

Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional

Recibido: 21 de febrero de 2007. Aceptado en versión final: 17 de noviembre de 2007.

Irasema Alcántara Ayala*
Fran Giselle Murillo García**

Resumen. Los procesos de remoción en masa constituyen una amenaza importante ya que éstos, en combinación con la vulnerabilidad de las poblaciones expuestas, determinan el riesgo y han causado a lo largo de la historia un considerable número de desastres en diversas partes del mundo, incluyendo México. Una adecuada evaluación de dichas amenazas requiere en su fase inicial, de la identificación y clasificación tipológica de los movimientos en su contexto espacio-temporal; esto comúnmente se realiza mediante la elaboración de diferentes tipos de mapas y de la construcción de un inventario. Sin embargo, debido a que las investigaciones relacionadas con la inestabilidad de laderas desde una perspectiva geomorfológica y no meramente ingenieril son

recientes y carecen de una plataforma sólida de referencia a nivel nacional, todavía no se ha desarrollado un inventario de procesos de remoción en masa para el territorio. En consecuencia, en este trabajo se hace una propuesta de elaboración de dicho inventario, la cual se ejemplifica a partir de su construcción, con base en observaciones de campo y análisis de imágenes de satélite IKONOS, para una porción de la Sierra Norte de Puebla, una de las zonas más afectadas por movimientos gravitacionales.

Palabras clave: Remoción en masa, inventario, Sierra Norte de Puebla.

Mass movement processes in Mexico: towards a proposal to construct a nation-wide inventory

Abstract. Within the natural risks framework, mass movement processes can be regarded as significant hazards since when combined with exposed populations both determine risk; thus, historically they have caused a considerable number of disasters worldwide, including Mexico. An adequate assessment of these hazards requires, on a first stage, the typology identification and classification of such movements considering their spatial-temporal context; the latter is commonly carried out by generating different types of maps and by developing inventories. However, not in terms of an engineering perspective, but from a geomorphological approach, as mass movement investigations are relatively

new and there is a lack of a solid platform of reference on these studies at national level, mass movement inventories are neglected. Therefore, in this paper, a proposal on the construction of a nation-wide mass movement processes inventory is put forward. Furthermore and based on field observations and analysis of IKONOS satellite images, the proposed design is illustrated by introducing the case of the Sierra Norte de Puebla, one of the most affected areas by slope instability.

Key words: Mass movement processes, inventory, Mexico, Sierra Norte de Puebla.

*Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D.F. E-mail: irasema@igg.unam.mx

** Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, E-mail: fran.79k@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

La evolución de las laderas ha sido afectada por procesos de remoción en masa asociados a su dinámica intrínseca aun desde antes de la aparición de los seres humanos. Si bien se ha demostrado que algunas actividades antropogénicas han acelerado la ocurrencia de ese tipo de procesos, también es importante recordar que la superficie terrestre no es estática y, por ende, la interacción endógena y exógena ofrece una amplia gama de diversidad en el paisaje.

De manera particular, se tiene conocimiento de la existencia de movimientos de ladera durante periodos climáticos críticos, como sucedió en la pequeña edad del hielo en regiones del Reino Unido, Noruega (Lewis and Birnie, 2001), Suiza (Stoffel and Beniston, 2006), entre otras; por ello, en la actualidad es de gran relevancia entender los efectos del cambio climático (IPCC, 2001) en la recurrencia de este tipo de procesos, específicamente debido a la intensificación de fenómenos, como los huracanes, ya que esto podría ocasionar un mayor número de deslizamientos desencadenados por precipitaciones extraordinarias.

Cabe destacar que también en otros planetas, como Marte, se han identificado rasgos (geo)morfológicos de este tipo de procesos (Aharonson *et al.*, 1998). En un sentido más quimérico, asimismo, es interesante señalar que curiosamente la existencia de cuentos y leyendas condujo hace poco más de un año a un grupo de científicos estadounidenses a analizar un sismo de magnitud 7.4° Richter que aconteció en 900 A.D. en Seattle y desencadenó deslizamientos importantes (Ludwin *et al.*, 2005). Es así que la inestabilidad de laderas ha estado presente a lo largo de la historia de la Tierra, y para poder conocer su impacto potencial presente y futuro, es esencial entender la huella que ha dejado en el pasado.

Los procesos de remoción en masa se presentan sobre la superficie terrestre en una extensa variedad de escalas, lugares, condiciones geológicas, geomorfológicas, climáticas e inclusive sociales. A este respecto, es necesario establecer criterios y estandarizar los datos que surgen y se relacionan con su estudio. El compendio de esa información

de manera sistematizada en una sola matriz, es el inicio de la construcción de un inventario de procesos de remoción en masa. Un inventario de este tipo se puede definir como la relación ordenada de la ocurrencia y características de los procesos de remoción en masa en un territorio determinado, y durante un periodo específico, el cual debe permanecer actualizado detalladamente.

La utilidad de sistematizar toda la información sobre cualquier tema, de manera ordenada y en un solo documento, resulta obvia, pero en el caso del estudio de los procesos de remoción en masa el impacto positivo se extiende en muchas direcciones. Un inventario de procesos de remoción en masa puede ayudar de manera general y puntual a establecer relaciones entre los distintos componentes que influyen en los niveles de riesgo y, por ende, en los desastres ocasionados por estos peligros, y es muy útil en la generación de cartografía temática (Hansen, 1984; Parise, 2000; van Westen *et al.*, 2006). Un beneficio concreto y relevante de elaborar un inventario consiste en que los datos acumulados durante décadas pueden ser analizados en combinación con otros elementos, para así poder efectuar investigaciones precisas relacionadas con la evaluación de amenazas. Por ejemplo, al asociarse con series de precipitación, es posible determinar umbrales (Glade *et al.*, 2001), a partir de los cuales se especifiquen zonas afectables bajo condiciones determinadas de lluvia, todo ello con el fin último de implementar sistemas de alerta.

Los registros históricos y actuales, tales como informes, publicaciones científicas, periódicos y en general toda la literatura y cartografía que permita la identificación y ubicación de un movimiento de ladera, y evidentemente la caracterización directa en campo, son fuente primordial para construir un inventario de procesos de remoción en masa. Conjuntamente, los recursos como el análisis de fotografías aéreas e imágenes de satélite (Nichol and Wong, 2005), son de gran valor complementario debido a que gracias a ellos es posible analizar zonas extensas e inaccesibles en periodos de tiempo relativamente cortos.

Diversos inventarios de procesos de remoción en masa se han desarrollado en el mundo, ya sea a nivel continental (Dikau *et al.*, 1996), nacional

(Viberg, 1988; Chau *et al.*, 2004), regional (Al-Homoud and Tubeileh, 1997; Jennings and Siddle, 1998; Ayenew and Barbieri, 2005; Duman *et al.*, 2005; Turcotte *et al.*, 2006), en función de algún evento extraordinario (Chuan and Grunert, 1999), o bien dependiendo de alguna tipología de movimiento en específico (Chau *et al.*, 2003).

En Latinoamérica existe “Desinventar”, un sistema de inventarios o registro de información sobre características y efectos de diversos tipos de desastres, el cual fue generado y es alimentado por la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (<http://www.desinventar.org>). Entre los desastres registrados, se incluyen los relacionados con la inestabilidad de laderas, mismos que son catalogados como deslizamientos o aludes. Para el caso de México en particular, “Desinventar” tiene un registro de movimientos constituido por datos tales como: estado, municipio, fecha, duración, fuente de información, sitio, causa, número de víctimas, número de heridos, población afectada, casas destruidas y dañadas, número de personas evacuadas, reubicación, pérdidas indirectas (agricultura, ganadería, etc.), daños a la infraestructura, etc. La utilidad de este inventario es incuestionable, sin embargo, esta información es generada esencialmente con base en noticias de periódicos nacionales, independientemente de que sea confirmada de manera oficial. Además de ello, como su nombre lo indica, el registro se centra en el desastre y no en la amenaza.

Además de los registros de “Desinventar”, no existe información precisa en relación con los procesos de remoción en masa en México, por ende, el objetivo de este proyecto fue establecer el formato de un inventario nacional y representar su utilidad, a partir de su aplicación en una de las zonas más afectadas en el territorio por este tipo de amenazas, la Sierra Norte de Puebla.

METODOLOGÍA

Definición de la estructura del Inventario

Con base en la revisión detallada de otros inventarios (Ibsen and Brundsen, 1995; Alger and Brabb 2001; Dellow *et al.*, 2003; Wegmann, 2005; US

Geological Survey Data Base), de los reportes elaborados por el grupo de trabajo del inventario mundial de movimientos de ladera de la UNESCO (WP/WLI, 1990, 1991, 1993a, 1993b, 1994) y del tipo de información asequible en México, se definió la estructura del inventario. Ésta 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 1).

a) 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. El nombre se compone de dos partes, la primera indica la localidad, o bien algún rasgo geográfico significativo como la elevación o el río más cercano al proceso en cuestión, en tanto que el segundo componente es un número, ya que en una localidad puede existir más de un proceso.

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 (Figura 2). 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. Se propone que el proceso de remoción en masa sea ubicado en el centro de la zona de hundimiento; asimismo, se incluye también un campo para establecer la altitud media a la que se encuentra. Es importante señalar que en caso de que el material acarreado por un proceso se deposite a una considerable distancia del punto de inicio del movimiento, el registro de altitud debe corresponder al punto que se determinó con las coordenadas geográficas y UTM. El dato debe ingresarse como metros sobre el nivel del mar.

<h2 style="text-align: center;">Inventario de procesos de remoción en masa</h2>			
Número 269 San José Chagchaltzin 4			
Información general			
Coordenadas UTM	latitud 2202977	longitud 656378	Coordenada Altitud 1600 msnm
Coordenadas geográficas	latitud 19°52'27".14	longitud 97°25'40".28	
Municipio Tlailaquitepec	Estado Puebla		
Clave de la carta 1:50 000 E/14B75	Edad del movimiento Reciente <input type="checkbox"/> Relicto <input type="checkbox"/> Indefinido <input type="checkbox"/>		
Fecha de activación 01/10/1999	Volumen del material de 1 a 100 m ³ <input type="checkbox"/>		
Grado de actividad Activo <input type="checkbox"/> Inactivo <input type="checkbox"/>	Volumen del material de 100 a 1000 m ³ <input type="checkbox"/>		
Fecha de observación 08/12/2000	mayor de 1000 m ³ <input type="checkbox"/>		
Fenómeno detonante Depresión tropical N° 11 de 1999.	Área afectada 76501 m ²		
Tipología Deslizamiento			
Materiales Rocas <input type="checkbox"/> Detritos <input type="checkbox"/> Suelo <input type="checkbox"/> Varios <input checked="" type="checkbox"/>			
Hidrología del sitio			
Tipo de drenaje Mixto <input checked="" type="checkbox"/>	Precipitación media anual 3224 mm/año		
Drenaje natural <input checked="" type="checkbox"/>	Intensidad de las lluvias		
Drenaje artificial <input type="checkbox"/>	Indefinido <input type="checkbox"/>		
	Período de retorno		
Geología			
Litología (in situ)			
Litología (Carta)	Sedimentarias: Jurásico Medio/Limonitas		
Control estructural	Tipo		
Planos de estratificación	Tipo		
Edafología			
Tipo de suelo (in situ)			
Tipo de suelo (Carta)			
Coefficiente de infiltración			
Características (Granulometría, composición química, etc.)			
Propiedades físico-mecánicas			
Uso de suelo y vegetación			
Existencia de vegetación	Uso de suelo		
Antes del evento <input checked="" type="checkbox"/>	Área agrícola de temporal		
Después del evento <input type="checkbox"/>	Tipo de vegetación		
Deforestación <input type="checkbox"/>	Observaciones		
Geomorfología			
Ángulo de pendiente (in situ)	Perfil de la pendiente	Orientación NE	
Ángulo de pendiente (MDE)	Complejo <input type="checkbox"/> Vertical <input type="checkbox"/>	Tipo de pendiente: Natural <input checked="" type="checkbox"/>	
Valor de la pendiente (MDE)	Convexo <input type="checkbox"/> Corfe <input type="checkbox"/>	Artificial <input type="checkbox"/>	
Valor de la pendiente (in situ)	Concavo <input checked="" type="checkbox"/> Otro <input type="checkbox"/>	Recto <input type="checkbox"/>	

Causas		Cambios resultantes	
Procesos Intemperismo <input type="checkbox"/> Por erosión Natural Erosión natural no definida <input type="checkbox"/> Erosión general de la ladera <input type="checkbox"/> Erosión basal <input type="checkbox"/> Subsistencia <input type="checkbox"/> Por vibraciones sísmicas Terremoto <input type="checkbox"/> Movimiento de fallas <input type="checkbox"/> Subsistencia <input type="checkbox"/> Por vibraciones inducidas por el ser humano Explosiones <input type="checkbox"/> Maquinaria <input type="checkbox"/>	Por Erosión Artificial Por excavaciones <input type="checkbox"/> Actividad Minera <input type="checkbox"/> Por cambios asociados al régimen de precipitación <input checked="" type="checkbox"/> Precipitaciones intensas <input checked="" type="checkbox"/> Inundaciones <input type="checkbox"/> Drenaje bloqueado <input type="checkbox"/> Cambios en el régimen de precipitación <input type="checkbox"/> Por cambios asociados a la cubierta vegetal <input type="checkbox"/> Deforestación <input type="checkbox"/> Incendios forestales <input type="checkbox"/> Otros procesos: <input type="checkbox"/>	Cambios en las propiedades físicas Presión en los poros <input type="checkbox"/> Vacíos en el suelo <input type="checkbox"/> Permeabilidad <input type="checkbox"/> Fisuras <input type="checkbox"/> Otro <input type="checkbox"/>	Otro tipo de cambios en la ladera Cambio geométrico <input type="checkbox"/> En gradiente <input type="checkbox"/> En altura <input type="checkbox"/> Otro tipo de cambios <input type="checkbox"/> Cambio de uso de suelo <input type="checkbox"/>
Riesgo potencial y daños ocasionados		Movimientos previos <input type="checkbox"/> Movimientos futuros <input type="checkbox"/>	
Ubicación en zona urbana <input checked="" type="checkbox"/> Ubicación en zona rural <input checked="" type="checkbox"/> Riesgo para la población <input checked="" type="checkbox"/> Infraestructura en riesgo General <input type="checkbox"/> Agua <input type="checkbox"/> Gas <input type="checkbox"/> Electricidad <input checked="" type="checkbox"/> Carretera o camino <input checked="" type="checkbox"/> Via Férrea <input type="checkbox"/> Riesgo a industria <input checked="" type="checkbox"/> Alteración humana <input checked="" type="checkbox"/>	Riesgo en localidad Varios (General) <input type="checkbox"/> Edificios aislados <input checked="" type="checkbox"/> Propiedad privada o residencial <input type="checkbox"/> Edificios públicos <input type="checkbox"/> Áreas recreativas <input type="checkbox"/> Áreas de acceso público (plazas, calles, etc) <input type="checkbox"/> Escuelas <input type="checkbox"/> Hospitales <input type="checkbox"/>	Posición relativa respecto al riesgo Ladera arriba <input type="checkbox"/> Ladera abajo <input checked="" type="checkbox"/> En uno de los flancos <input type="checkbox"/> Diversas áreas <input checked="" type="checkbox"/> Daños ocasionados por el movimiento Daños materiales <input checked="" type="checkbox"/> Pérdida de vidas <input type="checkbox"/>	Tipo de medida de control <input type="checkbox"/>
Otros detalles		Estudios previos <input checked="" type="checkbox"/> Reportado por Protección Civil <input checked="" type="checkbox"/>	
Fecha de la visita 12/05		Referencias Marcos López (2003) UNAM México	

Figura 1. Esquema general de los componentes del inventario propuesto.

Id	PRM	Coordenada latitud UTM	Coordenada longitud UTM	Coordenada latitud ge
1	Ahuatepec 1	2198201	664606	19°52'27".14
2	Planta Minera Aire Libre 1	2198951	667660	19°52'50".54
3	Planta Minera Aire Libre 2	2198766	668073	19°52'44".49
4	Aire libre 1	2198822	669869	19°52'45".91
5	San Diego 1	2198113	671470	19°52'22".38
6	Mexcalcuatla 1	2197443	669304	19°52'01".02
7	Mexcalcuatla 2	2197068	669791	19°51'48".70
8	Mexcalcuatla 3	2197153	669838	19°51'51".65
9	Mexcalcuatla 4	2197581	669775	19°52'05".48
10	Mexcalcuatla 5	2197395	669859	19°51'59".53
11	San sebastian 1	2196774	669994	19°51'39".10
12	San Sebastian 2	2196697	669953	19°51'36".81
13	San Sebastian 3	2197712	670366	19°52'09".57
14	Carretera Aire Libre 1	2198012	670171	19°52'19".50
15	San Acateno 1	2197845	671599	19°52'13".46
16	Atoluca 1	2196786	672953	19°51'38".50
17	Atoluca 2	2196675	673010	19°51'34".86
18	San Juan Tezongo 1	2195088	671808	19°50'43".60
19	San Juan Tezongo 2	2195199	671780	19°50'47".23
20	San Juan Tezongo 3	2195224	671728	19°50'48".23
21	Teziutlan 1	2192192	671479	19°49'09".64
22	Teziutlan 2	2192244	671331	19°49'11".34
23	Carretera 129 1	2193592	673063	19°49'54".86
24	Carretera 129 2	2193783	673092	19°50'00".77
25	Carretera 129 3	2193706	673086	19°49'58".47

Figura 2. Recuadro de la base de datos generada para la construcción del inventario.

En este mismo contexto espacial es necesario ubicar el movimiento con respecto a la división política administrativa; para ello se incluye un campo que corresponde al estado de la República y otro para el municipio. Con fines prácticos se incluye de igual forma un campo para introducir la clave de la carta INEGI 1:50 000 de la zona en la que se encuentra el movimiento.

En el ámbito de la temporalidad se consideró específicamente la fecha de actividad o activación. Este campo debe ser llenado con la fecha del evento en el formato dd, mm, aaaa, y 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 (1993a) tomado de Alcántara (2000), un movimiento de ladera puede ser básicamente activo o inactivo. Un movimiento activo es el que presenta movimiento actual en el terreno en la fecha que se ingresa en el registro, mientras que el inactivo es aquél que no ha tenido movimiento en los últimos doce meses. 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.

Un movimiento presenta cambios constantes en su morfología debido a los agentes externos

como el intemperismo o la actividad humana, por lo que su apariencia o sus características no son las mismas, incluso desaparecen a lo largo del tiempo. El establecer la fecha de observación o del registro puede ayudar a conocer los periodos de tiempo requeridos en la modificación diferencial geomorfológica del movimiento de ladera de interés. Los datos se ingresan con el formato de fecha estándar ya mencionado (dd, mm, aaaa).

Para la edad del proceso, las variables se estandarizaron como “reciente”, “relicto” o “indefinido”. La primera se refiere a movimientos que han ocurrido en los últimos años, en tanto que relicto implica un movimiento que no muestra signo de actividad y/o su edad es de más de 10 años –y es evidentemente inactivo–. Debido a la complejidad que existe para determinar cuándo un proceso deja de ser reciente para ser 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 aproximado. Con este dato, el usuario se puede dar una idea de la magnitud del movimiento, y si lo relaciona con su ubicación respecto a los asentamientos humanos se puede estimar si el movimiento podría o no implicar riesgo.

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. 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 “Huracán Stan”.

La tipología del movimiento está incluida como un campo abierto a variables alfanuméricas ya que se desprende de la clasificación de Varnes y Hutchinson utilizada para el programa europeo EPOCH (Dikau *et al.*, 1996). Lo anterior responde a que dicha clasificación contempla varios subtipos de movimientos y por cuestiones de optimización del espacio no se ha decidido estandarizar estas

variables. De este modo, en el campo puede incluirse algo tan sencillo como “deslizamiento” o tan complejo como “deslizamiento rotacional simple de detritos”. El tipo de material involucrado también se jerarquiza de acuerdo con la clasificación ya mencionada, las variables son: roca, detritos y suelo. Este campo puede dar una idea aproximada de la profundidad del proceso de remoción en masa, sin embargo, en ocasiones es difícil establecer cuál es el tipo de material involucrado, por ello se incluye la variable “varios” cuando existen dos o más tipos de material.

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, por ello se dejó abierto el campo a un registro numérico en metros cúbicos.

b) 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.

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 promedio en un año, el dato es en milímetros anuales (numérico) y se toma de la estación meteorológica más cercana al sitio del movimiento, al dato que se presente en la carta hidrológica INEGI o a una lectura directa en campo.

Existe una estrecha relación entre la vegetación y el aspecto hidrológico. Es de esperarse que la superficie de un movimiento que se presente en una zona muy húmeda sea rápidamente cubierta por vegetación. Por ejemplo, un movimiento en las zonas más húmedas de la Sierra Norte de Puebla puede tener vegetación arbustiva apenas un mes después de ocurrido el evento; si está aún activo, es posible que la vegetación tarde más en establecerse. Evidentemente, si el movimiento se presenta en una zona no lluviosa la falta de vegetación no sería

una clara señal de inestabilidad. Con el propósito de contar con la mayor cantidad de información al respecto, se consideró incluir un campo en el que se indique si al momento de la observación, el movimiento presentaba vegetación.

c) Geología

Al igual que la hidrología, la geología de un sitio tiene gran influencia como factor determinante de inestabilidad. De manera inicial 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 existente en INEGI o bien de otras fuentes específicas. Indudablemente la geología obtenida *in situ* es mucho más confiable que la obtenida en una carta, debido al nivel de generalización que presenta un mapa con escala 1:250 000. 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. 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 procesos de remoción en masa. 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. Para especificar qué tipo de control estructural influyó, se incluyó también un campo abierto.

d) Edafología

Al igual que en el apartado dedicado a geología, 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. Se plantea, que para estandarizar el dato, se utilice el sistema de clasificación edafológica FAO-UNESCO. 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 procesos de remoción en masa (Guimaraes *et al.*, 2003; Malet

et al., 2003). La granulometría y la composición son muy 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. En este sentido se incluye un campo para anotar el coeficiente de infiltración, así como las propiedades físico-mecánicas.

e) Vegetación y uso del suelo

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. Por ende, en este apartado se incluyen campos indicativos de la presencia y tipo de vegetación antes y después de la ocurrencia de un proceso de remoción en masa, el uso del suelo, existencia de deforestación, además de un campo abierto para incorporar observaciones.

f) Geomorfología

Esta categoría se refiere a las características generales del terreno en donde se localiza el proceso de remoción en masa. Los primeros campos de la categoría se dedican al ángulo de la pendiente 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°). El ángulo de la pendiente es un dato esencial en el estudio de los procesos de remoción en masa, 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. En combinación con parámetros de resistencia, este valor también puede ser empleado para efectuar análisis de estabilidad de laderas a partir del cálculo del Factor de Seguridad. Este último es un coeficiente empleado en ingeniería para calcular la inestabilidad de una ladera con base en parámetros de resistencia del suelo y de los esfuerzos de corte que puede gene-

rar una superficie de movimiento o deslizamiento (Anderson and Richards, 1987).

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 proceso de remoción en masa, 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.

La orientación de un proceso de remoción en masa 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.

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 procesos de remoción en masa en función del material y condiciones geográficas del área en cuestión, así como la tipología de los movimientos.

g) Causas

Existe una gran diversidad de causas de los procesos de remoción en masa, 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 “si o no”, con excepción del relacionado con las transformaciones producidas por cambios en el régimen de precipitación, cuyo formato es abierto.

h) Riesgo potencial y daños ocasionados

En esta categoría se ingresa la información relativa al movimiento de ladera como amenaza potencial. Este aspecto surge a partir de la incidencia o reactivación que suelen tener los movimientos en zonas previamente inestables, es decir, considera el hecho de que donde ya ocurrió un movimiento, es muy factible que vuelva a presentarse otro. La categoría también guarda estrecha relación con el grado de actividad, ya que existen movimientos que permanecen activos y cuya velocidad del movimiento es muy lenta. También puede suceder que el movimiento esté dormido y pueda reactivarse.

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 proceso de remoción en masa 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”. Finalmente, se consideró importante incluir un campo relacionado con el uso del suelo, ya que en años recientes este aspecto ha sido considerado como de influencia significativa en la ocurrencia de movimientos (Alcántara *et al.*, 2006). De manera complementaria a esta información, también fue relevante puntualizar si los efectos de los procesos de remoción en masa involucraron afectaciones en terrenos agrícolas o de cultivo.

i) 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).

Es trascendental, enfatizar, que para el establecimiento de los campos del inventario se tomaron en cuenta otros realizados para diversas regiones del mundo (Ibsen y Brundsen, 1995; Alger y Brabb, 2001; Dellow *et al.*, 2003; Wegmann, 2005; US Geological Survey Data Base). Lo anterior, con la finalidad de abarcar la mayor cantidad de escenarios posibles característicos de México, sin embargo, es evidente que queda latente la posibilidad de que la realidad no se ajuste por completo a las categorías y campos aquí formulados, por lo que esta propuesta de inventario se presenta como algo perfectible en todo momento.

RESULTADOS

Aplicación del Inventario: Sierra Norte de Puebla

La Sierra Norte de Puebla es una región montañosa que se localiza en el centro este de México, en el estado de Puebla. Ocupa el área de confluencia entre el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) y la Sierra Madre Oriental. Tiene un clima húmedo tropical y se caracteriza por el predominio de rocas sedimentarias del Jurásico, cubiertas en gran medida por depósitos piroclásticos provenientes de la caldera de Los Humeros (detalles específicos en Alcántara, 2004, Alcántara *et al.*, 2006, Lugo *et al.*, 2005).

Con la finalidad de elaborar un registro completo de los procesos de remoción en masa del área de interés, se revisaron archivos históricos y publicaciones científicas, se analizaron imágenes de satélite y se hicieron observaciones de campo.

a) Registros históricos

Los archivos históricos generalmente constituyen una herramienta importante para conocer el impacto que han tenido diversos eventos en un territorio determinado (Ibsen *et al.*, 1995; Calcaterra y Parise, 2001; Rizzo *et al.*, 2001), en este caso, los procesos de remoción en masa. Sin embargo, para México, los datos existentes no pudieron ser incluidos de

manera concreta en el inventario de la región de la Sierra Norte de Puebla. Lo anterior se debió principalmente a dos razones. Primero, al considerar la base de datos “Desinventar” de La Red como punto de partida, se encontró información muy generalizada, que si bien da cuenta del impacto de estos procesos durante un periodo de tiempo específico, no hace referencia a la localización del sitio afectado. Segundo, la búsqueda de información en archivos hemerográficos produjo de manera muy similar, datos ambiguos cualitativos de los efectos de la ocurrencia de distintos movimientos de ladera sin puntualizar su dimensión espacial. Curiosamente, sólo se encontraron datos precisos de un movimiento que de acuerdo con el diario *El sol de Puebla*, tuvo lugar en la ranchería Jaltenco, a 10 km de Zacapoaxtla, el 8 de octubre de 1954 (este mismo evento aparece en otros diarios como Xaltenco, Xaltenco y Xalteno); éste causó 14 víctimas. No obstante, muy probablemente la ranchería desapareció o cambió de nombre, en consecuencia, no fue posible registrar su ubicación.

Después del desastre de Puebla de 1999, las publicaciones científicas comenzaron a enriquecer la literatura sobre el tema de los procesos de remoción en masa en México. De manera particular, para la Sierra Norte existen hasta este momento 28 documentos (15 artículos en revistas científicas, ocho tesis de licenciatura, cuatro de maestría y una de doctorado). La revisión de dichos documentos sirvió para adquirir información sobre lo ocurrido en 1999 y para corroborar la existencia de algunos procesos de remoción en masa localizados en el área de aplicación del inventario mediante el análisis de las imágenes IKONOS-2.

b) Imágenes de satélite

La fase inicial involucró la delimitación del área de aplicación, la cual dependió en gran medida del material disponible, específicamente imágenes de satélite IKONOS-2 del año 2000, es decir, tomadas tan solo un año después del desastre de octubre de 1999. El cubrimiento de las imágenes IKONOS-2 utilizadas comprende aproximadamente el 80% del área de la carta INEGI 1:50 000 E14B15; esta zona corresponde al sector sureste de la Sierra Norte de Puebla (Figura 3). En esta región se localizan muni-

cipios como Teziutlán, Tlatlauquitepec, Zaragoza y Zacapoaxtla, todos ellos afectados durante 1999.

Con base en el análisis visual de las imágenes IKONOS, se identificaron los procesos de remoción en masa de la zona. Este tipo de imágenes posee la bondad de tener una gran resolución espacial y radiométrica. Su cubrimiento es de 13 x 13 km y el tamaño de píxel es de 0.8 m en pancromático y 3.2 m en imágenes multispectrales; la resolución radiométrica es de 2 048 tonos de gris. Todas estas características se traducen en un detalle significativo de la imagen, ideal para delimitar los movimientos de ladera. Las imágenes se adquirieron georreferenciadas y corregidas, con fecha de toma del 8 al 14 de diciembre del 2000, días registrados con nubosidad cercana a cero, algo que no es muy común en la zona en estudio.

Específicamente para la identificación de procesos de remoción en masa se utilizaron imágenes compuestas RGB e infrarrojo cercano. La identificación pudo hacerse de manera visual debido a la alta resolución de las imágenes (Figura 4). En este tenor, la textura es un atributo de gran utilidad para el reconocimiento de movimientos de ladera, ya que en una imagen digital, ésta se define como la distribución espacial de los valores de intensidad de los píxeles dentro de cada banda (Hervas de Diego *et al.*, 2003). Con base en este aspecto se buscaron los atributos morfológicos propios de un proceso de remoción en masa. De manera particular, se tomaron en cuenta aspectos como el tipo de proceso de remoción en masa, sus dimensiones, su grado de actividad, su expresión geomorfológica, el tipo de suelo y las alteraciones antrópicas a la superficie original del terreno.

La primera característica evidente e identificable en un proceso de remoción en masa es el escarpe, otro rasgo visible es la superficie expuesta de ruptura y los escarpes menores; esto es debido al color de la luz que reflejan en una imagen debido a la continua erosión superficial (Crozier, 1984). En la superficie de ruptura de un proceso de ladera es común observar el afloramiento de materiales más frescos, la pérdida de la cubierta vegetal o la superposición de materiales con diferentes características espectrales. Lo anterior ocasiona que en una imagen digital se cree un contraste espectral

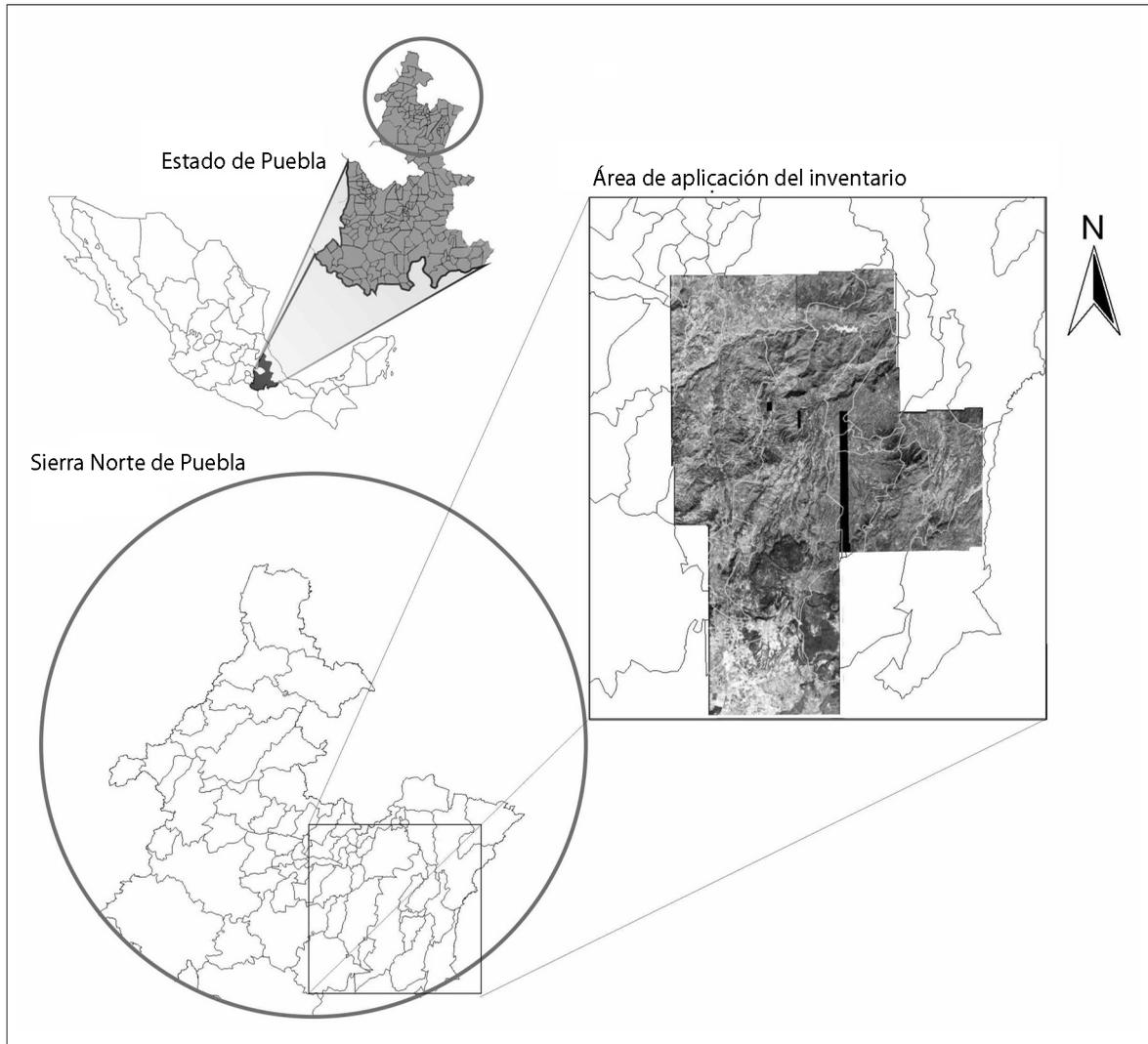


Figura 3. Delimitación del área de aplicación del inventario de procesos de remoción en masa, Sierra Norte de Puebla.

entre la superficie de ruptura y las zonas adyacentes, misma que delata la presencia de un proceso de remoción en masa (Hervas de Diego *et al.*, 2003). Aunado a ello, la superficie expuesta está comúnmente disectada por riachuelos evidenciando la relativa impermeabilidad del material expuesto (Crozier, 1984).

A partir del análisis por percepción remota fue posible identificar un total de 741 procesos de remoción en masa, cifra congruente con las expectativas y estimaciones anteriores a este trabajo, ya que se calcula que el número de procesos de

remoción en masa ocurridos en 1999 (a partir de una magnitud de 1 a 10 m³) en la Sierra Norte de Puebla fue de aproximadamente 3000 (Lugo *et al.*, 2005). Sin embargo, cabe destacar que no todos los procesos de remoción en masa detectados en las imágenes de satélite son movimientos activos, ya que algunos deslizamientos inactivos y al mismo tiempo muy antiguos, fueron localizados gracias a la morfología de la ladera y a la ausencia de vegetación arbustiva y arbórea.

Las características asociadas a los procesos de remoción en masa que fueron identificadas

