



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA**

**DIAGNÓSTICO DE ELEMENTOS EN RIESGO POR INESTABILIDAD DE
LADERAS EN EL MUNICIPIO DE TEZIUTLÁN, PUEBLA**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

MTRO. RICARDO JAVIER GARNICA PEÑA

DIRECTORA DE TESIS

DRA. IRASEMA ALCÁNTARA AYALA
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, MARZO, 2021



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.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. Marco teórico	6
I. Percepción Remota.....	6
II. Antecedentes históricos.....	8
III. Elementos básicos de la percepción remota.....	9
IV. Aplicaciones de la percepción remota.....	10
V. Percepción remota y geomorfología.....	10
VI. Sensores y plataformas usados en geomorfología.....	12
VII. Aplicaciones de la percepción remota en geomorfología (amenazas naturales) .	13
Sismicidad.....	14
a) Evaluación pre-evento	15
b) amenazas indirectas.....	15
c) Evaluación post-evento.....	16
Actividad volcánica.....	17
Inundaciones.....	19
Procesos de remoción en masa.....	22
a) Uso de imágenes de satélite	23
b) Monitoreo con Sistemas de Posicionamiento Global.....	24
c) Imágenes de Radar y uso de LiDAR.....	25
d) Imágenes de muy alta resolución espacial.....	27
REFERENCIAS.....	28

CAPÍTULO II. The use of UAVs for landslide disaster risk research and disaster risk management: a literature review.	42
CAPÍTULO III. Multi-temporal Landslide Evaluation by Using UAV: Some Insights on Disaster Risk in Teziutlán, Puebla México.	72
CAPÍTULO IV. On the Use of UAVs for Landslide Exposure of Households: La Gloria Neighbourhood, Teziutlán, Puebla.	85
CAPÍTULO V. Landslide Exposure Community-Based Mapping: A First Encounter in a Small Rural Locality of Mexico.	96
CAPÍTULO VI. