto	<input type="checkbox"/> Indefinido
Grado de actividad	<input type="checkbox"/> Activo <input type="checkbox"/> Inactivo	
Volúmen del material acarreado	<input type="text"/>	
Fecha de observación	Área afectada	
Fenómeno Detonante	<input type="text"/>	
Tipología	<input type="checkbox"/> Caída <input type="checkbox"/> Vuelco <input type="checkbox"/> Deslizamiento translacional <input type="checkbox"/> Flujo <input type="checkbox"/> Deslizamiento rotacional <input type="checkbox"/> Complejo	
Material	<input type="checkbox"/> Rocas <input type="checkbox"/> Detritos <input type="checkbox"/> Suelo <input type="checkbox"/> Varios	
Profundidad	<input type="checkbox"/> Superficial <input type="checkbox"/> Profundo	
Hidrología del sitio		
Tipo de drenaje	<input type="checkbox"/> Drenaje natural <input type="checkbox"/> Drenaje artificial <input type="checkbox"/> Mixto <input type="checkbox"/> Indefinido	
Precipitación media anual	<input type="text"/> mmm/año	
Intensidad de las lluvias	<input type="text"/>	
Periodo de retorno	<input type="text"/>	
Geología		
Litología	<input type="text"/> <input type="checkbox"/> In situ <input type="checkbox"/> carta	
<input type="checkbox"/> Control estructural	Tipo <input type="text"/>	
<input type="checkbox"/> Planos de estratificación	Tipo <input type="text"/>	
Edafología		
Tipo de suelo	<input type="text"/> <input type="checkbox"/> In situ <input type="checkbox"/> carta	
Coeficiente de infiltración	<input type="text"/>	
Características (granulometría, composición química, etc.)	<input type="text"/>	
Propiedades físico-mecánicas	<input type="text"/>	
Uso de suelo y vegetación		
Vegetación original	<input type="text"/>	
Uso de suelo al momento del evento	<input type="text"/>	
<input type="checkbox"/> Deforestación		
Tipo de vegetación presente en la actualidad	<input type="checkbox"/> Ninguna <input type="checkbox"/> Herbacea <input type="checkbox"/> Arbustiva <input type="checkbox"/> Arborea	
Observaciones	<input type="text"/>	
Geomorfología		
Ángulo de la pendiente	<input type="text"/> <input type="checkbox"/> In situ <input type="checkbox"/> MDE	
Valor de la pendiente	<input type="text"/> <input type="checkbox"/> In situ <input type="checkbox"/> MDE	
Perfil de la pendiente	<input type="checkbox"/> Complejo <input type="checkbox"/> Cóncavo <input type="checkbox"/> Vertical <input type="checkbox"/> Convexo <input type="checkbox"/> Recto <input type="checkbox"/> Corte <input type="checkbox"/> Otro <input type="text"/>	
Orientación	<input type="checkbox"/> Natural <input type="checkbox"/> Artificial <input type="checkbox"/> Otro <input type="text"/>	
Causas		
PROCESOS		
<input type="checkbox"/> Intemperismo		
Por erosión natural	<input type="checkbox"/> Por excavaciones <input type="checkbox"/> Actividad minera	
<input type="checkbox"/> Erosión natural no definida		
<input type="checkbox"/> Erosión general en la ladera	Por erosión artificial <input type="checkbox"/> Por excavaciones <input type="checkbox"/> Actividad minera	
<input type="checkbox"/> Erosión basal	Por cambios asociados al régimen de precipitación <input type="checkbox"/> Precipitaciones intensas <input type="checkbox"/> Inundaciones	
<input type="checkbox"/> Subsistencia	<input type="checkbox"/> Drenaje bloqueado <input type="checkbox"/> Cambios en el régimen de precipitación	
Por vibraciones sísmicas	<input type="checkbox"/> Terremoto <input type="checkbox"/> Movimiento de fallas <input type="checkbox"/> Subsistencia	
<input type="checkbox"/> Terremoto	Por cambios asociados a la cubierta vegetal <input type="checkbox"/> Deforestación <input type="checkbox"/> Incendios forestales <input type="checkbox"/> Cambio en el uso de suelo	
<input type="checkbox"/> Movimiento de fallas		
<input type="checkbox"/> Subsistencia		
Por vibraciones inducidas por el ser humano	<input type="checkbox"/> Explosiones <input type="checkbox"/> Maquinaria	
<input type="checkbox"/> Explosiones		
<input type="checkbox"/> Maquinaria		
Riesgo potencial y daños ocasionados		
<input type="checkbox"/> Ubicación en zona urbana	Riesgo en localidad	Posición relativa respecto al riesgo
<input type="checkbox"/> Ubicación rural	<input type="checkbox"/> Varios <input type="checkbox"/> Edificios aislados <input type="checkbox"/> Casas <input type="checkbox"/> Edificios públicos <input type="checkbox"/> Áreas recreativas <input type="checkbox"/> Áreas de acceso público (calles, plazas, etc.) <input type="checkbox"/> Escuelas <input type="checkbox"/> Hospitales	<input type="checkbox"/> Ladera arriba <input type="checkbox"/> Ladera abajo <input type="checkbox"/> En uno de los flancos <input type="checkbox"/> Diversas áreas
Riesgo para la población		Daños ocasionados por el movimiento
Infraestructura en riesgo		<input type="checkbox"/> Daños materiales <input type="checkbox"/> Pérdidas de vidas
<input type="checkbox"/> General		
<input type="checkbox"/> Agua		
<input type="checkbox"/> Gas		
<input type="checkbox"/> Electricidad		
<input type="checkbox"/> Carretera o camino		
<input type="checkbox"/> Vía férrea		
<input type="checkbox"/> Industria		
<input type="checkbox"/> Alteración humana		
<input type="checkbox"/> Existencia de medidas de control	Tipo de medida de control	<input type="text"/>
Otros detalles		
<input type="checkbox"/> Estudios previos	Técnica empleada para su identificación	<input type="checkbox"/> Visita de campo <input type="checkbox"/> Fotointerpretación <input type="checkbox"/> Archivo histórico
<input type="checkbox"/> Reportado por protección civil	Herramientas utilizadas para su identificación	<input type="text"/>
	Referencias	<input type="text"/>
Observaciones	<input type="text"/>	

Figura 2.20. Formato inventario PRM. (Fuente: elaborado con base en Alcántara y Murillo, 2008).

Resultados del inventario

En un SIG, los diferentes elementos geométricos constituyen el inventario. Se ligó cada polígono que representaba un PRM a una base de datos obtenida por medio de cálculos en el SIG e interpretación de las imágenes satelitales de muy alta resolución GeoEye1 y se señaló para cada PRM su zona de escarpe y la zona de depósito. Así, se obtuvo que el porcentaje de área total afectada por PRM en la zona de estudio fue de 31.7% y se identificaron un total de 577 PRM, los cuales se clasificaron de acuerdo a su edad en muy antiguos, antiguos y recientes. El umbral para dicha clasificación comprende, para los muy antiguos, PRM con miles de años de antigüedad, para los PRM antiguos, anteriores a 1994, PRM recientes, ocurridos desde 1994. La tabla 2.6 muestra un resumen de las estadísticas básicas obtenidas en el inventario.

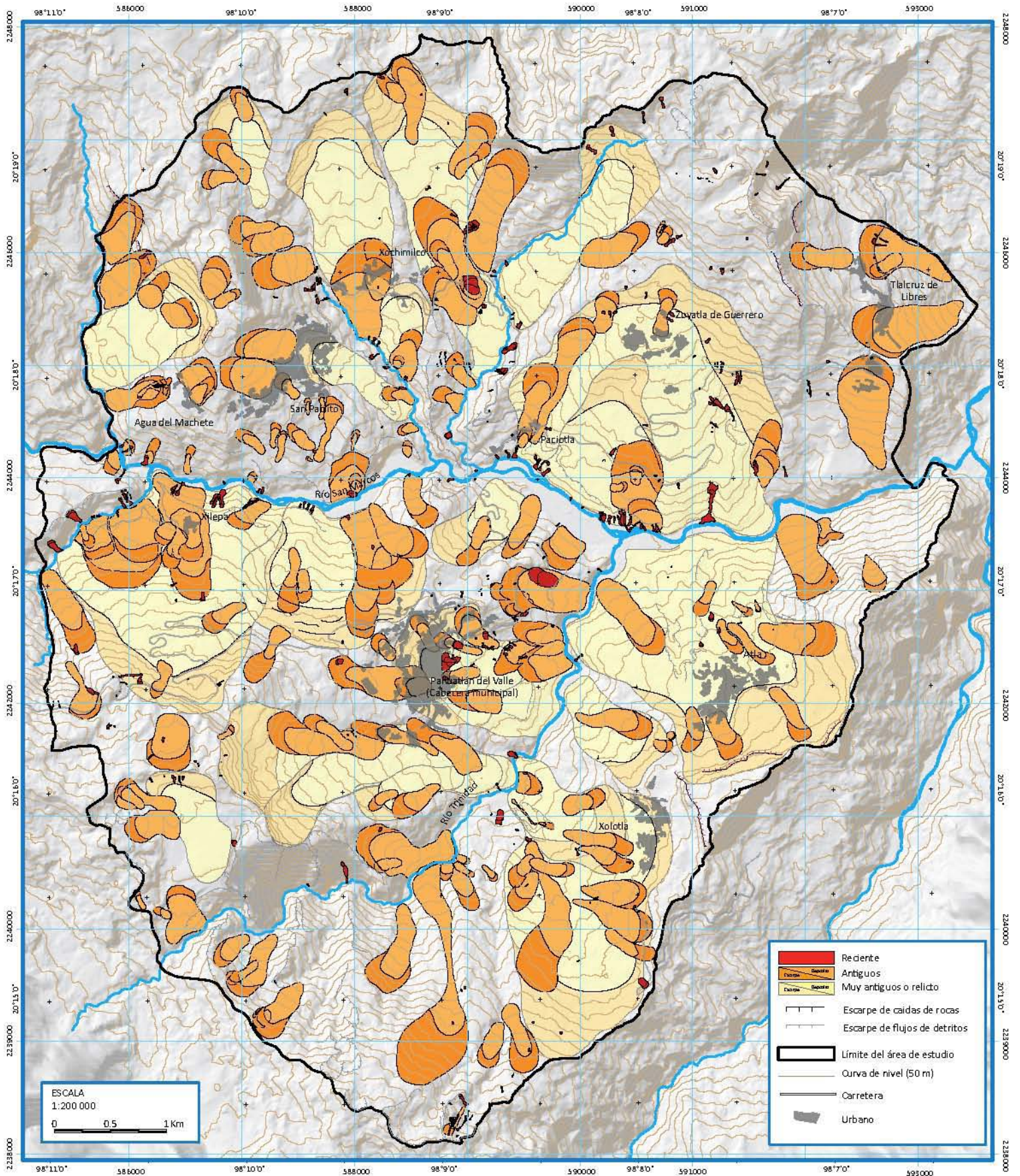
Table 2.6. Estadísticas básicas del inventario.

	Muy antiguos	Antiguos	Recientes	Total
Área total de la zona de estudio (km ²)				54.9
Superficie montañosa (km ²)				53.6
% de superficie montañosa				97.6
Número total de PRM	21	171	385	577
% de PRM	3.6	29.6	66.8	100
Superficie total afectada por PRM (km ²)	27.9	15.1	0.50	43.5
% del área total afectada por PRM	50.8	40.9	0.94	57.7
Densidad de PRM (#PRM/km ²)	0.4	3.1	7.0	10.5
Superficie del PRM más pequeño (m ²)	249132	1764	11.9	11.9
Superficie del PRM más grande (m ²)	4142569	439441	20292	4142569
Superficie media (m ²)	1173952	82559	1066	75466
Dimensión más frecuente esperada de un PRM (m ²)*			341	
Número total de PRM recientes que ocurrieron en superficie de PRM antiguos				141
Porcentaje de PRM recientes que ocurrieron sobre PRM antiguos.				36.6

Un dato importante a resaltar es la persistencia de la ocurrencia de PRM en áreas de antiguos PRM. En el caso de la zona de estudio, un 36% de los PRM recientes ocurrieron sobre unidades de movimientos de ladera antiguos y muy antiguos. Por lo que se infiere que existe una relación entre la ocurrencia de PRM en zonas donde ya habían ocurrido PRM.

Por otra parte, se elaboró una cartografía escala 1:10 0000 que muestra la localización y clasificación en muy antiguos, antiguos y recientes PRM de cada PRM, además se ha señalado para cada unidad su zona de depósito y escarpe, todo esto sobre un mapa base con la litología y algunas características estructurales de la zona de estudio. Una versión de dicho mapa en una escala apta para el formato de esta publicación se muestra en la figura 2.21. Los datos del inventario sirvieron para estimar la susceptibilidad a PRM y también para estimar la vulnerabilidad en la zona de estudio, a discusión futura queda completarlo con más datos para incluir más PRM y acercarse así a un inventario más completo. La mejora y evaluación del inventario queda fuera de los objetivos de esta tesis pero sin duda significa una labor a futuro necesaria de realizarse.

Figura 2.21. Mapa de inventario, versión tamaño carta.



Capítulo 3. Determinación del grado de susceptibilidad a PRM

3.1 Generalidades

Gran parte de los modelos predictivos de amenaza por PRM se reducen al estudio de una sola ladera a través del monitoreo detallado de sus características geotécnicas, investigaciones in-situ que pretenden estimar cuándo y cómo se podría esperar un PRM (Guzzetti, *et al.*, 1999). Este tipo de acercamientos son muy útiles cuando se tienen bien identificadas laderas en las que podría suceder un desastre, pero para estudios a escalas más regionales o nacionales, se deben de proponer otro tipo de técnicas. Partiendo del supuesto de que todo territorio afectado por PRM puede ser dividido en unidades cartográficas que muestren diferentes clases de grado de amenaza (Guzzetti, *et al.*, 1999), se puede establecer el grado de amenaza para toda una región y no solo para una ladera.

Los modelos de grado de amenaza pueden ser cuantitativos (subjetivos) o cualitativos (estimación numérica, probabilidad) y los métodos que pueden emplearse son, de acuerdo a Guzzetti, *et al.*, 1999:

- Mapas geomorfológicos de la amenaza (cualitativo).
- Análisis de inventario de PRM, encontrar patrones de inestabilidad a partir de la distribución pasada y presente de los depósitos de PRM (cualitativo o cuantitativo).
- Análisis heurísticos (cualitativo).
- Aplicación de modelos estadísticos, estableciendo relaciones estadísticas entre una serie de factores de inestabilidad y la distribución pasada y presente de los PRM (cuantitativo).
- Análisis geotécnicos detallados (cuantitativo).

En este trabajo, por la escala a la que se trabaja (56 km² a escala 1:10 000), se ha optado por utilizar un método de aplicación de modelo estadístico ya que de acuerdo a la literatura es un método eficiente a escalas locales y regionales. En ese sentido, los modelos de Análisis Discriminante, Regresión Logística y Análisis de Redes Neuronales son los más socorridos en la literatura (Nueland, 1976; Carrara, 1983; Roth, 1983; Yin and Yan, 1988; Neeley and Rice, 1990; Mark, 1992; Van Westen, 1993; Guzzetti, *et al.*, 1999). Las limitaciones de estos métodos para conseguir un buen mapa de amenaza dependen de:

- Identificar sistemáticamente los depósitos de PRM (un buen inventario de PRM).
- Entender correctamente las causas y fenómenos detonantes.
- Obtener información adecuada y relevante de la geología, geomorfología, hidrología, climatología y de otros factores de inestabilidad.
- Seleccionar el mejor modelo predictivo.
- Tener las herramientas adecuadas para el análisis de datos.
- Seleccionar la mejor unidad cartográfica para subdividir el área de estudio.

Por otra parte, la estimación del peso relativo de cada factor físico en la generación de PRM y la zonificación del área de estudio en grados de amenaza es también un paso crucial (Guzzetti, *et al.*, 1999). Adicionalmente, el papel que juegan cada uno de los factores de inestabilidad cambia de región a región y en algunos casos pueden ser totalmente diferentes (Guzzetti, *et al.*, 1999). Introducir datos equivocados o incompletos a los modelos estadísticos derivara en un mal modelo predictivo, si estos errores son sistemáticos el resultado del modelo será totalmente erróneo (Brabb, 1995). A esto hay que sumar que los procesos ambientales son complejos y están alejados de tener una relación lineal de sus componentes, esto último complica su simulación en un modelo. También, cuando la información tiene un alto grado de generalización la relatividad del resultado aumenta incrementando el grado de incertidumbre, limitando el resultado de certeza del modelo. Por ello, los métodos de estimación del grado de amenaza basados en modelos estadísticos a escala regional pueden estar afectados por errores o supuestos equivocados, generando resultados cuestionables o discutibles que deben ser sometidos a evaluación (Guzzetti, *et al.*, 1999). Lamentablemente, la única forma de realizar una evaluación efectiva de estos modelos es con el tiempo (Hutchinson, 1995).

En el análisis discriminante y la regresión logística los valores cercanos a cero o a uno indican una probabilidad alta o muy baja de amenaza, mientras que los valores cercanos a 0.5 no proveen información adicional o nueva que sea de utilidad (Guzzetti, *et al.*, 1999), prácticamente, este tipo de resultados dejan al investigador en el lugar en dónde comenzó, es decir, la incertidumbre. Es importante establecer que para conocer el grado de amenaza se requieren tres elementos:

- La susceptibilidad. Dónde los PRM pueden ocurrir.
- La frecuencia. Cuándo los PRM pueden ocurrir.
- La magnitud. Qué tan grandes y destructivos pueden ser los PRM.

Este capítulo de la tesis se enfoca en la estimación de la susceptibilidad. Para lograr esto se siguieron los siguientes pasos:

1. Construcción de un DEM de alta resolución (10 m).
2. División del área de estudio en unidades cartográficas.
3. Compilación de los datos geo-espaciales complementarios (geología, uso de suelo, estadísticas morfológicas).
4. Aplicación de los modelos estadísticos.
5. Análisis y cartografía de los resultados.

3.2 Construcción de un Modelo Digital de Elevación (DEM)

Definición

Un DEM de alta resolución (10 m) fue generado a partir del par estereoscópico de las imágenes Geo-Eye1 por medio del modulo LPS del software ERDAS 2010. Un Modelo Digital de Elevación (MDE por sus siglas en español y DEM en inglés) es una representación digital de la topografía de la superficie terrestre o una porción de ésta. Existen varias técnicas para poder generar un DEM, de acuerdo al manual de ERDAS IMAGINE 2011 se pueden mencionar las siguientes:

- Visita y medición en campo. Por medio de estaciones o puntos de control recopilados con un GPS.
- Fotogrametría tradicional. Por medio de pares de fotografías aéreas y estéreo-plotters mecánicos.
- Por medio de estéreo-plotters digitales. Mismo procedimiento que la fotogrametría tradicional pero con instrumentos digitales.
- Digitalización de curvas de nivel de mapas topográficos previos e interpolación.
- Imágenes radar.
- LIDAR o sensores laser.
- Fotogrametría digital. Pares estereoscópicos de imágenes de satélite.

En el caso de este trabajo, al contar con un par de imágenes estereoscópicas se decidió explotar este recurso para la generación del DEM de la zona de estudio.

El DEM fue utilizado para generar la ortorrectificación de otros materiales y cartografía que fueron usados en este proyecto, además de crear un modelo sombreado y las curvas de nivel del mapa topográfico base que sirvió de soporte a los demás mapas temáticos. Pero sin duda, su uso más importante derivó en la subdivisión de la zona en unidades de ladera y en la generación de variables de relieve para los modelos estadísticos de susceptibilidad.

Construcción del modelo

El módulo LPS© Automatic Terrain Extraction (ATE) es uno de los principales componentes de LPS. Para poder generar el DEM el LPS ATE requiere un archivo de bloque de un par estereoscópico como el que se utilizó para la generación del modelo digital 3D estereoscópico. La información del sensor (en este caso los metadatos y los Rational Function Coefficients (RCP) de las imágenes GeoEye1) es computada por el software por medio de un algoritmo. Este algoritmo compara las dos imágenes y busca patrones similares de radiancia (ND) en la sobreposición que de estas imágenes se hace. Posteriormente se computan las posiciones tridimensionales de cada uno de los píxeles que componen las imágenes en el archivo de bloque que a su vez ya contiene una proyección cartográfica. El resultado de esta comparación y adjudicación de coordenadas tridimensionales es un DEM en formato ASCII, TIN, ESRI o GeoTIFF en el cual cada píxel tiene una coordenada en (x,y) pero además en la coordenada z.

En resumen las fases de construcción de un DEM a partir de pares estereoscópicos en el módulo LPS ATE de ERDAS IMAGINE son:

- Construcción del archivo de bloque.
- La comparación de patrones de ND para coleccionar puntos de control que relacionen a las dos imágenes.
- La determinación de las coordenadas (x, y, z) de cada uno de esos puntos de control.
- La construcción del DEM en los formatos que ya se han mencionado.

Los resultados del DEM resultaron aceptables (figura 3.1) comparándolo con el DEM obtenido por el sistema SRTM de la USGS que tiene 30 m de resolución. Puede observarse en la figura 3.1 que el DEM generado contiene una zona con errores significativos en la porción suroeste del

mismo, esto se debe a que en esa zona la sombra del relieve se acercaba a valores muy cercanos al negro ($ND = 0$) por la sombra que a su vez era generada por una nube en ese momento, esto genera confusión en el software y lo hace dar valores que no corresponden a la realidad. Como en dicha porción no se encontraron PRM en las visitas de campo se decidió que el MDE podía trabajarse sin mayor problema para el resto del área de estudio. Se puede incrementar la precisión de este proceso pues las imágenes GeoEye son capaces generar un DEM de hasta 0.5 m de resolución, pero los resultados a esta resolución deben corregirse mediante algoritmos complicados para poder obtener, por ejemplo, una vista 3D de un PRM en particular, la obtención precisa del volumen del material acarreado o la representación 3D de los edificios y construcciones cercanas que hayan podido ser afectadas por el PRM en cuestión (Modelo Digital de Superficie MDS). Además, la licencia del software disponible en ese momento solo permitía lograr un DEM de máximo 6 m de resolución. Por otro lado, para un mapa de inventario escala 1:10 000, no hace falta una resolución mayor de 10 m y como se verá más adelante, el proceso de generación de unidades de ladera tampoco necesita de mayor precisión.

3.3 División de la zona de estudio en unidades cartográficas

Generalidades

La evaluación del grado de amenaza de PRM en una zona requiere de la selección preliminar de la unidad cartográfica que se va a utilizar para su estudio. Una unidad cartográfica es una porción de la superficie terrestre que contiene una serie de características distintas a las unidades cartográficas vecinas con las cuales está separada por fronteras bien definidas (Hansen, 1984). Hay varios métodos para la subdivisión de un área de estudio para el estudio de los PRM de acuerdo a Guzzetti, *et al.*, 1999:

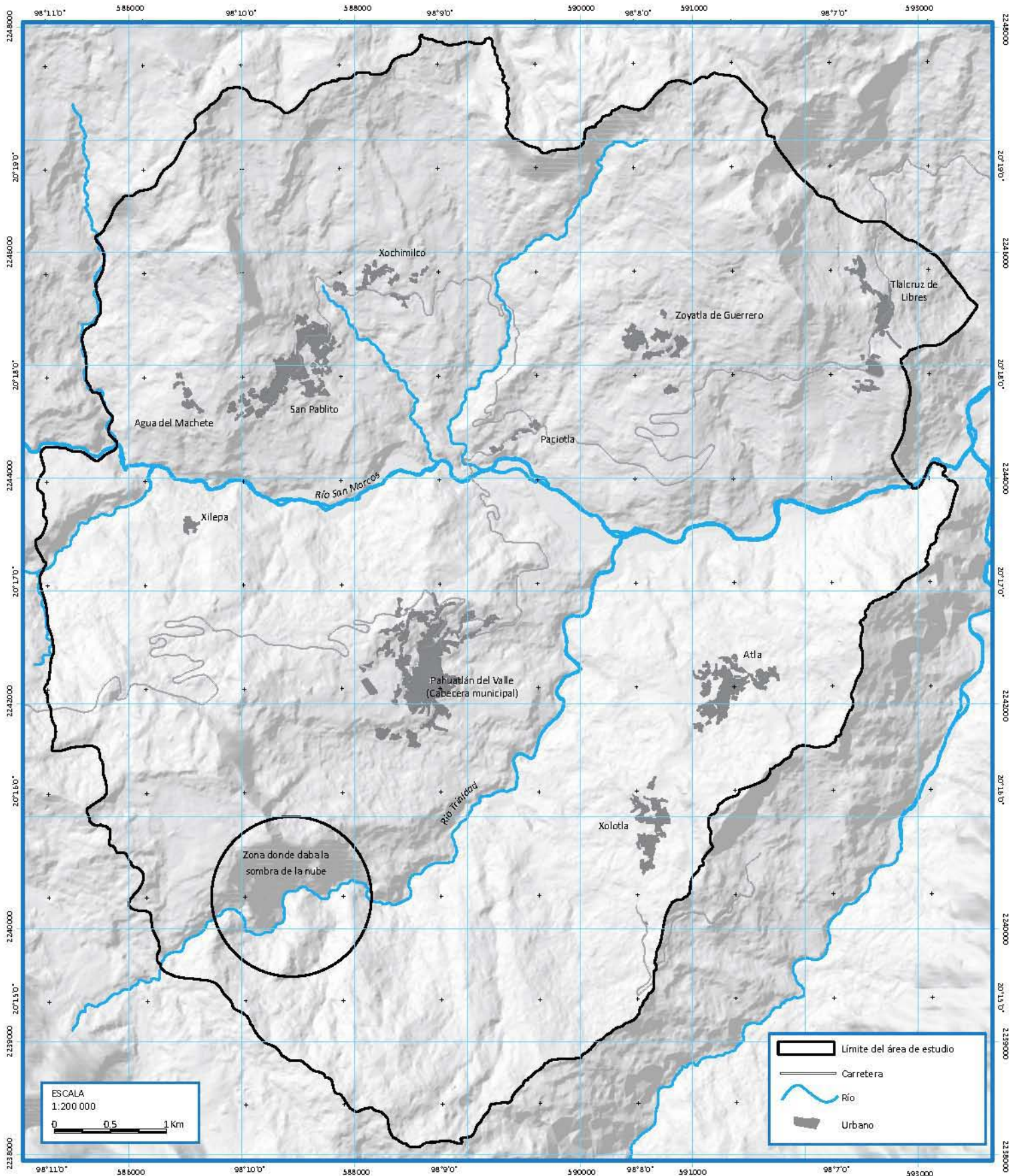
- *Grid cells*. Unidades raster o píxeles, generalmente forman una red de cuadrados regulares.
- Unidades de terreno. Porciones definidas por formas y/o procesos geomorfológicos.
- Unidades topográficas. Porciones definidas por diferentes altitudes a través de las curvas de nivel.
- Unidades con condiciones únicas. Cada unidad contiene un valor de inestabilidad diferente.
- Unidades de ladera. Derivadas de DEMS de alta resolución, es una división hidrológica pues utiliza las líneas de drenaje y los parteaguas para formar las unidades (Carrara, 1988).

La selección del tipo de unidad cartográfica depende de:

- Tipología de los PRM que más frecuentemente se presentan en la zona.
- Escala de la investigación.
- Resolución espacial de la información temática.
- Disponibilidad de la información a la escala que se pretende trabajar.

En este trabajo, se tomaron en cuenta todos estos factores para seleccionar a las unidades de ladera como la unidad cartográfica ideal para subdividir el área de estudio.

Figura 3.1. Modelo sombreado construido a partir del MDT (DEM) generado con las imágenes de satélite GeoEye1.



Unidades de ladera

Slope Units en inglés, se refiere a la división de un territorio con base en los cauces de los ríos y las líneas de división o parteaguas. Pueden ser generadas automáticamente a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE o DEM). En este último caso la calidad de la división en unidades de ladera dependerá de la resolución espacial del DEM (Ardizzone, *et al.*, 2002).

Una unidad de ladera puede definirse como la porción de una superficie que contiene una homogeneidad interna que la diferencia de las unidades adyacentes. Una unidad de ladera posee características topográficas (ángulo de pendiente y orientación de la ladera), geológicas similares (Qui, *et al.*, 2005; Tian, 2010). Puede considerarse a una unidad de ladera como la porción derecha o izquierda de una sub-cuenca de cualquier orden y se conforma en primer lugar por las discontinuidades bruscas que se presentan en el ángulo de pendiente de una superficie en su parte superior y que son llamadas líneas de división de aguas o parteaguas. Lo contrario de los parteaguas son las líneas de valle que coinciden generalmente con el camino que siguen las corrientes de agua al escurrir por una superficie de terreno. Estos dos elementos, líneas de división de aguas y líneas de valle, se utilizan para definir los límites de los polígonos que formarán las unidades de ladera. El trazo de estas características se ha llevado durante largo tiempo a mano, pero resulta un trabajo tedioso y tardado si se trata de trazar estas líneas para grandes superficies de terreno. Por ello, en este punto el uso de los SIG resulta de gran ayuda (Qui, *et al.*, 2005).

Existen diversos métodos y herramientas para obtener las unidades de ladera. Software como ArcGis© en su módulo ArcHydrology© cuentan con los algoritmos necesarios para realizar este proceso.

Procesamiento

El DEM previamente construido fue cargado en el GIS software de licencia libre GRASS 6.4.2 (GRASS Development Team, 2012). Por medio de la herramienta “WPS tools to support geological and geomorphological mapping” (Marchesini *et al.*, 2012.) que corre en el ambiente del software libre GRASS 6.4.2, se obtuvieron las unidades de ladera para la zona de estudio de Pahuatlán. Básicamente el proceso que realiza esta herramienta es el siguiente:

1. Se ingresa un DEM de alta resolución en el ambiente del software QuantumGIS 1.8.0, por medio del plugin QGIS WPS client 0.9.2, el software se conecta con el servidor del CNR-IRPI y carga los datos del DEM de alta resolución.
2. La herramienta utiliza el DEM de alta resolución para generar las líneas de división entre cuencas y subcuencas (parteaguas) además de trazar el drenaje de la zona de estudio a partir de un valor determinado de celdas (umbral, threshold) en el software GRASS que es compatible con QuantumGIS.
3. Combinando drenaje y parteaguas, la herramienta identifica y selecciona las unidades de ladera básicas de acuerdo a los parámetros que se le hayan indicado (área mínima de unidad de ladera, superficie máxima de los PRM en la zona de estudio, umbral de desviación estándar del seno y coseno de los valores de la orientación de la pendiente).
4. Paralelamente, la herramienta calcula la longitud del canal y el orden del mismo y utiliza estas jerarquías para establecer las subdivisiones de las unidades de ladera básicas.
5. La herramienta genera las unidades de ladera en formato shp.

En resumen, la herramienta valora el resultado de la siguiente ecuación para cada pixel:

$$\text{Sin (Orientación)} + \text{Cos (Orientación)} > \text{Sen } (\sigma \text{ (ángulo de pendiente)}) + \text{Cos } (\sigma \text{ (ángulo de pendiente)})$$

Si el valor de un pixel es mayor que la suma del seno de la desviación estándar del ángulo de la pendiente y el coseno de ésta, el pixel no pertenece a ese grupo, por el contrario, si el resultado es menor, el pixel pertenece a ese grupo. Para obtener los resultados más apropiados para cada caso el modelo permite tener control sobre el umbral (threshold) que pixel por pixel puede manejarse para determinar el trazo de las líneas de parteaguas o drenaje. En este caso el umbral con el que se trabajó fue de 50000 celdas para las unidades de ladera. También permite controlar la desviación estándar del valor de la pendiente de cada ladera para obtener unidades con mayor o menor detalle (valor de 4.2 en el caso de este trabajo). Además se debe introducir un valor de área mínima de unidad de ladera para que el proceso no genere unidades más pequeñas que el valor de área máximo de los PRM del inventario. En el caso de este trabajo, este último valor se estableció en 10000 m².

Al final, para el modelo de los PRM más recientes se obtuvieron un total de 259 unidades de ladera con valores de área desde 17344 m² a 1.1 km². Los resultados que el software GRASS genera no son perfectos y deben hacerse algunos ajustes de los polígonos manualmente, especialmente en la zona de la llanura del río San Marcos en donde el modelo malinterpreta los pequeños cambios de pendiente que encuentra en esta unidad de relieve creando polígonos demasiado pequeños y que obviamente al encontrarse en una zona de prácticamente nula pendiente no sirven para el análisis de los PRM. Estos polígonos fueron unidos en uno solo.

La división de una superficie en unidades de ladera para el estudio de PRM debe ser tratada de forma más profunda. En este caso las unidades de ladera obtenidas han servido para los objetivos propuestos pero se acepta que los resultados obtenidos con el modelo generado en GRASS pueden ser mejorados y se pueden incorporar más variables al modelo.

3.4 Compilación de los datos geo-espaciales complementarios o variables explicativas

Para el estudio de la susceptibilidad fue necesario recabar datos sobre los procesos y características relacionadas con la ocurrencia de PRM en la zona de estudio. Se seleccionaron las siguientes variables con base en la literatura general de los PRM y las características particulares de la zona de estudio:

- Relieve (ángulo de la pendiente, orientación y geometría de la ladera).
- Litología.
- Presencia de fallas y fracturas.
- Vegetación y uso de suelo.
- Superficie de PRM viejos.

Relieve

El relieve del municipio está conformado por depresiones y elevaciones con un intervalo de altitud que varía entre los 450 y los 1500 msnm. Hay diferentes aspectos del relieve relacionados con la ocurrencia de PRM, en este trabajo se tomaron en cuenta los siguientes:

- Energía del relieve.
- Geometría de la ladera o perfil de la pendiente.
- Ángulo de la pendiente
- Orientación de la ladera.

Energía del relieve

La energía de relieve se define como la diferencia de elevaciones entre el punto más alto y más bajo de una unidad de área, en este caso se utilizaron las Unidades de Ladera. Entre más diferencia exista entre las altitudes se dice que la energía del relieve es mayor pues todos los procesos asociados a esa área, incluidos los movimientos de ladera, estarán sujetos a esa diferencia. En el caso específico de los PRM una energía de relieve más grande supone una mayor influencia de la gravedad. La figura 3.2 muestra cómo se distribuye esta variable en la zona de estudio. Se asignaron cinco clases en el mapa pero para correr los modelos el dato se ingresó directamente en metros. Se utilizó la desviación estándar del valor de altitud en cada una de las laderas, ya que el SIG originalmente calcula el valor de la energía de relieve para cada pixel del MDE (DEM), de esos valores se obtiene la altitud media en metros y la desviación estándar del dato de altitud para cada unidad de ladera.

Geometría de la ladera o perfil de la pendiente

Otro aspecto importante es la geometría de la ladera ya que esta característica está asociada a la ocurrencia de diferentes tipos de PRM. Por ejemplo, el siguiente supuesto expone esa relación:

- Las partes altas de los valles o las laderas con geometría cóncava están asociadas con flujos y movimientos complejos (Guzzetti, *et al.*, 1996).

En el modelo está variable se redujo a determinar únicamente si la ladera era convexa o cóncava.

Ángulo de la pendiente

Se refiere al valor en grados de inclinación de una ladera. Básicamente este indicador se toma en cuenta ya que entre mayor sea el ángulo de la pendiente mayor fuerza ejerce la gravedad sobre los materiales que la componen. Lo anterior está relacionado con el tipo de material del que se trate, si son materiales consolidados o sueltos. En teoría, entre mayor sea el ángulo de la pendiente, mayor será la probabilidad de que el material se desplace ladera abajo. La figura 3.3 muestra el ángulo de la pendiente dividido en cinco clases, pero de nueva cuenta, esa caracterización solo ha sido utilizada para mostrar los valores visualmente. En el modelo estadístico el dato se ingresó directamente expresado en grados y además se incluyó una variable más, la des-

Figura 3.2. Mapa de energía del relieve.

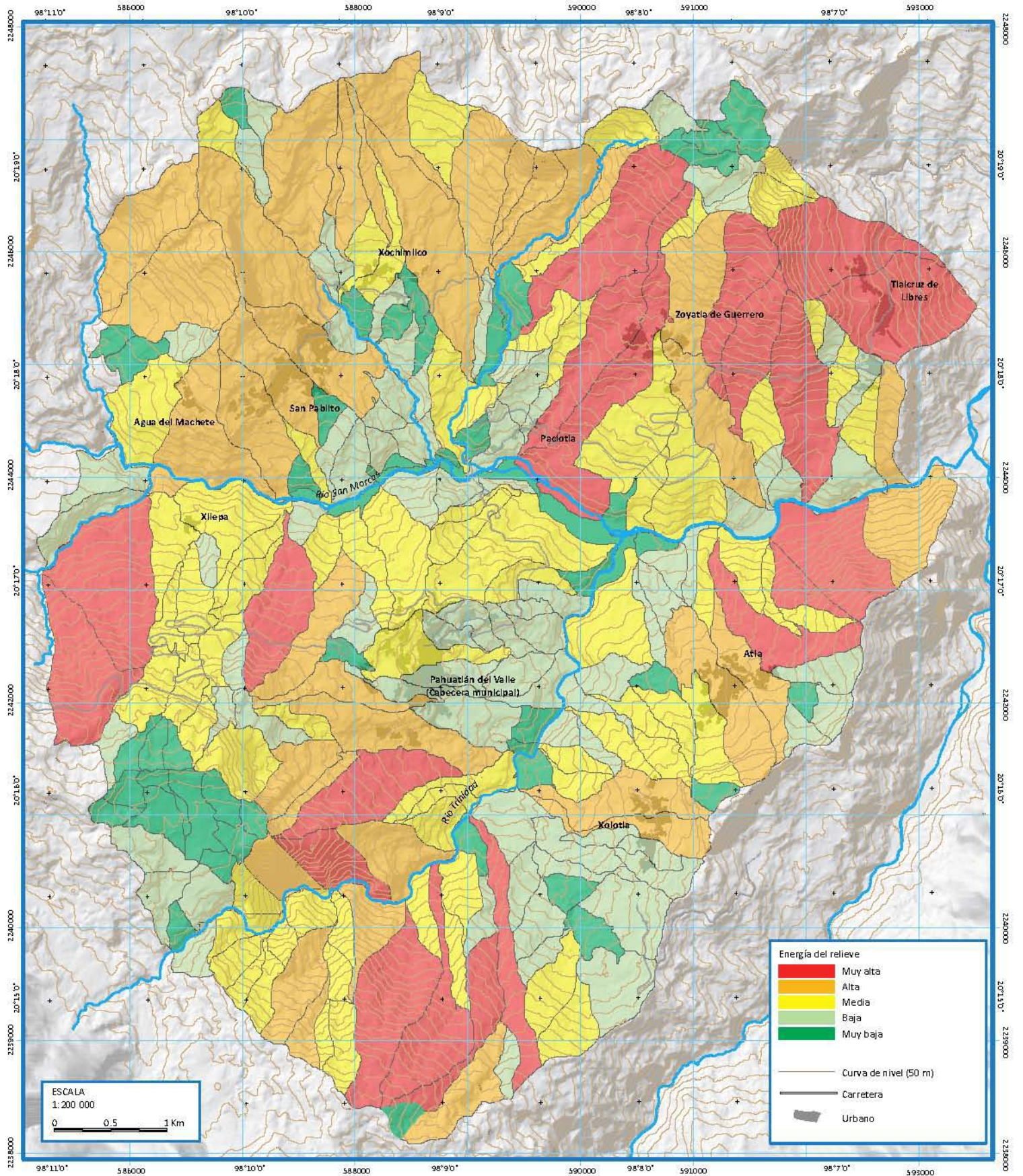
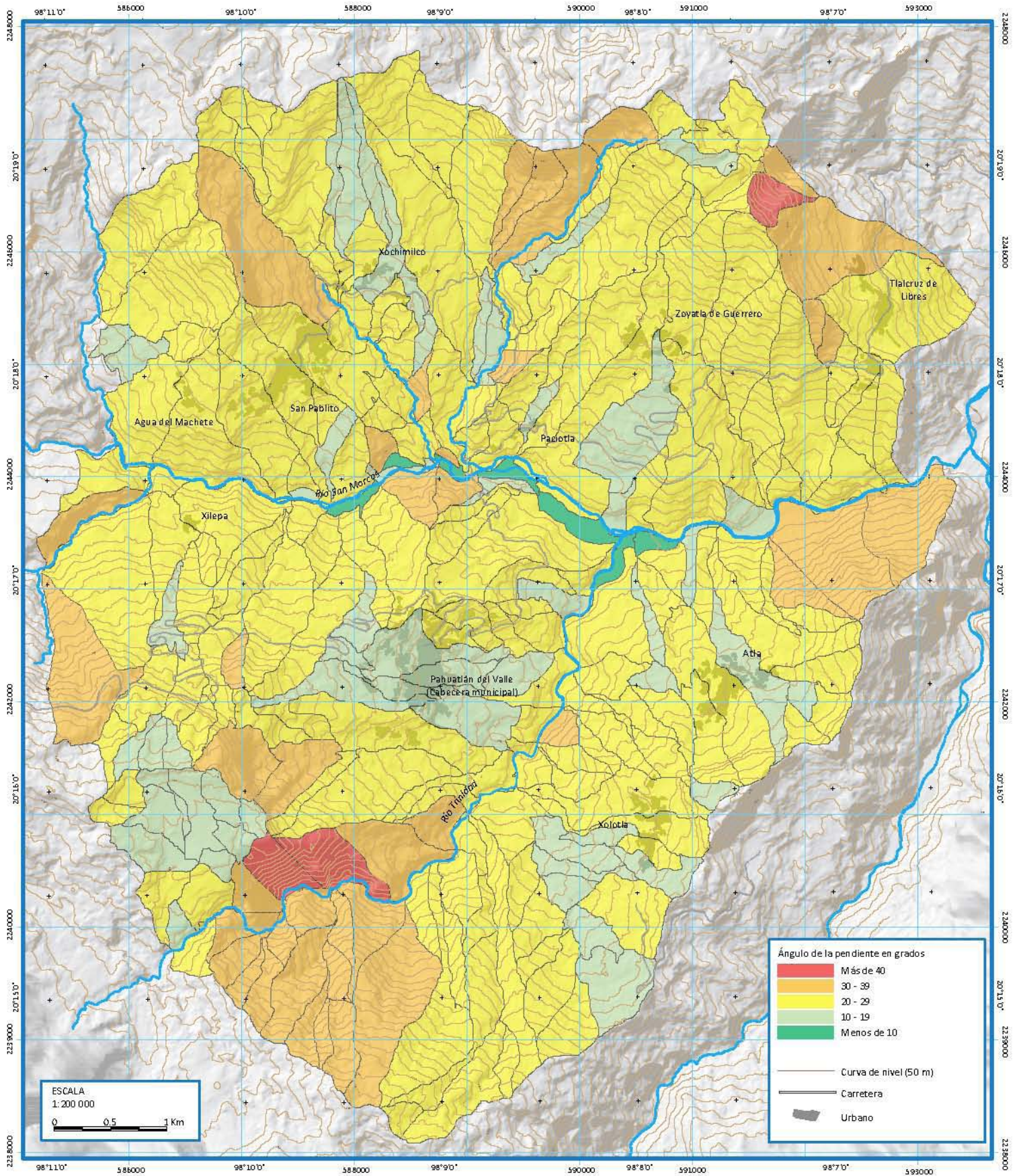


Figura 3.3 Ángulo de la pendiente.



viación estándar de dicho ángulo. Esto se hizo porque el dato del ángulo se trata de un promedio, para matizar de mejor forma el resultado se le combina con la desviación estándar.

Orientación de la ladera

Debido a que, las laderas que tienen una orientación hacia el norte, tratándose del hemisferio norte y el valor de la latitud a la que está la zona de estudio (21°), reciben menos radiación solar a lo largo del año que las que apuntan hacia el sur, se infiere que estas laderas tienden a guardar mayor humedad en su suelo. Por ello, esta característica se toma en cuenta en los estudios de los PRM. En el caso de este trabajo se calculó el azimut promedio para cada unidad de ladera y de acuerdo a ese valor se le clasificó dentro de alguno de los cuatro puntos cardinales: Norte, Sur, Este y Oeste. En el modelo la variable fue ingresada en valores del 1 al 4, 4 para las laderas que apuntan hacia el Norte, 2 y 3 para las laderas con orientación Este y Oeste y 1 para las laderas que apuntan hacia el sur. La figura 3.4 se muestra la orientación de cada unidad de ladera de acuerdo a las clases anteriores.

Litología

Los materiales débiles, sensibles, intemperizados, sujetos a fracturas o cizallamiento son propensos a presentar procesos de remoción en masa. Lo anterior tiene relación con la litología. En Pahuatlán hay diversas unidades litológicas, la figuras 3.5 y 3.6 presentan un resumen de sus características. Para el caso de este trabajo, la cobertura geológica se ingresó al modelo como el porcentaje de cada unidad litológica que afloraba en cada unidad de ladera. Posteriormente, para simplificar las variables del modelo, se agruparon las unidades litológicas en dos categorías: unidades resistentes o sólidas y unidades débiles (figura 3.6). Esta categorización no solo estuvo en función del tipo de roca presente en cada unidad litológica, sino también en la combinación y estratificación que presentaba, asumiendo como cierto el siguiente supuesto:

- Los PRM son más frecuentes donde abundan los paquetes de roca débil intercalados con paquetes muy voluminosos de roca dura (Guzzetti, *et al.*, 1996).

Todas las unidades en esta área han sido alteradas por variados procesos geotectónicos, conformado un relieve mucho más fracturado (Oliva Aguilar, *et al.*, 2010). Especialmente, el metamorfismo local que ha sufrido la lutita ha hecho de este tipo de litología un paquete sumamente débil, incrementando la susceptibilidad a la ocurrencia de PRM.

La fuente de los datos fueron las cartas geológicas de la zona, 1814_F14-D73_GM y 1814_F14-D83_GM escala 1:50 000 publicadas por el Servicio Geológico Mexicano en el año 2004, pero además, se analizaron las imágenes GeoEye1 con geólogos del CNR-IRPI en Perugia para hacer más finos los límites de las unidades geológicas y estas pudiesen trabajarse a escala 1:10 000. Tal ajuste es solo superficial, en un futuro sería pertinente hacer una cartografía geológica más detallada de la zona con una metodología más formal.

Figura 3.4. Mapa de orientación de las laderas.

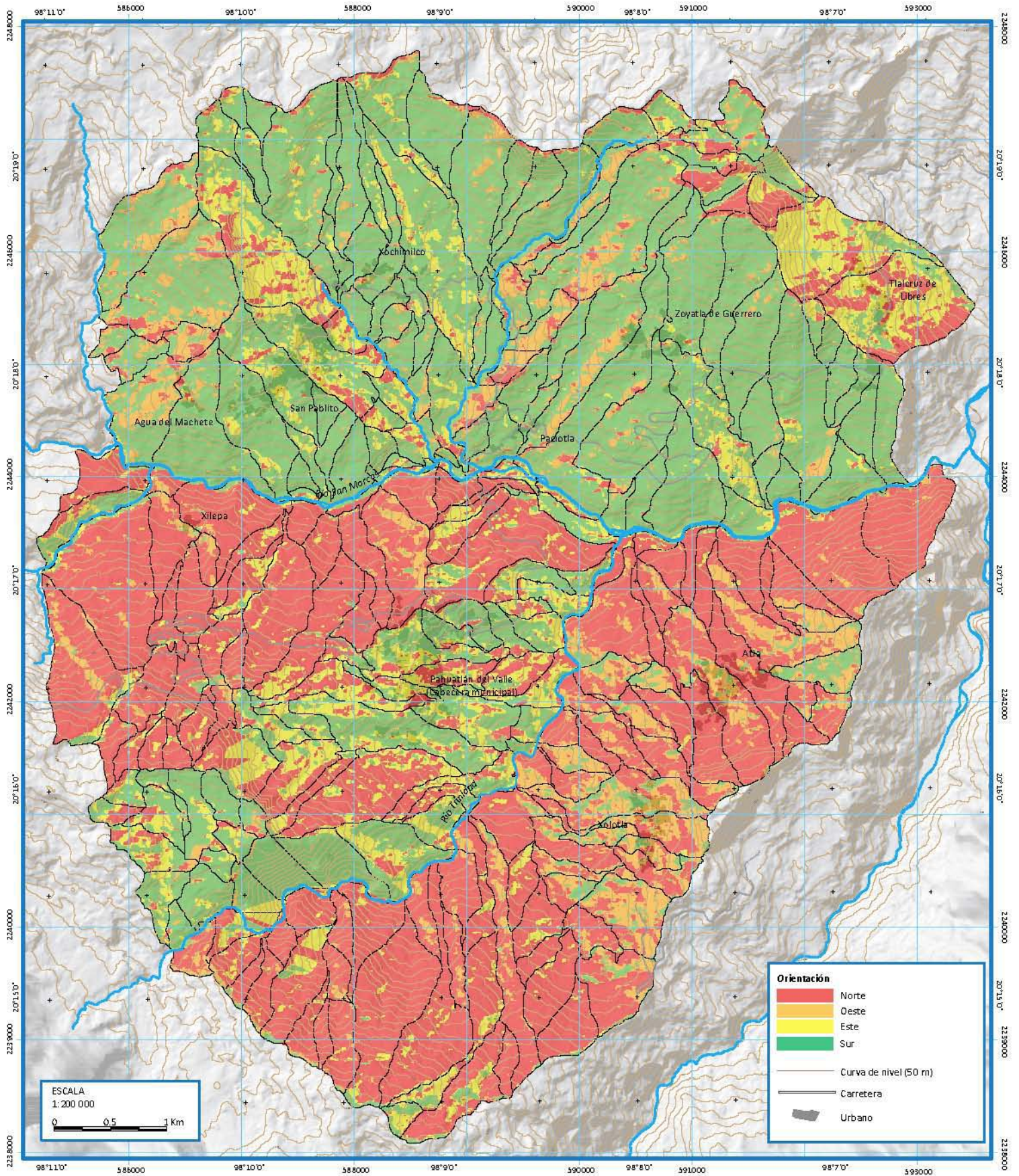


Figura 3.5. Geología de la zona de estudio. (Fuente: con base en Sánchez Rojas, *et al.*, 2004).

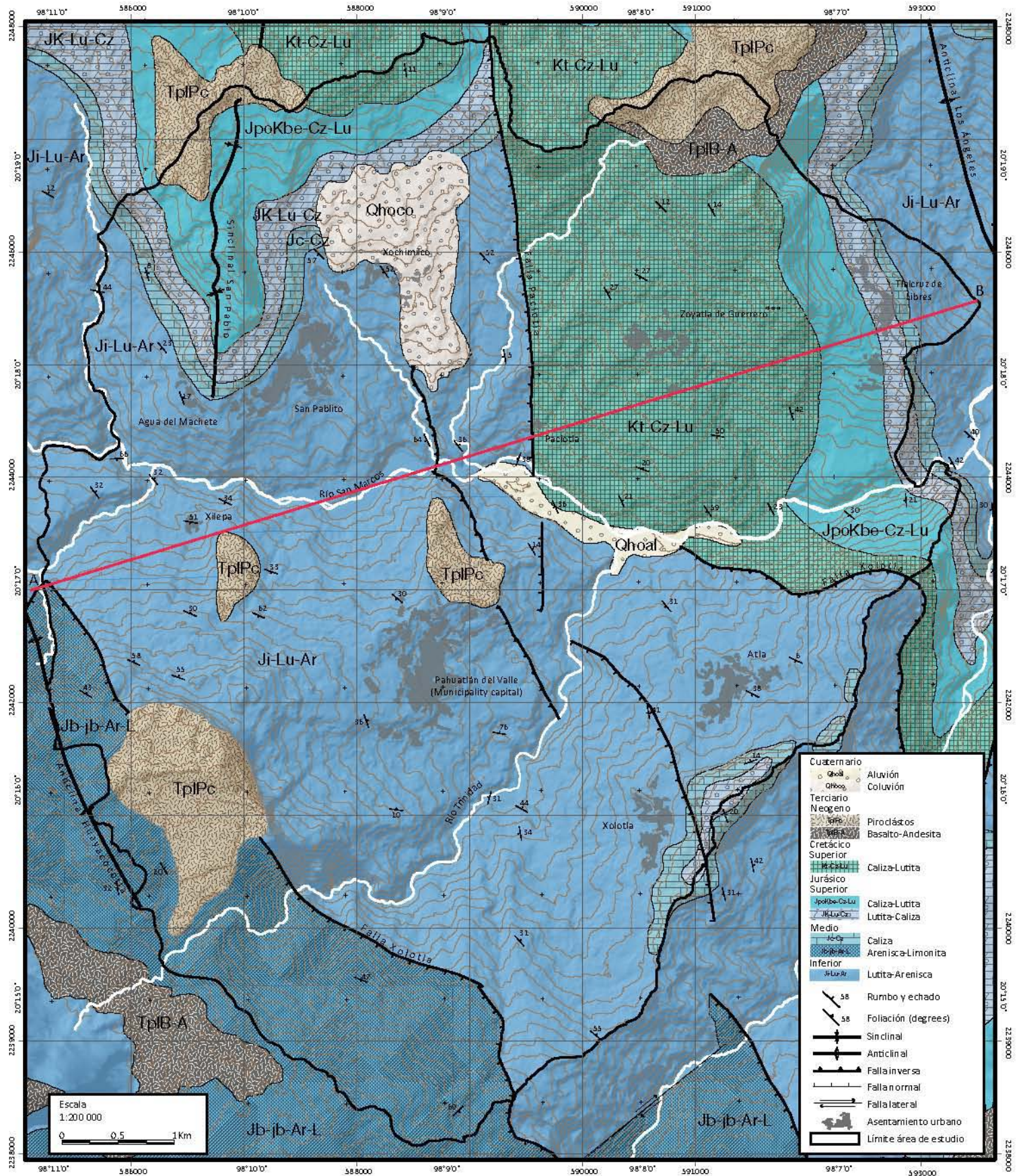
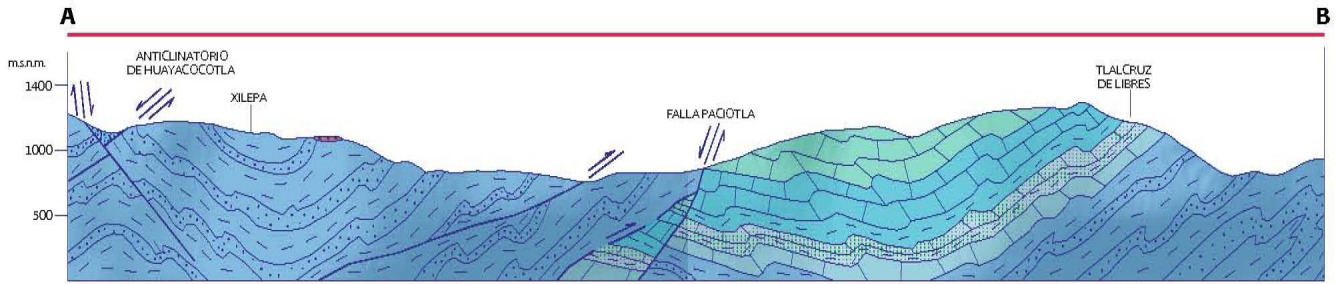


Figura 3.6. Perfil geológico y columna geológica de la zona de estudio. (Fuente: Sánchez Rojas, *et al.*, 2004).

Perfil geológico



Columna geológica

ERA PERIODO	ÉPOCA	COLUMNA	CLAVES CARTOGRÁFICAS	LITOLÓGIA	CATEGORIA	
	PISO					
CENOZOICO	CUATERNARIO		Qhoal	Aluvión	Débil	
			Qhoco	Coluvión		
	PLEISTOCENO					
	TERCIARIO	NEÓGENO		TplPc	Piroclastos	Resistente
		FLIOCENO		TplB-A	Basalto - andesita	Resistente
MIOCENO						
OLIGOCENO						
PALEOCENO						
MESOZOICO	CRETÁCICO SUPERIOR	MAASTRICHTIANO				
		CAMPANIANO				
		SANTONIANO				
		CONIACIANO				
		TURONIANO				
	CRETÁCICO INFERIOR	CENOMANIANO				Débil
		ALBIANO		KbeCz - Lu	Caliza - lutita	
		APTIANO		Tamaulipas indiferenciado (Formaciones Tamaulipas Superior Horizontes Otates Tamaulipas Inferior)		
		BARREMIANO				
		HAUTERIVIANO				
		VALANGINIANO				
		BERRIASIANO				
	JURÁSICO SUPERIOR	PORTLANDIANO		JpOkbeCz - Lu		Caliza - lutita
		TITHONIANO		Fm. Pimienta		
KIMMERIDGIANO			JkLu - Cz	Lutita - caliza		
			Fm. Tamán			
OXFORDIANO						
JURÁSICO MEDIO	CALLOVIANO		JcCz	Caliza	Resistente	
	BATHONIANO		Fm. Tepéxic	Arenisca - limonita	Resistente	
	BAJOJANO		JbbAr - Lm			
	AALENIANO		Fm. Cahuasas			
JURÁSICO INFERIOR			JlLu - Ar	Lutita - arenisca	Débil	
			Fm. Huayacocotla			

Presencia de fallas y fracturas

Las discontinuidades estructurales (fallas, discordancias, contactos) también pueden actuar como causas de PRM. La distribución y el tipo de PRM reflejan el control estructural ejercido por la orientación de los planos de estratificación y las fallas de un lugar determinado (Guzzetti, *et al.*, 1996).

Estructuralmente destacan en la zona el Anticlinorio de Huayacocotla, macroestructura con eje NNW-SSE conformado con rocas de la formación Huayacocotla, y el sinclinal San Pablo conformado por rocas más recientes. Respecto a las discontinuidades, la falla inversa Xolotla, al Sur-Centro de la zona de estudio, superpone rocas de la formación Huayacocotla a las de unidades más recientes. La falla normal de nombre Paciotla, al Norte-Centro de la zona de estudio, representa una reactivación de la falla inversa Xolotla poniendo en contacto las mismas rocas que esa estructura (Sánchez Rojas, *et al.*, 2004). Con base en el análisis de las imágenes GeoEye1 se trazó una falla más que no estaba incluida en la carta del Sistema Geológico Mexicano, esto es al centro de la carta en la ladera que ocupan los poblados de Xolotla y Atla. Esta falla normal podría ser la continuación de la falla Paciotla (ver figura 3.5).

Para ingresar la variable en los modelos estadísticos se construyó un buffer de 150 m a ambos lados de las líneas que representaban las discontinuidades en la zona, posteriormente, para cada unidad de ladera se obtuvo el porcentaje del área de los buffer de las fallas. La distancia de 150 m es empírica y fue recomendada por los geólogos del CNR-IRPI de Perugia.

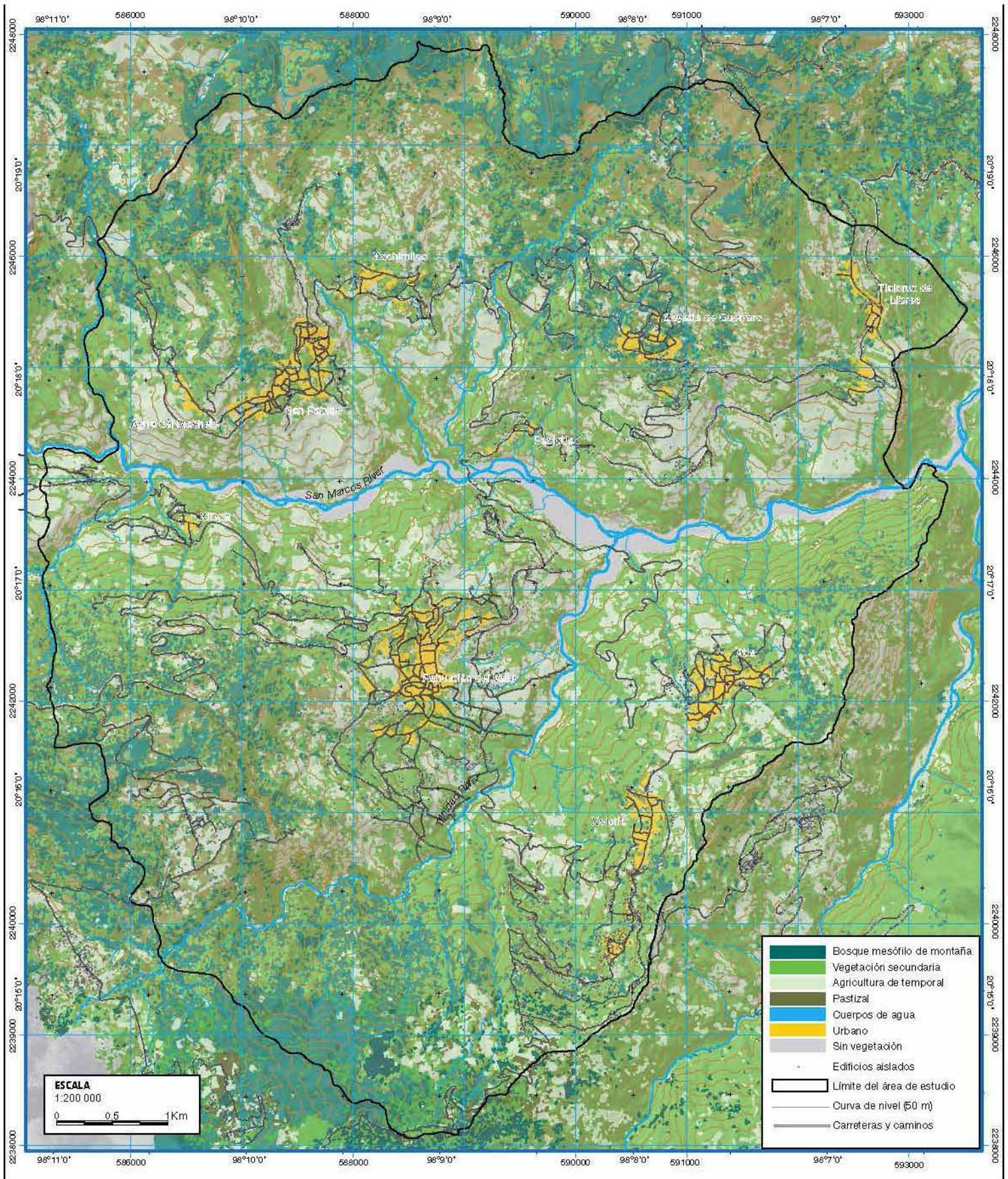
Vegetación y uso de suelo

El tipo de vegetación presente en un lugar influye en la ocurrencia o no de los PRM. En casos como el de la zona de estudio, donde los PRM ocurren en su mayor parte por la presencia de agua proveniente de fenómenos meteorológicos extraordinarios, una vegetación abundante juega un papel mitigador. El follaje impide que el agua se infiltre totalmente en el suelo, además las raíces de las plantas y árboles dan mayor firmeza al suelo incrementando la estabilidad de una ladera (Greenway, 1987).

Por otra parte, el uso de suelo está relacionado con lo anterior ya que cuando se remueve la vegetación para incorporar una zona de cultivo, pastoreo o simplemente se desmonta la vegetación por explotación forestal, el suelo queda expuesto y se incrementa la inestabilidad. Otro aspecto importante del uso de suelo son los cortes de carretera ya que estas pendientes artificiales incrementan la presión en los materiales que componen la ladera, fomentando la inestabilidad de la misma.

Finalmente, el uso de suelo urbano en la zona de estudio puede relacionarse con la ocurrencia de PRM debido al peso de las construcciones que están asociadas a esta unidad. Por todo esto, la cubierta de uso de suelo fue incluida en el análisis y fue ingresada como el porcentaje de área de cada categoría de uso de suelo por unidad de ladera. Una clasificación supervisada de las imágenes GeoEye 1 generada con el software ENVI 4.8, fue elaborada para obtener un mapa con las distintas coberturas de uso de suelo, la figura 3.7 muestra el resultado de esta clasificación y las clases en que fue dividido el uso de suelo.

Figura 3.7. Uso de Suelo en Pahuatlán. El mapa fue obtenido a partir de una clasificación supervisada de las imágenes GeoEye.



Procesos de remoción antiguos

Otra variable incluida es la del área de PRM viejos por unidad de ladera. Esta variable fue incluida tomando en cuenta el siguiente supuesto:

- Donde ya han ocurrido PRM seguramente volverán a ocurrir. El pasado es la clave para el futuro (Varnes, 1984; Hutchinson, 1995; Aleotti y Chowdhry, 1999; Guzzetti, *et al.*, 1999).

Otro supuesto que complementa lo anterior es el siguiente:

- Los PRM en masa superficiales son más frecuentes en la superficie de antiguos PRM (Guzzetti, *et al.*, 1996).

La variable se integró al modelo como porcentaje.

3.5 Aplicación de los modelos estadísticos

Introducción

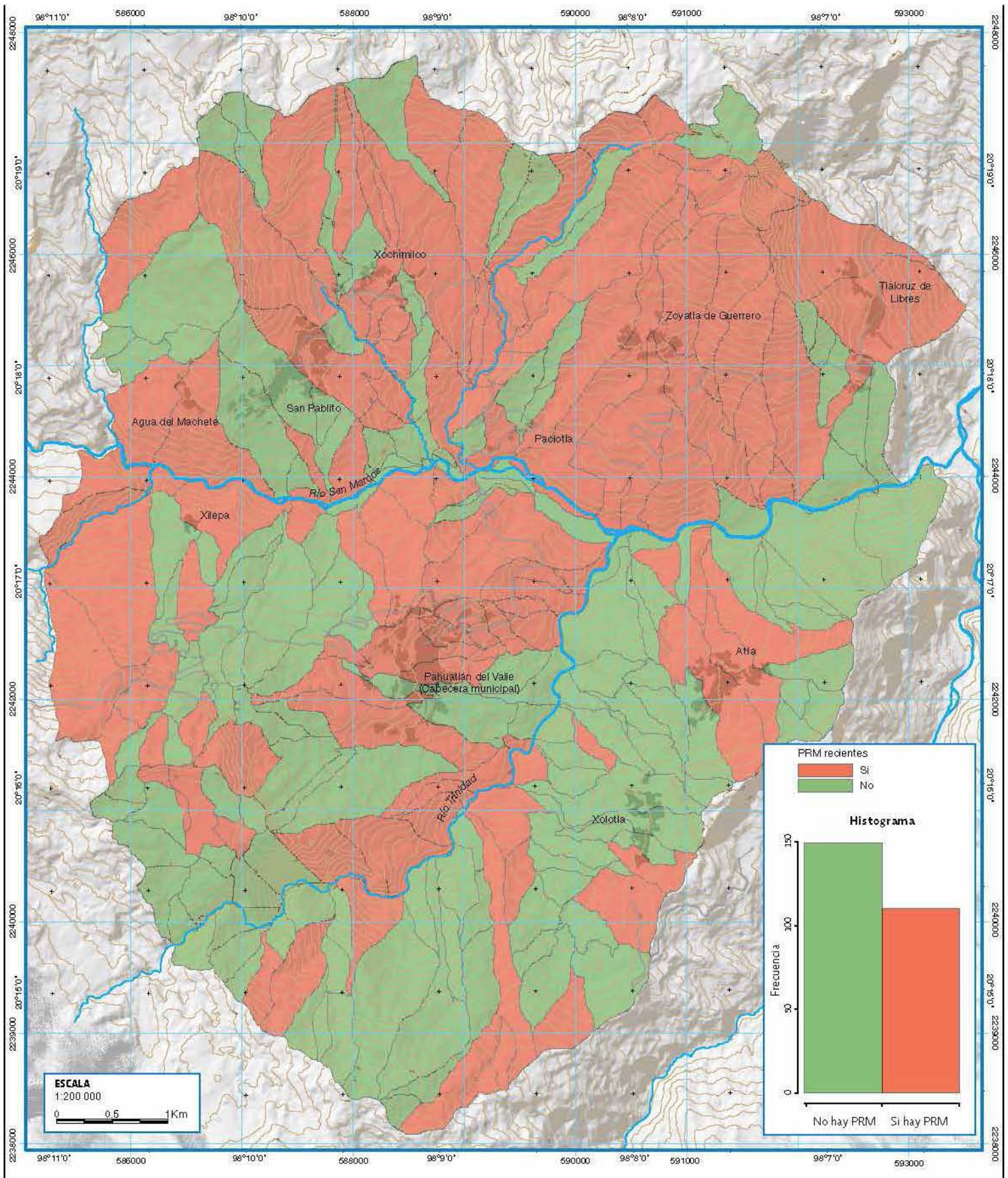
La susceptibilidad es uno de los componentes de la estimación del grado de amenaza por PRM (Carrara *et al.*, 1992; Ardizzone, *et al.*, 2002). Se refiere básicamente a responder la pregunta de ¿Dónde pueden ser esperados los próximos PRM? En el lenguaje matemático la susceptibilidad es la probabilidad espacial de que ocurran PRM bajo condiciones geo-ambientales dadas (Chung y Fabbri, 1999; Guzzetti *et al.*, 2005, 2006).

Pueden usarse métodos heurísticos para estimar la susceptibilidad, estos son aquellos en donde el investigador asigna un peso a las variables de acuerdo a su experiencia (Mâgut, *et al.*, 2012). Sin embargo, en este caso se optó por una serie de modelos estadísticos multivariados que arrojaron un índice de susceptibilidad entre 0 y 1 (0 es nula susceptibilidad, 1 es la más alta susceptibilidad) para cada unidad de ladera. El inventario de PRM elaborado previamente otorgó la información de la localización de PRM recientes, esta variable fue utilizada como variable de agrupación, para clasificar cada unidad de ladera como estable o inestable. Esta variable y las variables temáticas o explicativas fueron utilizadas para correr los siguientes modelos de manera separada:

- Análisis discriminante lineal.
- Análisis discriminante cuadrático.
- Regresión logística.
- Redes neuronales.

Posteriormente, se utilizó una regresión logística que combinó los resultados de los cuatro modelos mencionados para obtener un resultado óptimo. Este proceder recibe el nombre de Modelo de combinación de Regresión Logística y fue desarrollado por Rossi *et al.*, 2010.

Figura 3.8. Presencia o ausencia de PRM recientes en las unidades de ladera.



Determinación de la variable dependiente

La presencia o ausencia de PRM en las 259 unidades de ladera fue usada como variable dependiente. La base de datos para esto fue el inventario construido en esta misma investigación que incluía PRM ocurridos desde el año 1994 hasta el año 2012. La distribución de datos de esta variable se muestra en el mapa en la figura 3.8.

En el mapa se observa que hay un ligero número mayor de unidades laderas que no registraron PRM y su distribución no parece tener un patrón claro en el mapa. Con los modelos es como se tratará de establecer las relaciones entre las variables para hallar el patrón que determina la susceptibilidad.

Análisis discriminante Lineal (ADL)

El análisis discriminante es una técnica multivariada introducida por Fisher (1936) para clasificar muestras en grupos alternativos con base en una serie de datos (Michie, *et al.*, 1994). La meta de el análisis discriminante es clasificar casos en uno de los diversos grupos basados en los valores de una serie de variables predictivas (Guzzetti, *et al.*, 2006).

Las variables utilizadas para agrupar (grouping) deben ser categóricas y las variables predictivas pueden ser de intervalo o dicotómicas.

Las variables para agrupar, en el análisis de la susceptibilidad por PRM, tienden a establecer dos grupos básicos: unidades libres de PRM (laderas estables) y unidades que contienen PRM (laderas inestables).

El supuesto se basa en que estos dos grupos son distintos y que cada unidad cartográfica pertenece a uno y solo a uno de estos grupos. En el contexto de la susceptibilidad a PRM, el objetivo del análisis discriminante es determinar el grupo al que pertenece cada unidad cartográfica tratando de encontrar una combinación lineal de las variables predictivas (o ambientales) que maximice las diferencias entre las poblaciones de cada grupo, unidades estables o inestables, con el menor margen de error posible (Guzzetti, *et al.*, 2006).

Para obtener esto, se tienen un N número de variables ambientales v_1, v_2, \dots, v_m para cada unidad cartográfica, r , que se usaran para encontrar la combinación lineal, Z , que discrimine correctamente cada unidad cartográfica en los grupos estable (G_0) o inestable (G_1). De esta forma se tiene:

$$Z = B_1v_1(r) + B_2v_2(r) + \dots + B_mv_m(r) \quad 3.1$$

En el análisis discriminante la clave está en determinar el coeficiente B . La función lineal discriminante Z transforma los valores de las variables en un *score* discriminante que representa la posición de la muestra a lo largo de una línea definida por la misma función discriminante. Para medir qué tan alejados están los dos grupos sobre esta línea se pueden usar diferentes tipos de distancias (euclidiana, diagonal o Mahalonobis). Una distancia grande indica que es posible diferenciar a un grupo de otro con gran facilidad. Finalmente, el modelo calcula la probabilidad de que una unidad cartográfica pertenezca a un grupo u otro (Guzzetti, *et al.*, 2006).

El peso relativo de cada variable predictiva en la función discriminante puede ser evaluado analizando los Coeficientes Estandarizados de la Función Discriminante (CEFD). Los CEFD muestran la relativa importancia de cada variable como predictiva de la inestabilidad. Un número grande en los coeficientes indica que la variable está fuertemente asociada con la presencia o ausencia de PRM. El signo del coeficiente indica la correlación positiva o negativa con la inestabilidad para cada unidad cartográfica, entonces un coeficiente positivo indica que esa variable incrementa la inestabilidad, por el contrario, variables con signo negativo están relacionadas con la estabilidad.

Cualquier tipo de predicción de susceptibilidad de PRM tiene cierto nivel de incertidumbre. Las fuentes de esta incertidumbre de acuerdo a Guzzetti, *et al.*, 2006 son:

- Errores o falta de datos en la información temática (datos geo-espaciales complementarios) disponible.
- Una mala comprensión o interpretación de la evaluación geográfica y temporal de los procesos que ocasionan PRM.
- Limitaciones de las técnicas utilizadas para determinar la susceptibilidad.
- Variabilidad natural del fenómeno de los PRM.

Análisis discriminante cuadrático (ADC)

Es muy similar al Análisis Discriminante Lineal que ya se explicó, pero pertenece a un grupo distinto de clasificadores que son más generales que los clasificadores lineales. En este tipo de clasificadores, se asume que los valores son cuadráticos. A diferencia del AD, en el ADC no se asume que la covarianza de cada clase es igual. La expresión cuadrática de la función de Análisis Discriminante lineal, se expresa de la siguiente forma de acuerdo a Croux y Joossens, 2005:

$$Q(x) = x^t Ax + b^t + c \quad 3.2$$

Dónde:

$$A = \frac{1}{2} (\Sigma_2^{-1} - \Sigma_1^{-1}) \quad 3.3$$

$$b = \Sigma_1^{-1} \mu_1 - \Sigma_2^{-1} \mu_2 \quad 3.4$$

$$c = \frac{1}{2} \log \left(\frac{|\Sigma_2|}{|\Sigma_1|} \right) + \frac{1}{2} (\mu_2^t \Sigma_2^{-1} \mu_2 - \mu_1^t \Sigma_1^{-1} \mu_1) \quad 3.5$$

$Q(x)$ =Función Cuadrática Discriminante.

Σ_x = Matriz de covarianzas de ambos grupos, 1 y 2.

μ =Medias de las densidades ($f_1(x)$ y $f_2(x)$) de ambos grupos, 1 y 2.

Regresión logística (RL)

La regresión logística modela cómo influye en la probabilidad de aparición de un suceso (en este caso un PRM) la presencia o no de diversos factores y el valor o nivel de los mismos. Si el valor de respuesta es 0 no se presentara el suceso, si es 1 si estará presente. Una regresión logística permite predecir resultados discretos así como agrupar una serie de variables continuas, discretas o mixtas. Es más flexible que otras técnicas, no influye que no exista normalidad en las variables predictivas ni que tengan linealidad. Los predictores no necesitan ser discretos y no ofrece resultados de predicciones negativas. Es especialmente útil cuando la distribución de respuestas en la variable dependiente es de esperar que no tenga una relación lineal con alguna de las variables independientes. También tiene la ventaja de no requerir supuestos como el de normalidad y el de homocedasticidad.

Se basa en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{e^{B_0+B_1X_1+B_2X_2+\dots+B_kX_k}}{1+e^{B_0+B_1X_1+B_2X_2+\dots+B_kX_k}} \quad 3.6$$

Donde:

- B_0 = es una constante (también se puede encontrar como A).
- B_1, B_2, \dots, B_k = coeficientes logísticos correspondientes a cada variable predictiva.
- X_1, X_2, \dots, X_k = son las variables predictivas.
- P = Proporción (probabilidad de observar el evento o la categoría a predecir)

Redes neuronales (RN)

Predice comportamientos complejos a partir de una muestra de entrada y de salida observadas, es un sistema que puede “aprender”, y emula el funcionamiento del cerebro humano, de ahí su nombre. El análisis de redes neuronales ha sido implementado para una gran cantidad de objetivos, desde predecir la ocurrencia de tornados hasta predecir el cambio en los precios de las acciones en las bolsas de valores. Es una técnica muy útil en el reconocimiento de patrones complejos y de gran cantidad de datos como lo es la ocurrencia de PRM. Los modelos de redes neuronales se basan en la capacidad para memorizar y relacionar hechos. El modelo está compuesto de un número infinito de unidades o neuronas unidas por conectores o sinapsis que son capaces de encontrar relaciones funcionales entre un grupo de datos de entrada y un valor esperado de salida (Borracci *et al.*, 2005). Para el análisis de este trabajo se utilizó una red del tipo perceptrón multicapa (PMC), con 16 unidades de entrada para el ingreso de las variables explicadoras, 12 unidades de capa oculta y 1 nodo de salida para los resultados esperados.

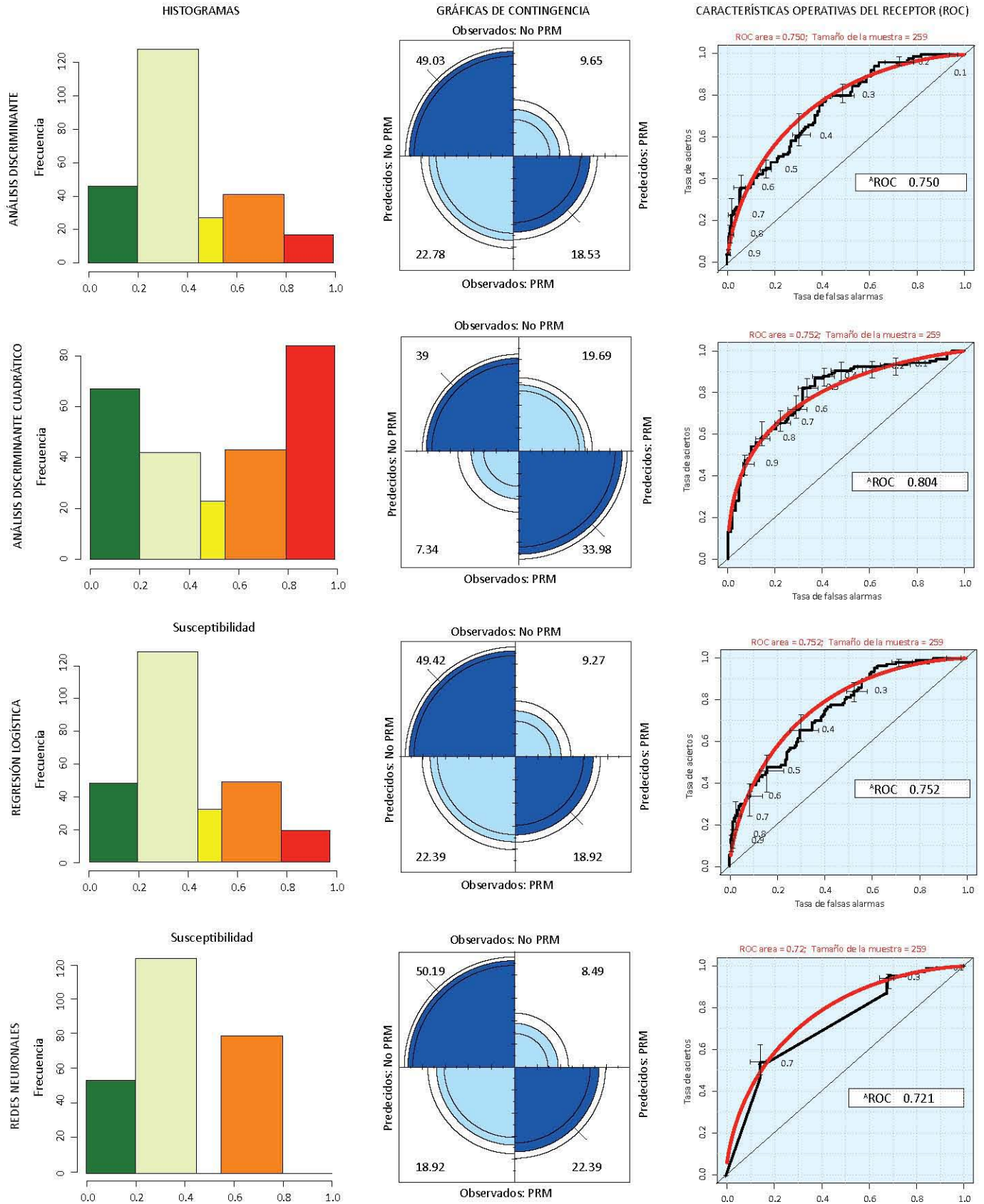
3.6 Análisis y cartografía de los resultados

Resultados de los cuatro modelos individuales

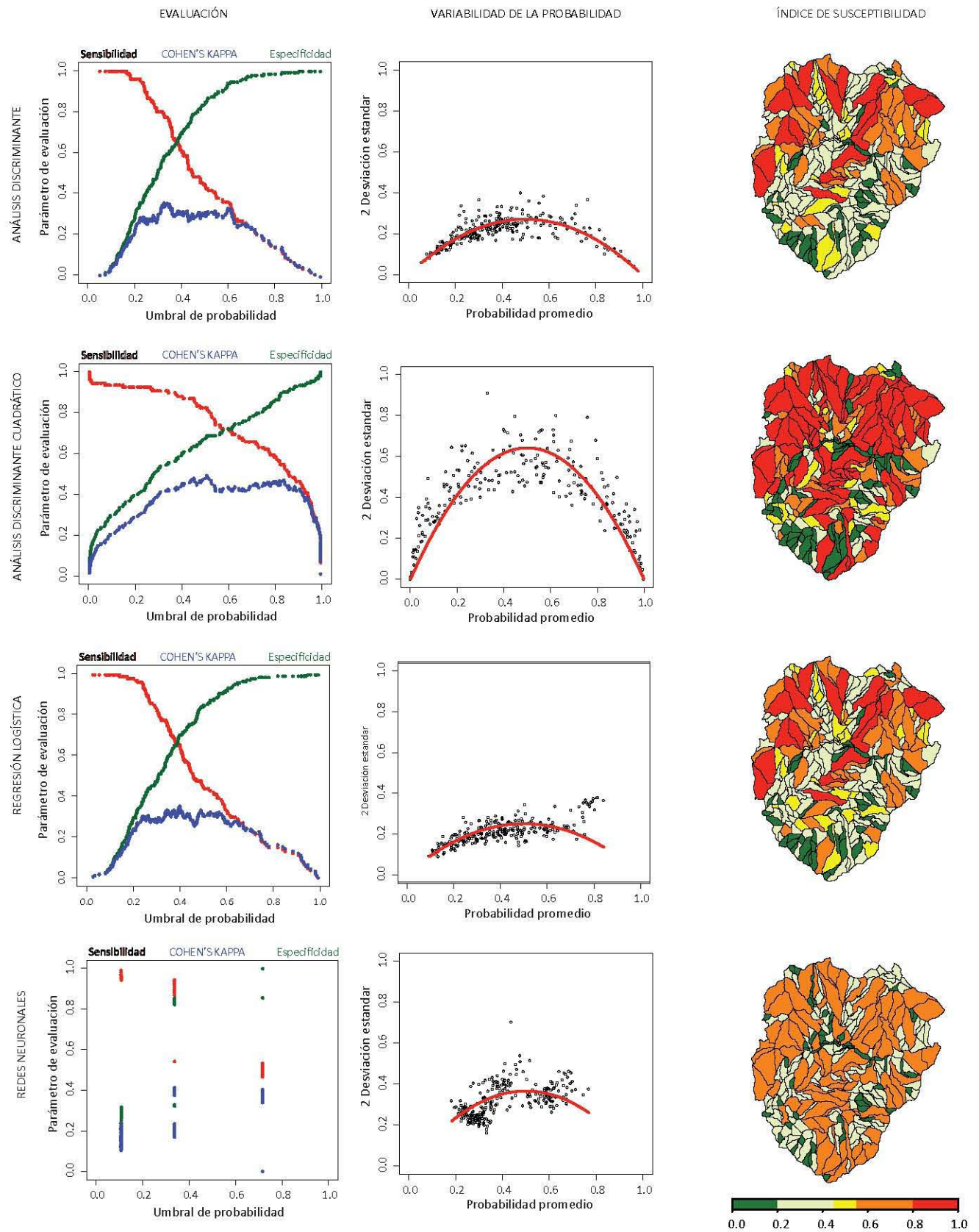
A continuación se presentan los resultados del primer modelo combinado aplicado con las variables que ya se han explicado. Primero se presentan los resultados obtenidos por cada modelo

Figura 3.9. Resultados individuales de los cuatro modelos.

Resultados de los modelos individuales 1.



Resultados de los modelos individuales 2.



individual –regresión logística, análisis discriminante, análisis discriminante cuadrático y redes neuronales. Todos los cálculos se realizaron en el software libre R – Project (R Core Team, 2013).

Para cada modelo (filas) se presenta en la figura 3.9 : el histograma de frecuencia de valores de susceptibilidad dividido en cinco clases [(0-2); (2-4.5); (4.5-5.5); (5.5-8); (8-1)], una gráfica de contingencia que indica los positivos verdaderos (PV); negativos verdaderos (NV); falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN), y las curvas ROC (Características operativas del receptor). En la figura 3.3, para cada modelo se presenta una gráfica de evaluación, que muestra a su vez la variación de la sensibilidad (tasa de aciertos), la especificidad (1 - tasa de falsos positivos) y el índice del coeficiente Kappa-Cohen (Cohen, 1960); también un pequeño mapa que muestra la distribución de las clases de susceptibilidad.

Las curvas ROC muestran la tasa de aciertos en el eje de las “y” contra la tasa de falsas alarmas en el eje de las “x” (Fawcett, 2006), donde la tasa de aciertos o sensibilidad (positivos-positivos) es $PV/(PV+FP)$, y la tasa de falsas alarmas es $FP/(FP+NV)$, lo que es equivalente a $1 - NV/(FP+NV)$ o $1 -$ especificidad (Fawcett, 2006). Las curvas de ROC también muestran el valor para el área debajo de la curva, AROC, que es quizás su aportación más importante pues representa una medida cuantitativa del desempeño del modelo, el modelo es mejor mientras más se acerque a 1 (Fawcett, 2006).

Por otro lado, el coeficiente Kappa-Cohen, es una medida distinta de la confiabilidad del modelo (Cohen, 1960), es la diferencia entre el mapa producto de la clasificación y la realidad. Un valor de 1 sugiere un acuerdo total entre la realidad y el mapa, un valor de cero señala que el acuerdo (si lo hay) es totalmente debido al azar. Se expresa con la siguiente fórmula:

$$K = \frac{PC-PE}{1-PE}, \{-\infty < k < 1\}$$

Donde:

- K = Índice Kappa-Cohen
- $PC = (PV+NV) N$
- $PE = (PV+FN)*(VP+FP) + (VP+FP)*(VP+FN) / N^2$
- N = Número total de unidades de ladera

Para los modelos de Regresión Logística, Análisis Discriminante y Análisis Discriminante Cuadrático se corrió 200 veces el modelo variando en cada vez las unidades de ladera para seleccionar el mejor modelo posible. Para las Redes Neuronales el modelo fue corrido 20 veces. En la misma figura 3.3 se muestran los gráficos de dispersión que enfrentan desviación estándar y la probabilidad (susceptibilidad) promedio obtenida de todas las veces que se corrió cada uno de los modelos. Los puntos que se localizan en los extremos de la susceptibilidad y además registran una desviación estándar baja son casos que han sido mejor predichos, son los más seguros, ya que si la desviación estándar es baja se podrán mover poco de la categoría de susceptibilidad en la que se encuentran así el modelo se corra x número de veces. Muchos puntos en estos extremos es bueno. Por el contrario, los puntos en el medio y con alta desviación estándar, son casos inciertos, pues si se corre el modelo de nuevo existe la posibilidad de que se muevan de una a otra categoría de susceptibilidad, por lo que muchos puntos en esta zona no es bueno.

Los resultados presentados son utilizados para evaluar los modelos. En la determinación del índice de susceptibilidad, todos los modelos dan resultados distintos (ver los pequeños mapas de la figura 3.9), los más parecidos entre sí son los resultados de RL, ADL y ADC mientras que los resultados del modelo de Redes Neuronales da resultados diferentes en cuanto a que, al parecer, no puede separar bien las laderas susceptibles y las que no, una forma más formal de decirlo es que muestra resultados menos dicotómicos. Lo anterior puede observarse en los histogramas de frecuencias (figura 3.9).

En lo que respecta a la gráfica de dispersión de la variabilidad, se observa que la mayor desviación estándar la presenta el modelo de ADC pero a su vez es el que menos puntos presenta en la parte media de la gráfica, los otros tres modelos muestran una menor desviación estándar pero una mayor cantidad de puntos en la zona media o de incertidumbre.

Comparando el número de aciertos y desaciertos de cada modelo, se observa que los modelos de Regresión Logística y Análisis Discriminante Lineal tienen una efectividad similar de 60%. En la gráfica ROC estos modelos también presentan una AROC aceptable de 0.75 para ambos. Por su parte, el modelo de ADC aumenta su efectividad hasta 73% que es un resultado bastante bueno. Otra forma de analizar las gráficas de contingencia es analizar cuántos PRM observados no fueron predichos por el modelo, en este sentido 7.3% de los PRM ocurridos u observados no fueron predichos por el modelo ADC, mientras que los demás modelos presentaron hasta 22% de PRM no predichos, este dato si crea cierta incertidumbre y aunque estos números en general son aceptables si se debe perfeccionar todo el proceso, quizás la diferencia más significativa sea hacer la base de datos más robusta, un inventario más completo.

Al analizar los resultados de susceptibilidad obtenidos de cada modelo, se observa que los modelos de RL y ADL muestran resultados muy parecidos, por ello se analizó la correlación de Pearson obteniéndose los resultados de la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valores de correlación entre los cuatro modelos.

Combinación	Correlación de Pearson (valor de r)
RL-ADL	0.990
RL-ADC	0.694
RL-RN	0.580
ADL-ADC	0.686
ADL-RN	0.578
ADC-RN	0.586

Valor de P n todos los casos: 2.2 X10⁻¹⁶

Lo anterior se aprecia claramente en la figura 3.10 de comparación de los modelos. Como puede verse, la relación en la combinación de los modelos RL y ADL es lineal, por lo tanto, hay un problema de colinearidad. También se aplicó un análisis de componentes principales para tratar de entender la relación entre los resultados de los 4 modelos. Los resultados se aprecian en la tabla 3.2 e indican que hay cuatro componentes principales. De esos, el primer componente explica el 77% de la varianza. En este componente la fuerza de las variables de RL y ADL es

la más alta; en cambio, en el segundo componente, que explica el 13% de la varianza, la variable del modelo NN es la que mayor peso tiene. Estos resultados, hicieron más evidente que la combinación de modelos podría presentar problemas. Por lo anterior, se corrieron tres modelos de combinación, uno con los cuatro modelos, otro sin el modelo de RL y otro sin el modelo de ADL.

Figura 3.10. Comparación entre los modelos de RL y ADL.

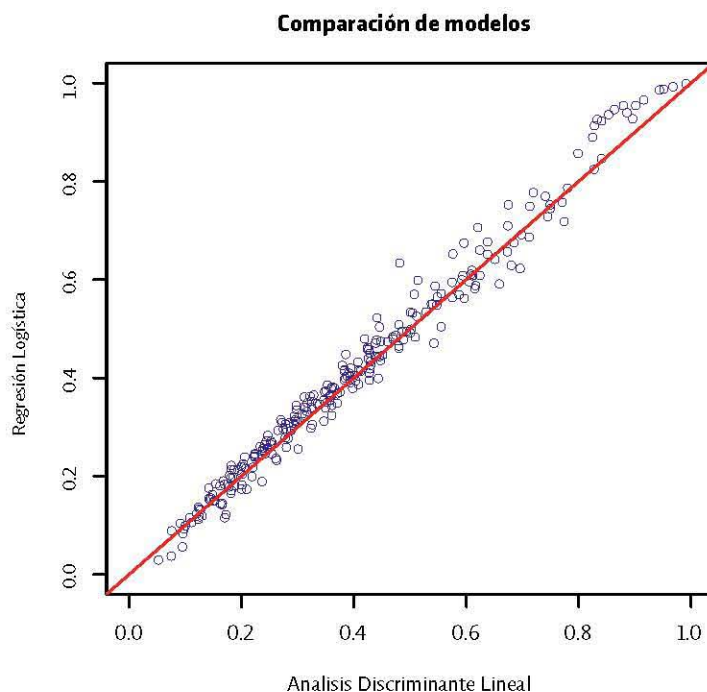


Tabla 3.2. Resultados del análisis de componentes principales a las variables de los resultados de los modelos.

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
RL	-0.539	0.382	-0.232	-0.712
ADL	-0.536	0.400	-0.240	0.701
RN	-0.436	-0.820	-0.369	0.010
ADC	-0.480	-0.134	0.860	0.007
Desviación estándar	1.755	0.732	0.610	0.940
Proporción de la varianza	0.770	0.134	0.093	0.002
Valor explicativo	77%	13%	9%	0.2%

Resultados de la combinación de modelos

Para combinar los resultados de los cuatro modelos se utilizó una regresión logística (Rossi *et al.*, 2010). En este proceso nuevamente se usó como variable dependiente la presencia o ausencia de PRM recientes y como variables independientes los resultados de los cuatro modelos: RL, ADL, ADC y RD. Se corrieron tres variantes: los cuatro modelos juntos, un modelo sin RL y otro sin ADL. Los resultados de los tres modelos eran muy similares, por lo tanto, para decidir

cuál era el mejor se analizaron el Criterio de Akaike (AIC), el valor de aciertos y el valor ROC de cada uno, tanto en la muestra training como en la muestra para validación (tabla 3.3).

Tabla 3.3 Indicadores para seleccionar el mejor modelo de combinación.

Modelo	AIC	Aciertos (%)	ROC	Aciertos (%) validación	ROC validación
Los cuatro juntos	260.45	74.51	0.821	67.57	0.706
Sin RL	279.11	73.36	0.808	63.71	0.679
Sin ADL	272.6	74.13	0.819	63.32	0.780

El modelo que combina los resultados de los cuatro modelos es mejor a los otros dos, pero por muy poco. Si se considera que es evidente que el modelo que corre los cuatro resultados juntos tiene un problema de colinearidad, elegir entre alguno de los otros dos modelos no representa un problema. De esos dos modelos restantes, el que mejor puntuación adquiere es el que omite al modelo ADL. Por lo tanto, este fue el modelo que se utilizó para definir la susceptibilidad. Los resultados de la combinación de los cuatro modelos se muestran en la figura 3.11 y en el mapa de la figura 3.12.

Figura 3.11. Resultados de la combinación de modelos sin ADL.

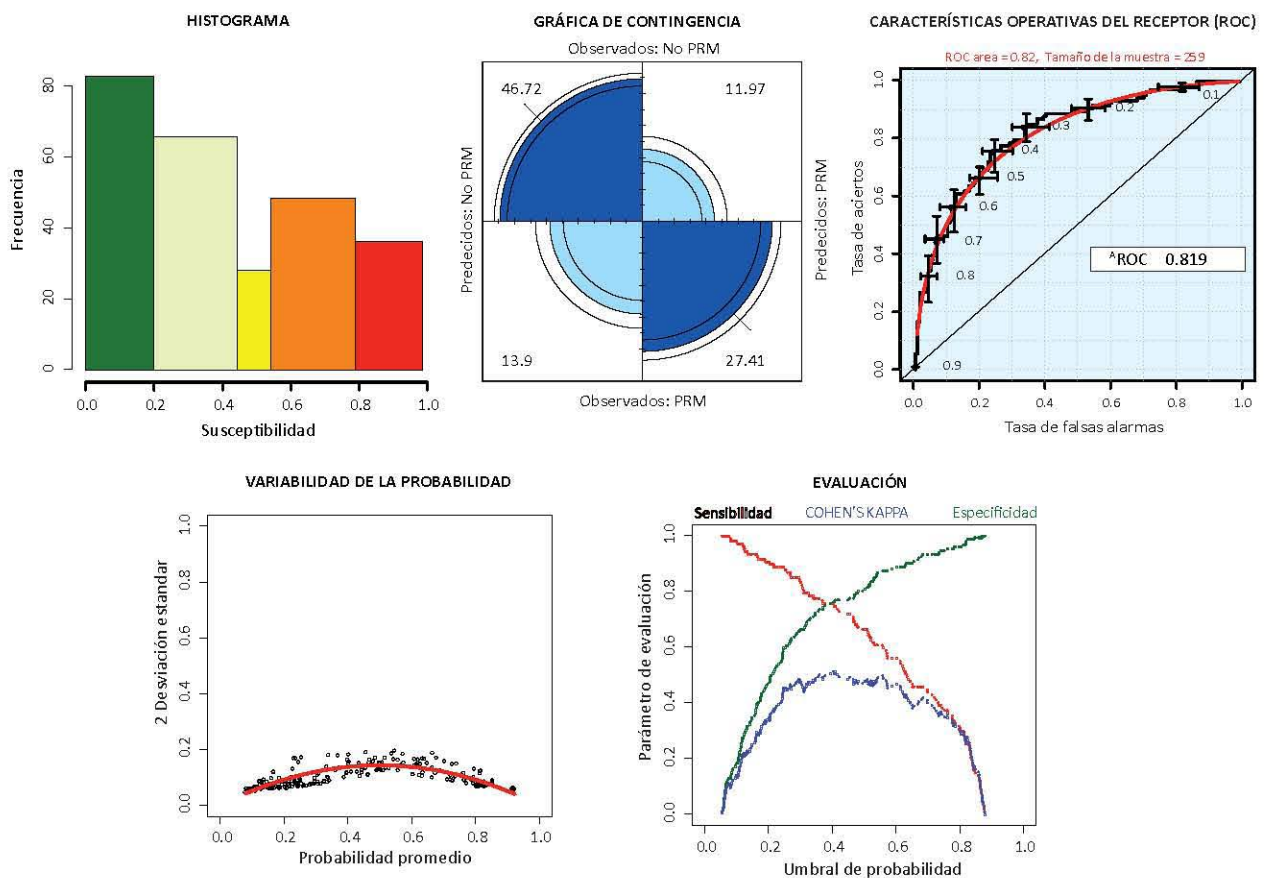
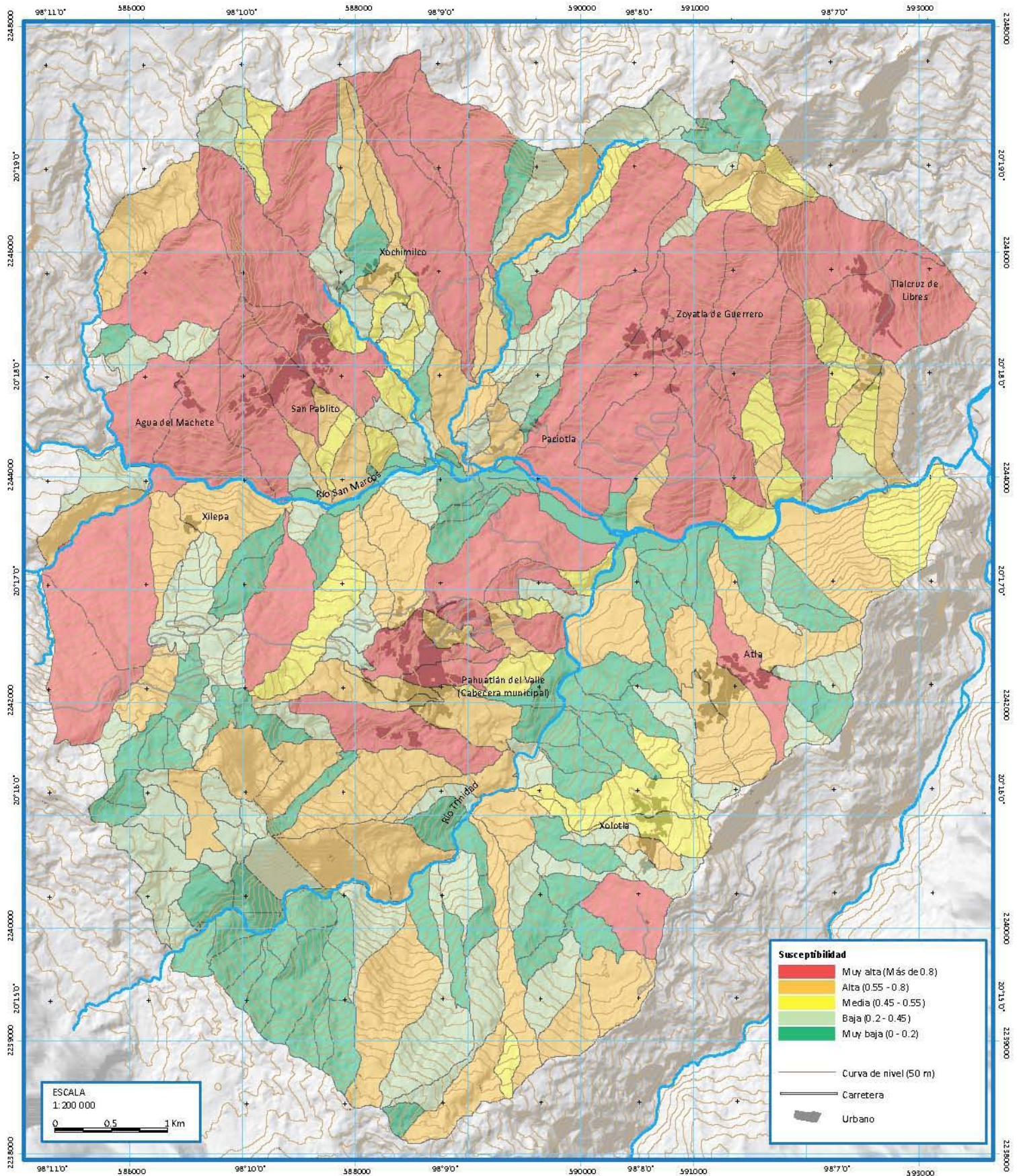


Figura 3.12. Susceptibilidad por PRM en la zona de estudio.



La separación de los grupos de susceptibilidad es bastante buena, presentándose una mínima cantidad de datos en el umbral medio (color amarillo). La gráfica de contingencia también presenta buenos valores con un 74.13% de efectividad. El valor de la curva ROC también es bastante bueno, 0.819. La variabilidad de la probabilidad también es aceptable con poca desviación estándar en todos los casos, con la mayoría de los puntos distribuidos en los extremos y pocos puntos en el medio. Finalmente el índice Kappa-Cohen también presenta valores aceptables. El mapa de la figura 3.13 muestra la distribución de los valores de susceptibilidad obtenidos.

La combinación de modelos mejoró los resultados obtenidos por los cuatro modelos individuales. También es de notar que algunas de las zonas con muy alta susceptibilidad coinciden con asentamientos humanos, como Pahuatlán, Atla, San Pablito, Zoyatla, Xochimilco y Tlacruz de Libres. Respecto a qué variables tuvieron más peso en los modelos sólo los modelos de RL, ADL y ADC dan esos datos debido a RN trabaja de forma distinta. La tabla 3.4 muestra tales resultados.

Tabla 3.4 Coeficientes de la regresión logística.

	Coeficiente	Error estándar	Valor de Z	Pr(> z)
(Interceptor)	361.4	291.9	1.23	0.215
Área	1.6×10^{-8}	5.4×10^{-9}	3.09	0.001
Roca resistente	8.3×10^{-3}	2.6×10^{-2}	0.31	0.751
Roca débil	0.1×10^{-2}	2.5×10^{-2}	0.61	0.535
Zonas sin vegetación	-3.65	2.92	-1.25	0.210
Uso agrícola	-3.64	2.92	-1.24	0.211
Con vegetación	-3.66	2.92	-1.25	0.209
Urbano y carreteras y caminos	-3.62	2.91	-1.24	0.214
Fallas y fracturas	-5.1×10^{-4}	6.6×10^{-3}	-0.07	0.937
Área de PRM viejos	0.01	5.7×10^{-3}	0.08	0.931
Elevación media	3.8×10^{-4}	7.6×10^{-4}	0.49	0.617
Desviación estándar de la elevación	-0.04	5.2×10^{-8}	-0.90	0.363
Ángulo de la ladera	0.04	0.03	1.45	0.145
Desviación estándar del ángulo de la ladera	0.03	0.06	0.60	0.545
Orientación de la ladera	0.27	0.16	1.65	0.098
Geometría o perfil de la ladera	-0.36	0.29	1.23	0.210

En el modelo de RL las variables que tuvieron más peso y que fomentan la ocurrencia de PRM (símbolo +) son la orientación de la ladera, la desviación estándar del ángulo de la ladera y el tipo de unidad litológica débil. De ahí, las variables con más peso que evitaban la ocurrencia de PRM (símbolo -) son las relacionadas con el uso de suelo con vegetación natural o secundaria muy densa, el perfil de la ladera y las zonas sin vegetación (esta última variable se entiende pues en la planicie del río predomina ese tipo de uso de suelo).

Los resultados de los coeficientes del ADI (tabla 3.5) muestran números similares a la regresión logística. Llama la atención que algunas variables no se comportaron como se podría esperar, por ejemplo, el uso de suelo urbano se esperaba que funcionara como variable ligada a la ocu-

rrencia de PRM pero ocurre lo contrario. Las zonas provistas de vegetación (bosque mesófilo de montaña conservado o alterado y vegetación secundaria arbustiva) si presentan una lógica la ser las variables que al parecer controlan ambos modelos, esta situación si era de esperarse de acuerdo a los supuestos bajo los que fue seleccionada dicha variable, y es la variable clave en ambos modelos.

Tabla 3.5 Coeficientes del Análisis Discriminante Lineal.

Coeficientes del análisis discriminante	
Roca débil	0.00
Roca fuerte	-0.01
Orientación de la ladera	0.28
Ángulo de la ladera	0.03
Área de PRM viejos	0.01
Elevación media	0.00
Área	0.00
Fallas y fracturas	0.00
Desviación estándar del ángulo de la ladera	0.00
Desviación estándar de la elevación	0.00
Geometría o perfil de la ladera	-0.38
Urbano y carreteras y caminos	-3.71
Uso agrícola	-3.74
Zonas sin vegetación	-3.75
Con vegetación	-3.76

Tabla 3.6 Coeficientes del Análisis Discriminante Cuadrático.

VARIABLES	Grupo 1	Grupo 2
Roca débil	-0.10	-0.42
Roca fuerte	-0.10	-0.43
Orientación de la ladera	0.00	0.00
Ángulo de la ladera	0.00	0.00
Área de PRM viejos	0.00	0.00
Elevación media	0.00	0.00
Área	0.00	0.00
Fallas y fracturas	0.00	0.00
Desviación estándar del ángulo de la ladera	0.00	0.00
Desviación estándar de la elevación	0.14	0.04
Geometría o perfil de la ladera	-0.38	-0.38
Urbano y carreteras y caminos	0.10	0.02
Uso agrícola	-0.10	0.01
Zonas sin vegetación	-0.10	0.00
Con vegetación	-0.01	0.01

La tabla 3.6 muestra los resultados de los coeficientes utilizados por el modelo ADC. Los coeficientes se dividen en dos grupos: el grupo 1 se refiere a los resultados de las unidades de ladera en donde NO hubo PRM registrados, y el grupo 2 se refiere al grupo de unidades de ladera donde SI hubo PRM. Aquí se puede observar que la variable de Uso de suelo con vegetación se mantuvo como la más importante, pero también tomó relevancia la variable de roca dura pues en el grupo 2 es una de las que más contribuye para que no se presenten PRM.

Un modelo de componentes principales (CP) puede ayudar de mejor manera que variables son las que tienen más peso. El procedimiento se realizó en R-Project. Primero se realizó un análisis de correlación entre las variables y de forma gráfica la figura 3.13 muestra los resultados. Los colores oscuros en los clusters indican una alta correlación entre las variables mientras que el color verde claro representa un nivel bajo de correlación. Las variables relacionadas con la vegetación son las que están más correlacionadas con el resto de las variables. Sin embargo, la relación que interesa es la de la variable FRAX que representa la presencia de PRM recientes en una ladera, en ese caso las variables de la orientación de la ladera, el uso de suelo agrícola o de pastizal, la desviación estándar de la elevación y la presencia de vegetación densa, son las que más asociadas con la ocurrencia o no de PRM.

Figura 3.13 Matriz de correlación entre variables.

F y F																			
	Geo																		
		SinV																	
			RF																
				Ele															
					Veg														
						AngL													
							DEE												
								DEA											
									PRM										
										Agro									
											OL								
												RD							
													Antr						
																			PA

El análisis de CP mostró 16 componentes, de los cuales, el componente 1 explicaba el 20% de la variación, el segundo componente el 15% y el tercero el 12%. Esto demuestra que en realidad no hay ningún componente que domine, lo que significa que no hay una variable o grupo de variables predominen, de forma evidente, en la ocurrencia de PRM. De acuerdo a los eigenvalores los primeros cinco componentes deberían tomarse en cuenta (tabla 3.7).

Tabla 3.7 Resultados del análisis de componentes principales entre las variables.

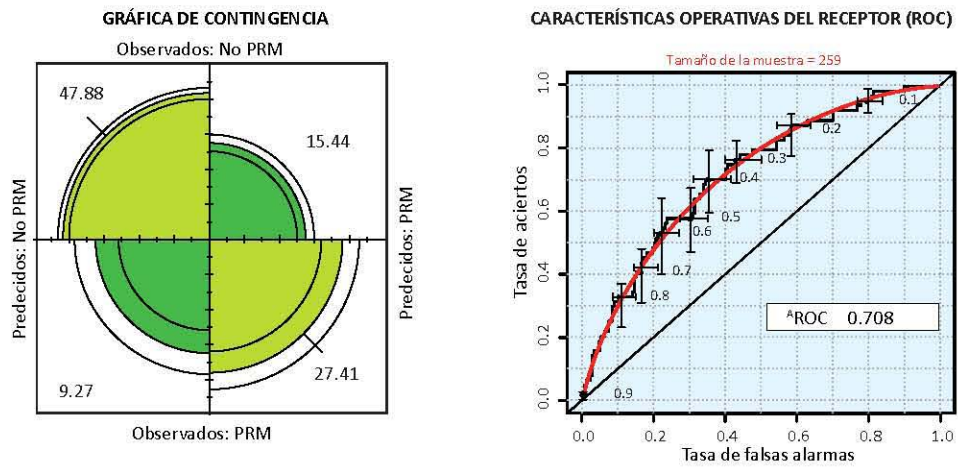
Componente	Proporción de la varianza	Eigenvalor
1	0.1984	3.174193
2	0.1564	2.502701
3	0.1242	1.987380
4	0.08515	1.362427
5	0.06513	1.042019
6	0.0612	9.793065 X10 ⁻⁰¹
7	0.05685	9.095289 X10 ⁻⁰¹
8	0.052	8.367691 X10 ⁻⁰¹
9	0.0483	7.728718 X10 ⁻⁰¹
10	0.04284	6.854621 X10 ⁻⁰¹
11	0.03769	6.030006 X10 ⁻⁰¹
12	0.0353	5.658610 X10 ⁻⁰¹
13	0.02025	3.240315 X10 ⁻⁰¹
14	0.01443	2.309187 X10 ⁻⁰¹
15	0.00147	2.352717X10 ⁻⁰²
16	0.000000	1.771148 X10 ⁻⁰⁶

Resultados de la validación

Para cada modelo se realizó una validación espacial, esto es, del total de unidades de ladera se toma una base de datos para correr el modelo de probabilidad (training data set) pero también se apartó una muestra aleatoria de laderas (validation data set) para correr una evaluación. De 259 unidades de ladera que componen la zona de estudio, 207 se tomaron se eligieron aleatoriamente para conformar el training data set y 52 se utilizaron para la validación. Sin embargo, los resultados de dicha validación fueron muy pobres. Junto con el personal del CNR-IRPI de Perugia se llegó a la conclusión de que la pobreza en la validación se debía a que había muy pocos casos para trabajar y además de que con una selección aleatoria de las unidades de ladera, se podía dar el caso de que la muestra no fuese representativa de todas las condiciones físicas y antrópicas de la zona de estudio, por lo que se decidió realizar el inventario de campo para identificar los PRM ocurridos en el periodo 2011-2012 en la zona de estudio para utilizarlos como validación de los resultados del modelo con los PRM de 1994-2010. Los resultados de dicha validación fueron aceptables con un porcentaje de eficiencia de 69.8% para ADL, 71.53% para RL, 74.52% para RN y 57.14% para ADC. El resultado no fue muy distinto para la validación general del modelo de combinación (figura 3.15).

Se obtuvo un 75.2% de casos acertados en la validación, lo cual es bastante aceptable, se puede afirmar de esta manera que el modelo es capaz de predecir el 70% de los PRM que ocurren en la zona. El dato ROC es aceptable con 0.708. Es evidente que para conseguir mejores resultados, los datos del inventario deben mejorarse, por lo pronto, el Modelo de Combinación ha demostrado ser eficaz para determinar la susceptibilidad por PRM en la zona de estudio.

Figura 3.15. Resultados de la validación de la combinación de modelos.



Capítulo 4. Determinación de la amenaza por PRM

4.1 Introducción

La amenaza es la probabilidad de que el peligro se materialice. Específicamente, la amenaza por PRM se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento dañino en un periodo de tiempo y espacio determinados (Varnes, 1984; Guzzetti, 2005). Para definir concretamente el grado de amenaza de los PRM se debe conocer la susceptibilidad, la frecuencia y la magnitud. La magnitud está relacionada con el poder destructivo de un PRM, puede equipararse al volumen o área del PRM, esta puede medirse de manera probabilística o determinística. La susceptibilidad se refiere a la localización geográfica, dónde son esperados los PRM (Guzzetti, 2005). La frecuencia se refiere a el intervalo de tiempo en que puede ser esperado un evento de PRM.

De acuerdo a Guzzetti 2005, la definición de la amenaza por PRM no es fácil, en teoría un movimiento de gran velocidad y volumen de material acarreado es muy destructivo (Varnes, 1984), pero al mismo tiempo este tipo de procesos no son frecuentes, ocurren contadas veces. En cambio, son muy frecuentes movimientos más lentos, con un área de afectación menor que no suelen cobrar vidas humanas pero si resultan en cuantiosos daños a la propiedad, infraestructura y modos de subsistencia de las comunidades afectadas, por lo tanto la relación velocidad de movimiento-volumen del material desplazado y daños no es lineal. Por otro lado, la ocurrencia de muchos PRM en una zona determinada está relacionada con eventos extraordinarios como sismos, huracanes o precipitaciones extraordinarias, este tipo de eventos suelen ser los más destructivos y son los que quedan grabados en la memoria humana, entonces, los PRM presentados en gran número representan una amenaza diferente a los PRM que se presentan de forma individual o casual.

La frecuencia de los eventos detonantes mencionados es en muchos casos la clave de la determinación de la amenaza por PRM, sin embargo, la falta de datos suele ser un obstáculo muchas veces insalvable que deja a los modelos que se derivan de esa información, incompletos. En el caso de este proyecto, la falta de datos o las referencias ambiguas fueron uno de los mayores problemas para poder elaborar un análisis de la amenaza más objetivo y efectivo.

Los modelos cuantitativos de la amenaza por PRM tratan de predecir la ocurrencia de nuevos PRM bajo el supuesto de que los nuevos PRM se presentarán bajo las mismas condiciones y circunstancias similares que los PRM del pasado, pero esto no siempre es tan exacto (Guzzetti, 2005).

4.2 Modelos de amenaza por PRM

La definición de amenaza por PRM incluye tres aspectos: localización, tiempo y superficie afectada. Se trata de estimar dónde ocurrían los próximos PRM, cuándo y de que tamaño serán. Matemáticamente se puede expresar de esta manera:

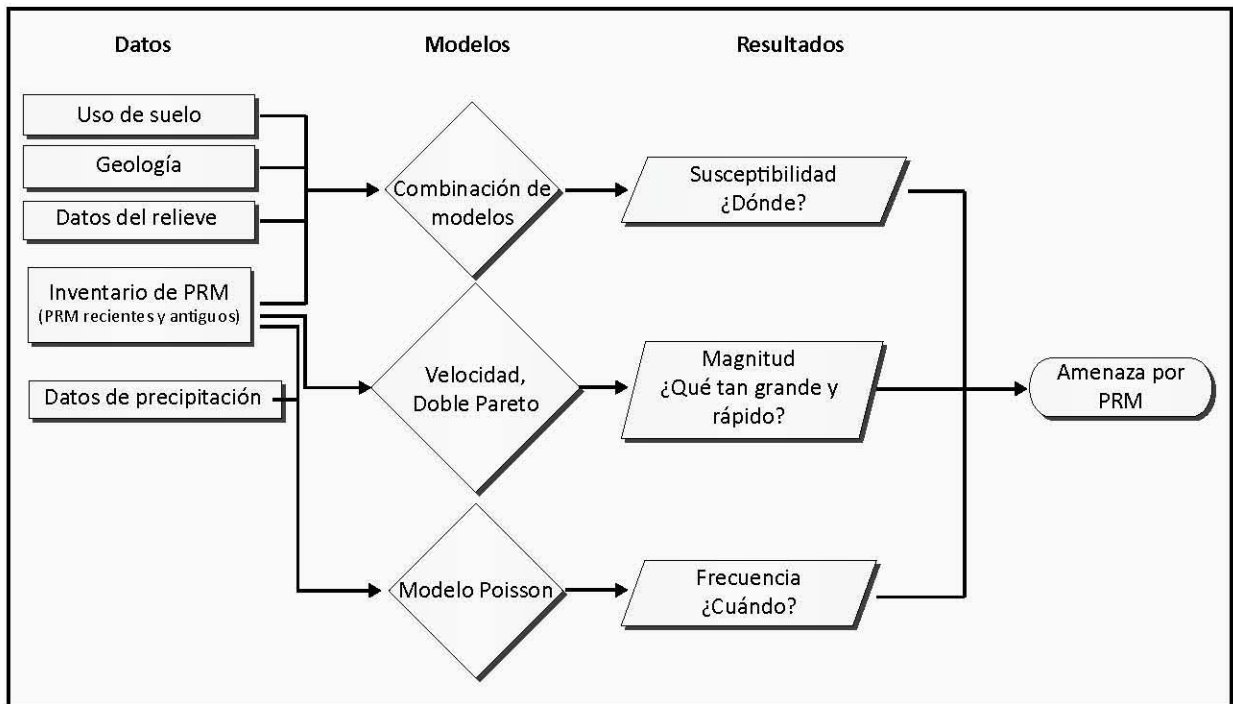
$$A_L = P(M_L) * P(T_L) * Su \quad (4.1)$$

Donde:

- A_L = Amenaza de PRM.
- $P(M_L)$ = Probabilidad de la superficie o área de los PRM.
- $P(T_L)$ = Probabilidad de que ocurran PRM en un determinado periodo de tiempo.
- Su = susceptibilidad o probabilidad espacial de que ocurran PRM en un lugar.

La obtención de la susceptibilidad (Su) es explicada en el capítulo 3. Para obtener la Periodicidad o probabilidad temporal $P(T_L)$ se utiliza un modelo Poisson o de distribución binominal. La probabilidad del área de afectación o magnitud $P(M_L)$ se obtiene por el análisis de probabilidad de distribución. Debido a que es común la falta de información estadística relacionada con los PRM, este acercamiento relativamente sencillo cumple con los objetivos de esta tesis. La figura 4.1 muestra un diagrama que resume como se obtuvo el grado de amenaza en este trabajo.

Figura 4.1. Procedimiento para la determinación del grado de amenaza.



4.3 Determinación de la magnitud

Área de los PRM

Uno de los datos para obtener la magnitud es la probabilidad del área o tamaño de los movimientos de ladera (figura 9), lo que indica cuál es el área más probable que se puede esperar en los PRM que ocurran en la zona. Este parámetro es una aproximación válida para definir la magnitud de un PRM (Rossi, *et al.*, 2012). Para obtenerlo, primero se obtuvo el área total (superficie de la corona y área de depósito) de cada PRM de la base de inventario en un GIS; posteriormen-

te, se corrieron tres modelos de distribución de área de PRM, implementando técnicas paramétricas y no paramétricas (Estimación de la Densidad del Histograma (EDH), Estimación de la Densidad por Kernel (EDK) y Máxima Verosimilitud (MV)), para estimar los parámetros en tres distintas funciones de distribución estadística: Doble Pareto Simple (DPS), Doble Pareto (DP) e Inversa Gamma (IG). Todo esto en el ambiente de R (software de cómputo estadístico libre). A continuación se definen los tres modelos de distribución de área de PRM:

Doble Pareto Simple. Esta distribución ha sido utilizada en gran variedad de disciplinas, desde la arqueología hasta la economía para modelar tasas de crecimiento de índices de precios, producto interno bruto o el tamaño de compañías. La distribución Doble Pareto Simplificada muestra el comportamiento de la ley de potencia estadística (relación matemática entre dos cantidades, en este caso área de los PRM y su frecuencia) en ambas colas de la curva (Al-Athari, 2011).

El parámetro α controla la pendiente de los valores altos en la cola de la distribución. β y η hacen lo mismo pero con los valores bajos. t y λ controlan la posición del valor máximo de las funciones de distribución (rollover) que es dónde la curva tiene un punto de inflexión. En la distribución Doble Pareto Simple, los valores de c y m representan los valores mínimo y máximo, respectivamente, de las áreas de los PRM (Rossi, 2012).

Esas ecuaciones son introducidas al software bajo las técnicas paramétricas y no paramétricas que ya se mencionaron: EDH, EDK, MV. Estas técnicas son una herramienta para estimar la densidad de probabilidad de una función. La técnica EDK es no-paramétrica, lo que significa que es muy útil en muestras de datos cuya distribución no es conocida. En cambio, las técnicas paramétricas como máxima verosimilitud (MV), se basan en que se conoce la distribución, normal o no, de una serie de datos y basta con encontrar algunos parámetros para conocer todos los detalles de esa distribución. La comparación de dichas técnicas representa una forma útil de encontrar un valor más acertado de la magnitud de PRM.

Las tres combinaciones pueden presentar ligeras diferencias en sus resultados. Los resultados en este caso se muestran en la tabla 4.1.

La tabla muestra la combinación de resultados. El valor de r (rollover) indica la probabilidad de área. Dicho valor es diverso cuando se utiliza EDK, dando valores más elevados de área (más de 300). Con los otros dos métodos los valores descienden a menos de cien. Sin embargo, es justamente la técnica EDK la que presenta menor error estándar en los tres modelos. Por lo tanto, será ese resultado el que se tomará como válido. Los tres valores de r en EDK son similares: 338 (DPS), 339 (DP) y 347 (IG). Para poder tener un resultado definitivo, se obtiene la media de esos resultados resultando una probabilidad de área de PRM de: 341.3 m². La gráfica de la figura 4.2 ilustra lo que significa el rollover, la sección en dónde la curva cambia de dirección y que indica el valor más probable de área de los PRM. En este caso dicho punto de inflexión ocurre muy cerca del símbolo 1e+2 en el eje de las X lo que en notación científica significa 100.

Los resultados se pueden interpretar de la siguiente forma: si toman en cuenta todos los resultados el área más frecuente que se puede esperar en la zona de Pahuatlán en un PRM oscila entre los 75 y los 347 m², si únicamente se considera el resultado obtenido de la media de Estimación de la Densidad por Kernel (EDK), el valor más frecuente que se puede esperar es de 341.3 m². Esto significa que movimientos más bien pequeños (18 X 18 m aproximadamente por lado)

Tabla 4.1. Resultados de la estimación de la probabilidad de área de PRM.

Método de estimación	EDH			EDK			MV			
	Valor	Error Std.	Valor de t	Valor	Error Std.	Valor de t	Valor	Error Std.	Valor de t	
DPS	α	1.13	0.07	15.63	1.15	0.01	176.21	1.22	0.1	12.02
	β	1.88	0.2	9.19	1.73	0.02	96.56	1.41	0.22	6.36
	t	191.88	54.29	3.53	227.15	5.76	39.46	340.72	97.42	3.5
	r	88	NA	NA	338	NA	NA	85	NA	NA
DP	α	1.13	0.07	15.71	1.15	0.01	178.07	1.19	0.12	10.16
	β	1.88	0.2	9.2	1.73	0.02	97.22	1.35	0.26	5.24
	t	192.86	54.45	3.54	227.83	5.73	39.77	347.78	119.33	2.91
	c	4.73	NA	NA	4.73	NA	NA	4.73	NA	NA
	m	30736.49	NA	NA	30736.49	NA	NA	30736.49	NA	NA
	r	88	NA	NA	339	NA	NA	75	NA	NA
IG	α	1.08	0.11	9.72	1.11	0.01	119.75	1.14	0.11	10.41
	η	6.51	1.01	6.45	7.73	0.1	72.91	7.88	0.91	8.65
	λ	16.64	1.97	8.46	17.77	0.18	99.89	19.01	1.67	11.39
	r	91	NA	NA	347	NA	NA	107	NA	NA

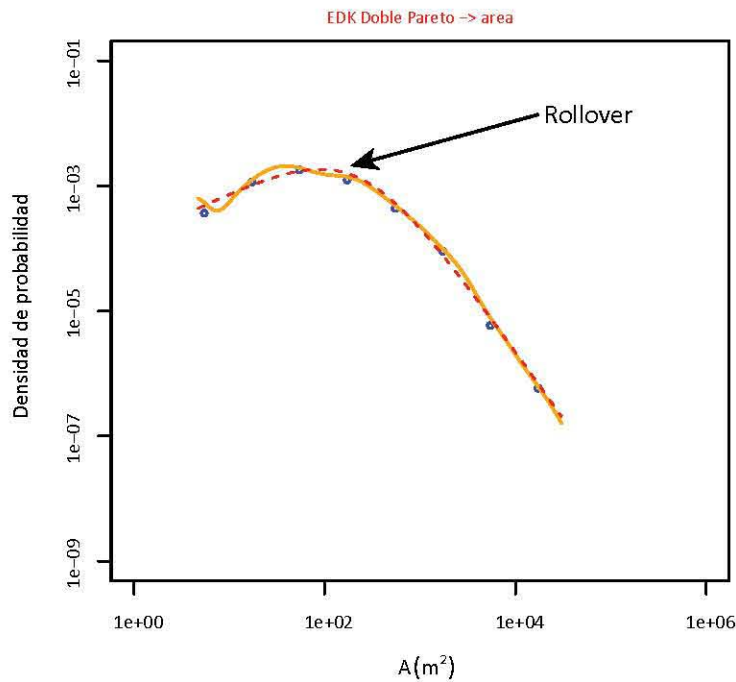
son los más frecuentes en la zona. Esto puede explicarse debido a que un gran número de los movimientos registrados en el inventario están relacionados con los caminos y carreteras de la zona de estudio en donde son muy frecuentes movimientos con esta magnitud. Los grandes movimientos, que se miden en miles de metros cuadrados (el más grande en la zona de estudio fue de 30 736m²), son menos probables de que ocurran. Es importante señalar que dichos modelos solo se corrieron con la base de datos de los movimientos recientes, resultados diferentes se obtendrían si se corren los modelos con la base de datos de PRM viejos, movimientos que son considerablemente mayores en área a los movimientos recientes.

El valor de 341.3 m² debía ser ajustado a una escala de cero a uno. Esto no es posible matemáticamente sin cierto conocimiento empírico del tamaño que puede alcanzar un PRM. Para tal efecto, se decidió utilizar la escala propuesta por Guzzetti (2005), para asignar un valor de magnitud de área. Esta escala está basada en el volumen que pueden presentar los PRM asumiendo que entre más grande sea este volumen más probabilidad de daño existe. Como en esta investigación no fue posible determinar el volumen del material desplazado para cada PRM, se obtuvo su equivalente en unidades de área aplicando una simple raíz cúbica. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 4.2.

En la tabla 4.2, el valor más frecuente de área de un PRM corresponde a la clase de intensidad media, interpolando ese valor a una escala de cero a uno, da el resultado de 0.547. Este dato ha sido calculado para toda la zona de estudio (no es posible obtenerlo por unidad de ladera), sin embargo en la zona de estudio se han registrado PRM de mayor o menor dimensión, por ello se relacionó este valor general con el dato del área del mayor PRM ocurrido en cada unidad de ladera, para obtener un valor de magnitud espacial. Los resultados se muestran en la figura 4.3.

Solo tres unidades de ladera presentan probabilidad de que ocurran PRM muy grandes, dichas laderas tienen un ángulo de inclinación pronunciado. En una categoría menor se localizan las unidades que abarcan el centro del poblado de Pahuatlán del Valle, lo que sugiere que la amenaza y el riesgo en esa zona deberán ser tomados en cuenta. No hay polígonos en verde porque se agregó el valor del rollover a toda el área de estudio. La herramienta para el cálculo de la densidad de probabilidad de área, se encuentra disponible en internet, accedendo desde la interfase de Quantum GIS (software libre), con el plugin WPS Plugin 0.8.4 en la dirección: <http://pywps.wald.intervation.org/>.

Figura 4.2. Distribución de la densidad de probabilidad de área de los PRM recientes en la zona de estudio con el modelo Estimación de Densidad de Kernel con la técnica de Doble Pareto.



Velocidad del movimiento

Otro aspecto relacionado con la magnitud del movimiento es la velocidad del movimiento. De hecho, el daño que pueda causar un PRM está en función de su volumen (área a falta de poder calcular volúmenes) y la velocidad del movimiento. Para obtener una medida de la velocidad de los PRM de Pahuatlán, se tomó como base la clasificación de Varnes (1978) presentada en el capítulo II de este trabajo. La velocidad del movimiento para cada PRM (1994-2012) del inventario puede ser asignada de acuerdo al tipo de movimiento, las características geomorfológicas (por ejemplo a mayor pendiente mayor velocidad esperada del movimiento), las características litológicas (en la zona de materiales de calizas, por su constitución, se espera que tengan una mayor velocidad de caída), la apariencia del movimiento en las imágenes de satélite y en campo (Antonini *et al.*, 2002), y los datos de las experiencias previas con los PRM en la zona de estudio.

De acuerdo a su tipología, los deslizamientos translacionales y rotacionales y los flujos de tierra, pueden clasificarse de manera general como movimientos rápidos (1.5 m/día en promedio). Esto

Tabla 4.2. Escala de magnitud por volumen y área del material desplazado.

Volumen estimado (m ³)	Área estimada (m ²)	Clasificación
<0.001	0-1	Extremadamente leve
0.001 – 0.5	1-2	Muy leve
0.5 – 500	3-60	Leve
500 – 10 000	60-460	Medio
10 000 – 500 000	461-6400	Alto
> 500 000	>6400	Muy alto
>>500 000	>>12 800	Extremadamente alto

coincide con los PRM de la zona de la calle Cinco de Mayo, pero no con los relatos de los pobladores de Cuenautla de la Paz que narraban como pudieron escapar de dos deslizamientos que afectaron la zona pero no pudieron rescatar ni sus posesiones ni sus animales de granja. Los flujos de detritos pueden ser clasificados como movimientos muy rápidos y las caídas y vuelcos como movimientos extremadamente rápidos. La clasificación de cada PRM de acuerdo a su velocidad representa una inferencia geomorfológica por parte del investigador (Guzzetti, 2005). Para este trabajo, los PRM se clasificaron de acuerdo a su velocidad en seis clases (ver tabla 4.3).

A partir de esta clasificación se obtuvo la media de valor de velocidad de movimiento para cada unidad de ladera. De esta forma, si en una unidad había tres PRM cuya clasificación fuese: Muy rápido, rápido y lento; los valores asignados serían 4, 3, 1. Se obtiene la mediana (3) y ese es el valor de velocidad de movimiento que se asigna a esa ladera. Posteriormente, por medio de una equivalencia, el valor se ajusta a un intervalo entre 0 y 1. De esta forma, la mediana de 3 obtenida representa un valor final de 0.60. Los resultados de este proceso se muestran en la figura 4.4. En el mapa se observa que los colores en verde no necesariamente se refieren a la ocurrencia de movimientos lentos, sino a aquellas zonas donde no ha habido PRM antes y no se puede obtener un dato para evaluarlas. Las unidades de ladera con colores naranjas y rojos representan las zonas en donde es muy probable que se presenten movimientos rápidos, muy rápidos o hasta extremadamente rápidos. Son unidades de ladera con un ángulo de ladera muy pronunciado pero de diversa litología. Aun así, casi toda la zona presenta valores de medio a alto.

De los resultados de probabilidad de velocidad del movimiento y área más probable de PRM, se obtuvo una relación simple que otorgó el valor de magnitud para la zona de estudio:

$$M_L = ((PV + PA)) / 2 \quad (4.5)$$

Donde:

M_L = Magnitud

PV = Probabilidad de velocidad de movimiento

PA = Área más probable de un PRM

Los resultados del valor final de la magnitud para cada unidad de ladera se muestra en la figura 4.5.

Figura 4.3. Mapa de probabilidad de área por unidad de ladera.

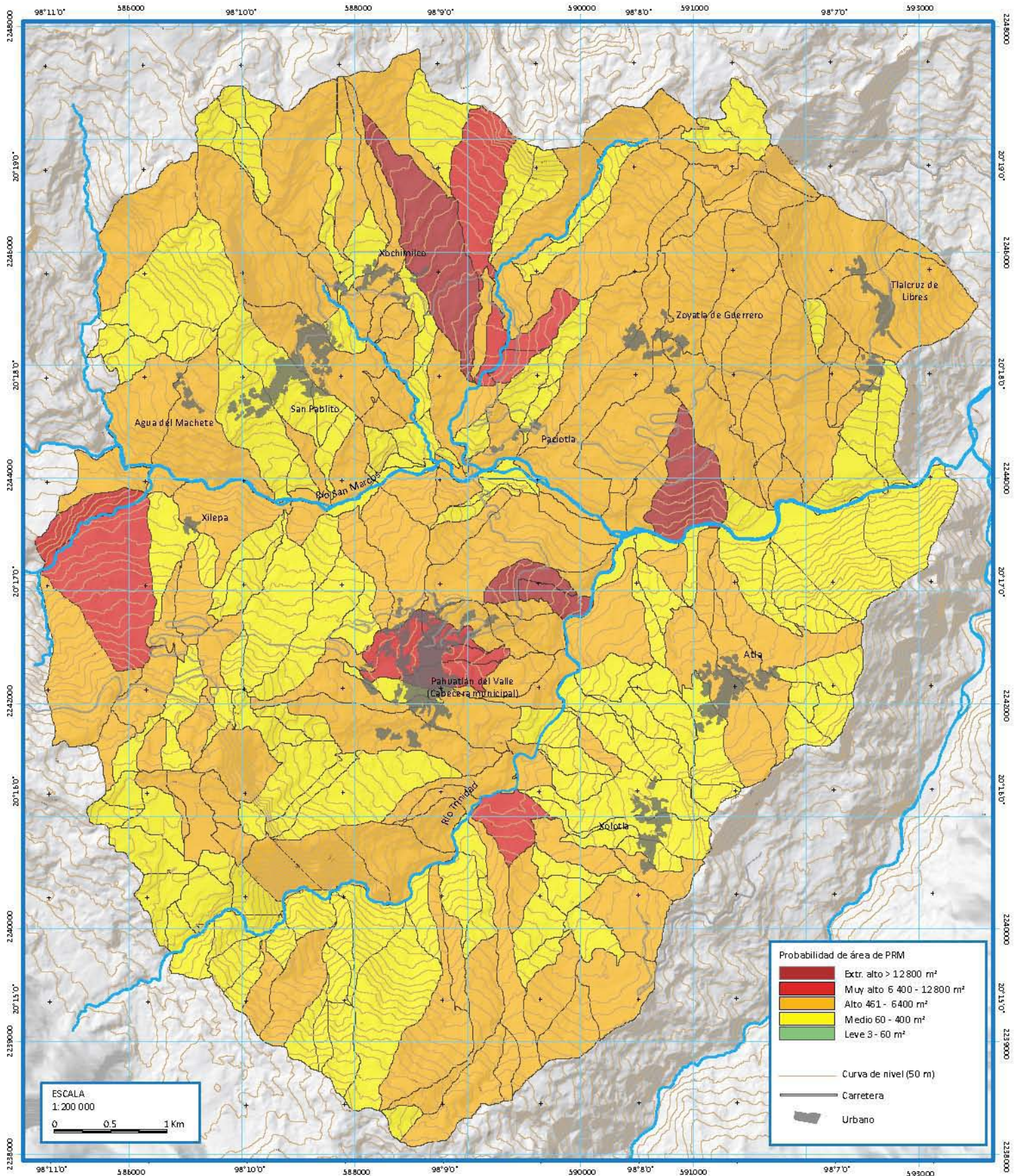


Tabla 4.3. Clasificación geomorfológica de la velocidad de PRM en la zona de estudio con base en Varnes (1978).

Valor	Velocidad	Descripción	Daño a la infraestructura	Daño a la población
5	3 m/s	Extremadamente rápido	Daños estructurales y funcionales.	Pérdida de vidas, heridos, daños indirectos
4	0.3 m/min	Muy rápido	Daños estructurales y funcionales.	Posible escape y evacuación. Pérdida de vidas, heridos y daños indirectos
3	1.5 m/día	Rápido	Infraestructura y equipamiento destruidos por la masa desplazada.	Daños indirectos
2	1.5 m/mes	Moderado	Estructuras localizadas en la masa desplazada son dañadas en gran medida.	Daños indirectos
1	1.5 m/año	Lento	Poco o nulo	Nulo
0	0.6 m/año	Muy lento	Nulo	Nulo

4.4 La frecuencia de ocurrencia de PRM

Análisis de los datos meteorológicos

En Pahuatlán cada temporada de lluvias se registran PRM. Sin embargo, en la zona se presentan, de manera menos frecuente, una serie de lluvias extraordinarias que detonan gran cantidad de PRM. Si se analizan los datos meteorológicos históricos de la región, se encuentra la firma de algunos de estos eventos. Para la zona de estudio, se cuenta con una estación meteorológica desde 2007. Es una estación de instalación reciente, por lo tanto no hay datos de precipitación histórica para el municipio. Pero si se analizan los datos meteorológicos en conjunto de la región de la Sierra Norte de Puebla se pueden identificar algunos eventos de lluvias extraordinarias. Estos eventos se analizan en su recurrencia debido a que son fenómenos detonantes de PRM en la región.

Los datos meteorológicos analizados provienen de la base de datos del ERIC III creado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) con base en los datos históricos del sistema Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional del Agua (Conagua), y que contaba con datos hasta el año 2003. Muchas estaciones meteorológicas en México no han tenido actividad permanente, pero se encontraron datos para la región de la Sierra Norte de Puebla desde 1921. Para lograr una mejor visualización de los fenómenos meteorológicos que han afectado históricamente al municipio de Pahuatlán, se seleccionaron algunas de las estaciones meteorológicas más cercanas a este. Con respecto a esto último, hay estaciones cercanas al municipio de Pahuatlán (en un radio de menos de 50 km), algunas son: Tenango de Doria, Huauchinango y las de la presa Necaxa. En la figura 4.6, por practicidad, solo se muestran los datos diarios de la estación Huauchinango, que es la que más tiempo estuvo en funcionamiento.

La primera serie es la que muestra los datos más antiguos: 1920-1930; en esa serie se puede observar que en esa década no hubo ningún evento de lluvia extraordinaria que causara ningún percance

Figura 4.4. Mapa de probabilidad de velocidad del movimiento.

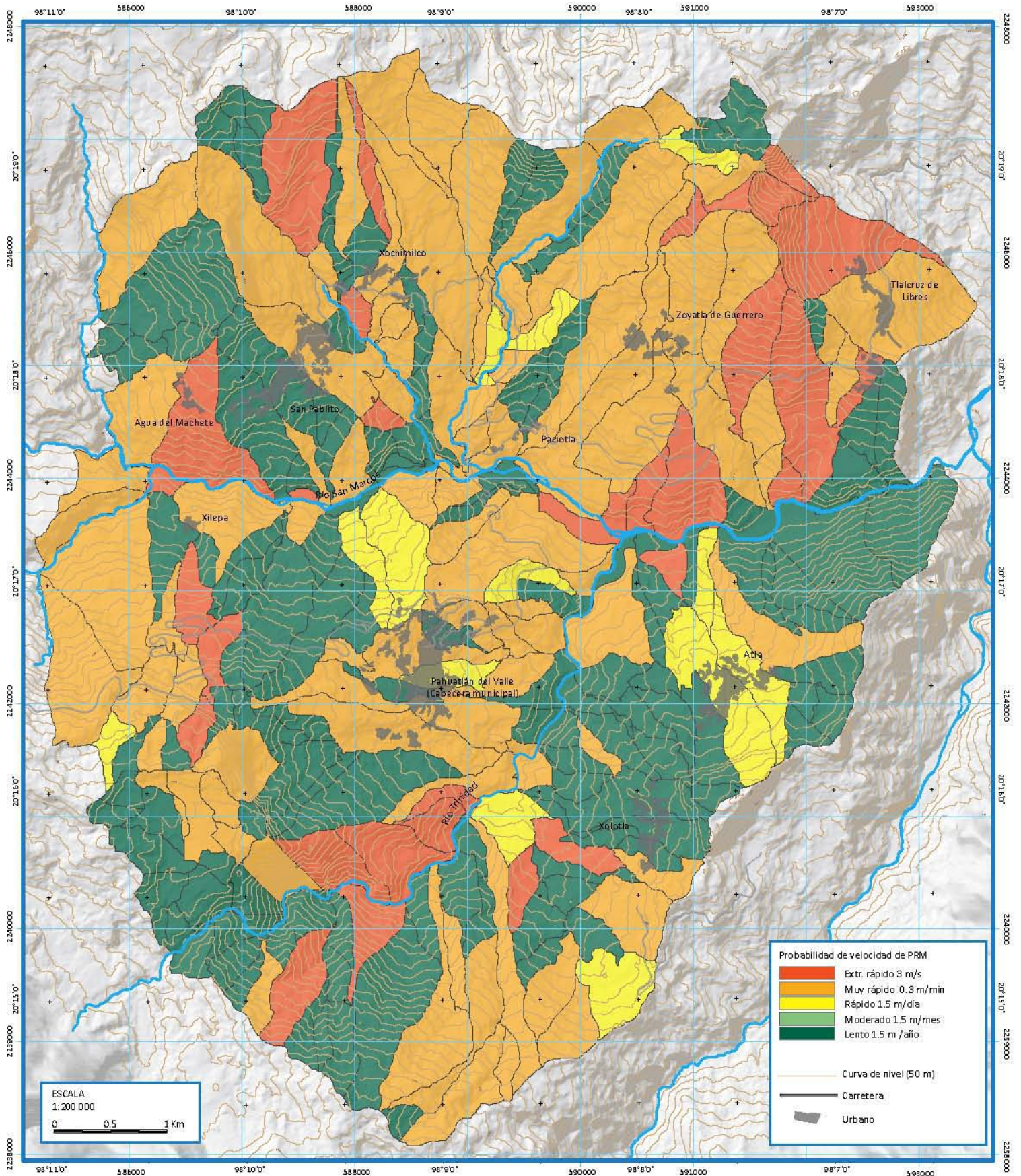
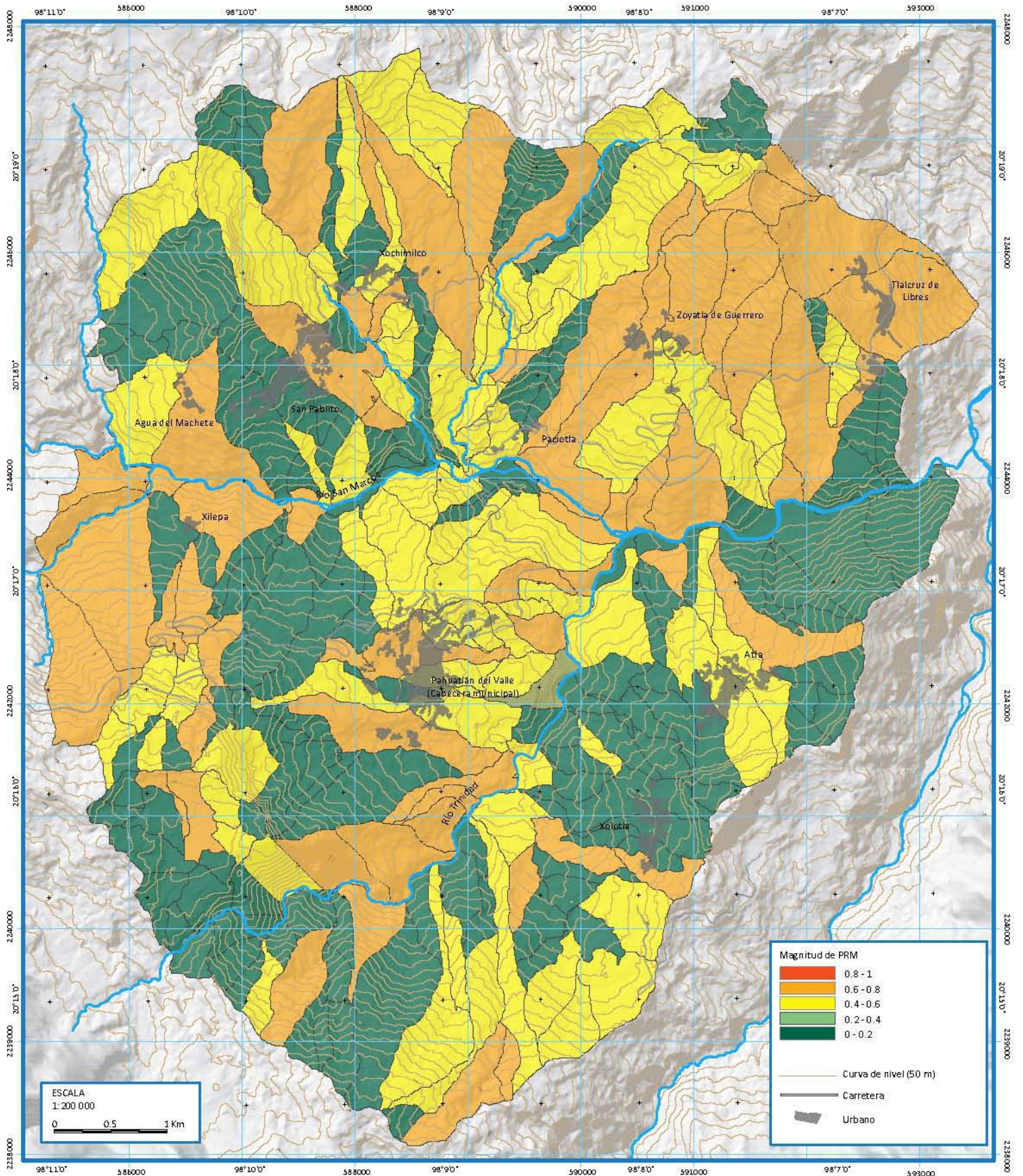


Figura 4.5. Mapa de valor de la magnitud de PRM.



grave en la región, excepto el evento del huracán de 1930 (simplemente llamado así pues en ese entonces no se les daba nombre a los huracanes). En nota del periódico Excelsior de octubre 22 de 1930, se reportan varios PRM en la Sierra Norte que afectaban varios tramos de vías de tren.

Para el siguiente bloque (1930-1940) los datos históricos de la investigación hemerográfica evidencian otro evento ocurrido en julio de 1933, también por un huracán, y que también causó daños en la región. Los datos meteorológicos son dispares no muestran una precipitación fuera de lo normal en ese año en ese mes (figura 4.3). Solo la estación meteorológica de Cuetzalan del Progreso registró un gran nivel de precipitación (que significa un record, con más de 800 mm en un día) pero a finales de julio, cuando el huracán aconteció del 10 al 13 de ese mes. La magnitud del dato lleva a pensar en un error humano, lo cual no es raro; quizás la lectura de ese día se trata en realidad de toda la lluvia que cayó en ese mes y que, quizás por producto del mismo desastre que aconteció, no se había podido vaciar el pluviómetro. Durante la década del 40 los datos también son confusos. Primeramente, no hay rastro de alguna precipitación intensa o fuera de lo normal en el año de 1942, que es el año en que los pobladores refieren hubo un desastre similar. En otras referencias se encontró que el deslizamiento de la calle 5 de Mayo se activó por primera vez en 1947 (ver capítulo II), pero tampoco hay evidencia de que el fenómeno detonante haya sido un evento de precipitación extraordinaria.

La segunda mitad de la década del 50 fue bastante lluviosa, presentándose eventos extremos en los años 1954, 1955 y 1958. En las referencias hemerográficas como el periódico El Sol de Puebla, Pahuatlán aparece mencionado en varias notas como uno de los municipios afectados por las lluvias y los PRM en esos tres años. Mención especial merece el evento de 1955, en septiembre de ese año, tres huracanes llegaron hasta la costa de Veracruz, el tercero de estos fue el huracán Janet, de clasificación 5, que previamente había destruido la ciudad de Chetumal y finalmente terminó de destruir Tampico el 29 de septiembre. En todas las estaciones meteorológicas que estaban en operación en aquel entonces en la región de la Sierra Norte de Puebla, se registraron niveles de precipitación mayores a 200 mm en un solo día. Es de esperar que, esa intensa acumulación de agua sumada a toda el agua que había caído ese mes y los meses anteriores de la temporada de lluvias, fuese el factor detonante de un gran número de PRM en toda la región, como queda registrado en varias notas de los periódicos de entonces.

Posteriormente, tanto los datos hemerográficos como los datos de las estaciones meteorológicas presentan casi treinta años sin registrar ningún evento similar al de los años 54, 55 y 58. En los datos de precipitación en estas décadas se observa una heterogeneidad de niveles de precipitación, lo que nos hace pensar que los eventos de precipitación intensa (mayores a 200 mm) fueron de carácter local y no regional, tampoco se reportaron daños, por lo tanto no fueron noticia en los periódicos. Solo en el año de 1974, los datos de precipitación nos hablan de un evento que si tuvo un mayor impacto, en los periódicos el fenómeno aparece mencionado como causante de inundaciones y desbordamiento de ríos en el estado de Veracruz, pero no se encontró ninguna mención hacia la región. El evento puede catalogarse como de mediana intensidad.

La década de los 80 se caracterizó por bajos niveles de precipitación y en general de actividad ciclónica a pesar de que en esa década ocurrió el ciclón Gilberto, que no afectó a la región de la Sierra Norte de Puebla (Rosengaus *et al.*, 2002). En la década de los 90, se presenta de nueva cuenta un evento similar al de 1955, esta vez no por un huracán sino por la Depresión Tropical n°11.

Figura 4.6. Datos meteorológicos de la estación Huauchinango (1920-2000). (Fuente: Sistema ERIC III).

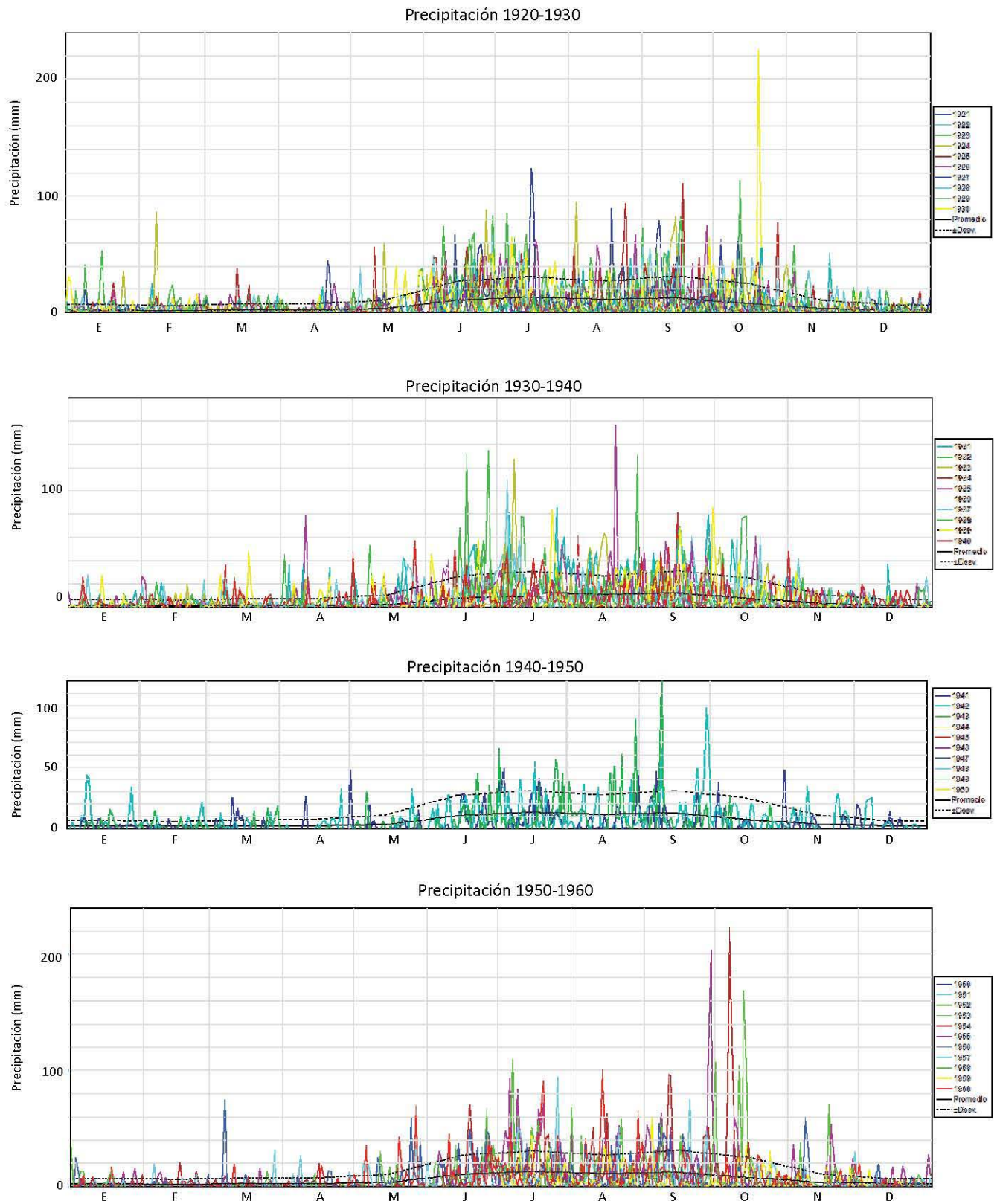
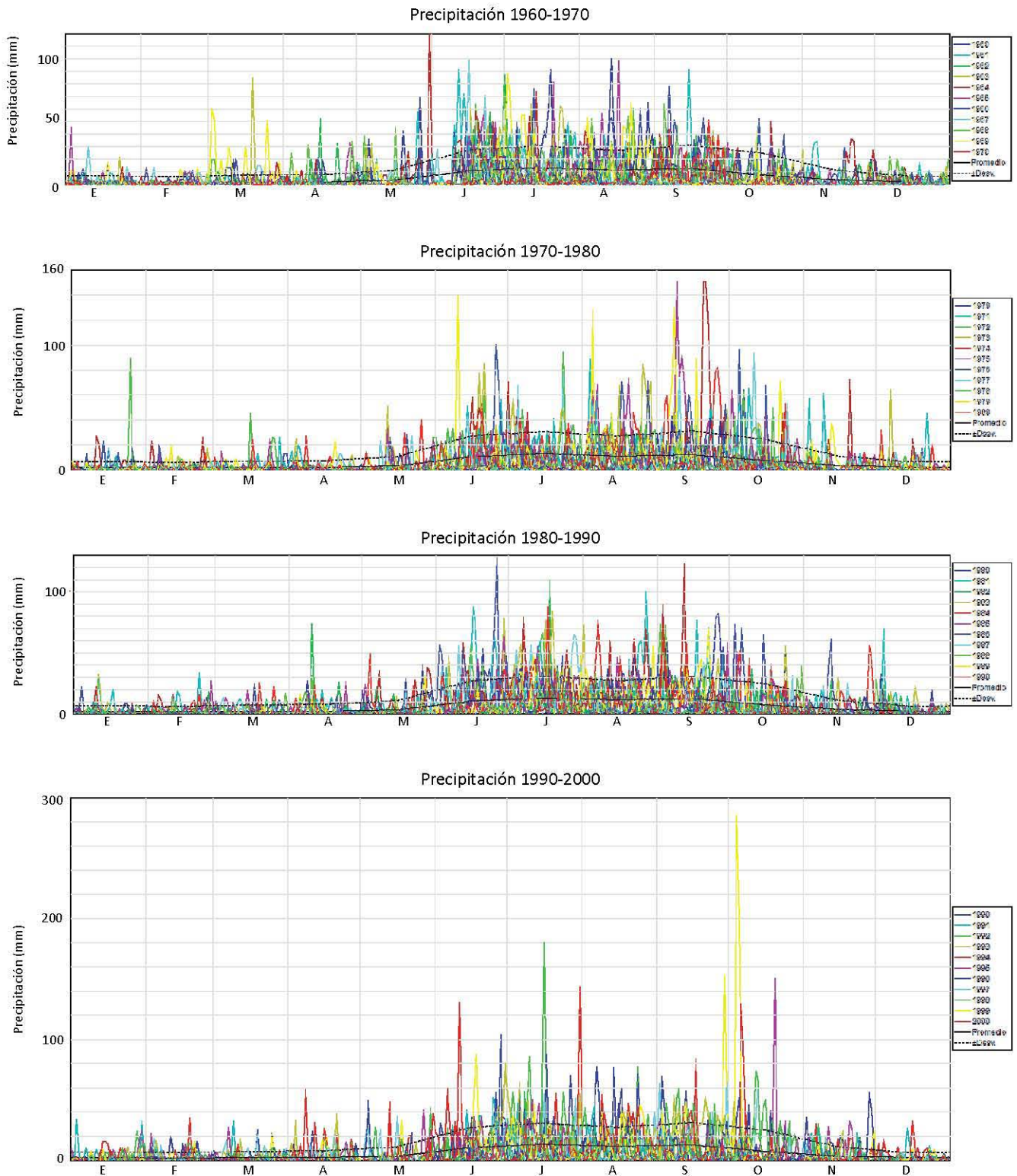


Figura 4.6. Datos meteorológicos de la estación Huauchinango (1920-2000). (Fuente: Sistema ERIC III) (continuación).



Los datos meteorológicos dan cuenta de ello con niveles de precipitación, para el día 5 de octubre, de casi 300 mm. En esa ocasión, en Pahuatlán también se registraron PRM, y solo se reportó una persona desaparecida, comparando el nivel de daño con el que se registró en el resto de la región, el municipio corrió con suerte.

El análisis de estos datos lleva a una estimación aproximada de la recurrencia de eventos extremos de PRM a causa de lluvias extraordinarias. El municipio de Pahuatlán ha tenido este tipo de eventos en los años que muestra la tabla 4.4.

La última década (2000-2010) se caracterizó por la temporada más fuerte de ciclones de todos los tiempos. Si bien, la región de la Sierra Norte de Puebla no fue de las más afectadas en esa ocasión, si se registraron PRM principalmente a causa del huracán Stan.

Aunque a partir del mes de agosto de 2007, la localidad de Pahuatlán cuenta con una estación meteorológica, los datos de esta no parecen ser correctos en la pluviometría. Hasta octubre de 2007 la estación mostraba valores cercanos a 100 mm por mes, luego de ese mes los valores que da son prácticamente de cero, incluso en los meses de la temporada de lluvia, lo que hace pensar que hay un error técnico o descompostura en la estación. Por esta razón, no se pudo ni siquiera construir un climograma de la región. Se debe solucionar esta problemática para poder trabajar los datos de precipitación con los PRM, para establecer rangos de precipitación en los que se presentan PRM. La falta de información completa y específica de la zona impide aplicar valiosas metodologías para el estudio de la ocurrencia de PRM. Pero también nos deja ver que los fenómenos de carácter extraordinario, tienen un promedio de recurrencia de 12.5 años en la región. Esto significa que en dicho intervalo de tiempo es probable que se presente un evento severo de PRM asociado a la ocurrencia de lluvias extraordinarias. La pregunta a responder sería ¿con qué frecuencia se pueden esperar PRM en la zona de estudio de acuerdo a los datos del inventario multitemporal?

Tabla 4.4. Lista de eventos de lluvias extraordinarias que han causado eventos de gran magnitud de ocurrencia de PRM en la zona de estudio. (Fuente: elaborada con datos del <http://smn.cna.gob.mx/>; Atlas Nacional de Riesgos, 2012 y el sistema ERIC III).

Fecha	Evento	Precipitación media de las EM que registraron el evento (mm).
22 de octubre de 1930	Huracán sin nombre	196
11 de julio de 1933	Tormenta tropical nº11	Desconocido
11 de septiembre de 1954	Huracán Florence, categoría 1.	236
29 de septiembre de 1955	Huracán Janet, categoría 5. En ese mismo mes, habían afectado también los huracanes Hilda y Gladys.	266
15-18 de octubre de 1958	Lluvias intensas	156
4-5 de octubre de 1999	Depresión tropical número 11.	297
5 de octubre de 2005	Huracán Stan	145

Determinación de la frecuencia

La frecuencia (o recurrencia) puede calcularse si se tiene un inventario multitemporal que permita establecer cuántos PRM ocurrieron en distintos periodos de tiempo (Guzzetti *et al.*, 2005a). Lo anterior tiene como base el que los PRM se pueden considerar como eventos puntuales que ocurren al azar en el tiempo (Crovelli, 2000; Guzzetti, 2007). Bajo este supuesto, la excedencia de probabilidad de ocurrencia de PRM puede ser calculada matemáticamente. De acuerdo a Crovelli, 2000, dos modelos pueden utilizarse para tal propósito: Un modelo de Poisson y un modelo Binominal. Crovelli demostró que el modelo binominal suele dar resultados de sobreestimación de ocurrencia de PRM cuando se calculan periodos cortos de tiempo (1 o hasta tres años); debido a esta problemática, en este trabajo únicamente se utiliza un modelo Poisson para conocer la excedencia frecuencia de ocurrencia de PRM en la zona de estudio. El modelo de Poisson ha sido utilizado para el mismo fin por Crovelli, 2000; Coe *et al.*, 2000; Roberds, 2005 y Guzzetti, 2007.

El modelo de Poisson es un modelo de tiempo continuo que consiste en una serie de puntos aleatorios (eventos) que ocurren independientemente del tiempo ordinario, que se considera naturalmente continuo. El modelo permite determinar la probabilidad de ocurrencia de PRM en diferentes intervalos de tiempo con base en los datos de un inventario multitemporal (Guzzetti, 2007). Se basa además, según Crovelli, 2000, en una serie de supuestos:

- El número de eventos de PRM que ocurren en intervalos de tiempo diversos son independientes unos de otros.
- La probabilidad de que un evento ocurra en un periodo de tiempo muy corto es proporcional a la longitud del intervalo de tiempo.
- La probabilidad de que más de un evento ocurra en un intervalo de tiempo muy corto es despreciable.
- La distribución de la probabilidad del número de eventos es la misma para todos los intervalos de tiempo.
- La recurrencia promedio de eventos permanece igual en el futuro como fue en el pasado.

El modelo se define matemáticamente como:

$$P[N_L(t) = n] = e^{(-\lambda t)} \frac{\lambda t^n}{n!} \quad n = 0,1,2, \dots \quad (4.6)$$

Donde:

P = Probabilidad de ocurrencia

N_L = número de PRM ocurridos en el tiempo

n = cantidad de PRM

$n!$ = expresión factorial: $n(n-1)(n-2)\dots (n-(n-1))$

t = tiempo

e = Constante de Napier. Base del logaritmo natural: 2.71828...

λ = tasa media estimada de ocurrencia de PRM que corresponde a $1/\mu$

μ = intervalo medio estimado de recurrencia entre eventos de PRM.

A partir de la ecuación 4.6 la probabilidad para experimentar uno o más PRM durante un periodo de tiempo determinado se expresa así:

$$P[N_L(t) \geq 1] = 1 - P[N_L(t) = 0] = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-t/\mu} \quad (4.7)$$

La clave consiste en obtener la recurrencia promedio que se calcula dividiendo el número total de PRM en cada unidad de área por el tiempo que cubre el inventario determinado. En el caso de esta investigación, se utilizaron únicamente los datos de los PRM clasificados como recientes de la base de datos del inventario, es decir, desde el año de 1994 y hasta 2012. Esto da un periodo de tiempo de 18 años. Para cada unidad de ladera se obtuvo la recurrencia promedio dividiendo el número de PRM en cada unidad entre 18.

Por ejemplo, una Unidad de Ladera donde se registraron 6 PRM en el periodo de 18 años y se quiere conocer la probabilidad de ocurrencia en 20 años. Entonces se tiene una recurrencia promedio: $m = t/n = 18/6 = 3$

Entonces:

$$P[N_L(50) \geq 1] = 1 - e^{-t/\mu} = 1 - e^{-20/3} = 0.998 \quad (4.8)$$

Eso significa que existe un 99% de probabilidades de que en esa unidad de ladera ocurra un PRM en los próximos veinte años.

De esa forma el resultado de la aplicación del modelo Poisson para diferentes intervalos de tiempo se muestra en la figura 4.7. En el mapa de la figura 4.8 se muestra la media de la probabilidad de ocurrencia para cada unidad de ladera.

4.5 Resultados del grado de amenaza

Ya teniendo los resultados de los tres aspectos que componen el concepto de amenaza se puede proceder a su estimación. Para ello, se obtuvo el promedio, para cada unidad de ladera, de la suma de los valores de Susceptibilidad, Magnitud y Frecuencia. Los resultados se muestran en la figura 4.9. Estos resultados se utilizaron para una estimación simple del riesgo por PRM.

$$AL = (P(M_L) + P(T_L) + Su)/3 \quad (4.9)$$

Donde:

AL = Amenaza de PRM.

$P(M_L)$ = Probabilidad de la superficie o área de los PRM $((PV+PA))/2$

$P(T_L)$ = Probabilidad de que ocurran PRM en un determinado periodo de tiempo.

Su = susceptibilidad o probabilidad espacial de que ocurran PRM en un lugar.

El análisis del mapa de la figura 4.9 resulta interesante, gran parte de la cabecera municipal, Pahuatlán del Valle, se localiza sobre una zona muy alta de amenaza. Situación similar ocurre con los poblados de Zoyatla de Guerrero, Tlacruz de Libres, Agua del Machete, Xilepa y Paciotla, además de porciones de los poblados de San Pablito y Atla. Esta situación obliga a tener cuidado con esas zonas del municipio pues es dónde los PRM pueden esperarse con mayor magnitud y frecuencia.

Figura 4.7. Probabilidad de ocurrencia de PRM en la zona de estudio a diferentes intervalos de tiempo.

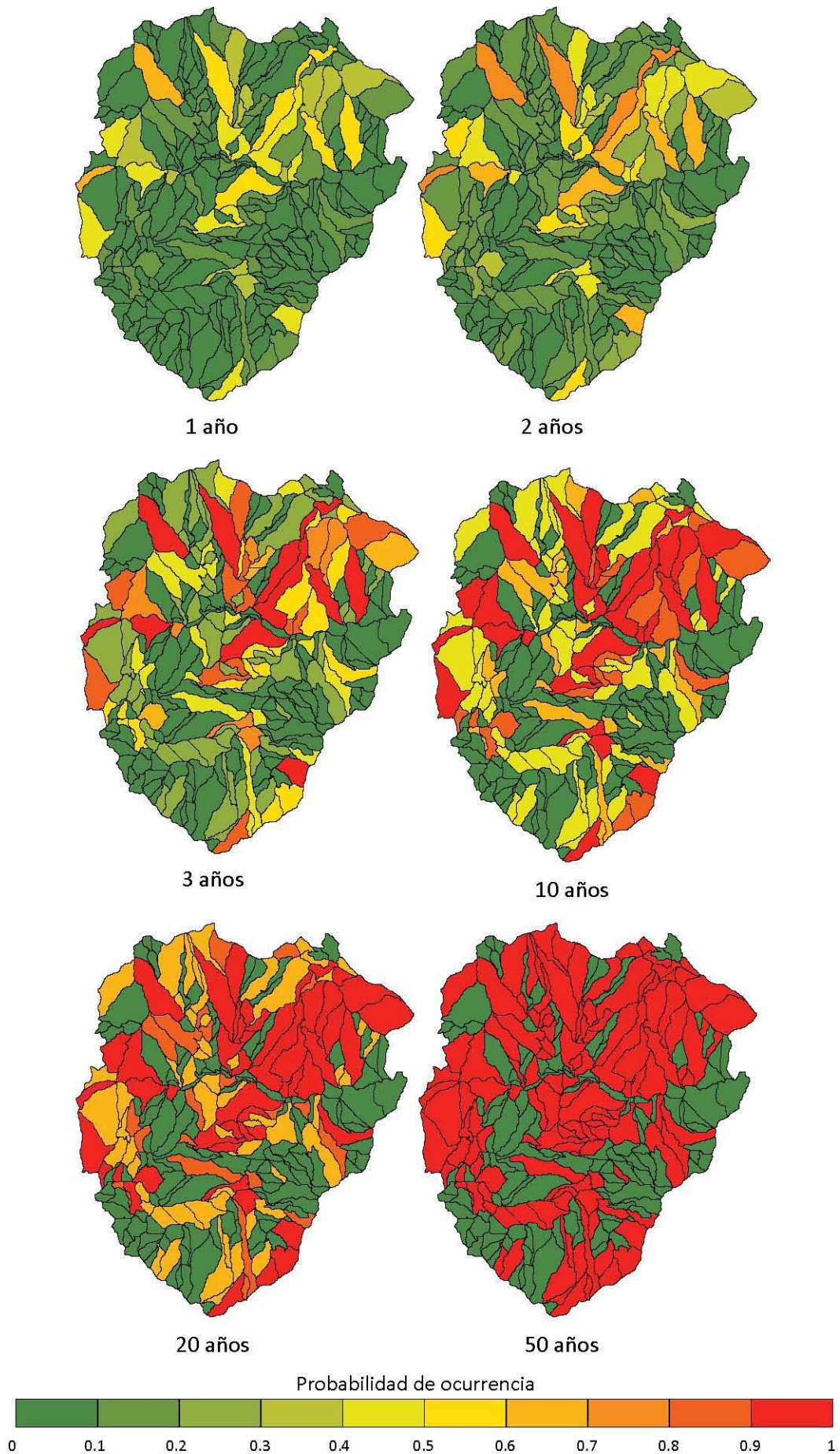


Figura 4.8. Promedio de probabilidad de ocurrencia en la zona de estudio.

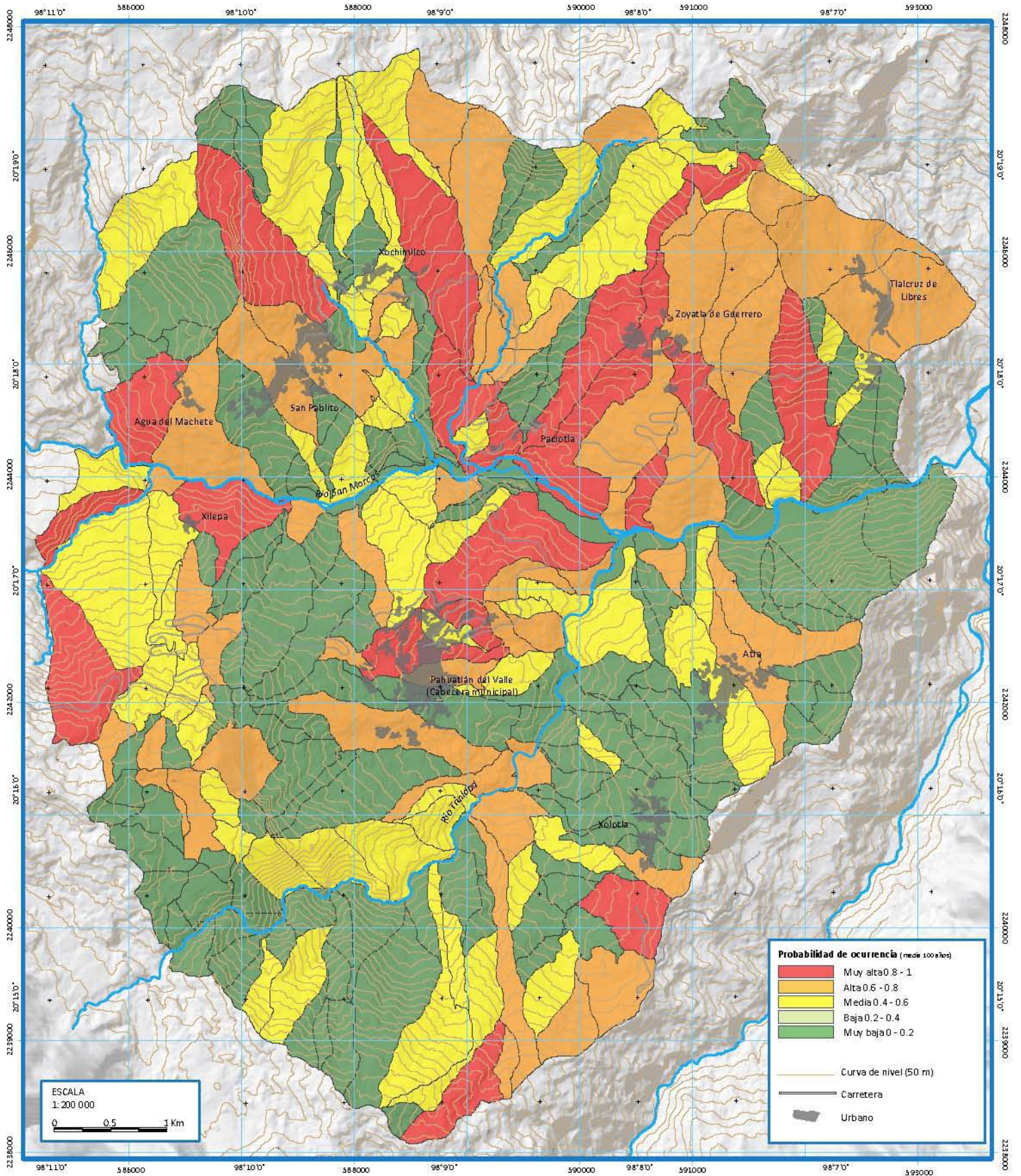
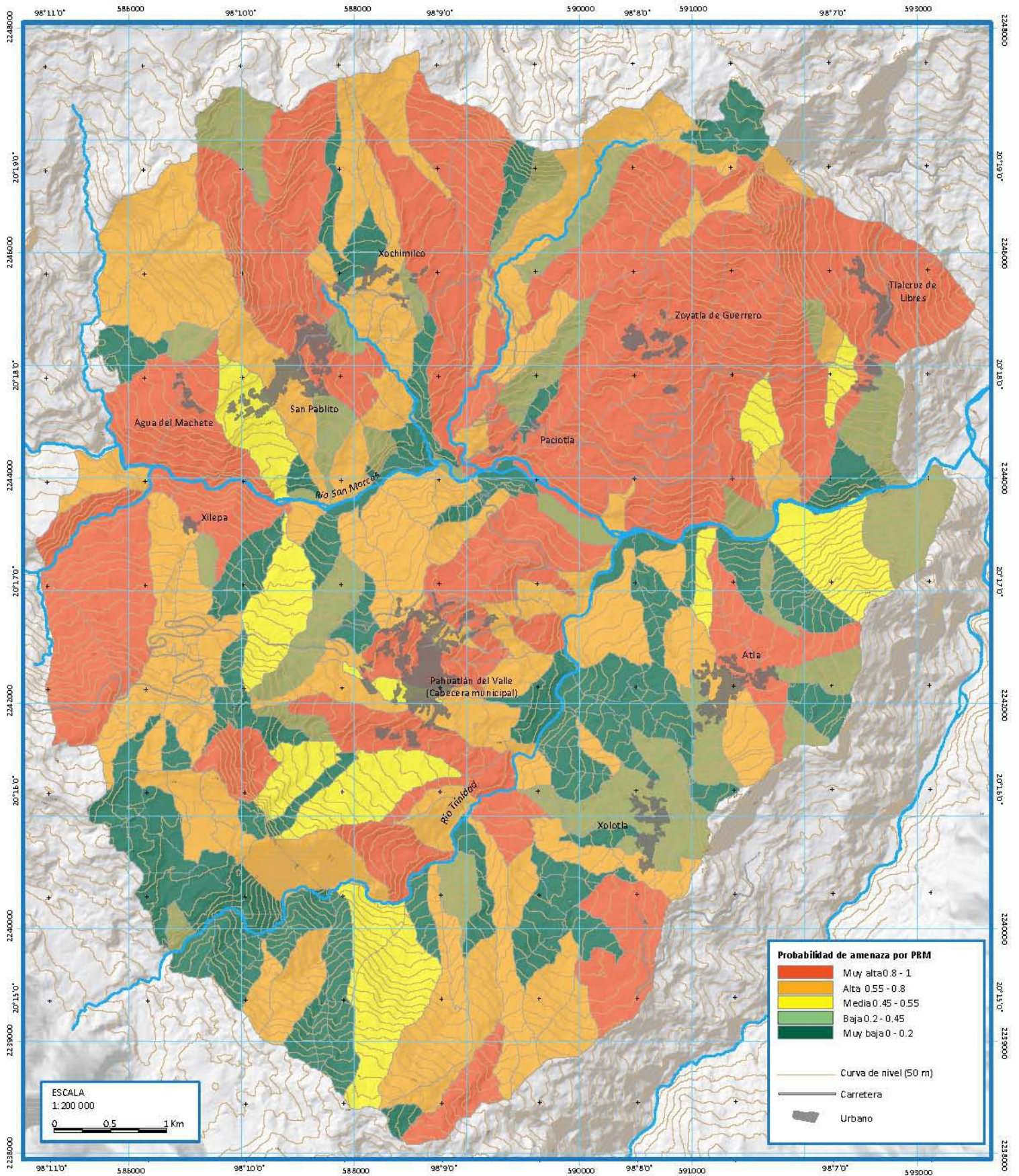


Figura 4.9. Probabilidad de amenaza por PRM en la zona de estudio.



Capítulo 5. Estimación de la vulnerabilidad

5.1 Introducción

El concepto de vulnerabilidad es eminentemente social y en este trabajo se entiende básicamente como la susceptibilidad de sufrir daño y tener dificultad o incapacidad para recuperarse de ello (Maskrey, 1993). La vulnerabilidad ha sido abordada desde diferentes perspectivas, aquí se retoma el punto de vista de Turner *et al.*, 2003, en el que está basado el enfoque *Spatial Approach to Vulnerability Assessment* (SAVE) utilizado en este proyecto.

En este marco teórico, la vulnerabilidad es la probabilidad de que el sistema sociedad-naturaleza, o cualquiera de sus componentes, sufra daño derivado de su exposición y sensibilidad frente a una amenaza, y de su capacidad para recuperarse y adaptarse una vez que la amenaza ha causado el daño (Turner et al, 2003; Birkman, 2006). Esta concepción es sumamente importante porque se entiende que como probabilidad la vulnerabilidad puede ser entonces estimada o medida, es medible. Luego entonces, se puede construir, a partir de este concepto de vulnerabilidad, un enfoque operacional para su evaluación (Morales, 2009). Aunque la vulnerabilidad es medible, es también compleja, lo que dificulta su estimación y posterior evaluación.

En este capítulo se explica el procedimiento que se siguió para definir los sujetos de vulnerabilidad y cada uno de los indicadores que se utilizaron para definir la sensibilidad, exposición y resiliencia de los mismos, para estimar la vulnerabilidad en la zona de estudio en Pahuatlán.

5.2 El enfoque de vulnerabilidad de Turner

El enfoque se basa en el supuesto de que existe una interacción entre las condiciones y procesos humanos y ambientales a distintas escalas. El enfoque considera lo que llama un Sistema Humano-Ambiental, es decir, la dinámica entre las condiciones humanas y ambientales de un lugar determinado. A continuación se presenta el enfoque en forma gráfica (figura 5.1) y su explicación.

En el esquema se muestra que hay elementos a escala global y regional, como el sistema económico y político, las instituciones nacionales o internacionales, además de procesos culturales y tecnológicos que influyen en las condiciones ambientales y humanas de un lugar determinado (escala local), los diferentes cambios en estos elementos hacen que las condiciones humanas y ambientales cambien a escala mundial, regional y local modificando así el Sistema Humano-Ambiental. Así mismo, el sistema ambiental (atmosfera, clima, etc.) a escala global o regional influye sobre las condiciones humanas y ambientales en un lugar determinado. Cambios o variaciones en estos elementos pueden dar origen a las amenazas, que pueden ser de escala global, regional o local, por ello su posición abarcando los tres colores. Estas amenazas pueden afectar al sistema entero o sólo al Sistema Humano-Ambiental a escala local.

La vulnerabilidad se localiza a escala local e implica los tres elementos ya mencionados de exposición, sensibilidad y la resiliencia. La exposición está definida por las características de

los componentes expuestos que pueden ser asentamientos humanos (incluida la población y el equipamiento e infraestructura) así como procesos, por ejemplo la economía, y entidades como por ejemplo el estado. En el enfoque, la exposición va más allá de la presencia de la amenaza ya que se debe considerar la manera en que el Sistema Humano-Ambiental experimenta el peligro. Además, la exposición estará relacionada con las características de la amenaza: su frecuencia, magnitud y duración. Por su parte, las condiciones humanas y ambientales de un lugar determinan la sensibilidad a cualquier amenaza a la que estén expuestos. Dentro de estas condiciones se incluyen el capital humano y ambiental que pueden ser considerados como elementos de resistencia ante una amenaza. Por ejemplo, acceso de la población a los recursos, instrumentos legales o nivel socioeconómico de la población del lugar. Las respuestas, ya sean de carácter autónomo o planeadas por la iniciativa privada o el gobierno, a corto o largo plazo, de prevención o de atención de la emergencia, determinan la resiliencia del Sistema Humano-Ambiental. Estas respuestas a veces pueden trascender a otras escalas, no solamente influir en lo local.

El enfoque de Turner *et al.*, 2003, es un enfoque conceptual que muestra las interacciones y relaciones entre los distintos componentes que influyen en la vulnerabilidad a diferentes escalas espacio-temporales. Esto último permite inferir que el análisis espacial puede ser aplicado para poder generar un enfoque operacional de evaluación de la vulnerabilidad.

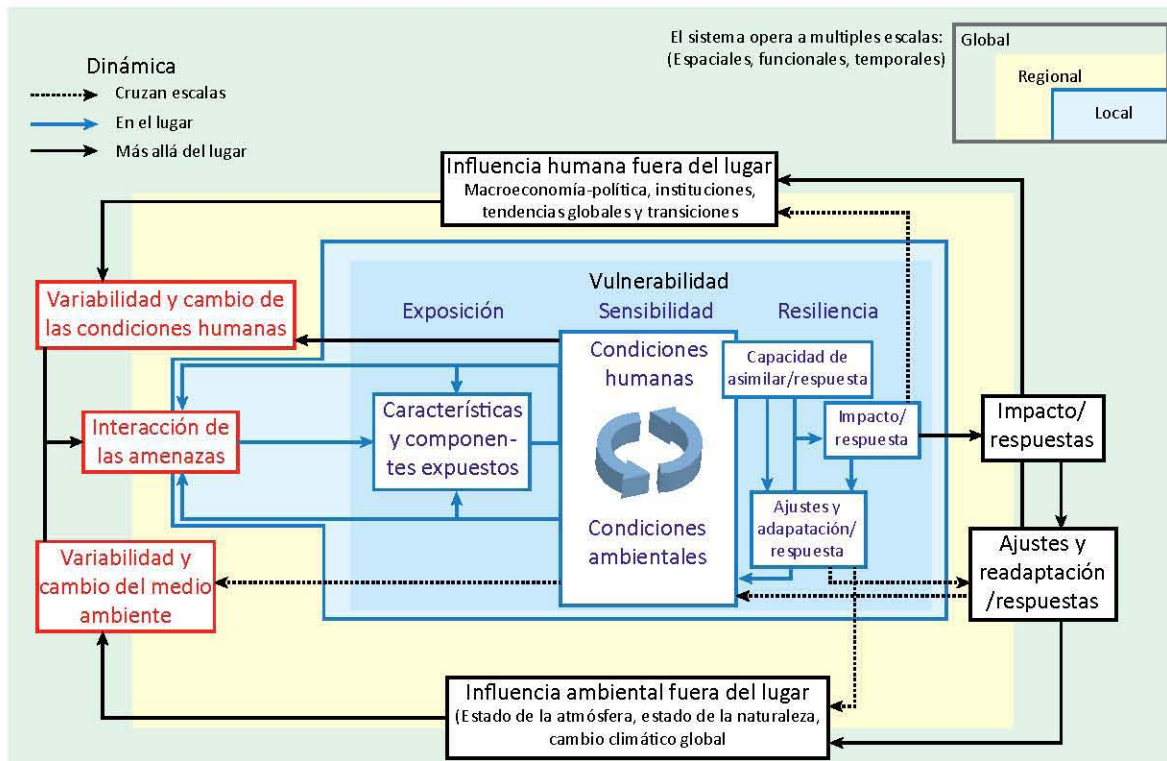
5.3 Enfoque Spatial Analysis of the Vulnerability (SAVE)

Para generar un modelo operacional se eligió para este proyecto el Spatial Analysis of the Vulnerability (SAVE). El enfoque usa tres conceptos fundamentales como base para el estudio de la vulnerabilidad derivada de las interacciones Sociedad–Naturaleza: lugar, relaciones espaciales, y patrón espacial. El enfoque SAVE es un enfoque operacional, por ello hace énfasis en tres cuestiones prácticas: ¿en dónde se va a aplicar la evaluación?, ¿qué se va a evaluar? y ¿cómo se va a evaluar? (Morales, 2007).

En este punto es necesario explicar lo que se entiende por análisis espacial. Tradicionalmente se denomina análisis espacial a los métodos y técnicas que emplean información referida a alguna clase de espacio para derivar, medir, calcular o estimar propiedades de los fenómenos espaciales o de los eventos que intervienen en dichos fenómenos. Uno de los aspectos fundamentales del análisis espacial es la disponibilidad y calidad de los datos requeridos (Morales, 2007).

La acción de analizar implica dividir el todo en sus partes para comprenderlo mejor; luego entonces, el análisis espacial busca usar conceptos espaciales para descomponer el problema y entender cómo funciona (Corona Morales, 2009).

Los conceptos espaciales son el lugar, las relaciones espaciales y los patrones espaciales. El lugar se refiere a la ubicación espacio-temporal. La noción de lugar es fundamental para el enfoque SAVE porque define la unidad de estudio en la cual se aplicará la evaluación. Esta definición se basa en la identificación de las interacciones de amenazas, grupos humanos, actividades económicas, obras de infraestructura y equipamiento, y elementos del medio natural que son relevantes para la evaluación de la vulnerabilidad. Así, el lugar definido por el enfoque SAVE es un sitio creado por las interacciones de estos eventos (Corona Morales, 2009). Las relaciones espaciales son conceptos que se emplean para demostrar interacciones espaciales entre eventos que ocurren en el espacio geográfico (Corona Morales, 2009). La clave de esto son las interac-

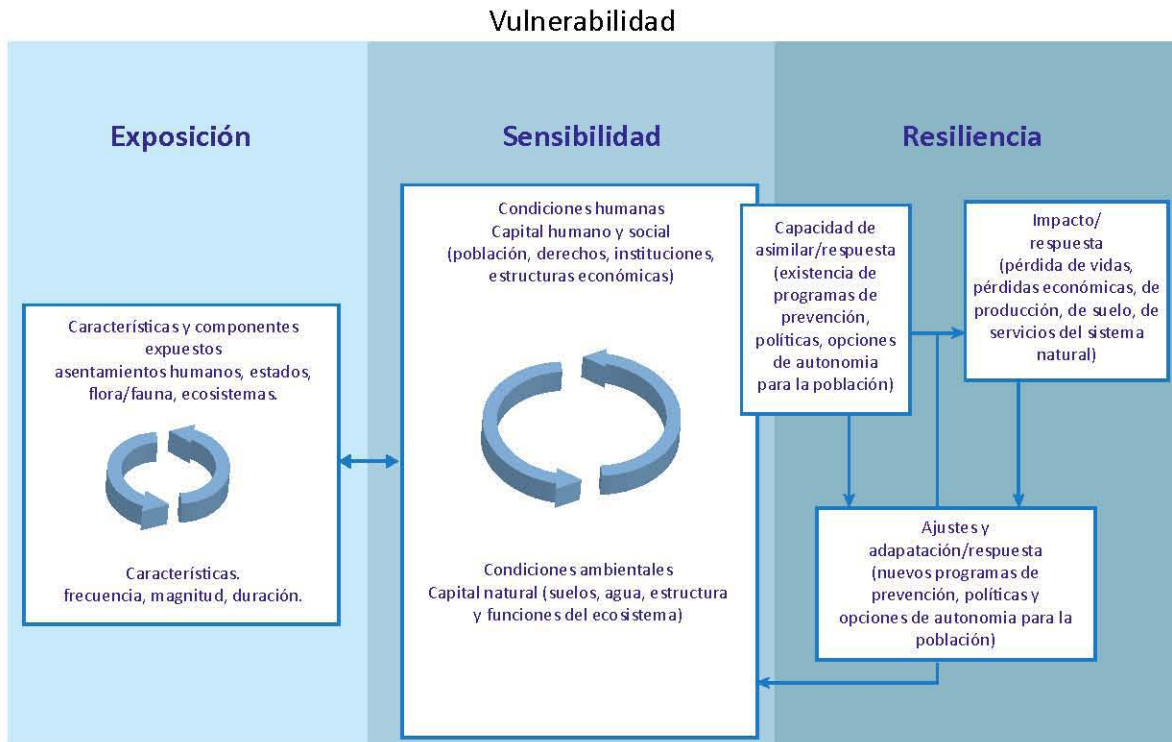
Figura 5.1. Enfoque de la vulnerabilidad, Turner, *et al.*, 2003.

ciones, esto es: una acción recíproca entre dos o más objetos con una o más propiedades homologas. ¿Cuáles son objetos? Ciudades, personas, regiones, actividades y todo tipo de conceptos que pueden establecer relaciones espaciales entre sí. Una de estas propiedades homologas que comparten muchos de estos objetos es la vulnerabilidad.

De acuerdo al mismo autor, Morales (2007), las relaciones espaciales son las siguientes:

- Proximidad. Cuando las distancias determinan la magnitud y/o intensidad de una interacción.
- Orientación. Si las direcciones tienen influencia en las propiedades de las interacciones.
- Exposición. Si la concentración de materia, energía, o conceptos, actúan como barreras en el espacio y determinan si y cómo interactúan los eventos.
- Adyacencia. Cuando los contactos entre eventos definen posibilidades de interacción.
- Inclusión. Cuando un evento es contenido dentro de otro y esto define un orden (o desorden) en las interacciones de los eventos.
- Coincidencia. Cuando la coexistencia en el tiempo y espacio de dos o más eventos establecen posibilidades de interacción.
- Conectividad. Cuando las interacciones tienen lugar por medio de conexiones y flujos entre eventos.
- Agregación. Si existen interacciones inconscientes que crean dependencias entre un conjunto de eventos, las cuales resultan en la creación de un evento de orden superior con propiedades emergentes.
- Asociación. Si existen interacciones conscientes y voluntarias entre un grupo de eventos que crean un evento de orden superior con propiedades emergentes.

Figura 5.2. Enfoque de la vulnerabilidad, Turner, *et al.*, 2003, detalle de la parte central.



Un patrón es un conjunto de rasgos esenciales que se repiten o son recurrentes en un proceso. Los patrones espaciales son lo que resulta de los procesos formados por las interacciones o relaciones espaciales entre los componentes del sistema sociedad-naturaleza (Morales, 2007). De acuerdo al autor, el enfoque SAVE con respecto a los patrones tiene las siguientes fases:

La búsqueda de patrones de vulnerabilidad empleando relaciones espaciales tiene el fin de medir la vulnerabilidad. Se trata de determinar la distribución espacio-temporal de los diferentes eventos de amenaza y vulnerabilidad, modelando las interacciones entre los sujetos de vulnerabilidad y las amenazas para determinar el valor de la condición de vulnerabilidad (Morales, 2007). La descripción formal de un fenómeno consiste en la clasificación y jerarquización de sus características más importantes. En el caso de la vulnerabilidad eso significa elaborar indicadores y definir niveles y pesos entre las diferentes variables. Ambas tareas pueden estar sujetas a un grado de subjetividad importante debido a que requieren interpretar los valores de vulnerabilidad obtenidos en la fase anterior en función de juicios de valor, los cuales implican una valuación diferente para el mismo valor de vulnerabilidad dependiendo del componente, sujeto, amenaza, y categoría de relación espacial de que se trate (Morales, 2007).

De acuerdo con Luers *et al.*, (2003), cualquier evaluación de vulnerabilidad debería no solamente identificar los sistemas en riesgo sino también conocer el porqué. Por ello, se investiga en esta fase cuáles son las causas principales de vulnerabilidad empleando como ejes de esta investigación a los indicadores elaborados en la fase anterior, y con ello indagar también sobre los mecanismos mediante los cuales dichas causas llegan a producir los patrones de vulnerabilidad

observados. Esta fase es muy importante porque el entendimiento de las causas y mecanismos facilita el trabajo de las dos fases siguientes (Morales, 2007).

En la fase de predicción de patrones se elaboran pronósticos de tendencias, se crean escenarios y se trata de predecir los resultados de estos, derivados de los cambios en las condiciones de vulnerabilidad. Esta fase también incluye el monitoreo. Finalmente la fase diseño de patrones está orientada hacia la especificación de políticas para modificar los patrones de vulnerabilidad que ayuden a reducir los niveles de vulnerabilidad existentes y por lo tanto disminuir las condiciones de riesgo de la población (Morales, 2007).

Se debe aclarar que en este trabajo solo se ha accedido hasta la fase de la descripción, la medición de la vulnerabilidad, pues las otras dos fases ya se encuentran dentro de la gestión y evaluación del riesgo e implican un seguimiento y un trabajo fuera de los alcances de esta investigación.

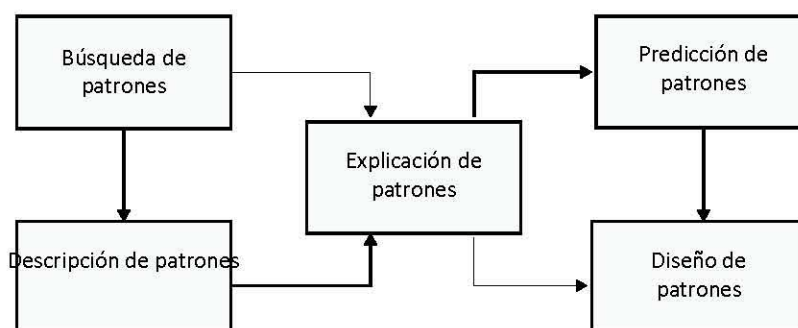
5.4 Metodología para estimar la vulnerabilidad

Para aplicar operacionalmente el enfoque SAVE primero se definieron los sujetos de vulnerabilidad, posteriormente se seleccionaron los indicadores para estimar cada uno de los componentes de la vulnerabilidad: exposición, resiliencia y sensibilidad. A partir de estos resultados se identificaron y describieron los patrones de vulnerabilidad, la fase de evaluación de la vulnerabilidad ya no correspondía a los alcances de este trabajo. El esquema de la figura 5.4 muestra de manera gráfica el procedimiento.

La amenaza para establecer el tipo de daño

Por principio es importante establecer la amenaza para la cual será aplicado el enfoque. De manera general la magnitud del daño que un PRM pueda causar al sistema humano depende del área de afectación. Entre mayor sea el área, mayor el daño, sin embargo esta relación no es

Figura 5. 3. Flujo de diseño de patrones.



lineal lo que complica la estimación del daño que puede causar un PRM. En este sentido las observaciones empíricas de los daños causados por PRM a los sujetos de vulnerabilidad son de vital importancia (Guzzetti, et.al., 2009). En el caso de Pahuatlán se observa que son frecuentes los PRM de área pequeña, si bien este tipo de movimientos pueden ocasionar la muerte de una

persona y pueden destruir una vivienda entera, hasta el momento no se ha reportado el caso de un fallecimiento. En Pahuatlán, los PRM de mayor magnitud, es decir con una mayor área de afectación, han destruido varias casas y dañado varios caminos haciendo que algunos de estos últimos cambien su trazo original. Estos grandes PRM son uno de los problemas más serios del municipio cuando ocurren cerca de las zonas pobladas pues han implicado la evacuación de decenas de personas así como la pérdida de infraestructura y equipamiento como ya ha sucedido con el deslizamiento de la calle Cinco de Mayo. Estos PRM, al ser de velocidad muy baja, han permitido que la gente pueda evacuar y por ello no se han registrado pérdidas humanas. Son procesos de remoción en masa visiblemente menos frecuentes que los PRM más pequeños.

Si ampliamos la escala de análisis, podemos encontrar que existe una gran similitud entre las condiciones socioeconómicas de la población y el resto de los municipios de la región de la Sierra Norte de Puebla, en donde si ha habido ejemplos de numerosas pérdidas de vida ocasionadas por los PRM. En este sentido, cuenta también la magnitud del evento, en Pahuatlán y en el resto de la región, ocurren PRM de pequeña área cada temporada de lluvias, pero cuando ocurren eventos de lluvias extraordinarias la cantidad y magnitud de los PRM se intensifica, paralizando en muchos casos la normalidad de las comunidades de la región. Además, en estos eventos la ocurrencia de PRM de gran magnitud es mayor. Por ello es que para definir los indicadores que pudieran servir para estimar la vulnerabilidad en Pahuatlán, se decidió tomar en cuenta en conjunto la experiencia de toda la Región de la Sierra Norte de Puebla en el desastre de 1999 y no solo los antecedentes específicos de la zona de estudio. Por eso, se tomó como supuesto que las calamidades presentadas en 1999 en la región pueden volver a ocurrir.

Definición de los sujetos de vulnerabilidad

Los sujetos de vulnerabilidad son entidades espaciales cuyas propiedades, espaciales y no espaciales, los someten a la influencia de una amenaza (Corona Morales, 2009), en este caso los PRM.

- **Población.** Un proceso de ladera puede dañar directamente a las personas quitándoles la vida. Esto ocurre debido a que frecuentemente las personas implicadas en un evento de este tipo quedan sepultadas por el material desplazado y mueren por asfixia, también pueden morir por traumatismos ocasionados por el impacto del material desplazado y esto depende del peso, volumen, material y velocidad del material desplazado. Si la muerte no se da, pueden quedar heridas graves que dejen secuelas físicas y psicológicas a las personas. Por otra parte, existe la posibilidad de que la población pierda su vivienda, sus bienes e incluso sus medios de subsistencia siendo más vulnerable a contraer enfermedades infecciosas que podrían causarles la muerte. Por lo tanto, el principal sujeto de vulnerabilidad a considerar es la población del lugar e incluye a todos los habitantes registrados en la zona de estudio por el último Censo de Población y Vivienda realizado en 2010 por el INEGI. La población no es un ente estático, por lo que en este trabajo se tomaron en cuenta algunas consideraciones como el que la gente no está todo el tiempo en su casa, se desplazan en diferentes horarios a plazas, mercados, escuelas y sus diferentes centros de trabajo.
- **Equipamiento e infraestructura.** La ocurrencia de movimientos de ladera también afecta al equipamiento e infraestructura de un lugar. Dentro de este conjunto están todos los tipos de vivienda, el equipamiento y la infraestructura urbana: edificios públicos, redes de agua,

Figura 5.4. Procedimiento del modelo SAVE.



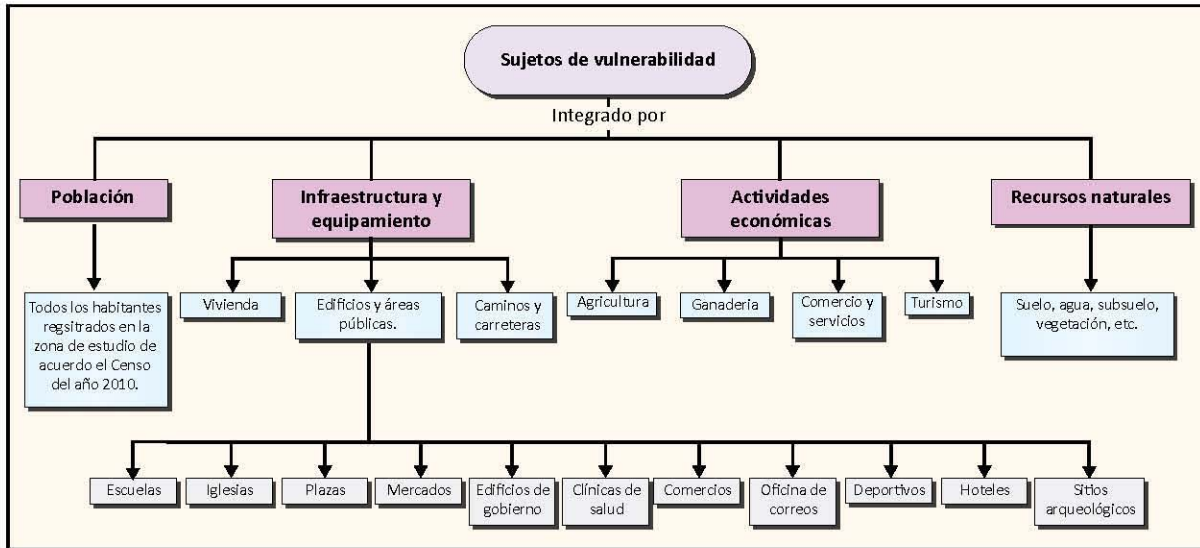
alcantarillado, drenaje, electricidad y comunicaciones. Y finalmente las vialidades, caminos y carreteras. Un proceso de remoción en masa pequeño puede bloquear un camino lo que hará necesario la remoción del material desplazado y quizás ocasione algunas molestias a los usuarios del camino. La ocurrencia de este tipo de procesos de forma frecuente en un corto periodo de tiempo, combinado con la ocurrencia de PRM de mayor magnitud, pueden ocasionar un daño mucho más severo, incrementando el tiempo de habilitación del equipamiento o infraestructura, aislando a una comunidad y paralizando su economía y medios de subsistencia.

- **Actividades económicas.** Desastres como el ocurrido en 1999 paralizaron la economía de la región, todos los tipos de actividad, primarias, secundarias y terciarias, pueden verse afectadas por la ocurrencia de movimientos de ladera. Sin embargo la forma en cómo esto se podría estimar está fuera del alcance de esta investigación, pues implicaría la realización de, al menos, la caracterización económica de la zona de estudio y establecer sus nexos y conexiones con otros lugares.
- **Recursos naturales.** Son todos los elementos del medio natural que son aprovechados en las actividades económicas. (vegetación, suelo, subsuelo, agua, etc.). Los PRM pueden afectar a estos componentes, especialmente, la ocurrencia de un PRM implica la pérdida de la carpeta de suelo, pueden interrumpir ríos, manantiales u otras fuentes de agua, esto solo por mencionar algunos ejemplos. En esta investigación tampoco se analizó a este sujeto de vulnerabilidad pues se requeriría un inventario de los recursos naturales del municipio.

Definición espacial de los sujetos de vulnerabilidad

La definición espacial de los sujetos de vulnerabilidad es necesaria dada que el enfoque SAVE se basa en el análisis espacial. La población es un sujeto que ocupa el territorio de manera dinámica, no estática. La mayor parte de los datos de este sujeto de vulnerabilidad provinieron del censo de población y vivienda elaborado por el INEGI en 2010. En este censo, la unidad mínima de agregación es la manzana. De acuerdo al INEGI la manzana es la extensión territorial constituida por un grupo de viviendas, edificios, predios, lotes o terrenos de uso comercial, ha-

Figura 5.5 Resumen los sujetos de vulnerabilidad tomados en cuenta para esta investigación.



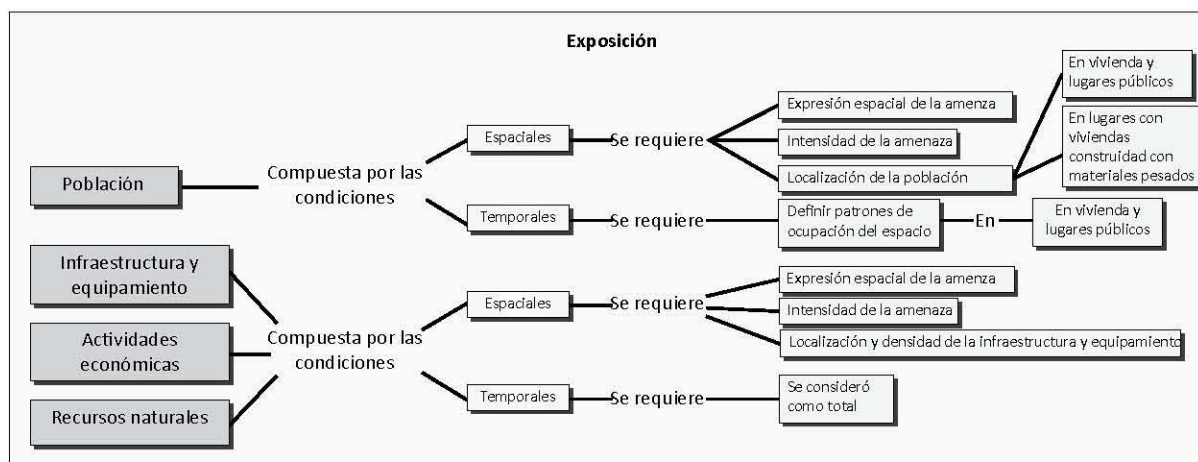
bitacional, industrial o de servicios, delimitada por calles, avenidas, andadores o cualquier rasgo de fácil identificación en el terreno; es la unidad mínima de desagregación del Marco Geoestadístico Nacional del INEGI. En este trabajo se tomó a la manzana como el área geoestadística básica, sin embargo es una categoría eminentemente urbana y Pahuatlán no está totalmente dividido con este nivel de agregación pues gran parte de su territorio es rural. Además, localidades rurales como Atla o Xolotla no están divididas por manzanas, de estas sólo se tiene información a nivel del polígono que delimita su zona urbana. Ante esta problemática se pensó en usar el AGEB rural del INEGI, pero debido a la escala y extensión de la zona de estudio, esta división oficial resultaba poco adecuada pues los polígonos que la componían eran muy grandes para la extensión del área de estudio. Por ello se decidió, para las zonas rurales, utilizar la división de unidades de ladera generada para el estudio de la susceptibilidad. Para subsanar la falta de datos a ese nivel de agregación, se extrapolaron los datos de los AGEB rurales y urbanos del INEGI a las unidades de ladera. Para ello, se identificaron y contaron el número de viviendas que había en cada unidad de ladera por medio de las imágenes de satélite de muy alta resolución, luego, tomando como base el dato por AGEB de hacinamiento (número de personas promedio que habitan una casa) se obtuvo una población total estimada para cada una de estas áreas rurales.

Los polígonos de las unidades de ladera se combinaron con los de las manzanas urbanas y los polígonos urbanos de las localidades rurales, no permitiendo que el límite de una unidad de ladera cortara al polígono de una manzana urbana o localidad rural. De esta manera se obtuvieron 316 polígonos o unidades de área.

Definición de la Exposición

En esta sección se definen las variables y los indicadores que permitirían evaluar la exposición de cada componente. Para determinar la exposición se requiere conocer la distribución espacial de la amenaza, la población, y los patrones de movilidad de los sujetos de vulnerabilidad en cada espacio definido.

Figura. 5.6. Criterios para definir la exposición de los sujetos de vulnerabilidad.



Para establecer la expresión espacial y la intensidad de la amenaza de los PRM se utilizaron los resultados del análisis de susceptibilidad y se tomó en cuenta si en el polígono en cuestión presentó un PRM reciente o viejo. El dato de susceptibilidad (IS) ya viene en valores de 0 a 1, por lo tanto se tomó tal como estaba, sin embargo, el dato estaba sólo por unidades de ladera, para conocer la susceptibilidad por manzana únicamente se utilizó la herramienta Identities del menú Overlay del software ©ArcGIS 10.0 aprovechando la superposición de ambas coberturas (unidades de ladera y manzanas). El dato del área de PRM viejos por polígono se estimó con una proporción para obtener un valor normalizado de 0 a 1 o índice de área afectada por PRM viejos:

$$IV = APRMV/AT$$

Donde:

- IV = Índice de área afectada por PRM viejos.
- APRMV = Área afectada por PRM viejos (m²).
- AT = Área total del polígono.

Para el dato de PRM recientes (PR) se consideró darle un valor de 1 a todos aquellos polígonos (unidades de ladera y manzanas) que presentaran uno o más PRM recientes y cero a los polígonos que no los presentaban. Como puede observarse el peso que se le da a esta variable es mayor y no está en función del área afectada, la justificación de esto es que un PRM reciente es más probable que esté activo o que se reactive. Además, como la magnitud de los PRM en Pahuatlán es más probable con PRM pequeños, utilizar el área no era una opción viable pues en casi todos los polígonos el valor de una normalización hubiese sido muy cercano a cero.

Para conocer la expresión espacial de la población se tomó el dato de la población absoluta, los polígonos que no presentaban población absoluta y que tampoco registraban la presencia de edificios y lugares públicos se tomaron como vulnerabilidad cero o nula para la población. Para normalizar este valor se utilizó la siguiente proporción:

$$IPA = (\log(PA))/VLMA$$

Donde:

IPA = Índice de Población absoluta.

PA = Población absoluta por polígono.

VLMA = Valor del logaritmo más alto de la población absoluta (PA).

De esta forma, la referencia para normalizar el valor de la población absoluta fue el valor más alto en la escala logarítmica, de esta forma ese valor representó un valor de 1 y a partir de ahí todos los demás valores se mantuvieron entre 0 y 1. Esto supone que los resultados de este modelo no podrían ser comparables con los resultados del mismo modelo aplicado en otra área, la solución sería siempre correr un solo modelo para dos o más áreas o zonas de estudio. La población total significa el número de personas por polígono, entre más personas haya en un área mayor podría ser el daño que cause en PRM, por ello se tomó en cuenta ese indicador. En este apartado de la exposición, también se incluyó otro factor, el de si la población construía sus casas con materiales de mayor peso (mampostería, rocas, etc.) ya que de acuerdo a Oliva Aguilar, *et al.*, 2010, esto aumenta la presión sobre el subsuelo débil de Pahuatlán compuesto por lutitas altamente alteradas y estratificadas con otros materiales más sólidos, haciendo más probable la ocurrencia de un movimiento de ladera. La inclusión de este criterio es polémica y otros investigadores han señalado que quizás su lugar debería darse en otra parte del análisis de riesgo. Para estimar qué tipos de vivienda podrían considerarse como viviendas de materiales pesados, se utilizó el siguiente criterio: Los pobladores de Pahuatlán anteriormente construían sus casas con una estructura de madera y ladrillos de adobe, una mezcla de lodo y paja, los techos eran contruidos también con madera (bajareque) y palmas (ver figura 5.7).

Este tipo de construcciones son bastante ligeras. Durante mucho tiempo la única construcción construida con rocas y cemento fue la iglesia del pueblo. A finales del siglo XIX se construyeron las primeras casas de roca y ladrillos, pero estas se concentraban únicamente en el centro de la cabecera municipal. Después de la segunda mitad del siglo XX que comienza la construcción de casas de concreto y ladrillo en todas las localidades del municipio, casas con dos o más niveles. Este tipo de casas generalmente tienen ya incluido un piso de losa, cemento o algún tipo de recubrimiento y ese fue el factor que permitió diferenciarlas en la base de datos del Censo con las viviendas de tipo tradicional cuyo piso es casi siempre de tierra. Aunque esta es una consideración empírica, con base en las observaciones en campo, se decidió utilizar la variable del Censo de viviendas con piso de tierra como indicador del material de construcción, aclarando que esto podría no aplicar en otras zonas de estudio. De esta forma se obtuvo la siguiente proporción:

$$IVTM = 1 - ((VCPT) / TV)$$

Donde:

IVTM = Índice de viviendas por material de construcción.

VCPT = Viviendas con piso de tierra.

VT = Viviendas totales.

Finalmente, si en algún polígono se presentaba algún edificio público, escuela, iglesia, mercado, plaza o clínica de salud, se asignaba un valor de 1 a cada polígono. Esto debido a que estos espacios presentan una alta concentración de población durante gran parte del día. Atención especial requieren las escuelas y clínicas de salud ya que como han sido dañadas por PRM al menos tres de estos edificios hoy están inutilizables por lo que la población estudiantil (en este caso de primaria, 6 -12 años) o la que requiere servicios de salud ha tenido que buscar otras opciones.

Para la evaluación de la exposición temporal de la población se tomaron en cuenta dos supuestos:

- Todos los habitantes que estudian (PE) se encuentran fuera del hogar en promedio 7 horas (6 del turno escolar y una hora en promedio de traslado), por lo tanto, de las 24 horas del día, siete estarán ausentes y por lo tanto este tiempo no estarán expuestos en las viviendas de cada manzana.
- La población que trabaja (PT), está ausente de su manzana en promedio 9 horas al día (ocho de trabajo, una hora de traslado).
- La población que no estudia ni trabaja (PNET) permanece en su vivienda la mayor parte del día, en este caso se consideraron las 24 horas del día.

Para conocer cuánta población que no labora ni estudia en cada manzana se utilizó la siguiente fórmula.

$$PNET = PT - (PE + Pt)$$

Donde:

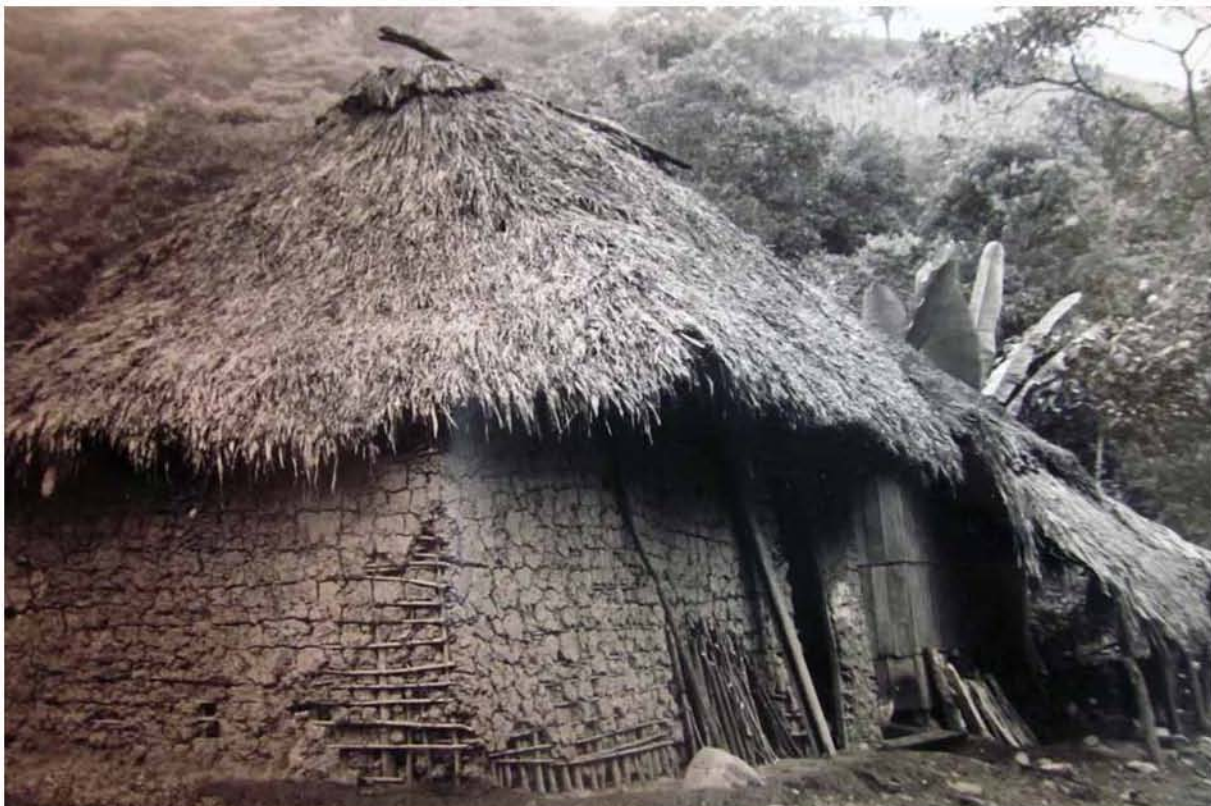
PNET= Población que no estudia ni trabaja.

PT= Población total.

PE = Población que estudia.

Pt = Población que trabaja.

Figura 5.7 Antigua casa en Pahuatlán, se nota la estructura de bajareque de la casa. Fuente: Archivo fotográfico de Raúl López.



Posteriormente, se calculó el promedio de tiempo que pasa la población en su vivienda, Índice de Tiempo. Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$ET_v = ((PE/PT)*(1-(7/24)))+(Pt/PT)*(1-(9/24))+((PNTE/PT)*(1-(0/24)))$$

Donde:

ET_v = Exposición temporal en viviendas.

PE = Población que estudia.

PT = Población total.

Pt = Población que trabaja.

PNET = Población que no estudia ni trabaja.

Si se obtiene un resultado de 1 o cercano a 1, la exposición temporal de esa manzana es muy alto, resultados cercanos a cero significan una exposición temporal muy baja. Para el caso de los edificios públicos un índice de esta naturaleza no pudo ser calculado debido a la falta de datos, sin embargo, se consideró dar un valor de 1 en otra variable (presencia de plazas, clínicas de salud, mercados, iglesias y escuelas) a aquellas manzanas que presentaran este tipo de edificios o lugares debido a que estos espacios concentran una gran cantidad de población en poco espacio, y aunque no es durante las 24 horas del día, si sucede al menos la mitad del día.

Las variables que se utilizaron para determinar la exposición de la población se muestran en la tabla 5.1

Tabla 5.1. Indicadores seleccionados para la estimación de la exposición de la población.

Variable	Fuente
Índice de susceptibilidad	El elaborado en la fase previa de la investigación.
Presencia de PRM viejos	Inventario de PRM elaborado en la fase previa de la investigación
Presencia de PRM recientes	Inventario de PRM elaborado en la fase previa de la investigación
Población total	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.
Índice de tiempo de permanencia por manzana	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.
Material de construcción (tradicionales o modernos).	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.
Presencia de escuelas, mercados, Iglesias, clínicas de salud, plazas.	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.

Para evaluar el grado de exposición de la infraestructura se tomaron en cuenta las variables de la tabla 5.2. Para definir la expresión espacial de la amenaza nuevamente se tomaron en cuenta los resultados de los análisis de susceptibilidad obtenidos previamente en esta investigación. Además, se decidió contabilizar el número de viviendas bajo el supuesto de que entre mayor número

de viviendas presenta un área, mayor cantidad de estas pueden perderse por la ocurrencia de un PRM. Para obtener un dato normalizado se realizó la siguiente operación:

$$IVT = (\log(VT))/VMALVT$$

Donde:

IVT = Índice de viviendas totales.

VT = Número de viviendas totales por unidad de área.

VMALVT = Valor más alto del logaritmo de viviendas totales.

La referencia para asignar los valores de 0 a 1 es el valor más alto de la base de datos.

Así mismo, un polígono en dónde hay una densidad de viviendas muy alta significa que incluso un PRM de un área no muy grande podría dañar un mayor número de viviendas. Por ello se construyó un índice de este dato usando la siguiente fórmula:

$$IDV = (\log(DV))/VMALDV$$

Donde:

IDV = Índice de densidad de viviendas.

DV = Densidad de viviendas por km².

VMALDV = Valor más alto del logaritmo de densidad de viviendas.

La cantidad de la carpeta asfáltica de carreteras, sea esta de asfalto o concreto, también se consideró pues entre mayor cantidad de este tipo de equipamiento contenga un polígono mayor probabilidad de que este atributo sea dañado por la ocurrencia de un PRM. De esta forma se utilizó la siguiente proporción para calcular su valor y normalizarlo de 0 a 1:

$$IC = (\log(AC))/VMALDV$$

Donde:

IC = Índice de carreteras.

AC = Área total de carreteras m².

VMALAC = Valor más alto del logaritmo de área total de carreteras.

El área total de caminos, calles, terracerías y brechas se incluyó tomando en cuenta que en el caso de algunas localidades significan su única vía de comunicación con la cabecera municipal y el resto del país.

$$ICa = (\log(ACa))/VMALAC$$

Donde:

ICa = Índice de área de caminos.

ACa = Área de caminos en m².

VMALACa = Valor más alto del logaritmo de área de caminos.

El área total de lo que se puede considerar zona urbana también fue considerada básicamente tratando de subsanar la falta de información precisa sobre la infraestructura (tuberías, drenaje) y equipamiento (líneas de comunicación, postes, líneas eléctricas, jardines, etc.), ya que se parte

del supuesto de que es en las zonas urbanas en donde todos estos elementos se concentran. Haría falta en un futuro realizar un inventario detallado del equipamiento e infraestructura urbana para poder hacer más fino el análisis de la exposición de este sujeto de vulnerabilidad. Por lo pronto, se utilizó la siguiente fórmula para estandarizar el valor para esta variable.

$$IAU = (\log(AU))/VMALAU$$

Donde:

IAU = Índice de área urbana.

AU = Área urbana en m².

VMALAU = Valor más alto del logaritmo de área urbana.

Tabla 5.2. Indicadores seleccionados para la estimación de la exposición del equipamiento e infraestructura.

Variable	Fuente
Índice de susceptibilidad	El elaborado en la fase previa de la investigación.
Número total de viviendas por polígono	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI y análisis de las imágenes de satélite de muy alta resolución GeoEye1.
Densidad de viviendas	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI y análisis de las imágenes de satélite de muy alta resolución GeoEye1.
Superficie total de carreteras, de asfalto o concreto.	Análisis de las imágenes de satélite de muy alta resolución GeoEye1.
Superficie total de calles, caminos secundarios o terracerías.	Análisis de las imágenes de satélite de muy alta resolución GeoEye1.
Área total urbanizada	Análisis de las imágenes de satélite de muy alta resolución GeoEye1.

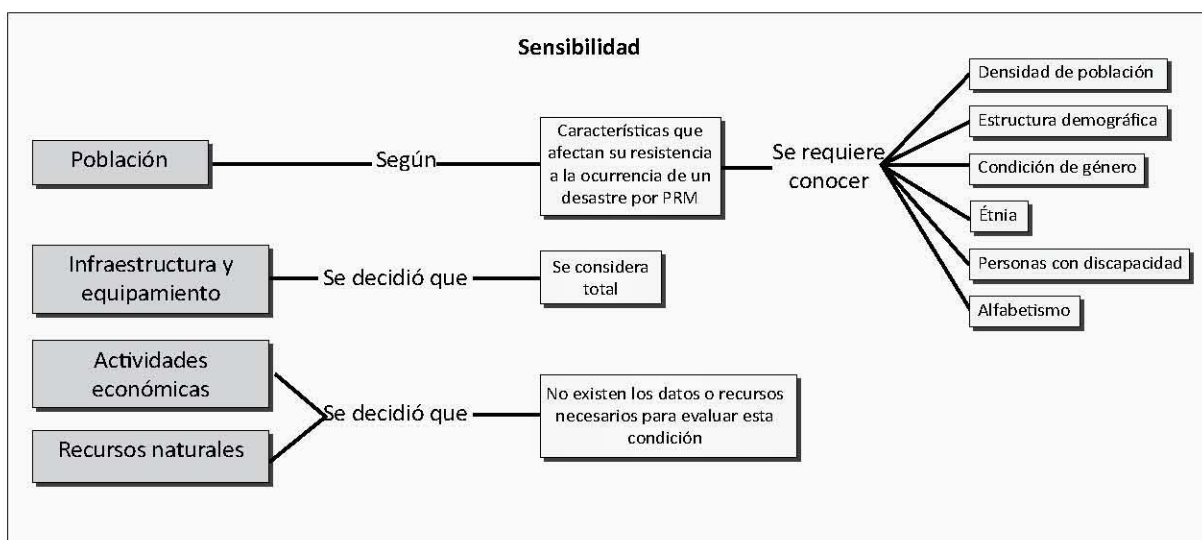
Cada una de estas variables fue normalizada a valores entre 0 y 1. Valores cercanos a uno aumentan el grado de exposición del sujeto de vulnerabilidad. En el caso de los datos de población total, viviendas totales, densidad de viviendas, área total urbanizada, área total de caminos, terracerías y brecha, y área de carreteras se utilizó una escala logarítmica debido a que los datos cubrían una amplia gama de valores. Así, se obtenía el logaritmo natural de cada dato, posteriormente, se realizaba una proporción, se tomaba el valor más alto de cada una de estas variables y se tomaba como uno, de ahí se hacía el cálculo proporcional para el resto de los valores.

Definición de la Sensibilidad

En esta sección se definen las variables y los indicadores que permitirían evaluar la sensibilidad de cada componente (figura 5.8).

Para evaluar esta condición, se identificaron los atributos que definen la vulnerabilidad de la población. Es decir, aquellas características que afectan la posibilidad de los sujetos de vulnera-

Figura. 5.8. Criterios para definir la sensibilidad de los sujetos de vulnerabilidad.



bilidad de resistir el impacto de una amenaza. En el caso de la infraestructura surge un debate: ¿qué características de una construcción, instalación o camino mitigan la posibilidad de que sufra daño ante la ocurrencia de un PRM? En este sentido, si la construcción o camino se localizan sobre la masa desplazada la pérdida es total y no existe ninguna característica en la construcción que pueda salvarla. Si la construcción se encuentra por debajo del material desplazado, existe la probabilidad de que luego de removido el material la construcción haya quedado en pie y pueda volver a utilizarse, en este caso se podría inferir que si la construcción está edificada con mampostería y materiales resistentes tiene más probabilidades de sobrevivir. Este es el caso del flujo de lodo que asoló Pahuatlán del Valle en 1955, aunque las casas prácticamente quedaron sepultadas, no fueron destruidas por la fuerza de la masa desplazada, luego de que fueron removidos el lodo y las rocas, estas viviendas fueron ocupadas otra vez y subsisten de esta forma hasta nuestros días. Esas casas fueron construidas a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. Sin embargo, definir qué materiales firmes podrían resistir el embate de la masa desplazada de un PRM está en función de la magnitud y velocidad del PRM en cuestión. Además, no se puede asegurar que la forma de construcción con concreto y varilla que se ha usado en la región luego de la segunda mitad del siglo XX garantice que la construcción quedará en pie, situación que hace todavía más complejo el determinar las condiciones de sensibilidad de la infraestructura y equipamiento. Por todo esto, la sensibilidad de la infraestructura se consideró como total para todos los casos y se le asignó el valor de 1.

En el caso de la sensibilidad para la población se tomaron en cuenta los siguientes indicadores: La densidad de la población, debido a que una mayor concentración de población supone siempre que el impacto dañino de un PRM será mayor. Por otra parte, hay grupos de población que han demostrado ser más vulnerables que otros, por ejemplo, la población infantil, de cero a doce años de edad es siempre más frágil ante el embate de una amenaza, la población de adultos mayores también tiene limitaciones para poder sobrevivir, estos supuestos están basados en una generalización de la capacidad física de ambos grupos de edad que limita que puedan escapar, sobrevivir o recuperarse luego de ser sepultados por la masa desplazada.

Por otra parte, de acuerdo a datos de la *Women's Environment and Development Organisation* (WEDO), en promedio, mueren más mujeres que hombres durante la ocurrencia de desastres alrededor del mundo, esto bien podría relacionarse con la constitución física de las mujeres pero de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud y a un estudio de la London School Economics (en:http://news.newamericamedia.org/news/view_article.html?article_id=082904494be79ff560dfb4f2470b49cd. Última visita 14-11-2012) en donde se analizaron diversos eventos de desastre en 141 países diferentes, las razones tienen que ver más con factores como:

- El limitado acceso a los recursos, tenencia o control de la propiedad.
- Redes sociales limitadas (generalmente solo con las mujeres de la comunidad).
- Bajo nivel de educación y tasa de analfabetismo más alta.
- Falta de empleo, salarios muy bajos y falta de condiciones de seguridad en el trabajo.
- Las mujeres sufren de violencia familiar y tienen poca injerencia en las decisiones que se toman en casa o en la comunidad.
- Al ser las que se encargan de los hijos, eso limita su movilidad o la posibilidad de emigrar o buscar nuevas oportunidades antes y después de un desastre.
- Atención de salud orientada específicamente a las mujeres y sus necesidades deficiente o ausente.

Todo lo anterior puede parecer exagerado en el ambiente urbano de México, pero tales estructuras son aún muy visibles en el ambiente rural y en Pahuatlán siguen vigentes, especialmente en las localidades indígenas. Todo ello, incrementa las condiciones inseguras de este grupo de población.

Situación parecida ocurre con los grupos indígenas y las personas con limitaciones físicas, que también sufren discriminación en la zona de estudio y encuentran limitaciones en su capacidad de resistencia ante una amenaza. En el caso de los grupos indígenas, la población mestiza no suele tener una buena opinión de ellos, existe el estereotipo de que son flojos, menos inteligentes o muy aguerridos, esto entorpece las relaciones sociales y políticas con los poblados que tienen mayoría de población indígena. Otro factor es que la educación siempre se ha dado en idioma español, por ello gran parte de la gente joven de las localidades indígenas es bilingüe, sin embargo, la población adulta o mayor muchas veces solo habla su lengua y no español. Por ello, para esta categoría se tomó en cuenta a este tipo de población. Se elaboró un índice de la siguiente forma:

$$IPI = ((PHLI/PT) + (PLINH/PT)) / 2$$

Donde:

IPI = Índice de población indígena.

PHLI = Población de tres años hablante de lengua indígena.

PLINH = Población hablante de lengua indígena que no habla español.

PT = Población total.

Respecto a la población con limitaciones físicas, en todo el municipio no existe el equipamiento adecuado para ellos, ni en las viviendas ni en los espacios públicos. La población que no sabe leer o escribir o analfabeta, que se compone en gran parte por mujeres e indígenas pero no en todos los casos, también encuentra limitaciones para poder resistir los embates de una amenaza

como los PRM, en este sentido debe pensarse que gran parte de la cultura de la prevención se difunde de forma escrita y exclusivamente en idioma español. De esta forma se puede inferir que es probable que esta población padezca de una ignorancia de qué hacer antes, durante y después de un desastre y quedan solamente a expensas de lo que el sentido común pueda dictarles. La tabla 5.3 resume las variables que se utilizaron para medir la sensibilidad de la población.

Para normalizar todas estas variables se trabajó con proporciones, tomando como referencia el porcentaje de cada grupo de población respecto a la población total en cada unidad de área (manzana, polígono urbano o unidad de ladera). De esta forma se obtuvieron siempre valores de 0 a 1. Sin embargo, el dato de la población femenina representaba un problema debido a que en casi todos los polígonos la proporción de hombres y mujeres era muy similar a 50/50, por esta razón la simple proporción del dato no reflejaba realmente la variabilidad en este indicador, por ello se decidió multiplicar el valor de la proporción por diez y obtener el logaritmo del dicho resultado, obteniendo así un reflejo más significativo del dato. De este modo se tiene la siguiente fórmula:

$$IPF = \text{Log}((PF/PT)*10)$$

Donde:

IPF = Índice de población femenina.

PF = Población total femenina.

PT = Población total.

Como el logaritmo base 10 de cualquier número menor de 10 y mayor estará siempre entre 0 y 1, la variable, queda normalizada. La tabla 5.3 expone los indicadores utilizados para el cálculo de la sensibilidad de la población.

Tabla 5.3. Indicadores seleccionados para la estimación de la sensibilidad de la población.

Variable	Fuente
Densidad de población	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.
Población infantil (0-12 años)	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.
Población de adultos mayores (más de 65 años)	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.
Población femenina	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.
Población indígena	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.
Población con limitaciones físicas	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.
Población analfabeta	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.

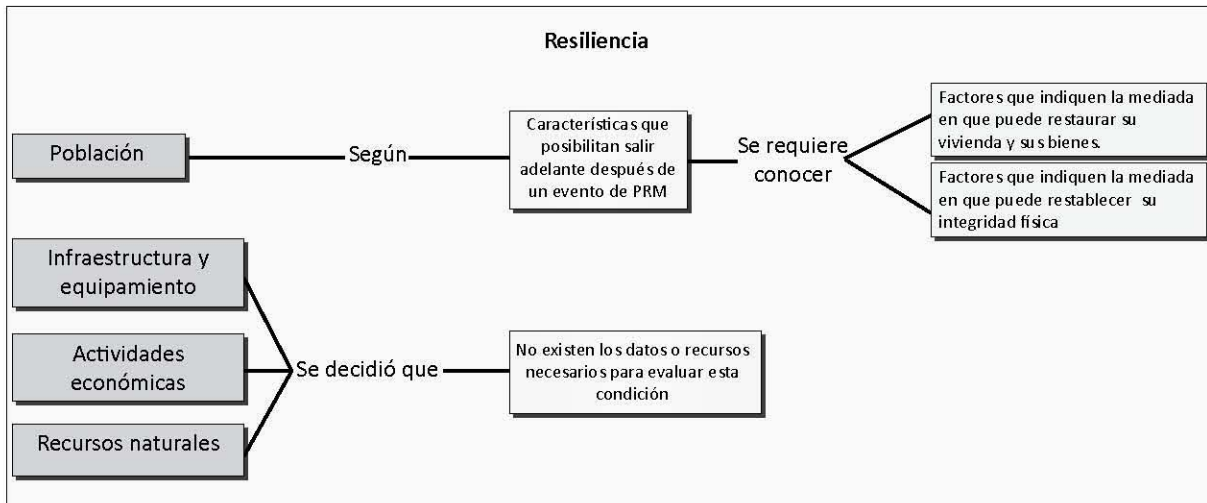
Cada una de estas variables fue normalizada a valores entre 0 y 1. Valores cercanos a uno aumentan el grado de sensibilidad del sujeto de vulnerabilidad.

Definición de la falta de Resiliencia

Para solventar este requerimiento se necesita conocer las propiedades de la población que le permiten salir adelante después de la ocurrencia de un evento de PRM (Corona Morales, 2009). Para lo anterior, se decidió trabajar con los siguientes indicadores: Ingreso, ocupación, tipo y cantidad de caminos que comunican dicho polígono con otras localidades, tiempo de recorrido hasta la cabecera municipal, y la población con derecho a seguro social.

Para el resto de los sujetos de vulnerabilidad no pudieron definirse criterios, ya que no se cuenta con los recursos necesarios para ello. En el caso de la infraestructura su recuperación depende de muchas variables difíciles de medir, como son el presupuesto asignado al municipio, los fondos destinados para desastres por parte del gobierno federal, la disposición de los habitantes de ayudar en las labores de reconstrucción, etc. Tal situación coloca la estimación de la resiliencia de la infraestructura fuera del alcance de esta investigación.

Figura. 5.9. Criterios para definir la resiliencia de los sujetos de vulnerabilidad.



Las variables seleccionadas para medir la resiliencia de la población se seleccionaron considerando los factores que podían influir para que la población pudiese recuperar su vivienda, sus bienes y sus medios de subsistencia y su salud (tabla 5.4). Los indicadores para la vivienda y los bienes son económicos, se parte del supuesto de que los grupos de población con mayores ingresos podrán tener más medios para recuperar sus bienes luego de un desastre, sin embargo este indicador debe tomarse con mesura, ya que en Pahuatlán la población de clase media ha conseguido su patrimonio luego de años e incluso décadas de esfuerzo, la pérdida total de ese patrimonio podría tardar años en recuperarse si esta población no tomó en cuenta precauciones como tener ahorros o asegurar sus bienes. Por el contrario, la población de menos ingresos podría perder su casa y los pocos bienes que tenga pero recuperarlos podría no ser tan complicado ya que pueden reconstruir su vivienda con los métodos tradicionales de construcción lo que implica prácticamente una inversión nula. Un análisis más detallado en este tema podría modificar los resultados de vulnerabilidad aquí expuestos, pero para poder ahondar más en ello se requieren recursos y tiempo que este trabajo no tiene, por lo anterior, se decidió tomar solamente el supuesto de que a mayor nivel de ingreso una recuperación de un desastre es más probable.

En México no existe una variable de ingreso en el censo, pero esta característica puede ser inferida mediante otros indicadores como la propiedad de bienes, servicios o algunas características de las viviendas. En este trabajo se utilizaron los siguientes indicadores para crear un índice de ingreso por polígono:

- Viviendas con piso de tierra (VCPT).
- Viviendas con todos los servicios (VCTS).
- Viviendas sin ningún bien (VSB).

De acuerdo a la siguiente fórmula:

$$IdI = \text{Log}_{10}(((VCPT/VT)+(1-(VCTS/VT)))+(VSB/VT) / 3)*10)$$

Donde:

IdI = Índice de ingreso.

VT = Viviendas totales.

VCPT = Viviendas con piso de tierra.

VCTS = Viviendas con todos los servicios.

VSB = Viviendas sin ningún bien.

Variables como conexión a internet y acceso a electricidad, sirvieron de referencia para definir el valor de tres polígonos que no tenían ninguna vivienda con piso de tierra, ni tampoco ninguna vivienda con todos los servicios y sin ningún bien. A estos tres polígonos se les dio un valor de 0.5 ya que se infiere que no se trata de viviendas de escasos recursos (los tres polígonos tenían acceso a electricidad y uno de ellos reportaba una computadora con acceso a internet) ni tampoco son viviendas de una alta clase social pues no contaban con todos los servicios. Un índice de ingreso alto significa que en esa unidad el ingreso de la población es bajo y aporta más a la falta de resiliencia de la población.

Tabla 5.4. Indicadores seleccionados para la estimación de la falta de resiliencia de la población.

Variable	Fuente
Ingreso	Estimado por medio de otros indicadores como características de la vivienda, acceso a los servicios y posesión de ciertos bienes con datos del Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.
Ocupación (Población económicamente activa)	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.
Acceso a seguridad social	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.
Existencia y tipo de camino (carretera, terracería)	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI y análisis de las imágenes de satélite de muy alta resolución GeoEye1.
Tiempo de recorrido hasta la cabecera municipal	Censo de Población y vivienda, 2010, INEGI.

Por otro lado, el tener una fuente de trabajo segura o el conocer algún oficio supone que las personas podrán recuperar su normalidad. En Pahuatlán, la mayor parte de la población aún se dedica al campo, lo cual no garantiza una fuente de ingresos segura ni constante. La población

que se ocupa en los sectores del comercio o de la industria podría tener mayores posibilidades, sin embargo dicho dato al nivel de manzana no destaca en el Censo de Población y vivienda 2010. Por lo que únicamente se consideró la cantidad de personas en edad de trabajar y no se les pudo clasificar de acuerdo al sector en que se ocupan. La desocupación o falta de empleo en el municipio es alta, de hecho el INEGI lo maneja como uno de los mayores problemas en todas las localidades del municipio. Sin embargo, la población que no encuentra empleo no se queda en el municipio, emigra; lo que hace que el porcentaje de población desocupada en Pahuatlán aparente ser bajo, por esta situación, no se tomó dicho dato y no existe un dato que indique la cantidad de personas que emigran. Sin duda un estudio más detallado que contabilice la cantidad de hogares que reciben remesas de sus familiares en Estados Unidos sería mejor para la estimación de la vulnerabilidad, pero al momento no se cuenta con esos datos.

Para calcular un valor para la ocupación se tomó el dato de Porcentaje de la Población Económicamente Activa Ocupada, y simplemente se realizó una proporción con la cantidad total de población.

Otro aspecto indispensable para estimar la resiliencia son las vías de comunicación. En el evento de 1999 muchas comunidades sufrieron de más, ya que los caminos que los comunicaban con otras comunidades fueron bloqueados por los PRM retrasando la ayuda por parte de Protección Civil, otras instituciones de gobierno, ONG o de parte de los pobladores de localidades cercanas. A algunos poblados la ayuda tardó en llegar hasta una semana. Por ello, el que una localidad cuente con más de un solo camino que la comunique con otras localidades aumenta la probabilidad de no quedar aislada en un evento de desastre. Para calcular este dato se analizaron las imágenes de satélite GeoEye1. Pahuatlán del Valle resultó ser la localidad más conectada con ocho caminos posibles para acceder a ella, el mínimo fue de un solo camino en localidades como Agua Negra. Para normalizar el dato se obtuvo el logaritmo en base diez de cada valor. Para los polígonos que no pertenecían a una localidad y no eran cortados por el paso de algún camino se tomó el dato como 1.

El tipo de camino también fue considerado, si el camino era una carretera asfaltada o una brecha o terracería. Luego de una emergencia, la reparación de los caminos asfaltados tiene prioridad sobre los caminos que no lo están, dicha situación afecta la llegada de ayuda o la normalización de las actividades económicas de una localidad. En ese sentido se estimó una escala simple de valores:

- Si el polígono estaba comunicado con carretera asfaltada se daba un valor de 0.
- Si estaba comunicado con terracerías se daba el valor de 0.5.
- Si no estaba en contacto con este equipamiento se daba el valor de 1.

El tiempo promedio que tarda un vehículo para arribar a la cabecera municipal también es un factor importante, por ello se consideró tomar el dato del tiempo promedio que una persona tarda en desplazarse desde su localidad en automóvil hasta la cabecera municipal, lo cual habla de la distancia pero también de la calidad de los caminos. Dicho dato es a nivel localidad, por ello se consideró que todas las manzanas de una localidad registraban el mismo tiempo, para las casas aisladas en el medio rural dicho indicador se tomó como 1 pues es evidente que llegar hasta esas casas es todavía más complicado que a una localidad completa comunicada por mejores y más caminos. El resto de los datos se normalizó con la siguiente fórmula:

$$\text{IdTC} = \text{Log } 10 (\text{TR} / 60 \text{ min})$$

Donde:

IdTC = Índice de tiempo que tarda un vehículo en arribar a la cabecera municipal.

TR = Tiempo promedio que tarda un vehículo en arribar a la cabecera municipal.

Para los polígonos de la cabecera municipal este indicador se tomó como cero.

El acceso a servicios de salud también fue un factor a considerar pues en México gran parte de la población depende del Seguro Social: IMSS, ISSTE o el Seguro Popular, para atender sus problemas de falta de salud. La gente que no tiene acceso a estos servicios tardara más, tendrá mayor dificultad o no podrá recuperar su salud si sale herida luego desastre o es afectada por alguna enfermedad. El dato se normalizó con una proporción tomando como referencia la población total con respecto a la que tiene acceso a los servicios de salud.

5.5 Resultados e identificación de patrones

Para calcular todos los resultados estadísticos se utilizó el software de licencia libre R –Project versión 2.12 (Modulo de interfase R-Studio), lo mismo para elaborar los distintos gráficos. Para generar los mapas se utilizó el software comercial ARCGIS 10 ©. El cálculo de la Exposición de la Población (EXP) resultó de la siguiente fórmula:

$$\text{EXP} = (\text{IS} + \text{IV} + \text{PR} + \text{IPA} + \text{IVTM} + \text{ETV} + \text{PEP}) / 7$$

Donde:

IS = Índice de susceptibilidad.

IV = Índice de área afectada por PRM viejos.

PR = Presencia de PRM recientes.

IPA = Índice de población absoluta.

IVTM = Índice de vivienda por material de construcción.

ETV = Índice de exposición temporal en la vivienda.

PEP = Presencia de algún edificio público, escuela, iglesia, mercado, plaza o clínica de salud.

Así, se registraron 102 polígonos con un nivel de exposición de la población muy bajo, 108 con valor de bajo, 97 con valor medio y solo siete con valor alto y uno con valor muy alto (ver figura 5.10). Se debe tomar en cuenta que, de los 316 polígonos, 130 no presentan población, todos estos polígonos se distribuyen en el valor de muy bajo de $\text{EXP} = 0$. Aun así, quedan 28 polígonos sin población que tuvieron valores mayores de cero, esto se explica debido a que hay polígonos en dónde no hay ninguna vivienda pero se concentra algún espacio público como las plazas. Algunos de estos polígonos sin población si registraron valor en las variables de Índice de susceptibilidad o en la presencia de PRM viejos o recientes. Esto indica que la mayor parte de los polígonos que tenían población tienen un valor de EXP de medio a muy alto, lo cual comienza a mover el resultado de la vulnerabilidad de la población hacia niveles críticos.

Figura 5.10. Histograma de datos de Exposición del la población

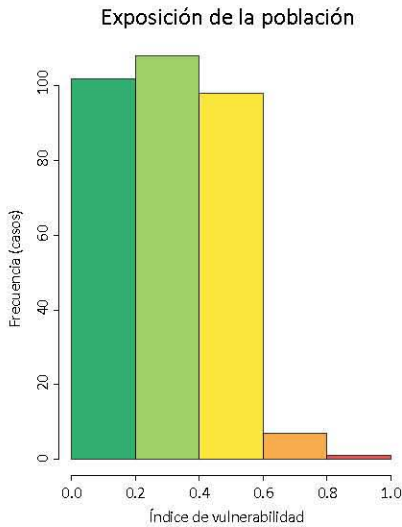
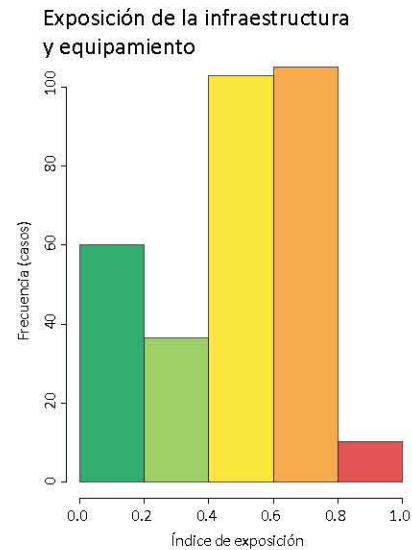


Figura 5.11. Histograma de datos de Exposición del equipamiento e infraestructura.



Para estimar el grado de Exposición de la Infraestructura y Equipamiento (EXI), se utilizó la siguiente fórmula.

$$EXI = (IS + IV + PR + IVT + IDV + IC + ICa + IAU) / 8$$

Donde:

- EXI = Exposición de la infraestructura y equipamiento.
- IS = Índice de susceptibilidad.
- IV = Índice de área afectada por PRM viejos.
- PR = Presencia de PRM recientes.
- IVT = Índice de viviendas totales.
- IDV = Índice de densidad de viviendas.
- IC = Índice de carreteras.
- Ica = Índice de caminos secundarios.
- IAU = Índice de área urbana.

Se obtuvieron los siguientes resultados. 60 polígonos reportaron un valor muy bajo de EXI, 37 un valor bajo, 112 con valor alto, 105 con valor medio y 10 con valor muy alto (figura 5.11). En este caso la ausencia de población no fue tan importante para delimitar las zonas de baja exposición ya que existe infraestructura, principalmente carreteras y caminos, que está presente en polígonos donde no hay población ni viviendas.

En la figura 5.15 se puede observar la expresión espacial de la EXI, se aprecia que todas las áreas urbanas tienen un nivel de exposición alto o muy alto. Las zonas con un nivel muy bajo son zonas en donde no hay infraestructura ni equipamiento. Además, cerca de la cabecera municipal hay polígonos con un nivel muy alto de exposición lo cual se explica por las viviendas, la presencia de carreteras y caminos, y que son zonas susceptibles a la ocurrencia de PRM.

Para estimar el grado de Sensibilidad de la Población (SP), se utilizó la siguiente fórmula:

$$SP = ((\text{Log}(DP) / \text{VMALDP}) + (Pm12/PT) + (PM65/PT) + IPF + IPI + (PL /PT) + (PAn/PT))/7$$

Donde:

- SP = Sensibilidad de la población.
- DP = Densidad de población.
- VMALDP = Valor del logaritmo más alto de la densidad de población.
- Pm12 = Población con menos de 12 años.
- PT = Población total.
- PM65 = Población mayor de 65 años.
- IPF = Índice de población femenina.
- IPI = Índice de población indígena.
- PL = Población con limitaciones físicas.
- Pan = Población analfabeta.

De esta forma se obtuvieron los siguientes resultados para la Sensibilidad de la Población. 131 casos registraron niveles nulos de Sensibilidad de la población, todos estos casos corresponden a las zonas que no tienen población. 26 casos registraron valores bajos de Sensibilidad, 95 valores medios, 50 con valores altos y 15 con valores muy altos (ver figura 5.12). El que 26 casos registraran casos de baja sensibilidad significa que en estos polígonos el acceso a recursos y oportunidades por parte de la población es aceptable, dichos polígonos pertenecen principalmente a la cabecera municipal y uno al centro del poblado de San Pablito.

Si se observa en el mapa de la figura 5.18 se puede ver que los polígonos con niveles más altos de sensibilidad de la población corresponden a las localidades indígenas de Atla, Xolotla, Xochimilco, Agua del Machete, Agua del Carrizo, Agua Negra, y casi la totalidad del poblado de San Pablito. Además, la localidad mestiza de Zacapehuaya al oeste de la zona de estudio también presenta niveles muy altos de sensibilidad. Esto nos indica que en esas localidades las condiciones y el nivel de vida son bajos y muy difíciles. Para hacer más grave la situación, el resto de las localidades del municipio, incluida la cabecera municipal, presenta niveles altos de sensibilidad (color naranja en el mapa). Se puede concluir que en general, la población del municipio es muy sensible a un desastre por PRM.

La sensibilidad del equipamiento y la infraestructura, se tomó como total, un valor de 1, como es constante en todos los polígonos que registraron tener algún tipo de estos atributos, el resultado esperado era que la diferencia entre los polígonos que si tienen infraestructura y los que no tienen, fuese más grande, estadísticamente esto no era muy relevante, por lo que se decidió no incluir en el análisis la sensibilidad para este sujeto de vulnerabilidad. Se reitera que es necesario un estudio más completo para poder obtener datos y valores que realmente sean significativos en un análisis estadístico.

La resiliencia de la población es la capacidad de la gente para recuperarse luego de un desastre, luego entonces, lo que a este estudio interesaba era conocer el grado de falta de resiliencia de la población, para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$FRP = IdI + (1 - (PEA/PT)) + TC + INC + IdTC + (1-(PSS/PT))/6$$

Donde:

- FRP = Falta de resiliencia de la población.
- IdI = Índice de ingreso.
- PEA = Población económicamente activa.
- PT = Población total.
- TC = Tipo de camino
- INC = Índice de número de caminos que comunican a la localidad.
- PSS = Población con acceso a seguro social.

Se obtuvieron las siguientes frecuencias: 131 casos tuvieron niveles muy bajos de Falta de Resiliencia, todos los casos corresponden con los polígonos que no tienen población, 31 con valores bajos, 66 con valores medios, 75 con valores altos y 13 con valores muy altos (ver figura 5.13). La falta de resiliencia no se concentra en las localidades sino en los polígonos que presentaban población rural dispersa, cuyas situación socioeconómica es igual o más precaria que la de las localidades. En cambio, niveles bajos o medios de Falta de Resiliencia se localizan en los polígonos correspondientes a la cabecera municipal, dejando ver que es estos lugares en donde la población tiene más medios para recuperarse de un desastre. Para determinar la Vulnerabilidad de la Población se utilizó la siguiente formula.

$$VP = (EXP + SP + FRP) / 3$$

Donde:

- VP = Vulnerabilidad de la población.
- EXP = Exposición de la población.
- SP = Sensibilidad de la población.
- FRP = Falta de resiliencia de la población.

Se obtuvieron los siguientes resultados: 128 polígonos resultaron con valores de vulnerabilidad muy bajo, de nueva cuenta todos estos polígonos correspondían a polígonos sin población. Solo un polígono resultó con un valor bajo de vulnerabilidad, este polígono era también de los que

Figura 5.12. Histograma de datos de Sensibilidad de la población

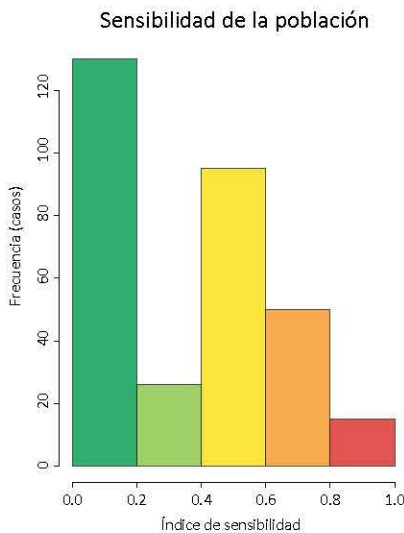


Figura 5.13. Histograma de datos de Falta de resiliencia de la población

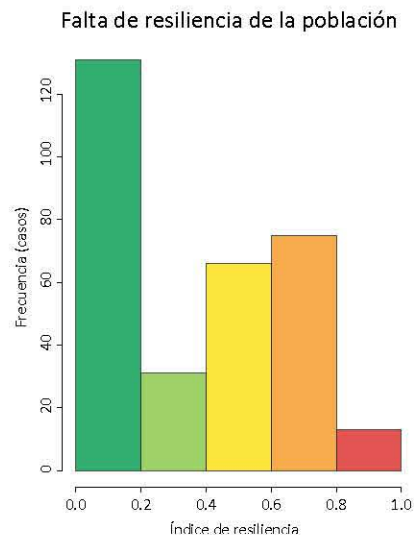


Figura 5.14. Exposición de la población.

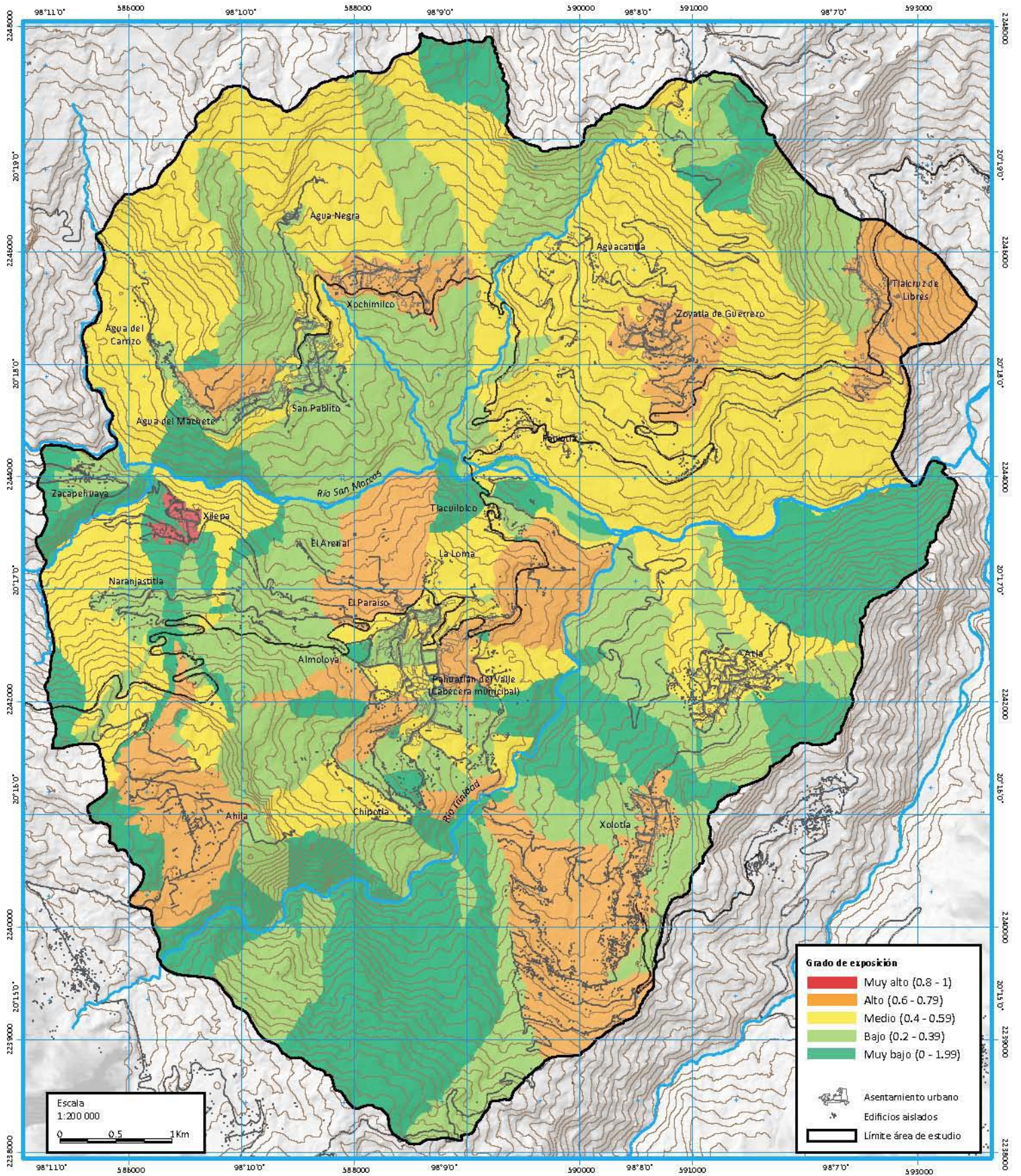


Figura 5.15. Exposición del equipamiento e infraestructura

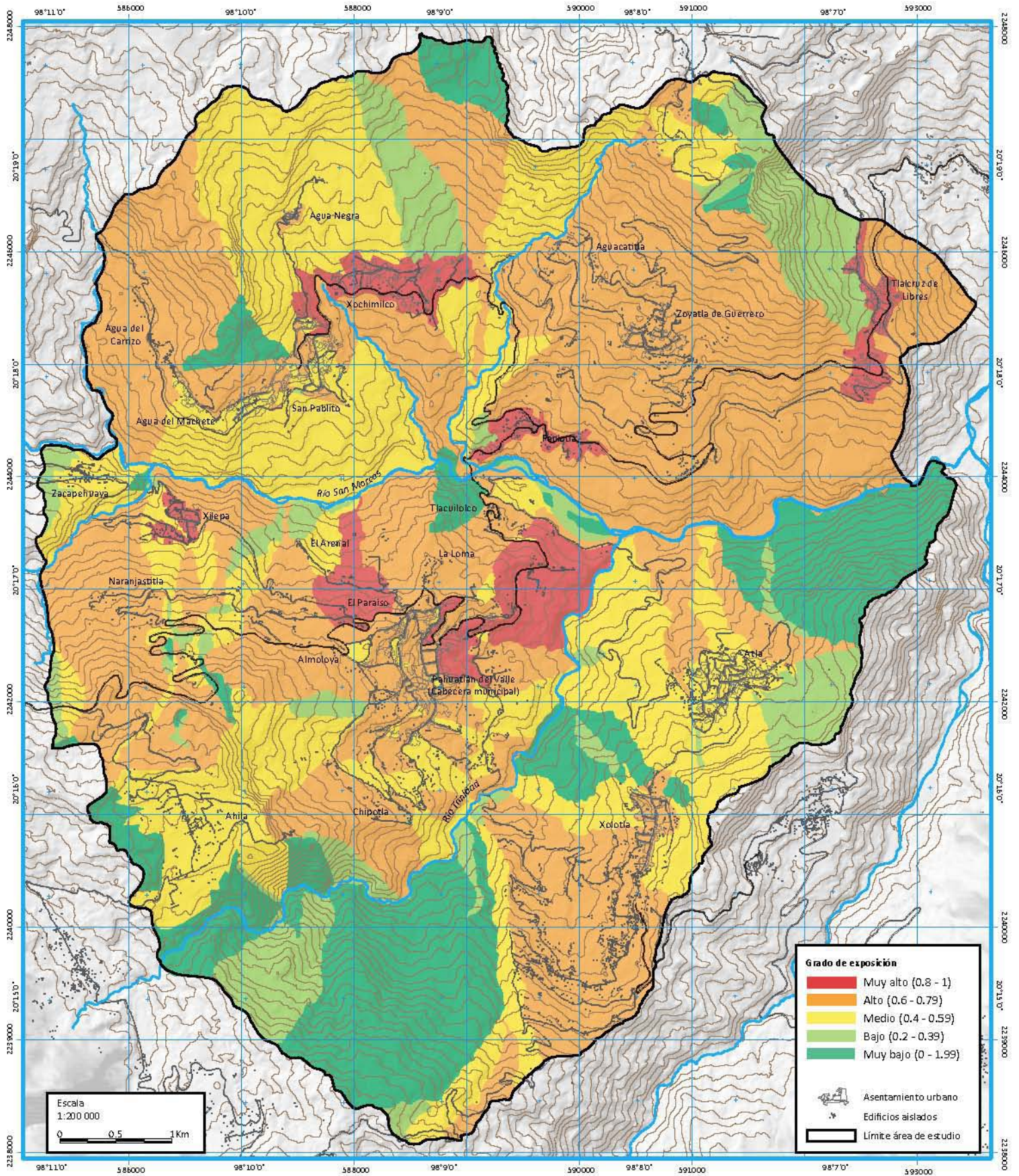
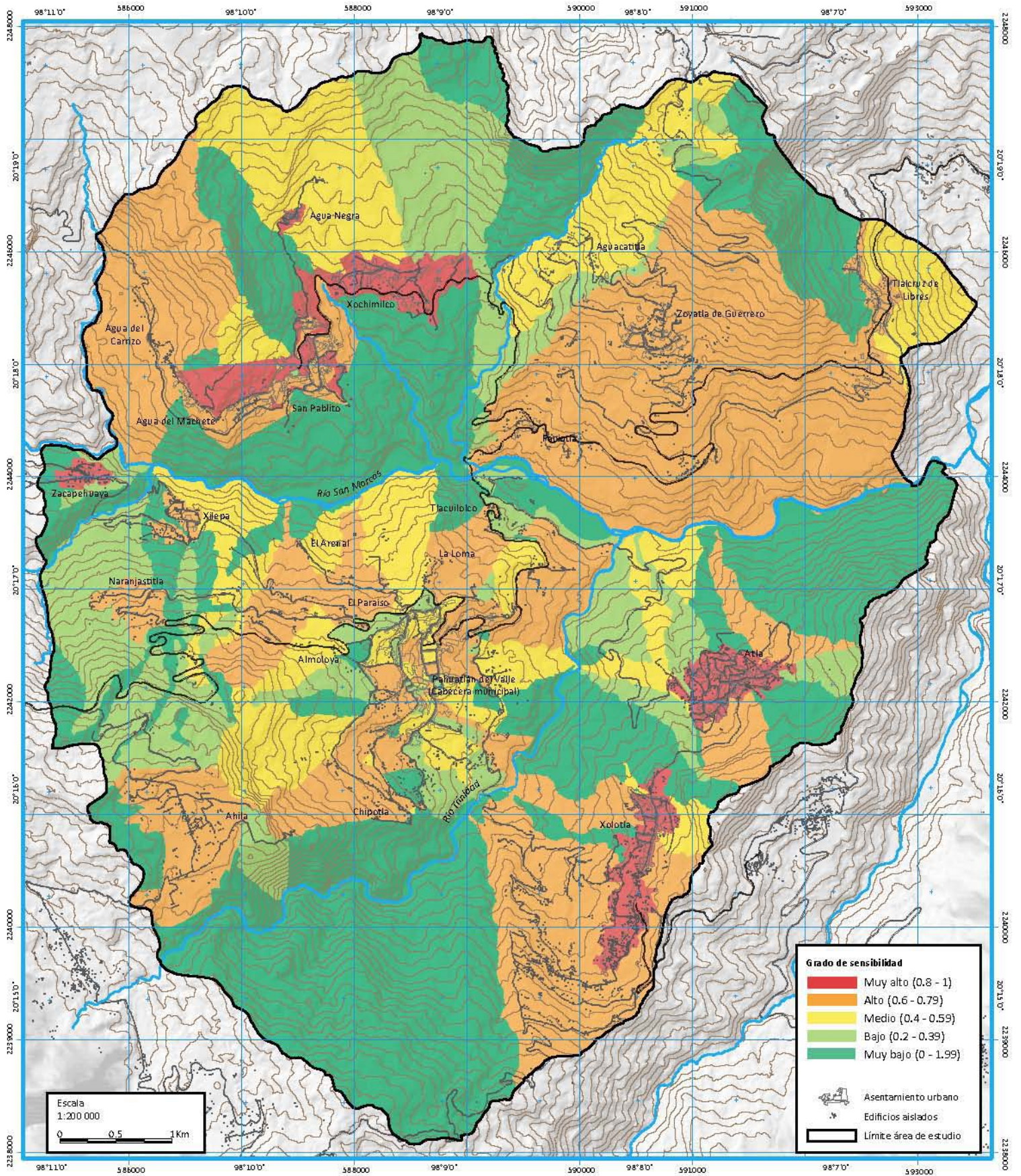


Figura 5.16. Sensibilidad de la población.



carecía de población. Tan solo doce polígonos registraron valores medios de vulnerabilidad para la población, lo que deja una alta cifra de vulnerabilidad para casi toda la población del área de estudio. 165 polígonos tuvieron valores altos de vulnerabilidad, lo que le da un color naranja al mapa de la figura 5.20. Finalmente, 11 polígonos tuvieron valores muy altos de vulnerabilidad de la población (ver figura 5.17).

Analizando la distribución de la frecuencia de los valores de Vulnerabilidad de la Población, se puede observar que casi toda la población del área de estudio presenta un nivel alto de vulnerabilidad. Los niveles más altos se registraron en las localidades indígenas de Xolotla, Atla y Xochimilco, así como en las localidades mestizas de Xilepa, Zoyatla de Guerrero y Ahila.

Para obtener el valor final de Vulnerabilidad se combinó el dato de la Vulnerabilidad para la Población y el dato de la Exposición del equipamiento e infraestructura que fue el único dato que se pudo obtener para dicho sujeto de vulnerabilidad. De esta forma, la Vulnerabilidad Total para el área de estudio resulto de:

$$VT = (VP + EXI) / 2$$

Donde:

VT = Vulnerabilidad Total.

EXI = Exposición del equipamiento y la infraestructura.

VP = Vulnerabilidad de la Población.

Se obtuvieron las siguientes frecuencias: 92 casos resultaron con una Vulnerabilidad Total muy baja, 36 con vulnerabilidad baja, 31 con vulnerabilidad media, 147 con alta vulnerabilidad y 10 con vulnerabilidad muy alta (figura 5.18).

En lo que al área se refiere, 20% del área de estudio está cubierta por las zonas de muy baja o nula vulnerabilidad (ver figura 5.21). Es una porción considerable del territorio y está compuesta principalmente por las laderas despobladas del cerro de Aila, cuya pendiente es muy fuerte, muchas de estas zonas aún conservan la vegetación natural de bosque mesófilo de montaña.

Figura 5.17. Histograma de datos de Vulnerabilidad de la Población

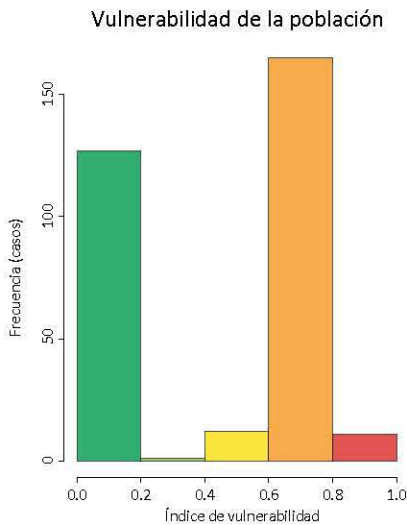


Figura 5.18. Histograma de datos de Vulnerabilidad Total

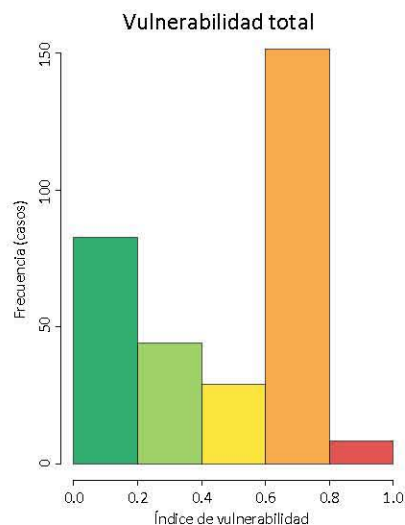


Figura 5.19. Falta de resiliencia de la población.

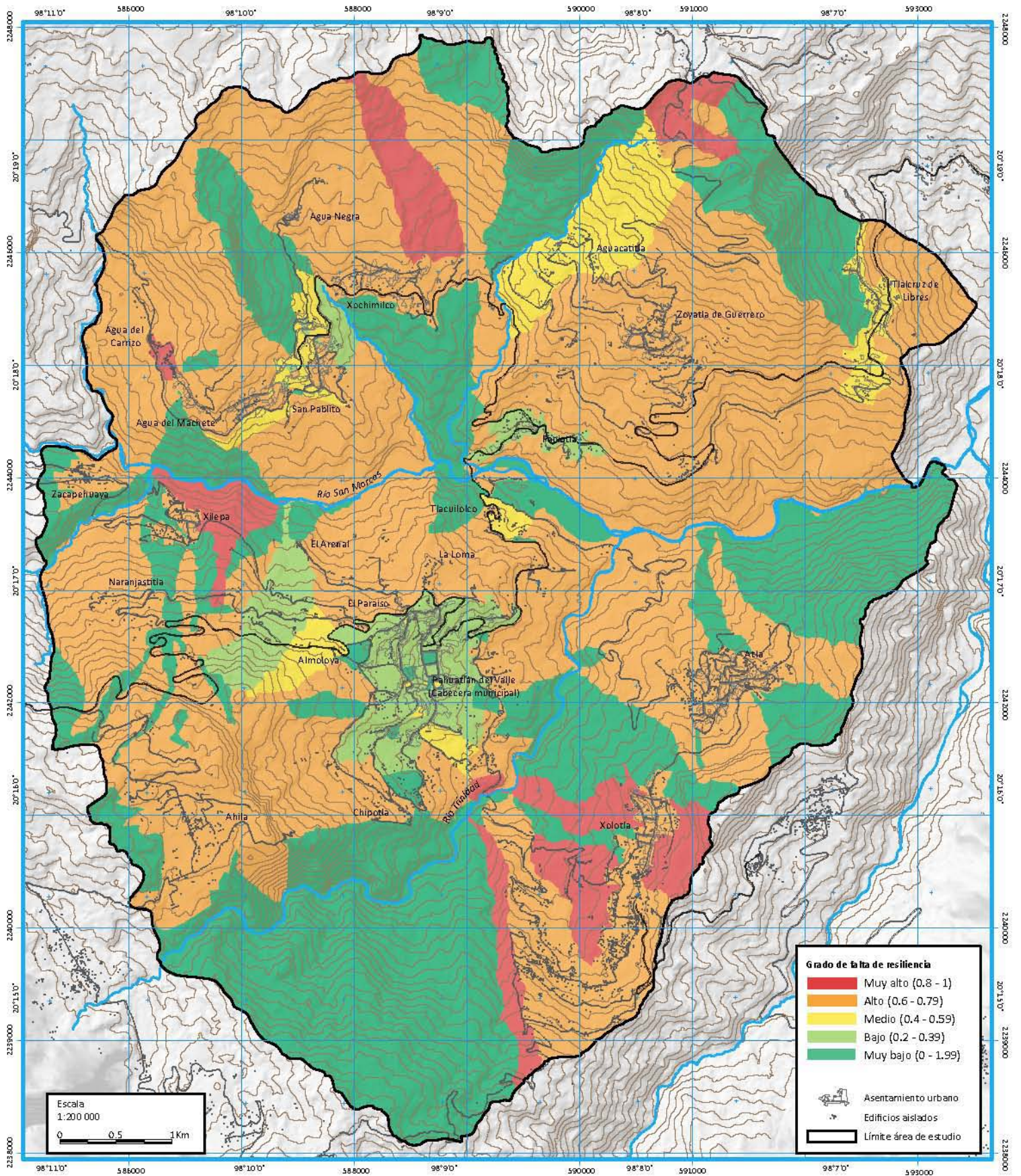


Figura 5.20. Vulnerabilidad de la población.

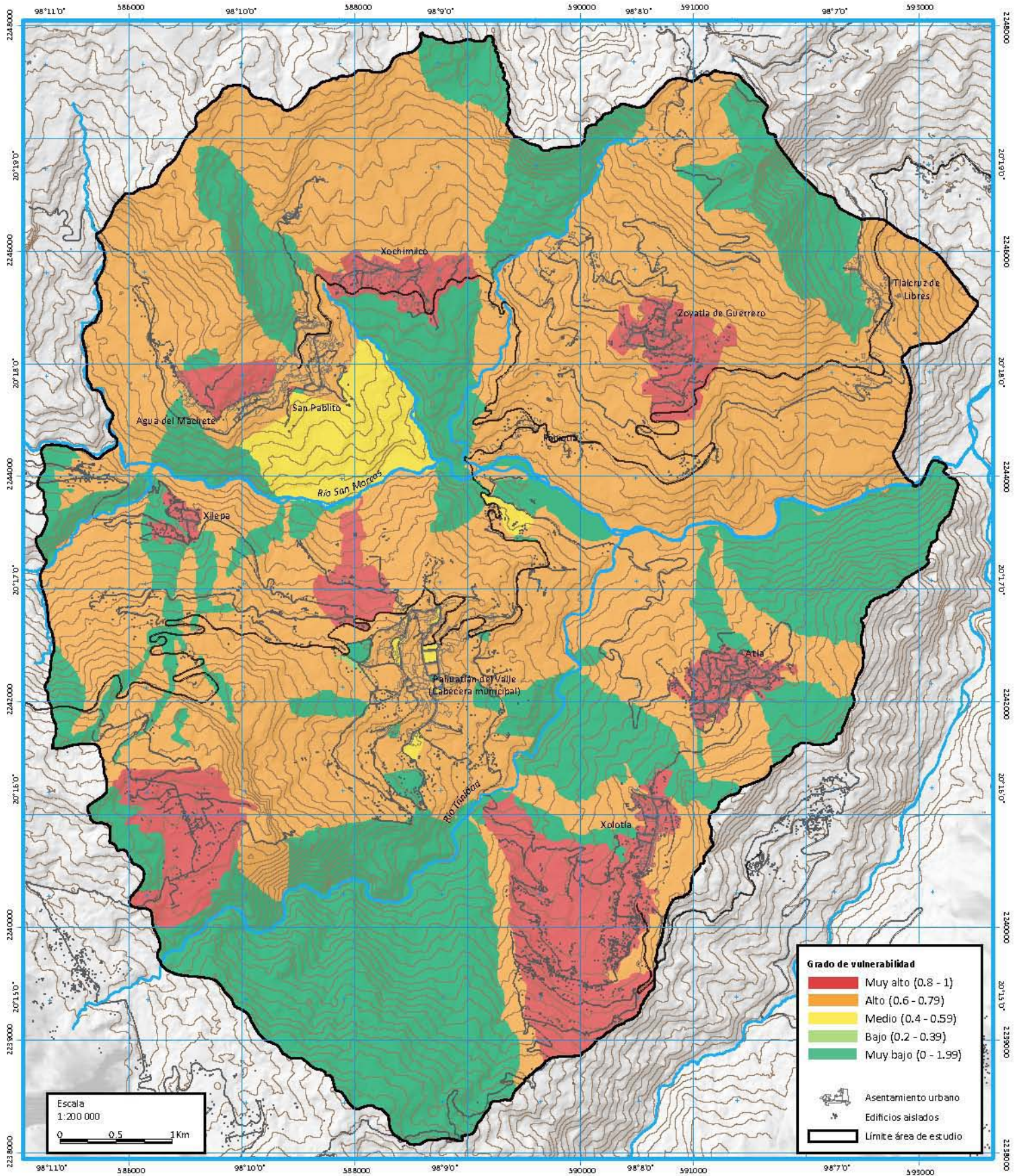
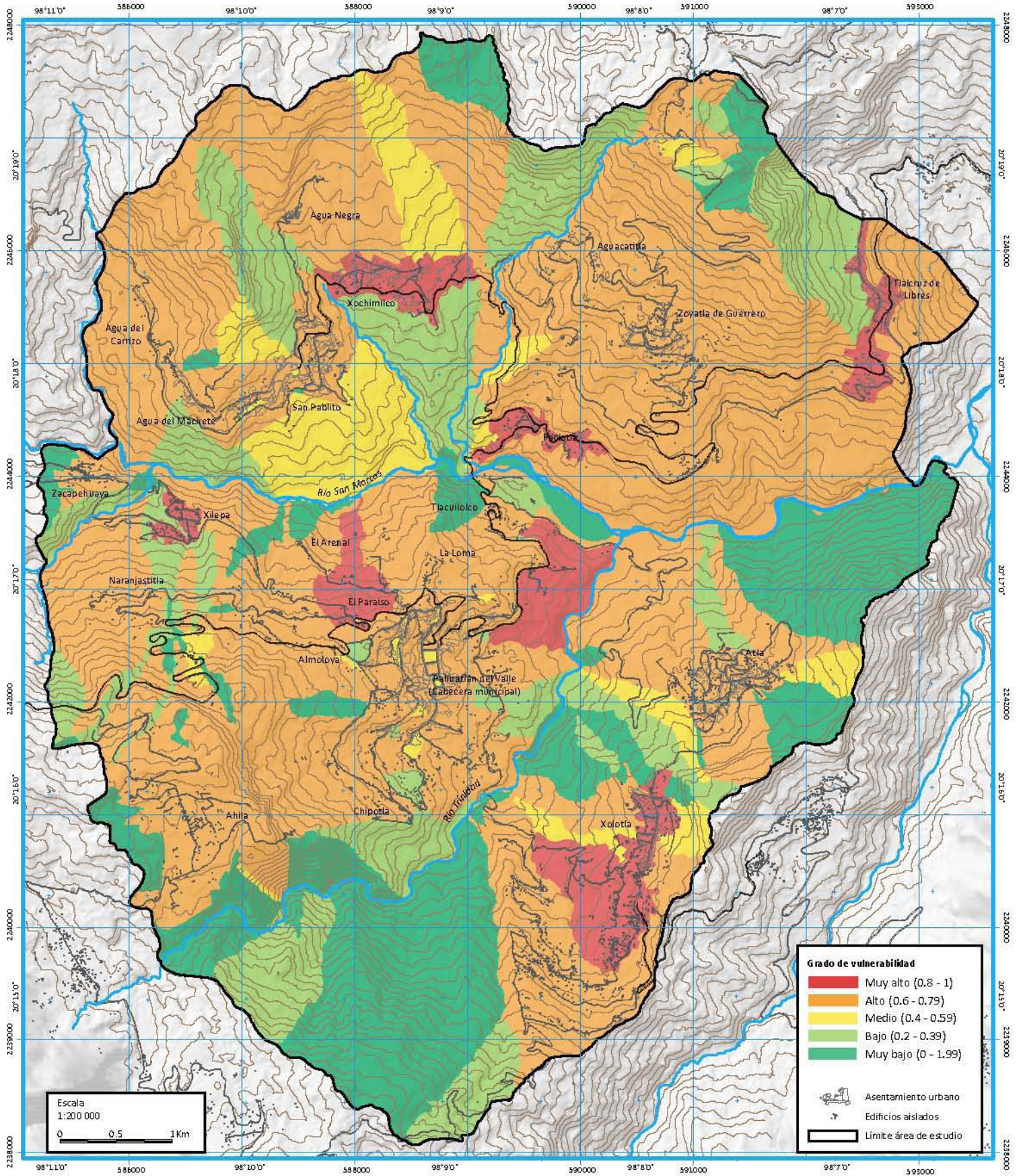


Figura 5.21. Vulnerabilidad Total.



Hacia el este de la zona de estudio también hay una gran porción de valores muy bajos de vulnerabilidad, esta zona también está despoblada y presenta una pendiente muy fuerte y vegetación original en buen estado, es una zona que también corresponde al área de un gran y muy antiguo PRM. Otras zonas de muy baja vulnerabilidad son la planicie del río San Marcos y algunas de las laderas que lo circundan, estas laderas no presentan vegetación ni población y si tienen una fuerte pendiente y están compuestas por materiales deleznable que favorecen la ocurrencia de flujos de detritos.

Posteriormente, está el área comprendida por las zonas de baja vulnerabilidad, 11% del área total de la zona de estudio, también prácticamente despobladas. Estas son zonas generalmente ocupadas por la agricultura y el pastoreo, por lo que están distribuidas a lo largo de toda la zona de estudio sin un patrón particular.

Las áreas de mediana vulnerabilidad, 7% de la zona de estudio, ya incluyen algunas zonas de población. Algunas manzanas de la cabecera municipal y de San Pablito presentan este grado de vulnerabilidad además de algunas zonas rurales poco pobladas pero cercanas a las carreteras y caminos principales.

El área de vulnerabilidad alta ocupa la mayor parte de la zona de estudio, 55 %, y la conforman casi todas las manzanas urbanas y algunas de las laderas con mayor número de población.

Finalmente, como era de esperarse luego de analizar los resultados anteriores, los valores más altos corresponden a localidades como Xolotla, Xochimilco, ambas localidades indígenas, Xilepa, Tlalcruz de Libres, Paciotla, El Paraiso y El Arenal. Además destaca un polígono cercano a la cabecera municipal en donde hay varias viviendas dispersas. El mapa muestra que en general en la zona de estudio predomina una alta vulnerabilidad.

La tabla 5.4 muestra la distribución de algunos valores de las variables con relación al valor de la vulnerabilidad total en la zona de estudio. Como puede observarse, la mayor parte de la población de la zona de estudio, casi un 70% de esta, reside en zonas con valores altos de vulnerabilidad. Cerca de un 30% vive en condiciones de valores de vulnerabilidad muy altos. Prácticamente no hay población habitando en zonas con baja o muy baja vulnerabilidad y solo unas pocas personas viven en zonas con una vulnerabilidad media. Entonces, la población de la zona de estudio vive en condiciones homogéneas de vulnerabilidad alta.

También se puede apreciar que la distribución de la población de los grupos más vulnerables: mujeres, niños, adultos mayores, indígenas, personas con limitaciones físicas y población analfabeta, se distribuyen casi exclusivamente en zonas de vulnerabilidad alta y muy alta, sólo un pequeño porcentaje de las personas que pertenecen a estos grupos viven en zonas de vulnerabilidad media. Los grupos de población de mujeres y personas sin acceso al seguro social son los que tienen una distribución más equilibrada en las tres categorías (media, alta y muy alta). La variable de viviendas sin ningún bien solo tienen población en las categorías de vulnerabilidad alta y muy alta, esto parece lógico pues esta variable refleja condiciones sociales muy precarias relacionadas con la pobreza. Sin embargo, el índice de ingreso (entre más alto menos ingreso), no es muy alto ni siquiera en la categoría de vulnerabilidad muy alta, lo que parece indicar que la relación entre ingreso y vulnerabilidad no es lineal, y solo un ingreso muy precario

Tabla 5.4. Resumen de resultados de la vulnerabilidad total.

	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Total
Población total	0	8	370	13 281	6 000	19 659
Área (km ²)	11.2	6.1	3.9	30.3	3.4	55
Densidad de población	0	1.3	94.8	438	1 764	357
Población mayor de 65 años	0	0	19	727	477	1 223
Población menor de 12 años	0	3	104	3 655	1 666	5 428
Población hablante de lengua indígena {Porcentaje respecto al total de la población}	0 (0)	0 (0)	34 (9)	6 366 (48)	3 438 (57.3)	9 838 (50)
Población femenina	0	4	177	6 882	3 990	1 416
Población con alguna discapacidad	0	0	17	989	410	1 416
Población analfabeta	0	0	25	1 906	974	2 905
Población sin acceso al seguro social	0	5	193	7 303	2 007	9 508
Viviendas sin ningún bien	0	0	0	472	305	776
Índice de ingreso	0	0.01	0.48	0.52	0.62	0.32
Índice de exposición de la población	0	0.01	0.37	0.44	0.63	0.36
Índice de exposición de la infraestructura	0.09	0.50	0.44	0.68	0.83	0.36
Índice de la sensibilidad de la población	0	0.01	0.35	0.57	0.71	0.32
Índice de falta de resiliencia de la población	0	0.18	0.58	0.55	0.60	0.43
Vulnerabilidad total	0.05	0.29	0.53	0.55	0.68	0.44

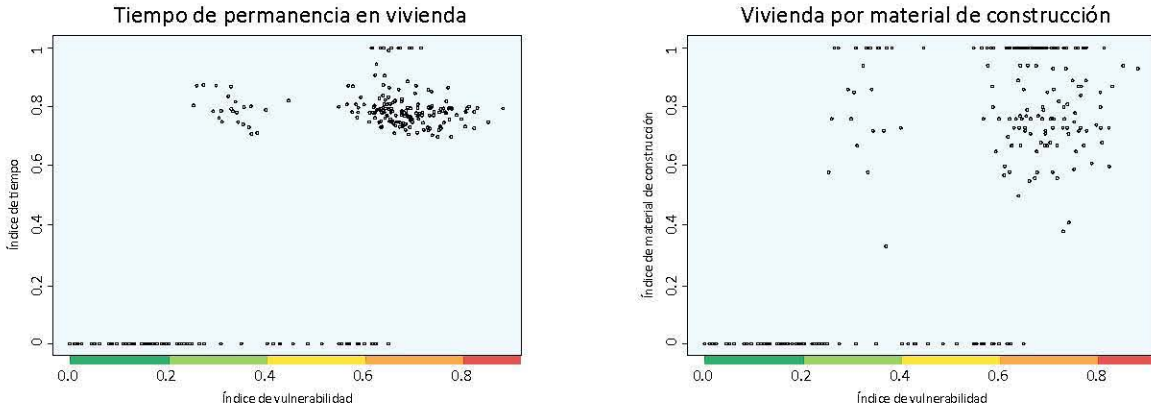
podría estar relacionado con una alta y muy alta vulnerabilidad, al menos, en lo que respecta a la zona de estudio.

En la parte correspondiente a los tres componentes de la vulnerabilidad, puede observarse que de todos los componentes, la falta de resiliencia parece tener el mayor peso en la definición de la vulnerabilidad alta y muy alta en la zona de estudio. Pero es la exposición de la infraestructura la que parece tener un mayor peso en la categoría específica de vulnerabilidad muy alta.

Para visualizar qué variables podrían tener mayor injerencia en la estimación de la vulnerabilidad total se pueden analizar los gráficos de dispersión de algunas de las variables. En la figura 5.22 se muestran dos de las variables utilizadas para construir el valor de la Exposición de la población. En el tiempo de permanencia en vivienda, la distribución muestra dos grupos, aquellos casos en que un alto valor del índice de tiempo coincide con valores de alta y hasta muy alta vulnerabilidad, y algunos casos que presentan valores altos del índice de tiempo pero no así en la escala de la vulnerabilidad, presentando valores medios y bajos. En este último grupo, es de suponer, que otras variables tienen más peso que el tiempo de permanencia en vivienda. Por otro lado, la gráfica de vivienda por material de construcción muestra una distribución similar al tiempo de permanencia en viviendas.

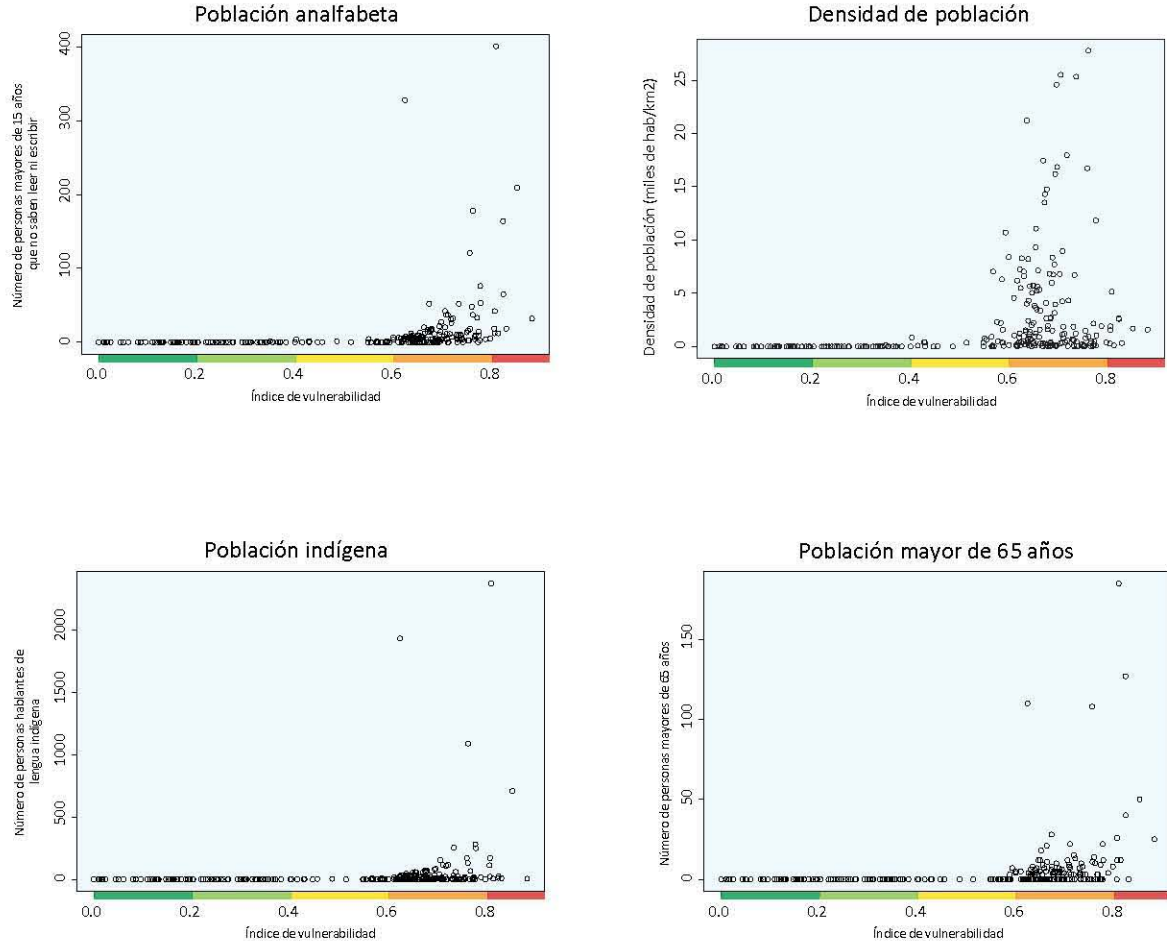
En el caso de las variables que se utilizaron para construir la sensibilidad de la población, la figura 5.23 muestra algunas gráficas de dispersión de estas. Se puede apreciar que en las seis variables seleccionadas existe una relación directa entre valores altos de cada una de ellas y valores altos de vulnerabilidad. Es interesante el caso de la variable de hogares con jefatura femenina, que fue una variable no incluida en la construcción de la vulnerabilidad aunque está relacionada con la población femenina; aun así, el gráfico de dispersión de esta variable muestra una relación similar lo que nos lleva a pensar que la población vulnerable también está relacio-

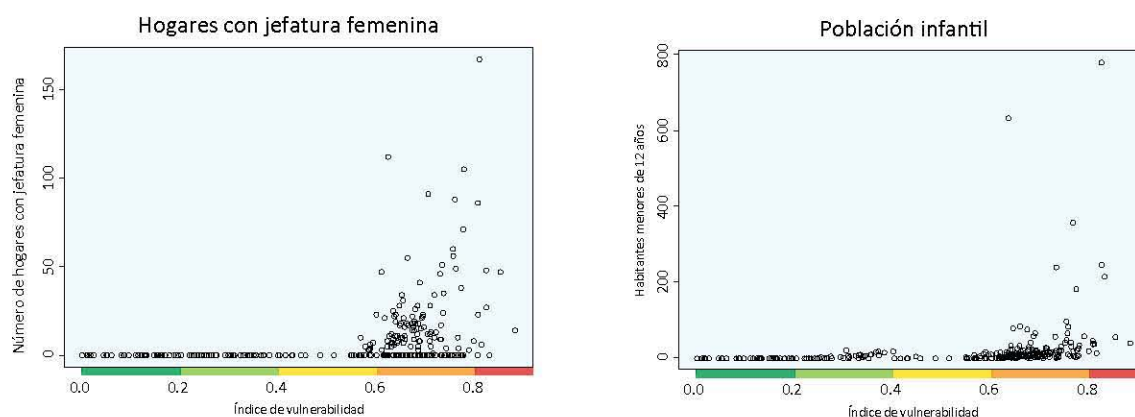
Figura 5.22. Gráficos de dispersión de algunas las variables utilizadas para el análisis de la exposición de la población.



nada con hogares en donde las mujeres son las jefas del hogar, esta situación puede estar también relacionada con la migración y falta de oportunidades, ya que una de las causas para que una mujer sea jefa del hogar es que el marido ha emigrado. Lo anterior es solo una suposición, se requerían mayores datos para comprobar y estimar la relación entre esos componentes.

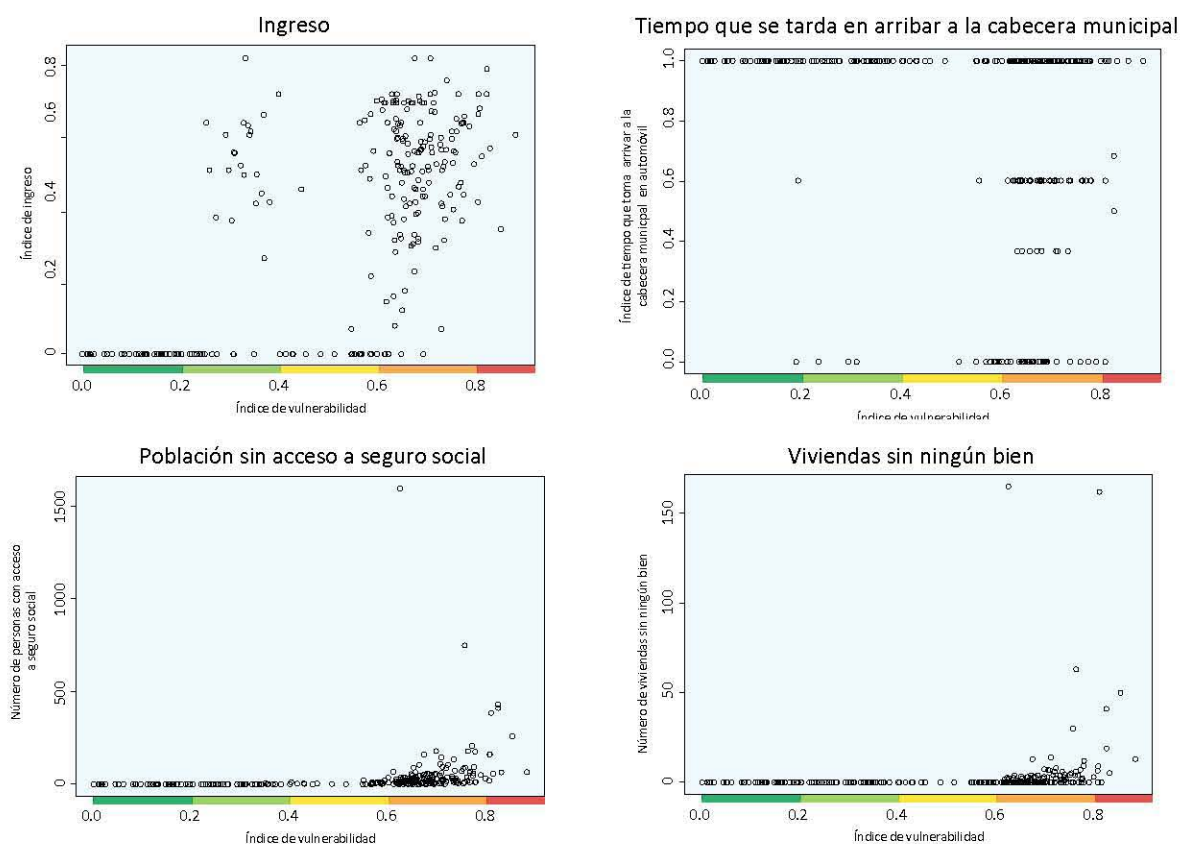
Figura 5.23. Gráficos de dispersión de algunas las variables utilizadas para la construcción de la sensibilidad de la población.





Por otra parte, la figura 5.24 muestra las gráficas de dispersión de algunas variables utilizadas para la estimación de la Falta de Resiliencia. El gráfico referente al ingreso demuestra que no siempre la falta de ingreso determina la vulnerabilidad ya que hay algunos casos de un alto índice de ingreso (carencia de ingreso) que no están en el área de valores altos de vulnerabilidad y viceversa. Es de suponer que en esos casos son otras variables las que determinan la localización de esos puntos. En cambio, situaciones de extrema pobreza que podrían relacionarse con las viviendas sin ningún bien, si están directamente relacionadas con valores de vulnerabilidad altos y muy altos como lo demuestra el gráfico de dispersión de esa variable. La variable de la gente sin acceso a seguridad social también guarda esta relación. Contrario a lo anterior, el tiempo que toma ir de una localidad a otra no es tan significativo pues los puntos no guardan una

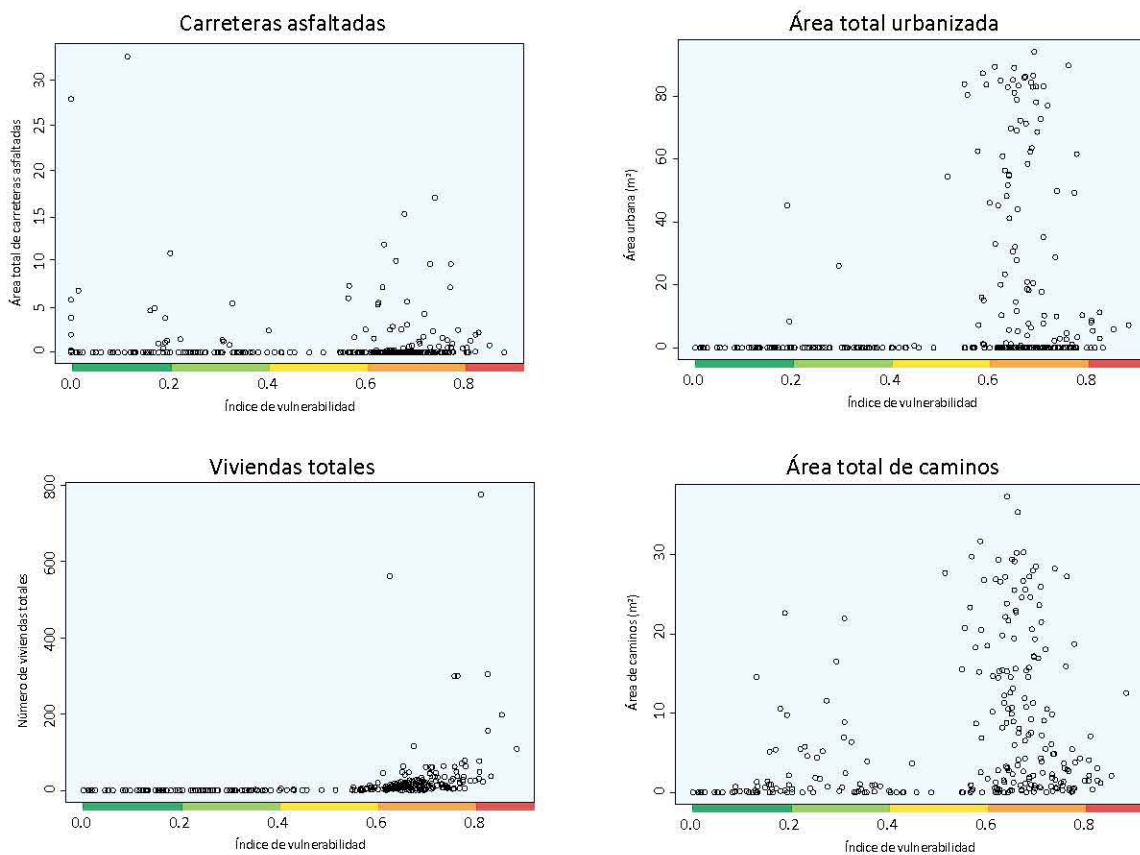
Figura 5.24. Gráficos de dispersión de algunas las variables utilizadas para la construcción de la falta de resiliencia de la población.



distribución uniforme: valores altos de índice de tiempo no necesariamente están relacionados con valores altos de vulnerabilidad.

La figura 5.25 muestra los gráficos de dispersión de algunas de las variables utilizadas para estimar la exposición de la infraestructura y equipamiento. La única variable de estas que muestra una relación directa en todos sus casos con altos valores de vulnerabilidad es el total de viviendas, que además es una variable altamente relacionada con la presencia de población. El resto de las variables muestra una distribución menos ordenada. Del área total urbanizada hay tres casos que no se encuentran en la zona de valores altos de la vulnerabilidad, en las variables referentes a los caminos y carreteras el número de casos no relacionados se incrementa. Es de suponer que en esos casos otras variables tienen más injerencia.

Figura 5.25. Gráficos de dispersión de algunas de las variables utilizadas para la estimación de la falta de exposición de la infraestructura y equipamiento



Analizando globalmente todos los gráficos de dispersión se puede afirmar que las variables relacionadas con la sensibilidad, directamente ligadas a las condiciones sociales de la población, son las que mayor peso tienen en la definición de la vulnerabilidad en la zona de estudio.

La figura 5.26 muestra la distribución de los valores de la Exposición de la población con respecto a la Vulnerabilidad Total. Dicha distribución no es homogénea delatando que la relación entre este componente de la vulnerabilidad y la Vulnerabilidad Total no es lineal. Sin embargo, los valores más altos de exposición están en la zona de los valores más altos de vulnerabilidad. En la figura 5.27 se aprecia la relación del resultado final de vulnerabilidad con los valores de la Sensi-

bilidad de la población. En esta se aprecian tres grupos bien diferenciados de puntos, los valores de nula sensibilidad, todos aquellos polígonos sin población, tienen valores de vulnerabilidad diversos, seguramente una alta vulnerabilidad en este grupo tiene como causa una Exposición de la Infraestructura y Equipamiento alta.

Figura 5.26. Gráfico de dispersión de la Exposición de la población.

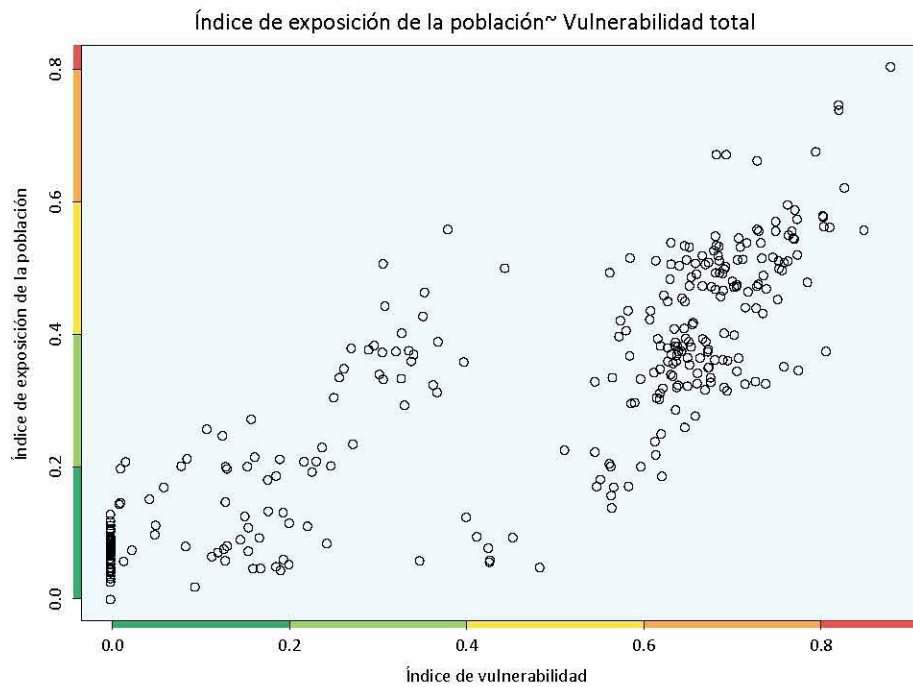
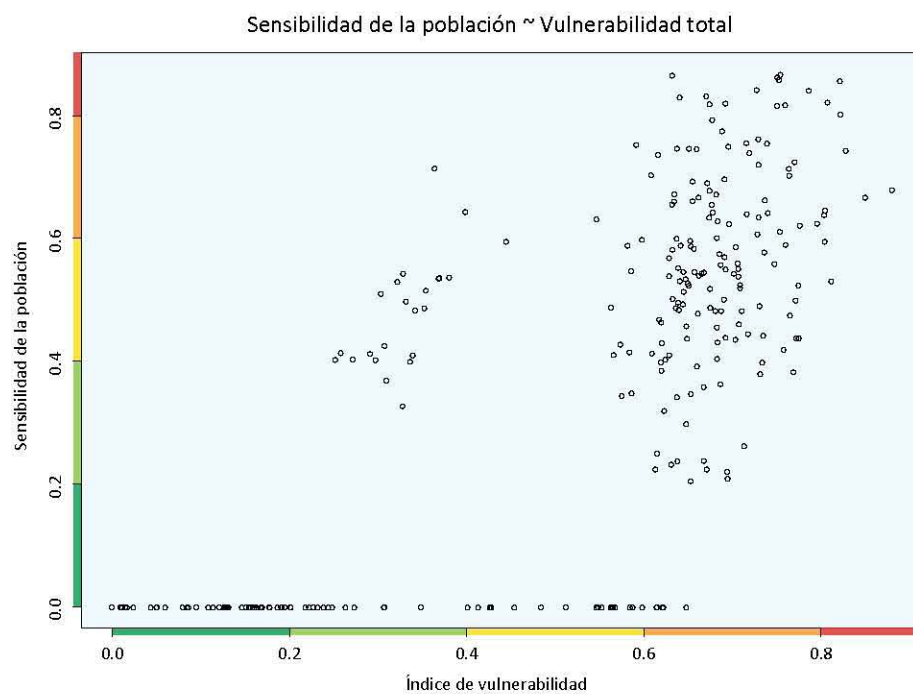


Figura 5.27. Gráfico de dispersión de la Sensibilidad de la población.

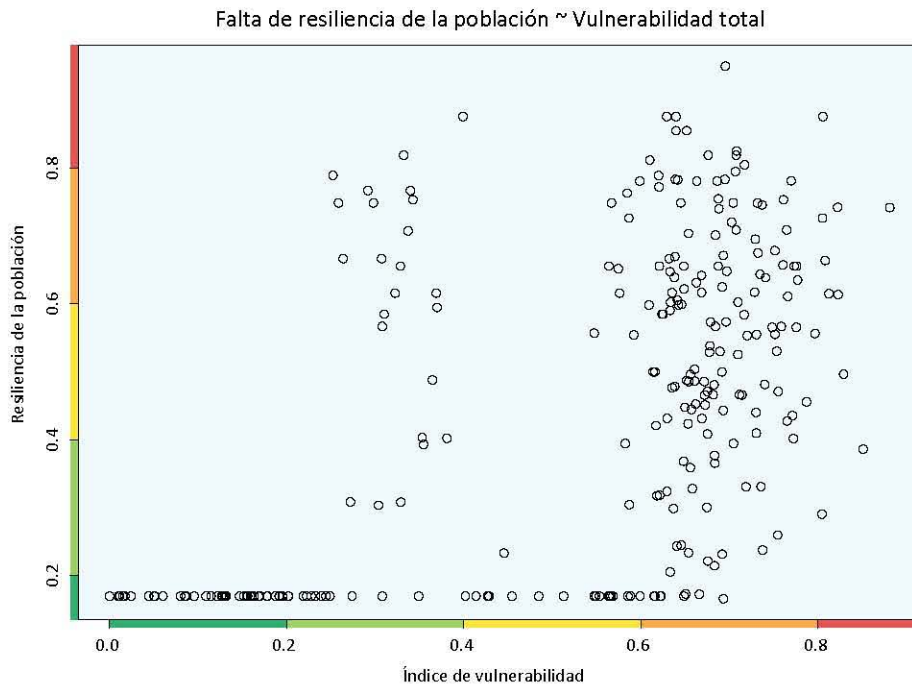


El grupo más pequeño de los que están al centro de la gráfica también parece guardar cierta lógica pues valores medios de sensibilidad se relacionan con valores medios de vulnerabilidad, pero el grupo mayor es el que no guarda una relación simple con la vulnerabilidad, toda una variedad de valores de Sensibilidad se distribuyen en el espacio de la Vulnerabilidad alta y muy alta. El gráfico 5.28 que muestra la distribución de los valores de la Falta de Resiliencia tiene una distribución similar a los valores de Sensibilidad, nuevamente no hay una relación lineal.

La clave parece estar en la distribución de los valores de la Exposición de la Infraestructura y equipamiento, en la figura 5.29 se puede apreciar una relación lineal clara, entre más alta la Exposición de este sujeto de vulnerabilidad, mayor el valor de la vulnerabilidad, esto se puede explicar por el peso que tiene la variable frente a los análisis individuales referidos a la población. Esto es, en la fórmula para obtener la Vulnerabilidad Total primero se promediaron los índices de Exposición, Sensibilidad y Falta de Resiliencia de la población en un solo indicador: Vulnerabilidad de la población.

En el gráfico de la figura 5.30 se puede observar que la mayoría de los valores altos de vulnerabilidad de la población coinciden con valores altos de la Vulnerabilidad Total. También hay un grupo de valores bajos de Vulnerabilidad de la Población que coincide con valores bajos de la Vulnerabilidad Total. Hay dos grupos, aunque menos densos, de puntos en situaciones contrar-

Figura 5.28. Gráfico de dispersión de la Falta de Resiliencia de la población.



ias a las de los primeros dos grupos descritos. Esto indica que hay toda una variedad de casos con características diferentes y en cada uno de ellos hay una o más variables que determinan su posición en la clase de la Vulnerabilidad Total, y esa distribución no es una relación lineal.

Si se realiza una prueba de Chi2 a todas las variables con respecto al valor de Vulnerabilidad Total, todas las pruebas serán significativas, esto es porque cada valor ha contado en la construc-

ción del valor de Vulnerabilidad Total, la cuestión no es conocer si existe una relación entre estas variables sino cuál es el peso o importancia de esa relación, para tal objetivo se realizó una prueba de correlación de Pearson. La tabla 5.5 muestra las variables que resultaron con un alto nivel de asociación, esto quiere decir que en el caso de la zona de estudio, estas variables son las que cuentan más al hacer la estimación de la vulnerabilidad.

Figura 5.29. Gráfico de dispersión de la Exposición de la Infraestructura y Equipamiento.

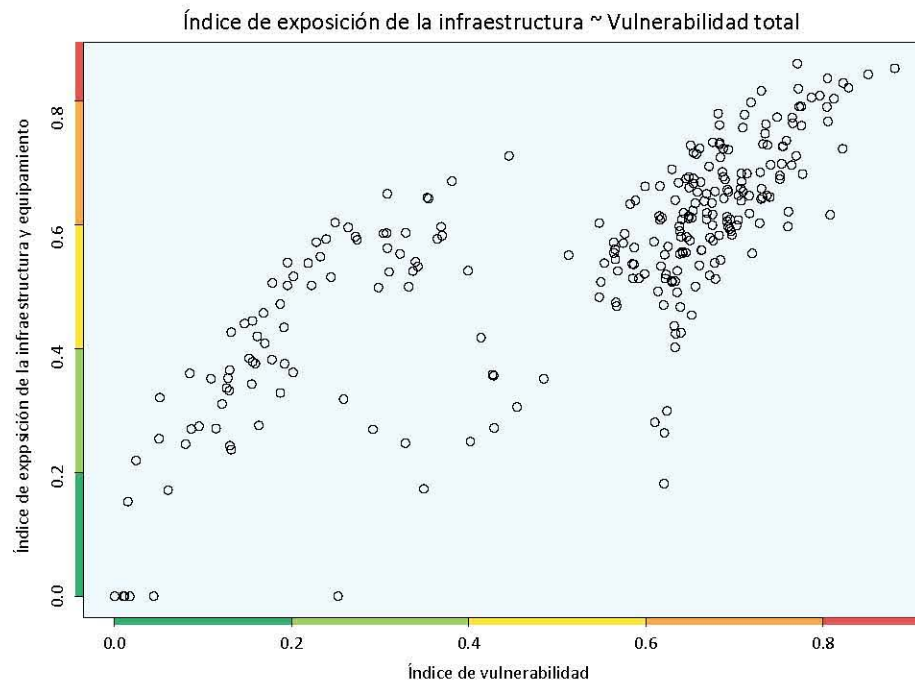


Figura 5.30. Gráfico de dispersión de la Vulnerabilidad de la Población.

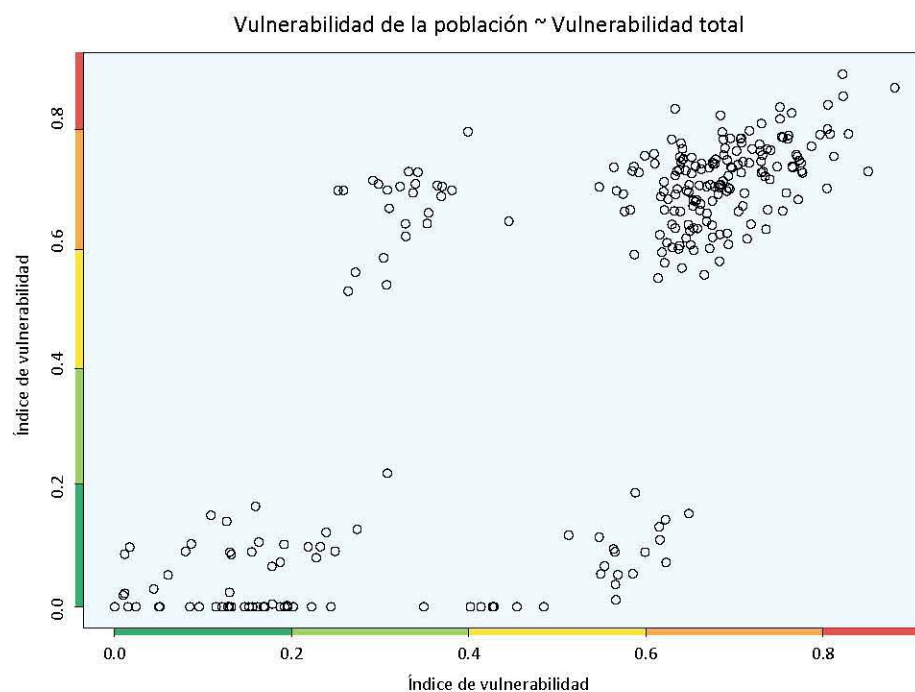


Tabla 5.5. Valores más altos de correlación de Pearson.

Variable	Valor de R ²
Tiempo de permanencia en vivienda	0.820
Población femenina	0.752
Ingreso	0.714
Vivienda por tipo de material de construcción	0.600
Población sin acceso a seguro social	0.527
Área total de caminos	0.505
Área total urbana	0.500
Población analfabeta	0.449

Llama la atención que la presencia de PRM recientes apenas obtuvo una R² de 0.085, un valor muy cercano a cero que significa la falta de asociación (valores negativos indican correlación pero inversa). Incluso la variable de la Población total tampoco resultó con un valor alto, apenas 0.068. Además, se corrió la correlación para cada uno de los componentes de la vulnerabilidad y se obtuvieron también resultados interesantes. La tabla 5.6 muestra los resultados.

Tabla 5.6. Resultados de la Correlación de Pearson con los componentes de la vulnerabilidad.

Componente	Valor de R ²
Exposición de la población	0.849
Sensibilidad de la población	0.773
Falta de resiliencia de la población	0.578
Exposición de la infraestructura y equipamiento	0.838

Aquí se muestra de forma más clara que la exposición de la población fue el factor más significativo para definir la Vulnerabilidad Total del área de estudio. Dicho resultado va en contra de lo que los promedios habían mostrado anteriormente, es interesante observar el peso que cada componente tuvo, aunque todos mantienen un nivel de asociación alto.

Como conclusión de este capítulo, se debe mencionar que el modelo aquí presentado carece de datos importantes para poder establecer un grado de Vulnerabilidad Total más acertado, pues hace falta definir la vulnerabilidad para los otros sujetos (recursos naturales y actividades económicas). También es importante aclarar que la selección de indicadores parte de un proceso heurístico que es necesario sustituir por un criterio basado en métodos cuantitativos, esto es posible pero queda fuera del alcance de esta tesis. A pesar de lo anterior, el trabajo realizado aquí, puede servir de base para una mejor selección de las variables que definen la vulnerabilidad de la población y es un buen esbozo para continuar en la búsqueda de la medición de la vulnerabilidad.

Capítulo 6. Discusión y conclusiones

6.1 Resultados del análisis de riesgo

Con la construcción de un inventario multitemporal de PRM para la zona de estudio de 54.9 km² de extensión, se han calculado y estimado la susceptibilidad, la magnitud y la frecuencia por PRM. Con estos tres componentes se obtuvo un grado de probabilidad de amenaza. Paralelamente, distintas variables físicas y antrópicas han servido para la construcción de un índice de vulnerabilidad para la población, y un índice parcial de vulnerabilidad de la infraestructura y equipamiento. Contando ya con estos elementos, se puede calcular, al menos de forma preliminar, el riesgo específico de desastre por PRM para el sujeto población, y de manera parcial para la infraestructura y equipamiento.

El concepto de riesgo es bastante amplio y complejo. Varias definiciones han sido propuestas en la literatura, incluyendo riesgo parcial, riesgo específico, valor del riesgo específico, riesgo total y riesgo múltiple (Vandine *et al.*, 2004; Guzzetti, 2005). Varnes (1984) define al riesgo específico por PRM como la probabilidad de sufrir cierto grado de daño a causa de un PRM. Guzzetti (2005) ha expresado esa definición de manera simple como:

$$R_E = A_L * V_L \quad (5.1)$$

Donde:

- R_E = Riesgo específico.
- A_L = Grado de amenaza por PRM.
- V_L = Grado de vulnerabilidad por PRM.

La amenaza y la vulnerabilidad están expresadas en valores de cero a uno, por lo tanto el resultado del riesgo será en valores de cero a uno. El riesgo total por su parte, sería la estimación de daño a todos los sujetos (población, infraestructura y equipamiento, economía y recursos naturales), por la ocurrencia de un evento de PRM. Como en este trabajo algunos aspectos han quedado fuera del alcance (por falta de presupuesto, tiempo o recursos) no se puede estimar el riesgo total por PRM para la zona de estudio.

También, debido a la falta de datos detallados del daño que han causado los PRM en Pahuatlán, en este trabajo se utilizará un método cualitativo basado en escenarios para calcular y comprender el riesgo específico. Es un método basado en la medición geomorfológica que difiere de otro tipo de acercamientos al tema pues no es necesario un inventario de daños causados por PRM en el pasado. Dicho inventario de daños sería muy complicado de obtener para la zona de estudio debido al problema de la falta de datos; por ello una metodología geomorfológica, se presta más adecuada a la zona de estudio. El método presenta las siguientes fases:

- Definición del área de estudio.
- Compilación de un inventario multitemporal de PRM.

- Definición de unidades de área (nivel de agregación).
- Definición de zonas de amenaza.
- Identificación y cartografía de los sujetos de riesgo incluyendo su vulnerabilidad.
- Definición del riesgo específico.
- Definición del riesgo total.

Hasta el momento, en los capítulos anteriores se han llevado a cabo todos los pasos de la metodología, solo resta obtener el valor del riesgo específico por PRM para la población.

De esta forma se tiene un Grado de Probabilidad de Amenaza (A), y un grado de Vulnerabilidad (V), ambos datos, estandarizados en valores de cero a uno. Sin embargo, el dato de amenaza esta agregado en unidades de ladera, y la vulnerabilidad se encuentra agregada en una combinación de unidades de ladera, manzanas y Agebs. Por ello es necesario realizar una sobreposición por medio de Quantum GIS para obtener una división territorial definitiva, de esta forma se obtiene más de 1000 polígonos, cada uno con su información de amenaza y vulnerabilidad. La figura 6.1 muestra el resultado final del cruce entre amenaza y vulnerabilidad de la población.

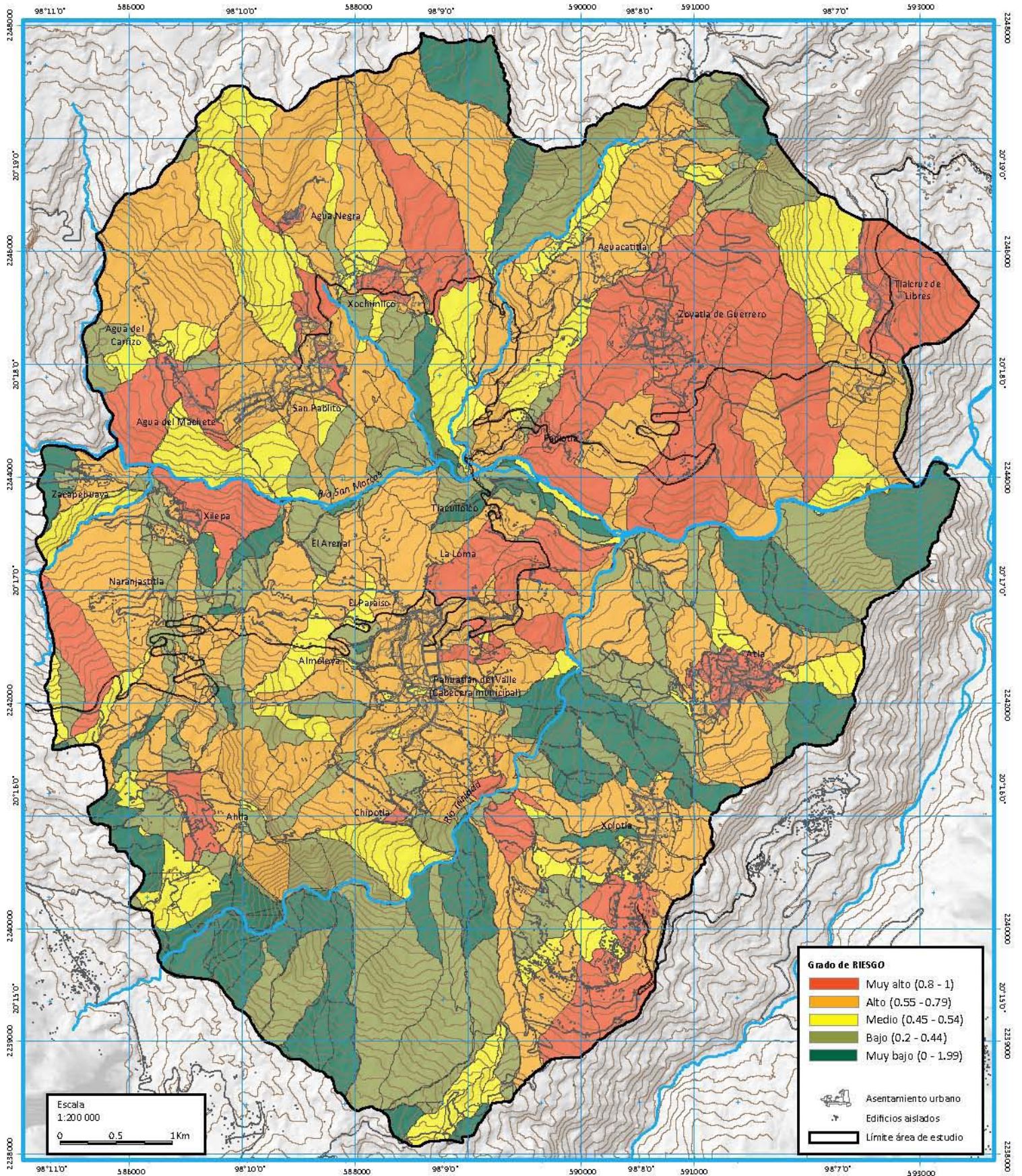
El resultado de la sobreposición de las coberturas de amenaza y vulnerabilidad de la población revela que algunas manzanas de la cabecera municipal tienen muy alto riesgo, son zonas periféricas al centro del poblado como el barrio de Chipotla. Algo similar ocurre en San Pablito y Xilepa. Otros poblados están localizados sobre zonas de muy alto riesgo: Zoyatla de Guerrero, Tlacruz de libres, Atla, Xolotla, Agua del Machete, Aguacatitla, Paciotla, Agua Negra y Ahila.

Muchos de estos poblados se localizan en zonas dónde se estimó una alta y muy alta susceptibilidad de PRM, aunado esto a las difíciles condiciones sociales, que derivan en una alta vulnerabilidad, se explica por qué estas zonas pobladas son zonas de muy alto riesgo. Sin embargo, hay dos excepciones: los poblados de Xolotla y Paciotla, que se localizan en zonas de mediana susceptibilidad pero que aparecen como zonas de alto riesgo. En estos poblados son otros los factores que generan el riesgo, principalmente lo extremadamente alta de la vulnerabilidad.

Otro dato preocupante es que prácticamente toda la extensión de la cabecera municipal se localiza en zona de alto riesgo, es justamente este perímetro el que ha sido nombrado Pueblo Mágico, por lo que la ampliación de las construcciones en dicho perímetro, deberían realizarse de manera especialmente cuidadosa y no dejarse al azar. ¿Qué características mantiene esta zona? Litológicamente es la que presenta una intercalación de lutitas y areniscas intemperizadas, es decir: un material sumamente inestable; la vegetación original ha sido removida y en su lugar se han hecho cortes en las laderas para la construcción de casas y caminos, equipamiento que por su peso ejerce más presión en el terreno inestable. En la zona hay cauces subterráneos que emanan como manantiales en diversos puntos del poblado creando barrancos superficiales que aumentan la erosión. También es una zona de fuerte pendiente aunque gran parte del poblado se localiza sobre un terraplén que formó el depósito de un muy antiguo PRM. Las condiciones sociales en la zona son las mejores del municipio, pero aun así no alcanzan para ubicar al poblado y sus barrios periféricos fuera de la categoría de grado de marginación medio y alto.

Hay pocas zonas de riesgo medio. Pasando este umbral se localizan las de bajo riesgo. Estos polígonos coinciden con zonas poco pobladas, que mantienen la vegetación original o una vegetación secundaria abundante, además de coincidir también con la planicie del río San Marcos.

Figura 6.1. Riesgo de desastre por PRM para la población en Pahuatlán.

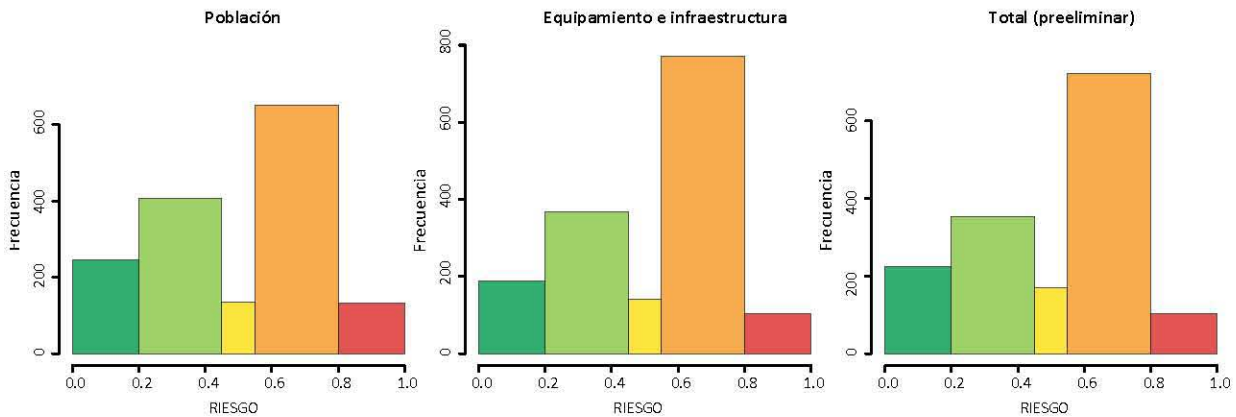


Cuando se cruza la información de la cobertura de amenaza con la de vulnerabilidad parcial de la infraestructura, los resultados son similares pero con menos zonas de muy alto riesgo (figura 6.3).

Zonas de muy alto riesgo para la población no necesariamente coinciden con zonas de muy alto riesgo para el equipamiento y la infraestructura. Llama la atención que al eliminar el factor población, gran parte de las zonas de muy alto riesgo que presentaba el mapa de la figura 6.1 y que coincidían con poblados de muy alto grado de marginación, en el mapa de la figura 6.3 aparecen a lo más como zonas de alto riesgo. Lo anterior se explica debido a que en esos poblados, por lo mismo de su condición marginal, no cuentan con todos los servicios y todo el equipamiento necesario que si hay en la cabecera municipal, que es justamente donde más polígonos en color rojo se presentan. Los polígonos en color amarillo son, de nueva cuenta, pocos. Los polígonos de bajo y muy bajo riesgo son prácticamente los mismos en ambos casos.

No se puede obtener un cálculo del riesgo total, pero el mapa de la figura 6.4 muestra una aproximación parcial al conjuntar las coberturas de amenaza, vulnerabilidad para la población y vulnerabilidad para el equipamiento y la infraestructura. Si se observa los histogramas de frecuencia de los tres casos (figura 6.2): riesgo para la población, riesgo para la infraestructura y equipamiento y el resultado parcial de riesgo total, se puede apreciar que no son muy disímiles. En todos, el caso más frecuente son los polígonos con riesgo alto (naranja), mientras que los menos frecuentes son los polígonos con riesgo muy alto (rojo).

Figura 6.2. Histogramas de frecuencia.



En la tabla 6.1 se muestra la distribución de la población en las distintas zonas de riesgo para la población. Como puede observarse, el 90% de la población total vive en zonas de alto riesgo. No hay población viviendo en zonas de muy bajo riesgo pero tampoco hay mucha población viviendo en zonas de muy alto riesgo, que son finalmente los casos extremos. Aun así, es preocupante que casi toda la población viva en zonas de riesgo, sin duda este resultado debe ser detonador de serias medidas de prevención.

Tabla 6.1. Distribución de la población en zonas de riesgo.

Grado de riesgo	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Población total	0	34	646	17714	1266
Porcentaje de la población	0	0.1	3.2	90	6.4

Figura 6.3. Riesgo de desastre por PRM para el equipamiento y la infraestructura en Pahuatlán.

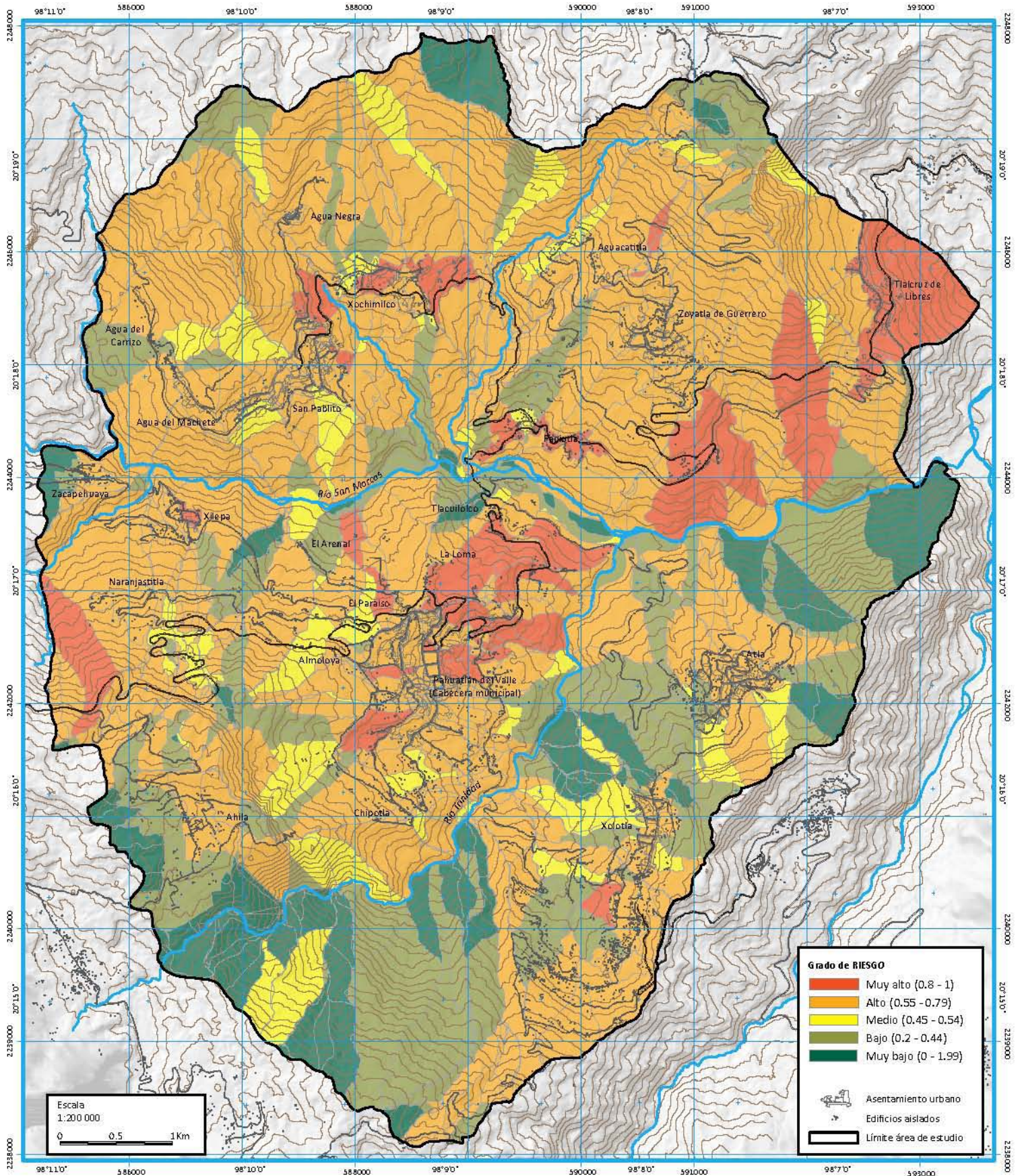
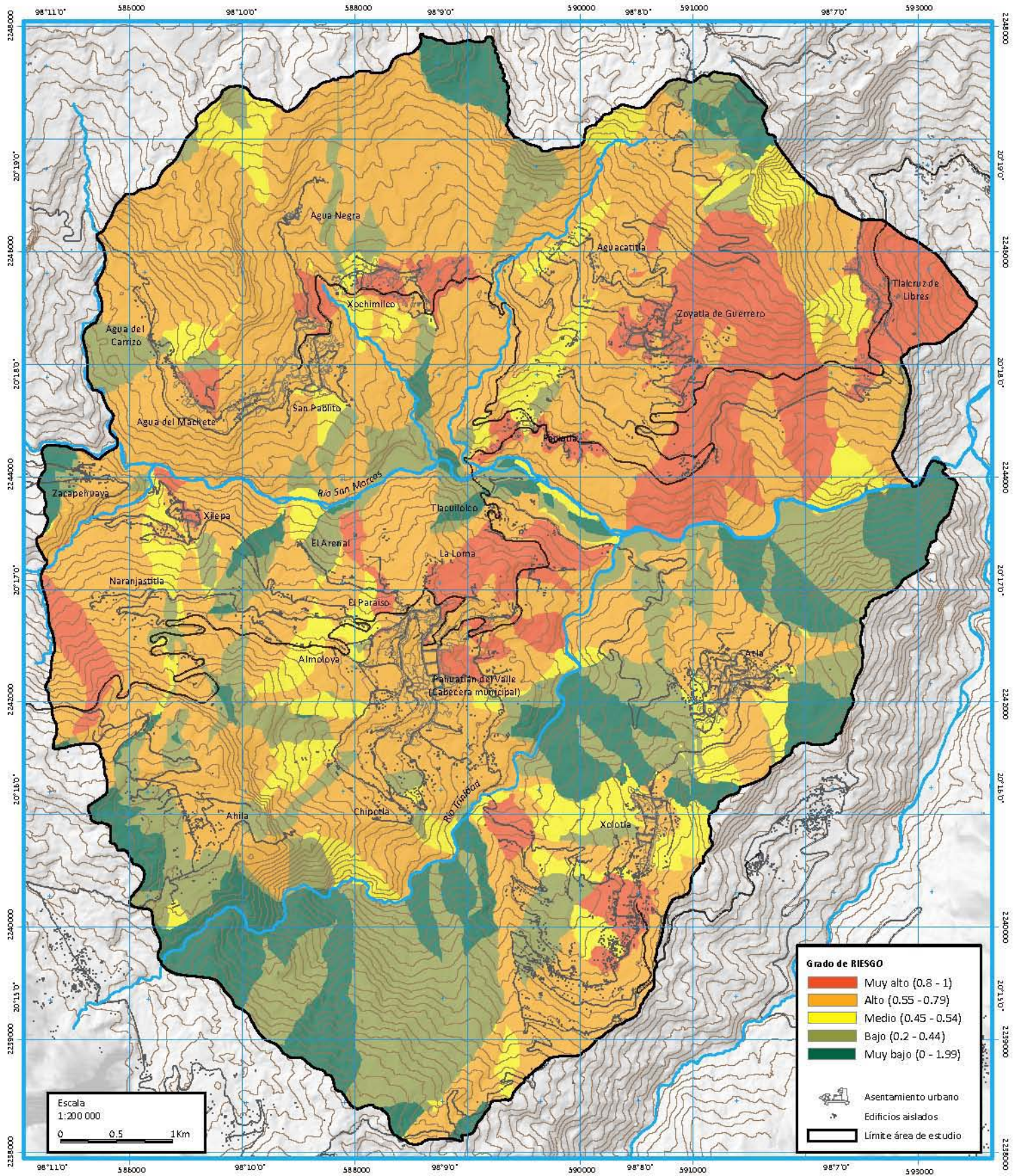


Figura 6.4. Riesgo de desastre por PRM en Pahuatlán.



6.2 Discusión

En esta investigación se ha realizado un inventario multitemporal de PRM, con base en ello se han obtenido valores de la susceptibilidad, magnitud y frecuencia de los PRM para obtener un grado de amenaza. Paralelamente a estos datos, se ha elaborado un índice de vulnerabilidad. Con estos elementos se pudo realizar un breve análisis de riesgo para la zona de estudio. Más allá de los resultados obtenidos, que pueden ser discutibles o criticados en su exactitud o veracidad, la propuesta metodológica de este trabajo es uno de los elementos más valiosos de esta investigación. A partir de esta experiencia se han identificado varias carencias en los archivos históricos y la falta de datos sobre los PRM en México, que implican tomar los resultados de este trabajo como preliminares. Hace falta una complementación de los datos, una depuración de las técnicas aplicadas y toda una serie de elementos para poder solventar las carencias que podría tener este trabajo. Lo anterior, supone un incremento de la inversión económica, tiempo y recursos humanos con los que esta investigación no contó. Por ello, lo más importante es que se han aplicado una serie de técnicas y herramientas que no se habían usado nunca para el estudio de los PRM en México. Por ello, esto último es quizás lo más valioso de esta investigación. Si los resultados obtenidos han sido aceptables de acuerdo a los parámetros de evaluación y rendimiento con los que actualmente se cuenta, resta solo imaginar lo que se podría lograr con un proyecto más en forma. Las técnicas aplicadas a nivel regional podrían replicarse a otras zonas con problemas de PRM o incluso aplicarse a toda la región de la Sierra Norte de Puebla, contribuyendo de esta forma a la conformación de una base de datos de inventario nacional que ha sido desde el principio, uno de los pilares que han impulsado estos estudios.

Los resultados serán presentados a las autoridades municipales de Pahuatlán; si se les toma en cuenta o no para planear el desarrollo de este municipio no es algo que dependa de este trabajo. Finalmente, lo ideal sería que se lograra terminar todo el análisis de riesgo para los otros sujetos: actividades económicas, recursos naturales y equipamiento e infraestructura. Además de completar el estudio para el resto del municipio, en especial para la zona de Cueunautla de la Paz, que fue afectada seriamente por PRM en 1999. Por ello, este trabajo puede considerarse terminado para el propósito de obtener el grado, pero aún resta mucho por hacer en el estudio de PRM a nivel del municipio de Pahuatlán, a nivel regional en la Sierra Norte de Puebla y en general a escala nacional. Sirva pues este trabajo como plataforma para futuras investigaciones.

6.3 Conclusiones

En esta investigación se construyó un inventario de PRM por medio de análisis de pares estereoscópicos de imágenes de satélite de muy alta resolución GGeoEye-1, ortofotos del INEGI, visitas a campo y compilación de archivos históricos y testimonios de la gente del lugar. Los resultados del inventario, combinados con información a la ocurrencia de PRM, fueron utilizados para estimar la susceptibilidad mediante la combinación en regresión logística, de cuatro técnicas estadísticas utilizadas frecuentemente en la literatura: Análisis Discriminante Lineal (ADL), Análisis Discriminante Cuadrático (ADC), Regresión Logística (RL) y Redes Neuronales (RN). La correlación entre los resultados de los modelos fue muy alta entre los modelos de ADL y RL, por lo que se realizaron tres versiones del modelo de combinación: Una con todos los resultados, otra sin los resultados de RL y otra con los resultados de ADL. Por medio

de los indicadores estadísticos como el criterio de Akaike, se estimó que, a pesar de la fuerte correlación, la combinación con todos los resultados era el mejor modelo. El análisis concluyó que algunas variables como la presencia o ausencia de vegetación natural o abundante, tenían más peso que otras variables como la litología. Los resultados de susceptibilidad se presentaron en unidades de ladera, definidas por rasgos hidrológicos (parteaguas y cauces), en total la zona estuvo dividida en 259 unidades de ladera.

Por medio de un modelo de Poisson y una análisis de los datos históricos de precipitación, se obtuvo una medida de la frecuencia de los PRM; estos resultados combinados con los resultados de susceptibilidad y magnitud (área de afectación y velocidad del movimiento), obtenida por medio de la función Doble Pareto y los resultados del inventario, se obtuvo un índice de amenaza para cada unidad de ladera.

Paralelamente, se compilaron datos relativos a la población para seleccionar indicadores de la vulnerabilidad, el criterio de esta selección fue empírico y con referencia a la literatura especializada en el tema. Se utilizó el modelo SAVE que está basado en el enfoque de Turner et. al., 2003, para medir la vulnerabilidad. Con base en lo anterior, la vulnerabilidad se estimó para los sujetos: población y parcialmente para la infraestructura y equipamiento, de acuerdo a tres dimensiones: exposición, sensibilidad y falta de resiliencia. Para cada dimensión fueron tomados en cuenta diversos indicadores sociales y los resultados demostraron que la mayor parte de la población del municipio vive en condiciones de media a muy alta vulnerabilidad.

Finalmente, ambas coberturas, amenaza y vulnerabilidad, fueron analizadas en su conjunto. Primero se realizó una sobreposición de las dos coberturas pues ambas tenían niveles de agregación diferentes: unidades de ladera en el caso de la amenaza y manzanas en vulnerabilidad. El análisis concluyó con que la mayor parte del municipio se encuentra en zona de alto y muy alto riesgo a desastres por PRM.

Otras conclusiones específicas de este trabajo son:

- La mayor parte de la población de la zona de estudio habita en zonas clasificadas como de alto riesgo de desastre por PRM. Por lo que toda futura obra de desarrollo en este municipio debería tomar en cuenta este factor.
- La población más vulnerable coincide ampliamente con la población indígena de la zona de estudio, mientras que la población de la cabecera municipal presenta valores medios tanto de vulnerabilidad como de riesgo.
- Factores como la litología o la presencia de PRM antiguos no son tan relevantes como el uso de suelo, en especial la presencia de vegetación natural, para la presencia de PRM. Las zonas con menor riesgo son aquellas que presentan una vegetación natural o secundaria abundante.
- Aproximadamente cada 12 años se presentan fenómenos de lluvias extraordinarias en la región, que son detonantes para un gran número de PRM en la zona de estudio.
- La velocidad de los PRM en la zona de estudio es en general rápida o moderada, relacionado esto con el valor de área más frecuente que se puede esperar de un PRM (341 m²) en la zona de estudio, hacen que los valores de magnitud de PRM en la zona de estudio sea más bien medio.

- Los modelos de probabilidad generaron resultados aceptables, aunque el mejoramiento de las distintas bases de datos (training y evaluación) seguramente derivará en mejores resultados de los modelos.
- Herramientas como las imágenes de satélite de muy alta resolución como GeoEye1 o SPOT5, son herramientas valiosas para la identificación, localización y clasificación de los PRM.
- Las herramientas señaladas en el punto anterior, si tienen además la bondad de ser pares estereoscópicos, potencian la identificación de los PRM, además de derivar en otros productos como MDT de alta resolución, base cartográfica de uso de suelo y litológica, base para un inventariado de viviendas y otros elementos del equipamiento urbano así como datos relacionados a la geomorfología de las laderas.
- La división territorial en unidades de ladera facilitó todo el trabajo, desde la interpretación y manejo de los resultados hasta la presentación de los mismos en forma cartográfica. Es de esperarse que esta división también sea efectiva en el campo práctico de la gestión de riesgo.
- Un inventario de PRM en la zona más detallado sería lo ideal, pero no es posible debido a la falta de datos históricos, tanto de ocurrencia de los PRM como de los eventos extraordinarios que los detonan.
- Herramientas como el GPS, la fotografía y un buen medio de transporte acorde a la zona, son herramientas importantes para para lograr un inventario de campo de PRM lo más detallado posible.
- Todas las técnicas y herramientas utilizadas en este trabajo pueden ser perfectibles y queda como meta a futuro optimizar y extender su uso.

Referencias

- Al-Athari, F.M., 2011. Parameter estimation for the double pareto distribution. *J. Math. Stat.*, 7: 289-294.
- Alcántara Ayala, I., 2000. Landslides: ¿Deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM.* 41, 9-23.
- Alcántara Ayala, I., Echeverría, L. A., 2001. Cartilla de diagnóstico preliminar de inestabilidad de laderas. México, CENA-PRED, SEGOB.
- Alcántara Ayala, I., Murillo García, F.G., 2008. Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones Geográficas, boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 66, 47-64 (in spanish).
- Alkevi, T., Ercanoglu, M., 2011. Assessment of ASTER satellite images in landslide inventory mapping: Yenice-Gökçebeý (Western Black Sea Region, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment.*
- Aguirre Gómez, R., 2008. Bases físicas de la percepción remota. En *Conceptos de Geomatica. Estudios de caso en México.*
- Alexander, D. E., 1993. *Natural Disasters.* London: UCL Press, Chapman & Hall, Routledge.
- Aleotti, P. & Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58: 21-44.
- Antonini, G., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F. and Reichenbach, P., 2002. Surface deposits and landslide inventory map of the area affected by the 1997 Umbria-Marche earthquakes. *Bollettino Società Geologica Italiana*, 121:2 843-853.
- ERDAS®, 2009. Stereo analyst for Arc GIS®. Geographic Imaginary by ERDAS.
- Ardizzone, F., Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F. and Reichenbach, P., 2002. Uncertainty and errors in landslide mapping and landslide hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2:1-2 3-14.
- Ardizzone, F., Fiorucci, F., Santangelo, M., Cardinali, M., Mondini, A., Rossi, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., 2011. Very-high resolution stereoscopic satellite images for landslide mapping. *Proceedings of Second World Landslide Forum.* Pp. 3-7, Rome, Italy.
- Arizpe, L. 1989. *Parentesco y economía en una sociedad nahua.* México, Dirección General de Publicaciones del Consejo para la Cultura y las Artes. INI.
- Barlow, J., Franklin, S., Martin, Y., 2006. High spatial resolution satellite imagery, DEM derivatives, and image segmentation for the detection of mass wasting processes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72, 687-692.
- Birkmann, J., 2006. Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Conceptual frameworks and definitions. En: *Measuring Vulnerability to natural hazards 2008.* United Nations University Press. Hong Kong. Pp. 9-54.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davies, I. & Wisner, B. 1994. *At Risk.* Routledge. Londres.
- Borracci, R., Arrivalzaga, E., 2005. Aplicación de análisis de conglomerados y redes neuronales artificiales para la clasificación y selección de candidatos a residencias médicas. *Educación Médica. Volumen 8, Número 1, Marzo 2005.* 22-30 pp.
- Brabb, E.E., 1995. The San Mateo County California GIS project for predicting the consequences of hazardous geologic processes. In: Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.) *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 299-234.
- Brunsdon, D. and Prior, D.B. (eds.), 1984. *Slope Instability.* John Wiley and Sons, 620 pp.
- Burrell E., Montz, Graham A.T., 2011. Natural Hazards: An evolving tradition in applied geography. En *Applied Geography.* El Sevier. 31. 1-4.

- Burrough, Peter A.; McDonnell, Rache A., 1998, Principles of Geographical Information Systems. Nueva York, Estados Unidos. Oxford University Press.
- Busch-Lütj, C., 1995. Nachhaltige Entwicklung als Leitmodell einer ökologischen Ökonomie. En Fritz, P., j. Huber y H. Levi, Hrsg., Nachhaltigkeit; En naturwissenschaftlicher Perspektive, Stuttgart, S. 115-126.
- Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti F., Reichenbach, P. and Borri, G., 1994. Relazioni fra movimenti di versante e fenomeni tettonici nel bacino del Torrente Carpina (Umbria settentrionale). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 17: 3-17 (in Italian).
- Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F., Reichenbach P. and Guzzetti, F., 2004. Analysis of landslide occurrence in the Collazzone Area, central Umbria, Italy. *Geophysical Research Abstracts*, 6: 02792, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU04-A-02792.
- Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Reichenbach, P. and Bartoccini, P., 2005. submitted) Rainfall induced landslides in December 2004 en South-Western Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Science*.
- Cardona, O. D., 1993. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. En Maskrey 1993. Los Desastres no son naturales. La Red: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Colombia, Ed. Tercer Mundo Editores. 45-65.
- Carrara, A., 1983. A multivariate model for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15: 403-426.
- Carrara, A., 1988. Drainage and divide networks derived from high-fidelity digital terrain models. In: Chung, C.-J. F., et al. (eds.) Quantitative analysis of mineral and energy resources. NATO-ASI Series, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 581-597.
- Carrara, A., 1992. Landslide hazard assessment. Proceeding 1st Simposio Internazionale Sensores Remotos y Sistema de Informativo Geografico para el Studio de Resorces Naturales, 10-12 March, Bogotá, 329-355.
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M. and Reichenbach, P., 1999. Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. *Natural Hazards*, 20:2-3 117-135.
- Castillo Román, J. y Nolasco Valencia, J.V., 2008. Evolución del frente activo del deslizamiento en la comunidad de pahuatlán y la estimación del riesgo que este representa a la población. En: Novelo, D., Magaña, V., 2008. Riesgos geológicos e hidrometeorológicos. *Geos*, Vol. 28, No. 2.
- Cheng, K.S., Wei, C., Chang, S.C., 2004. Locating landslides using multi-temporal satellite images. *Advances in Space Research* 33 (3), 96-301.
- Childe, G., 1986. Los orígenes de la civilización. Breviarios Fondo de Cultura Económica. México. Pp. 291.
- Chung C., J. F. and Fabbri, A.G., 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65:12 1389-1399.
- Chuvieco, E., 2008. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia. España. Pp. 594.
- CENAPRED, 2012. Atlas Nacional de Riesgos. Versión en internet: http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=53&Itemid=176
- Coe, J.A., Michael, J.A., Crovelli, R.A. and Savage, W.Z., 2000. Preliminary map showing landslide densities, mean recurrence intervals, and exceedance probabilities as determined from historic records, Seattle, Washington. U.S. Geological Survey Open-File Report, 00- 303.
- Cohen, J., 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*. 20, 37-46.
- CONAPO, 2006. Índices de marginación 2005. Consejo Nacional de Población. 52 pp.
- Corona, Morales N., 2009, Vulnerabilidad de la ciudad de Morelia a inundaciones. Tesis de Maestría. Asesor: Luis Miguel Morales Manilla. México. UNAM.
- Croux, C.; Joossens, K., 2005. Influence of observations on the misclassification probability in quadratic discriminant analysis. *Journal of Multivariate Analysis*. Volume 96, Issue 2, October 2005, Pp. 384-403.

- Crovelli, R., 2000. Probability models for estimation of number and costs of landslides. U.S. Geological Survey Open File Report 00-249, 23 pp.
- Crozier, M.J., 1984, Field assessment of slope instability. In: Brunsten, D. and Prior, D.B. (eds.) Slope Instability, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Chapter 4, 103-142.
- Crozier, M.J., 1986. Landslides: causes, consequences & environment. Croom Helm Pub., London.
- Crozier, M.J., 2005. Management frameworks for landslide hazard and risk: issues and options. In: Glade, T., Anderson, M.G. and Crozier, M.J. (eds.) Landslide risk assessment. John Wiley, 331-350.
- Crozier, M.J. and Glade, T., 2004. Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. In: Glade, T., Anderson, M.G. and Crozier, M.J. (eds.) Landslide risk assessment. John Wiley, 1-40.
- Cruden, D.M. and Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes. In: Turner, A.K. and Schuster, R.L. (eds.) Landslides, Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, Washington D.C., 36-75.
- Cruz, Regino, 1938. Apuntes para la historia de Pahuatlán. Pahuatlan. Edición del autor.
- Cuny C., F., 1983. Disasters and Development, Oxford University Press, Inc. New York, Oxford. (Traducido al español por Gustavo Wilches-Chaux, 1985).
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka M., Dhakal, S., y Paudyal P., 2008. Predictive modeling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. En: Geomorphology. United Kingdom, Elsevier, 102 pp. 496-510.
- Davis, I., 1981. Arquitectura de Emergencia, Serie Tecnología y Arquitectura, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona.
- Dietrich, E.W., Reiss, R., Hsu, M-L. and Montgomery, D.R., 1995. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. Hydrological Process, 9: 383-400.
- Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L. and Ibsen, M.-L. (eds.), 1996. Landslide recognition. Identification, movements and causes. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 251 pp.
- Dryzek J. 2000. Deliberative Democracy and Beyond. Liberals, Critics, Contestations, Oxford University Press: Oxford.
- Fawcett, T., 2006. An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters 27, 861-874.
- Ferry, L., 2007. Aprender a Vivir. Filosofía. Santillana Ediciones Generales. España.
- Fiorucci, F., Cardinali, M., Carlà, R., Rossi, M., Mondini, A.C., Santurri, L., Ardizzone, F., Guzzetti, F., 2011. Seasonal landslides mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images. Geomorphology 129 (1-2), 59-70.
- Floyd F., S., 1984. Remote Sensing. Waveland Press Inc. 494 pp.
- Gagnon, H., 1975. Remote sensing of landslide hazards on quick clays of eastern Canada. Proceeding 10th International Symposium Remote Sensing of Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan II, pp. 803-810.
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2008. Comparing landslide inventory maps. Geomorphology 94, 268-289.
- García Martínez, B., 1987. Los pueblos de la Sierra. El poder y el espacio entre los indios del norte de Puebla hasta 1700. México, El Colegio de México.
- Glade, T., Anderson, M.G. and Crozier, M.J. (eds.), 2005. Landslide risk assessment. John Wiley, 832 pp.
- Glade, T. and Crozier, M.J., 2005a. The nature of landslide hazard impact. In: Glade, T., Anderson, M.G. and Crozier, M.J. (eds.) Landslide risk assessment. John Wiley, 43-74.

- Gómez-Tagle, A., Chávez, Y., 2004. Cálculo de la distribución espacial de la insolación potencial en el terreno empleando MDE en un ambiente SIG. En: Investigaciones Geográficas, UNAM, Núm. 55, 2004, pp. 7-22.
- Gonçalves Porto, W., 2006. El desafío ambiental. PNUMA. México. Pp. 153.
- Grandos Chapa, 1984. Alfonso Cravioto, Un liberal hidalguense. Océano. Gobierno del Estado de Hidalgo. México. Pp. 167.
- GRASS Development Team, 2012. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.2. Open Source Geospatial Foundation. <http://grass.osgeo.org>
- Greenway, D.R., 1987. Vegetation and slope stability. En Anderson, M. G., & Richards K. S. (eds) Slope stability. Wiley and Sons. 187 -229 pp.
- Guha-Sapir, Rodriguez-Llanes, J.M.; Jackubicka, T., 2011. Using disaster footprints, population databases and GIS to overcome persistent problems for human impact assessment in flood events. *Natural Hazards* 58(3): 845-852.
- Guimarães, R., Montgomery, R., Greenberg, H., Ferreira Fernandes, N., Trancoso Gomes, R., Abilio de Carvalho Júnior, O., 2003. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology*. Volume 69, Issues 1–2.
- Gunn, A., 2008. Encyclopedia of disasters: environmental catastrophes and human tragedies. Greenwood. Westport, Connecticut. Pp. 773.
- Günther, A., van Den Eeckhaut, M., Reichenbach, P., Hervás, J., Malet, J.P., Foster, C., Guzzetti, F., 2011. New developments in harmonized landslide susceptibility mapping over Europe in the framework of the European Soil Thematic Strategy. Proceedings of the Second World Landslide Forum. 3-7 de octubre. Roma.
- Guzzetti, F. and Cardinali, M., 1989. Carta Inventario dei Fenomeni Franosi della Regione dell'Umbria ed aree limitrofe. CNR Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche Publication n. 204, 2 sheets, scale 1:100,000 (in Italian).
- Guzzetti, F., Cardinali, M. and Reichenbach, P., 1996. The influence of structural setting and lithology on landslide type and pattern. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2:4 531-555.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: an aid to a sustainable development. *Geomorphology*, 31: 181-216.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. and Carrara, A., 2000. Comparing landslide maps: A case study in the upper Tiber River Basin, central Italy. *Environmental Management*, 25:3, 247-363.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Ardizzone, F. and Galli, M., 2003. Impact of landslides in the Umbria Region, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3:5, 469-486.
- Guzzetti F., 2003b. Landslide hazard assessment and risk evaluation: limits and prospective. En: Jansà A. & Romero R. (eds.), Proceedings 4th Plinius Conference on Mediterranean Storms, Mallorca, Spain, Universitat de Illes Balears, CD-ROM, ISBN 84-7632-792-7.
- Guzzetti, F., 2005. Landslide Hazard and Risk Assessment. Universidad de Bonn, Alemania. Pp. 347. Tesis de doctorado.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M. and Ardizzone, F., 2005a. Landslide hazard assessment in the Staffora basin, northern Italian Apennines. *Geomorphology* Vol 72, 272-299.
- Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M. & Galli M., 2006. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81, 166-184.
- Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M. & Stark C.P. 2007 Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 98, 239-267.
- Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M. 2009 Landslide hazard assessment, vulnerability estimation and risk evaluation: an example from the Collazone area (Central Umbria, Italy). *Geografia Fisica. Dinamica Quai*. 32 2009 185-192.

- Guzzetti, F., Modini, A., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K-T., 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Sciences Reviews*, 112, 42-66.
- Hansen, A., 1984a. Landslide hazard analysis. In: Brunsden, D. and Prior, D.B. (eds.) *Slope instability*, Wiley & Sons, New York, 523-602.
- Hansen, M.J., 1984. Strategies for classification of landslides. Brunsden, D. and Prior, D.B. (eds.) *Slope Instability*. John Wiley and Sons, 1-25.
- Hewitt, K., Ed. (1983). *Interpretation of Calamity: From the Viewpoint of Human Ecology*. Boston, Allen.
- Hutchinson, J.N., 1988. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology. En: Bonnard, C. (ed.), *Proceedings 5th International Symposium on Landslides*, Laussane, Switserland, Balkema, Rotterdam, pp. 1805-1841.
- Hutchinson, J.N., 1995. Keynote paper: Landslide hazard assessment. In: Bell (ed.) *Landslides*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1805-1841.
- Hufschmidt, G., Glade, T., 2010. Vulnerability Analysis in geomorphic risk assessment. En Alcántara-Ayala, Irasema; Goudie, Andrew, 2010 *Geomorphological hazards and disaster prevention*. Nueva York, Estados Unidos. Cambridge University Press.
- Ibsen, M., Brunsden, D., 1995. The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the south coast of Britain, Ventnor, Isle de Wight. *Geomorphology*. 15, 241-258.
- INEGI, 2011. Panorama sociodemográfico de Puebla. INEGI, (in spanish).
- INEGI, 2011. XIII Censo de población y vivienda INEGI. INEGI. México.
- Lavell, thomas, A., 1993. Ciencias sociales y desastres naturales en América Latina: Un encuentro inconcluso. En : *Los Desastres no son naturales*. La Red: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Colombia, Ed. Tercer Mundo Editores.
- Lee, S., Lee, M.-J., 2006. Detecting landslide location using KOMPSAT 1 and its application to landslide-susceptibility mapping at the Gangneung area, Korea. *Advances in Space Research* 38 (10), 2261–2271.
- Lillesand, T., Kiefer, R., Chipman, J., 2007. *Remote Sensing And Image Interpretation*, 5th Ed. Willey & Sons. Estados Unidos de América.
- Loeza García, J. P., Zárate Barradas, R. G., 2005. Carta Geológico-Minera Huauchinango F14-D83. Servicio Geológico Mexicano, escala 1:50 000.
- Luers, A., Lobell, D., Sklar, L.S., Addams, C.L., Matson, P.M., 2003. A method for quantifying vulnerability, applied to the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change* 13, 255–267.
- Lugo-Hubp, J., 1989, *Diccionario geomorfológico con equivalentes de los términos de uso más común en alemán, francés, inglés y ruso*. 1. Ed. UNAM. Instituto de Geografía, Coordinación de Ciencias. México. Pp. 228.
- Macías, J.M., 1993. Perspectivas de los estudios sobre desastres en México. En: *Los Desastres no son naturales*. La Red: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Colombia, Ed. Tercer Mundo Editores.
- Măgut, F.L., Zaharia, S., Glade, T., Irimus, A., 2012. Comparing performances of heuristic and logistic regression models for a spatial landslide susceptibility assessment in Maramures County, Northwestern Romania. Poster en: IGC 2012, Colonia Alemania, Agosto de 2012.
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F. and Reichenbach, P., 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29:6 687-711.
- Marchesini, I., Rossi, M., Alvioli, M., Santangelo, M., Cardinali, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Fiorucci, F., Balducci, V., Mondini, A., Guzzetti, F., 2012. WPS tools to support geological and geomorphological mapping. HEIG-VD :: Open Conference Systems, OGRS2012.

- Martha, T.R., Kerle, N., Jetten, V., van Westen, C., Vinod Kumar, K., 2010. Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods. *Geomorphology* 116, 24–36.
- Marcelino, E.V., Formaggio, A.R., Maeda, E.E., 2009. Landslide inventory using image fusion techniques in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 11, 181–191.
- Mark, R.K., 1992. Map of debris flow probability, San Mateo County, California, scale 1:62,500. U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigation Map I-1257-M.
- Masferrer, E., Báez, L., 1995. Los nahuas de la Sierra Norte de Puebla. En INI Oriental. *Etnografía contemporánea de los pueblos indígenas de México*. Pp. 165-204.
- Maskrey, A. (compiler), 1993. *Los Desastres no son naturales*. La Red: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Colombia, Ed. Tercer Mundo Editores.
- Maskrey, A., 1993. Vulnerabilidad y mitigación de desastres. En: *Los Desastres no son naturales*. La Red: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Colombia, Ed. Tercer Mundo Editores. Pp. 93-110.
- Maskrey, A., 1989. *El Manejo Popular de los Desastres Naturales*. Estudios de Vulnerabilidad y Mitigación, ITDG, Lima.
- McCalpin, J., 1984. Preliminary age classification of landslide for inventory mapping. *Proceedings 21st annual Engineering Geology and soils Engineering Symposium*, pp. 99-111. Moscow, Idaho.
- Meade, J., 1942. *La huasteca : época Antigua*. Cossio. México D.F. Pp. 387.
- Metternicht, G., Hurni, L., Gogu, R., 2005. Remote sensing of landslides: an analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountain environments. *Remote Sensing of Environment* 98, 284–303.
- Michie, D., Spiegelhalter, D.J., Taylor, C.C., (eds) 1994. *Machine Learning Neuronal and Statistical Classification*. Internet version (<http://www.amsta.leeds.ac.uk/~charles/statlog/>).
- Mondini, A.C., Chang, K.T., Yin, H.Y., 2011. Combining multiple change detection indices for mapping landslides triggered by typhoons. *Geomorphology* 134 (3–4), 440–451.
- Morales Manilla, L.M., 2009. *El análisis espacial en la evaluación de la vulnerabilidad*. Curso impartido en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. UNAM. México.
- Nale, D.K., 2002. *Quickbird – Aerial Photography Comparison Report*. EMAP International. Pp. 37.
- Neeley, M.K. and Rice, R.M., 1990. Estimating risk of debris slides after timber harvest in northwestern California. *Bulletin American Association of Engineering Geologists*, 27:3 281-289.
- Neuland, H., 1976. A prediction model of landslips. *CATENA*, 3: 215-230.
- Nichol, E.J., Shaker, A., Wong, M.-S., 2006. Application of high-resolution stereo satellite images to detailed landslide hazard assessment. *Geomorphology* 76, 68–75.
- Ochoa-Tejeda, V., Parrot, J.F., 2007. Extracción automática de trazas de deslizamientos utilizando un modelo digital de terreno e imágenes de satélite de alta resolución IKONOS. Ejemplo en la Sierra Norte de Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24 (3), pp. 354-367.
- Oliva Aguilar, V.R., Garza Merodio, G.G., Alcántara Ayala, I., 2011. Configuration and temporal dimension of vulnerability: spaces and disasters in the Sierra Norte de Puebla. *Investigaciones Geográficas, boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 75, 61-74.
- ONU/ISDR (Estrategia Internacional para la reducción de desastres) 2002. *Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives*, Geneva: UN Publications.
- Park, N.W., Chi, K.H., 2008. Quantitative assessment of landslide susceptibility using high-resolution remote sensing data and a generalized additive model. En *International Journal of Remote Sensing*. Taylor & Francis. Vol. 29. Nos 1-2, Pp. 247-264.

- Parker, R.N., Densmore, A.L., Rosser, N.J., de Michele, M., Li, Y., Huang, R., Whadcoat, S., Petley, D.N., 2011. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth. *Nature Geoscience* 4 (7), 449–452.
- Pašek, J., 1975. Landslide inventory. *International Association Engineering Geologist Bulletin* 12, 73-74.
- Pike, R.J., 1988. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology* 20 (5), 491–511.
- PLANAR Systems Inc., 2008. SD2620W Stereoscopic Monitor USER'S GUIDE. 24 pp.
- Quantum GIS Development Team (YEAR). Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Qui, C., Esaki, T., Xie, M., Mitami, Y., Wang, C., 2005. A GIS system development for evaluating 3D slope stability. *Proceedings ESRI.com*.
- R Core Team. 2013. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>
- Redman, C. L., 1990. Los orígenes de la civilización : desde los primeros agricultores hasta la sociedad urbana en el próximo Oriente. *Crítica*. Barcelona. Pp. 443.
- Reichenbach, P., Cardinali M., De Vita, L. and Guzzetti, F., 1998. Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River basin (Central Italy). *Environmental Geology*, 35:2-3 146-159.
- Reichenbach, P., Galli, M., Cardinali, M., Guzzetti, F. and Ardizzone, F., 2005. Geomorphologic mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of central Italy. In: Glade, T., Anderson, M.G. and Crozier, M.J. (eds.) *Landslide risk assessment*. John Wiley, 429-468.
- Reichenbach, P., Guzzetti, F. and Carrara, A., (eds.) 2002. Assessing and mapping landslide hazard and risk. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2:1-2 82 pp.
- Reyes Vid, H., 2005. La conceptualización y visión de la marginalidad, el caso de los indígenas totonocas del municipio de Coatepec Puebla. Tesis de maestría. México. UNAM.
- Rib, H.T., Liang, T., 1978. Recognition and identification. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (Eds.), *Landslide Analysis and Control*. : Transportation Research Board Special Report, 176. National Academy of Sciences, Washington, pp. 34–80.
- Roberds, W. 2005. Estimating temporal and spatial variability and vulnerability. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R. and Eberhardt, E. (eds.) *Landslide Risk Management*. A.A. Balkema Publishers, 129-157.
- Roth, R.A., 1983. Factors affecting landslide susceptibility in San Mateo County, California. *Association Engineering Geologists Bulletin*, 20:4 353-372.
- Rosegnus M., M.; Jiménez E., M.; Vazquez Conde, M.T., 2002. Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. CE-NAPRED y SEGOB. Pp. 106.
- Rosin, P.L., Hervás, J., 2005. Remote sensing image thresholding methods for determining landslide activity. *International Journal of Remote Sensing* 26 (6), 1075–1092.
- Rossi M., Guzzetti F., Reichenbach P., Mondini A., Peruccacci S., 2010. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. *Geomorphology*, Vol 114, 129-142.
- Rossi, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Fiorucci, F., Marchesini, I., Mondini, A., Santangelo, M., Gosh, S., Riguer, D.E.L. Lahoussou, T., Chang, K.T., Guzzetti, F., 2012. A tool for estimation of the distribution of landslide area. IRPI. EGU
- Rostow, W.W. 1991. *The Stages of Economic Growth: A Non-Communist Manifesto*. Cambridge: Cambridge University Press, Chapter 2, "The Five Stages of Growth-A Summary," pp. 4-16
- Sabins, Floyd F., 1987. *Remote sensing: Principles and interpretation*, edit. W. H. Freeman. Estados Unidos.

- Salvano Briseño, 2011. La gestión de los riesgos vinculados a la naturaleza, ¿tema central de la Geografía? En: Conferencia en el Instituto de Geografía de la UNAM. México 10 de diciembre de 2011.
- Sánchez Rojas, L. E., De la Callejera Moctezuma, A. E., 2004. Carta Geológico-Minera Pahuatlán F14-D73. Servicio Geológico Mexicano, escala 1:50 000.
- Santurri, L., Carla, R., Fiorucci, F., Aiazzi, B., Baronti, S., Cardinalli, M., Mondini, A., 2010. Assessment of very high resolution satellite data fusion techniques for landslide reognition. ISPRS TC VII Symposium. IAPRS, Viena, Austria, XXXVIII, pp. 492-496.
- Sauchyn, D.J., Trench, N.R., 1978. Landsat applied to landslide mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44 (6), 735-741.
- Scanvic, J.Y., Girault, F., 1989. Imagerie SPOT-1 et inventaire des mouvements de terrain: l'exemple de La Paz (Bolivie). *Photo Interpretation* 89 (2-1), 1-20 (in French).
- Singhroy, V., Molch, K., 2004. Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques. *Advances in Space Research* 33 (3), 290-295.
- Skempton, A., DeLory, F.A., 1957. Stability of natural slopes in London Clay. *Proc. 4th Ini. Conference. Scott Metch.*, 2:378-381.
- Speight, J.C., 1977. Landform pattern description from aerial photographs. *Photogrametry* 32, 161-182.
- Stephens, P.R., 1988. Use of satellite data to map landslides. *Proceedings 9th Asian Conference of Remote Sensing*, Bangkok, Thailand, 11, pp. 1-7.
- Stumpf, A., Kerle, N., 2011. Object-oriented mapping of landslides using Random Forests. *Remote Sensing of Environment*. Volume 115, Issue 10, Pp. 2564-2577
- Tian, Y., 2010. Slope unit-based landslide susceptibility zonation. *Geoinformatics, 2010 18th International Conference on*, vol., no., pp.1-5, 18-20 June 2010.
- Turner, Kasperson, E. R., Matson L., McCarthy, A., Corell, R. J., Christensen, Eckley, Kasperson, X. Luers, Martello, L. Polsky, Pulsipher, and A. Schiller, 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *PNAS*, vol. 100, 14 (pp. 8074-8079).
- Tsai, F., Hwang, J.-H., Chen, L.-C., Lin, T.-H., 2010. Post-disaster assessment of landslides in southern Taiwan after 2009 Typhoon Morakot using remote sensing and spatial analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, 2179-2190.
- van Westen, C.J., 1993. Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation. *ITC Publication n. 15*, ITC, Enschede, 245 p.
- vanWesten, C.J., 2010. Gis for the assessment of risk from geomorphological hazards. En Alcántara-ayala, Irasema; Goudie, Andrew, 2010 *Geomorphological hazards and disaster prevention*. Nueva York, Estados Unidos. Cambridge University Press.
- van Westen, C.J., van Asch, T.W.J., Soeters, R., 2006. Landslide hazard and risk zonation is still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 65, 167-184.
- van Zuidam, R.A., 1985. Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciencies (ITC)*. Smits Publishers, La haya. 442 pp.
- Vandine, D.F., Moore, G. and Wise, M., 2005. A comparison of landslide risk terminology. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R. and Eberhardt, E. (eds.) *Landslide Risk Management*. A.A. Balkema Publishers, 557-562.
- Vargas Serna, 2012. La pahuá frondosa. Reportaje histórico y cultural de Pahuatlán de Valle. Ediciones del Programa de Desarrollo Cultural de la Huasteca. México. Pp. 284.
- Varnes, D.J. and IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements, 1984. *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. The UNESCO Press, Paris, 63 p.

Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In, Special Report 176: R.L. Schuster and R.J. Krizek (eds.), Landslides: Analysis and Control, TRB, National Research Council, Washington, D.C. Pp. 11-33.

Weirich, F., Blesius, L., 2007. Comparison of satellite and air photo based landslide susceptibility maps. *Geomorphology* 87 (4), 352-364.

Wieczorek, G.F., 1984. Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* 21 (3), 337-342.

Wilches-Chaux, G., 1998. Auge, caída y levantada de Felipe Pinillo, mecánico y soldador o yo voy a correr el riesgo. *Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*. Perú. Pp. 103.

Wilches-Chaux, G., 1993. La vulnerabilidad global. En: Maskrey, A., 1993. *Los desastres no son naturales*. La Red: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Colombia, Ed. Tercer Mundo Editores. 11-44.

WP/WLI - International Geotechnical societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1993. A suggested method for describing the activity of a landslide. *International Association Engineering Geology Bulletin*, 47: 53-57.

Yin, K. L., Yan, T.Z., 1998. Statical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks, Del: 5th Simposio Internacional de Procesos de Remoción en Masa, Lausanne, Suiza, v 2, pp. 1269-1272.

Referencias electrónicas.

Todas las páginas aquí citadas, fueron revisadas por última vez el 19 de febrero de 2013.

Satellite Image Corporation: <http://www.satimagingcorp.com>

Digital Globe. <http://www.digitalglobe.com/index.php/88/WorldView-2>

US Geological Survey: <http://www.usgs.gov/>

Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de la ONU: <http://www.eird.org/index-esp.html>.

México en cifras. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>

Sistema Estatal y Municipal de base de datos. <http://sc.inegi.org.mx/sistemas/cobdem/>

Planar System: <http://www.planar3d.com/3d-products/sd2620w/>

Secretaría de Turismo. Pueblos Mágicos: http://www.sectur.gob.mx/wb2/sectur/sect_Pueblos_Magicos

The international disaster Databas: <http://www.emdat.be/>

Imágenes GeoEye1: <http://www.GeoEye.com/CorpSite/gallery/Default.aspx>

WPS Plugin para QGIS: : <http://pywps.wald.intervation.org/>

Atlas Nacional de Riesgos: <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/>

Womens Enviroment & Development Organization: <http://www.wedo.org/>

Natural Disasters Hit Women Harder Than Men: http://news.newamericamedia.org/news/view_article.html?article_id=082904494be79ff560dfb4f2470b49cd

UNEP: <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=97>