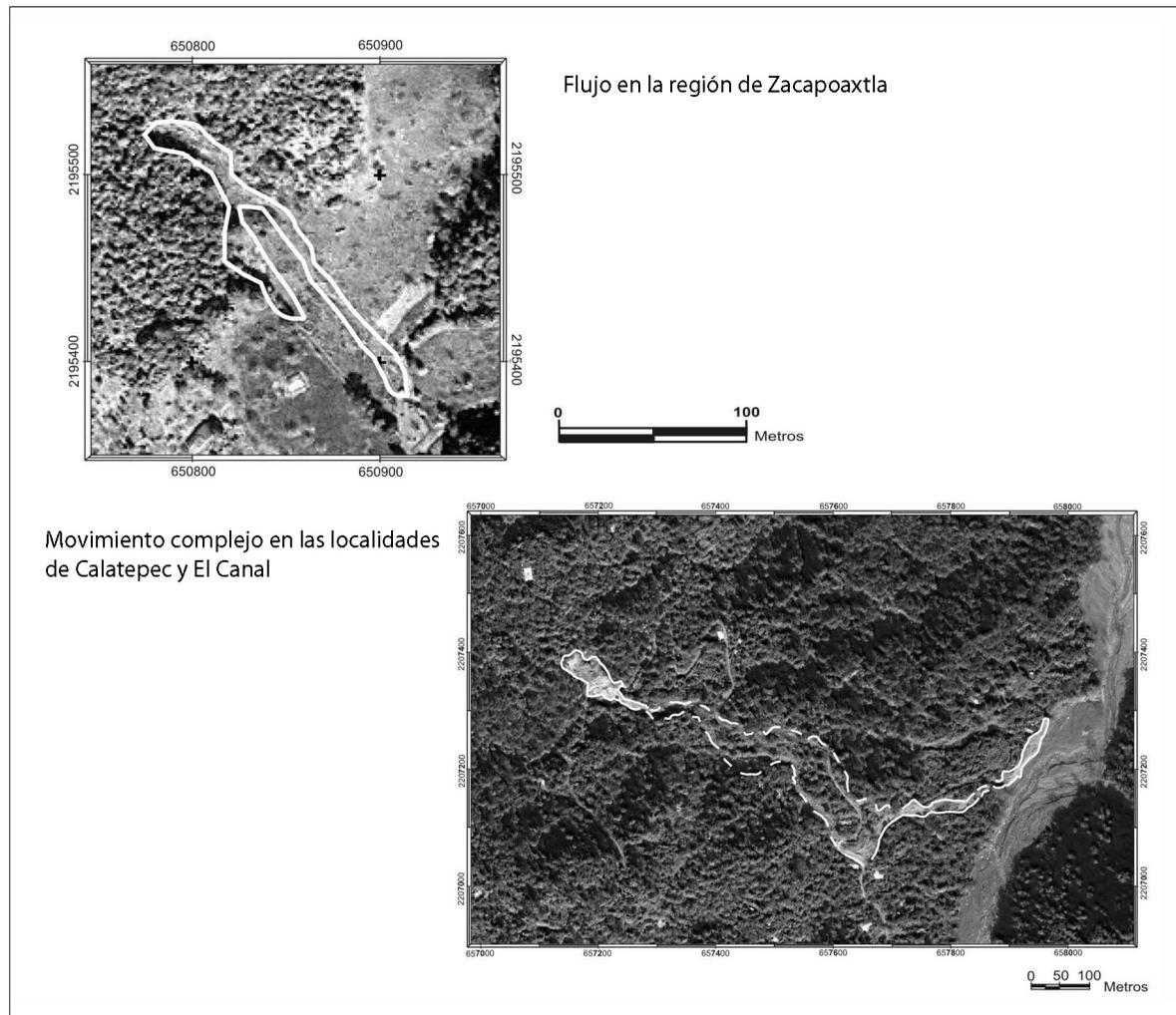


Figura 4. Identificación de procesos de remoción en masa mediante el análisis de imágenes de satélite IKONOS-2.

también mediante el análisis de las imágenes IKONOS-2 son: uso de suelo; riesgo potencial para la población o sus propiedades; grado de actividad; y orientación, tipo y perfil de la ladera, aunque es importante señalar que no fue posible determinar estos últimos tres aspectos para todos los procesos de remoción en masa. De manera complementaria y con base en un SIG, se pudo determinar el área afectada y las coordenadas (UTM y geográficas), en tanto que gracias a la información digital de las cartas topográfica, geológica, edafológica y de uso de suelo y vegetación fue posible obtener la altitud y las características geológicas.

c) Observaciones de campo

Distintas visitas a campo –particularmente en el municipio de Tlatlauquitepec–, efectuadas en 2005 y 2006 permitieron identificar, georreferenciar y caracterizar movimientos de ladera específicos que fueron incorporados en el inventario (Figura 5).

d) Cifras del Inventario: sector SE de la Sierra Norte de Puebla

En este apartado se expone un resumen de los datos obtenidos para el inventario de procesos de remoción en masa del sector sureste de la Sierra Norte de Puebla. Es importante señalar que la fuente de

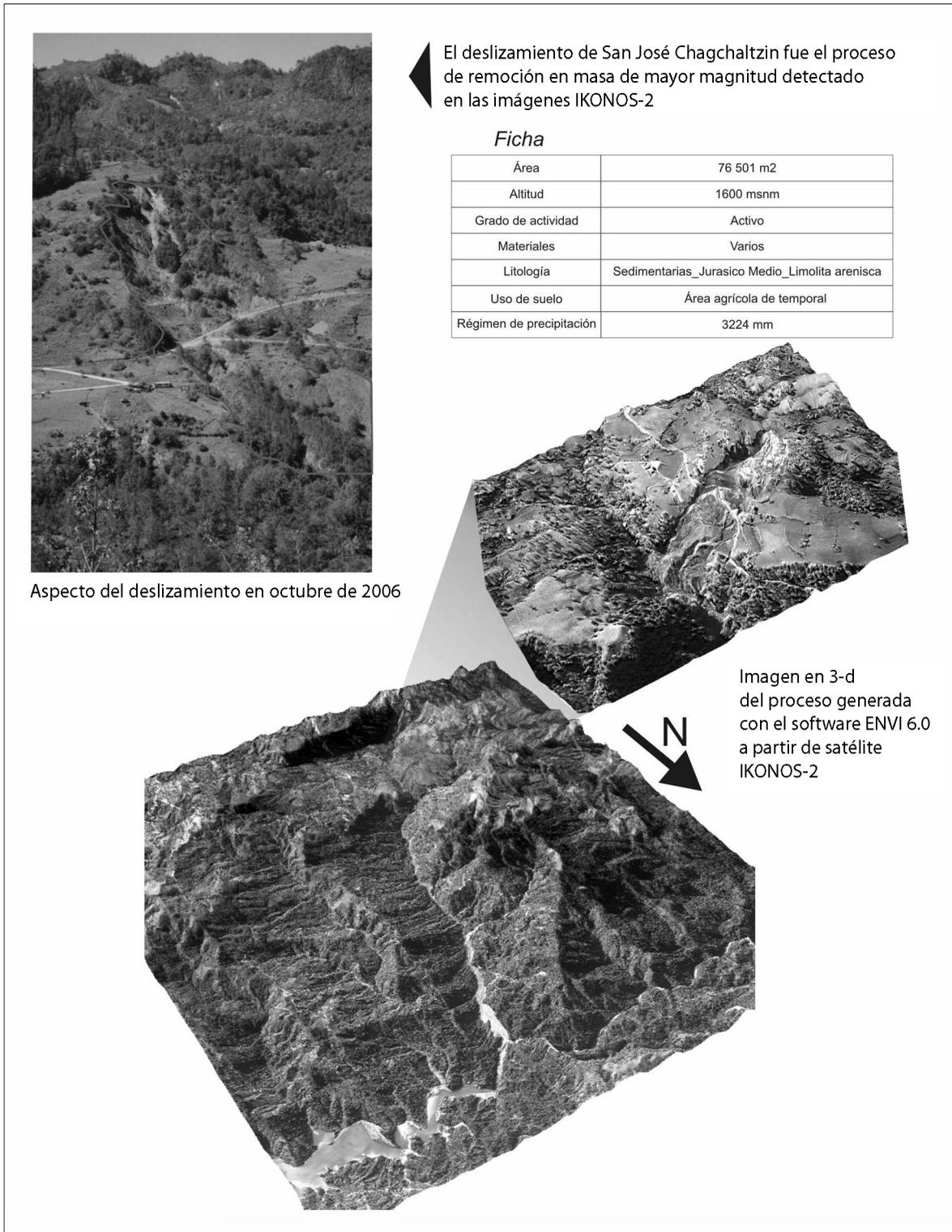


Figura 5. Identificación e información del deslizamiento de San José Chagchaltzin, municipio de Tlatlauquitepec.

un alto porcentaje de movimientos se concentró en el análisis de las imágenes de satélite IKONOS-2, en tanto que las visitas de campo en gran medida proporcionaron información complementaria (Tabla 1).

Un total de 756 procesos de remoción en masa fueron registrados. De éste, el 55% correspondió a deslizamientos, 22% a movimientos complejos, 15% a caídas y 4% a flujos. Prácticamente el 65% de los movimientos ocurrió en materiales ígneos, en tanto que el 26% en rocas sedimentarias y el 8% en metamórficas. En relación con el grado de actividad, 81% de los movimientos registrados son activos, 8% inactivos y 10% no pudieron ser catalogados. En función del uso del suelo, la mayor parte de los movimientos, es decir el 83%, ocurrió en zonas con vegetación secundaria o áreas agrícolas y de pastizal. Esta cifra contrasta con el 7.53% de los procesos identificados en regiones con vegetación natural. Asimismo, es importante señalar que cerca de uno de cada tres movimientos registrados representa un riesgo potencial para algún núcleo de población de la región (Tabla 2).

CONCLUSIÓN

Como respuesta a la necesidad de contar con un inventario de procesos de remoción en masa para el territorio nacional, se presentó una propuesta de construcción, la cual se ilustró con su aplicación en el sector sureste de la Sierra Norte de Puebla. Para ello, y debido a que la ocurrencia de procesos de remoción se genera tanto en función de la dinámica de la superficie terrestre, como de las mo-

dificaciones derivadas por actividades antrópicas, los componentes incluidos en el tipo de inventario propuesto, involucran ambos matices.

A pesar de que el propósito de este artículo no se centró en el análisis de la distribución espacio-temporal de la inestabilidad de laderas en la Sierra Norte de Puebla, sino en destacar la relevancia que tiene la creación de un inventario de procesos de remoción en masa en el ámbito nacional, es substancial enfatizar que a partir de contar con una base de datos precisa sobre dicha temática, es factible explorar de manera detallada la interacción entre elementos críticos –naturales y antrópicos– que determinan la inestabilidad de laderas en México. Entre los más importantes cabe señalar: las condiciones del relieve que crean mayor susceptibilidad a los movimientos (pendiente, orientación, tipo de perfil), el carácter geológico condicionante intrínseco (unidades litológicas, control estructural), las características edafológicas e hidrológicas, el papel de la ausencia-presencia de vegetación, el cambio de uso del suelo y las modificaciones a la superficie original del terreno.

REFLEXIONES Y RECOMENDACIONES

La inestabilidad de laderas por procesos de remoción en masa se puede considerar como una de las amenazas de origen natural más importantes en México debido al impacto que producen no sólo durante eventos extraordinarios, es decir, de alta magnitud y baja frecuencia, sino también en condiciones de baja magnitud y alta frecuencia. Lo anterior se expresa claramente con la ocurrencia de

Tabla 1. Fuentes de identificación de información para la construcción del inventario de procesos de remoción en masa; aplicación en el sector sureste de la Sierra Norte de Puebla (Murillo, 2007)

Método de detección o identificación	Número de procesos de ladera
Fotointerpretación imágenes IKONOS-2 (verificación de campo para algunos de ellos)	741
Archivos históricos	2
Visitas a campo	13

Tabla 2. Resultados preliminares de la caracterización de los movimientos de ladera del área de interés (adaptado de Murillo, 2007)

Categoría	Número de procesos	Porcentaje con respecto al total de la categoría
Total de PRM en la zona de aplicación del inventario	756	100
<i>Tipología</i>		
Deslizamientos	420	55.55
Caídas o desprendimientos	116	15.34
Flujos	31	4.10
Movimientos complejos	169	22.35
Sin catalogar	20	2.64
<i>Litología</i>		
Procesos localizados en rocas ígneas	488	64.55
Procesos localizados en rocas sedimentarias	198	26.19
Procesos localizados en rocas metamórficas	63	8.33
Sin catalogar	7	0.92
<i>Grado de actividad</i>		
Movimientos activos	615	81.34
Movimientos inactivos	62	8.20
Sin catalogar	79	10.44
<i>Uso de suelo</i>		
Procesos localizados en zonas con vegetación natural	57	7.53
Procesos localizados en zonas con vegetación secundaria o área agrícola y de pastizal	629	83.20
Procesos localizados en zonas urbanas	39	5.15
Banco de material	1	0.13
Equipamiento carretero	4	0.52
Industria	3	0.39
Sin catalogar	23	3.04
<i>Riesgo</i>		
Representan un riesgo potencial para la población	228	30.15

movimientos de ladera desencadenados durante la época de lluvias, aunque también es importante considerar que este tipo de procesos puede ocurrir a consecuencia de sismicidad, o bien por erupciones volcánicas.

Al ser los procesos de remoción en masa poco estudiados en México, la falta de información se puede convertir en un obstáculo de gran trascen-

dencia para la correcta evaluación de su impacto potencial. La necesidad de crear conocimientos básicos y aplicados relacionados con este tipo de fenómenos ha llevado, entre otras cosas, a la construcción de inventarios nacionales en diversas partes del mundo. La información contenida en dichas bases de datos ha sido empleada en numerosas ocasiones como punto de partida para

analizar la distribución espacio-temporal de los movimientos y entender las interrelaciones de los factores que determinan sus mecanismos y complejidad.

Idealmente, la propuesta debería ser evaluada por expertos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), con el objetivo de analizar la pertinencia de los campos sugeridos, así como de brindar una retroalimentación con miras a la instauración, desarrollo y actualización permanente del inventario. Además de ello, sería importante que una fase inmediata posterior a dicha evaluación involucrara su implementación en un SIG especializado y centralizado en el mismo CENAPRED. Lo anterior con la idea de que fuera alimentado por la información generada en toda la República Mexicana, y que sirviera de apoyo tanto a los expertos en la materia, como a las instituciones de Protección Civil correspondientes.

Finalmente, cabe destacar que la idea esencial de contar con un inventario nacional de procesos de remoción en masa se origina más allá del simple objetivo de entender los mecanismos de los movimientos desde una perspectiva de ciencia básica, y con la intención concreta de aplicar dicho conocimiento en el ámbito específico de la prevención de desastres.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por PAPIIT mediante el proyecto de investigación IN304306-3, en el cual Fran Giselle Murillo García participó como becaria. De igual manera, se agradece el financiamiento concedido por CONACYT a través del proyecto de investigación de ciencia básica 49844, y a los ingenieros Manuel García Espinosa de los Reyes y Wilfrido Gutiérrez López del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México por su apoyo técnico. Finalmente, se reconoce la labor de dos revisores anónimos: gracias por sus observaciones y sugerencias para mejorar este trabajo.

REFERENCIAS

- Aharonson, O., M. T. Zuber and G. A. Neumann (1998), "Mars: Northern hemisphere slopes and slope distributions", *Geophysical Research Letters*, 25, 24, pp. 4413-4416.
- Alcántara-Ayala, I. (2000), "Landslides: ¿Deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 41, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-25.
- Alcántara-Ayala, I. (2004), "Hazard assessment of rainfall induced landsliding in Mexico", *Geomorphology*, no. 61, pp. 19-40.
- Alcántara-Ayala, I. y L. A. Echevarría (2001), *Cartilla de diagnóstico preliminar de inestabilidad de laderas*, CENAPRED, Secretaría de Gobernación, México.
- Alcántara-Ayala, I., O. Esteban-Chávez and J. F. Parrot (2006), "Landsliding related to land-cover change: a diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico", *CATENA*, núm. 65, 2, pp. 152-165.
- Alger, C. and E. Brabb (2001), "The development and application of a historical bibliography to assess landslide hazard in the United States", in Glade, T. et al., *The use of historical data in Natural Hazard Assessments*, Advances in Natural and Technological Hazards Research, Kluwer Academic Publishers, Holanda, pp. 185-199.
- Al-Homoud, A. S. and T. Tubeileh (1997), "An inventory for evaluating hazard and risk assessment of cut slopes in weak rocks along highways", *Bulletin -International Association of Engineering Geology*, no. 55, pp. 39-51.
- Anderson, M. G. and K. S. Richards (eds.; 1987), *Slope Stability*, Wiley, Chichester.
- Ayenew, T. and G. Barbieri (2005), "Inventory of landslides and susceptibility mapping in the Dessie area, northern Ethiopia", *Engineering Geology*, 77, no.1-2, pp. 1-15.
- Calcaterra, D. and M. Parise (2001), "The contribution of historical information in the assessment of landslide hazard", in Glade et al., *The use of historical data in Natural Hazard Assessments, Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Kluwer Academic Publishers, Holanda, pp. 201-215.
- Chau, K. T., R. H. C. Wong, J. Liu and C. F. Lee (2003), "Rockfall Hazard Analysis for Hong Kong Based on Rockfall Inventory", *Rock Mechanics and Rock Engineering* 36, no. 5, pp. 383-408.

- Chau, K. T., W. Y. Wong, E. L. Fong, L. C. P. Chan, Y. L. Sze and M. K. Fung (2004), "Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS", *Computers and Geosciences* 30, no. 4, pp. 429-443.
- Chuan, T. and J. Grunert (1999), "Inventory of landslides triggered by the 1996 Lijiang earthquake, Yunnan Province, China", *Chikei* 20, no. 3, pp. 335-349.
- Crozier, M. J. (1984), "Techniques for the morphometric analysis of landslides", in Brunsden, D. y D. Prior (eds.), *Slope instability*, Wiley and Sons.
- Dellow, G., P. J. Glassey, B. Lukovic, P. R. Wood and B. Morrison (2003), "Data sources of the New Zealand Landslide database", *European Geophysical Society*, 5.
- Dikau, R., D. Brunsden, L. Schrott and M. L. Ibsen (1996), *Landslide recognition. Identification, movements and causes*, Wiley, Chichester, England.
- Duman, T. Y., M. Keçer, A. Dogcaronan, S. Ates, S. Durmaz, T. Çan and Ö. Emre (2005), "Landslide inventory of northwestern Anatolia, Turkey", *Engineering Geology* 77, no.1-2, pp. 99-114.
- Glade, T. (2001), "Landslide hazard assessment and historical landslide data", in Glade *et al.*, *The use of historical data in Natural Hazard Assessments*, Advances in Natural and Technological Hazards Research, Kluwer Academic Publishers, Holanda, pp. 154-168.
- Glade, T., F. Felix and P. Albini (2001), *The use of historical data in Natural Hazard Assessments*, Advances in Natural and Technological Hazards Research, Kluwer Academic Publishers, Holanda.
- Gómez-Tagle Chávez, A. y Y. Chávez Huerta (2004), "Cálculo de la distribución espacial de la insolación potencial en el terreno empleando MDE en un ambiente SIG", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 55, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-22.
- Guimaraes, R. F., R. A. T. Gomes, O. A. de Carvalho Junior, R. Montgomery David, H. M. Greenberg and N. F. Fernandes (2003), "Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro", *Engineering Geology*, 69, 1-2, pp. 98-108.
- Hansen, A. (1984), "Landslide hazard analysis", in Brunsden, D. y D. Prior D., *Slope instability*, pp. 553-595.
- Hervas de Diego, J., J. I. Barredo, P. L. Rosin, A. Pasuto, F. Mantovani and S. Silvano (2003), "Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy", *Geomorphology*, no. 54, pp. 63-75.
- Ibsen, M. L. and D. Brunsden (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 of Wight", *Geomorphology*, vol. 15, pp. 241-258.
- Ibsen, M. L., D. Brunsden, M. Lee and R. Moore (1995), "The validity of temporal archive records for geomorphological processes", *Quaestiones Geographicae*, no. 4, pp. 79-92.
- IPCC (2001), *Climate Change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge UK.
- Jennings, P. J. and H. J. Siddle (1998), *Use of landslide inventory data to define the spatial location of landslide sites, South Wales, UK*, Geological Society Publishing House, United Kingdom.
- Lewis, S. G. and J. F. Birnie (2001), "Little ice age alluvial fan development in Langedalen, western Norway", *Geografiska annaler: Series A, Physical Geography* 83(4), pp. 179-190.
- Ludwin, R., C. P. Thrush, K. James, D. Buerge, C. Jonientz-Trisler, J. Rasmussen and A. Troost K, de los Ángeles (2005), "Serpent spirit-power stories along the Seattle fault", *Seismological Research Letters*, 76, 4, pp. 426-431.
- Lugo, J., J. J. Zamorano, L. Capra, M. Inbar e I. Alcántara-Ayala (2005), "Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: causa y efectos", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 22, pp. 212-228.
- Malet, J.-P., L. Descroix, M. Esteves, J.-P. Vandervaere, E. Truchet, A. V. Auzet, O. Maquaire and B. Ambroise (2003), "Soil surface characteristics influence on infiltration in black marls: application to the super-sauze earthflow (southern Alps, France)", *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 5, pp. 547-564.
- Murillo García, F. G. (2007), *Elaboración de un inventario de procesos de remoción en masa: aplicación en la porción sureste de la Sierra Norte de Puebla*, tesis de Licenciatura (inérita), Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Nichol, J. and M. S. Wong (2005), "Satellite remote sensing for detailed landslide inventories using change detection and image fusion", *International Journal of Remote Sensing*, 26, no. 9, pp. 1913-1926.
- Parise, M. (2000), "Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard", *Phys. Chem. Earth*, vol. 26, no. 9, pp. 697-703.
- Rizzo, V., F. Fragale and O. Terranova (2001), in Glade, T. *et al.*, *The use of historical data in Natural Hazard Assessments*, Advances in Natural and Technological Hazards Research. Kluwer Academic Publishers, Holanda, pp. 169-183.

- Stoffel, M. and M. Beniston (2006), "On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: a case study from the Swiss Alps", *Geophysical Research Letters*, 33.
- Turcotte, D. L., B. D. Malamud, F. Guzzetti and P. Reichenbach (2006), "A general landslide distribution applied to a small inventory in Todi, Italy", *Fractal analysis for Natural Hazards*, -/261, Geological Society Special Publication, United Kingdom, pp. 105-111.
- US Geological survey: <http://landslides.usgs.gov/learningeducation/nisqually.php>
- van Westen, C. J., T. W. J. van Asch and R. Soeters (2006), "Landslide hazard and risk zonation –why is it still so difficult?", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, no.2, pp. 167-184.
- Viberg, L. (1988), "Inventory of the needs of research on slope stability and landslides in Sweden", in Bonnard, C. (ed.), *Landslides. Proc. 5th symposium, Lausanne, 1988*, vol. 2, Balkema, pp. 1245-1250.
- Wegmann, K. (2005), *Digital landslide inventory for the Cowlitz County Urban Corridor, Cowlitz County, Washington*. Report of Investigation XX.
- WP/WLI (1990), *A suggested method for reporting a landslide*, *Bulletin International Association of Engineering Geology*, 41, International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, pp. 5-12.
- WP/WLI (1991), *A suggested method for a landslide summary*, *Bulletin International Association of Engineering Geology*, 43, International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, pp. 101-110.
- WP/WLI (1993a), *A suggested method for describing the activity of a landslide*, *Bulletin International Association of Engineering Geology*, 47, International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, pp. 53-57.
- WP/WLI (1993b), *Multilingual Landslide Glossary*, Bitech, Richmond, International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, British Columbia.
- WP/WLI (1994), *A suggested method for describing the causes of a landslide*, *Bulletin International Association of Engineering Geology*, 50, International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, pp. 71-74.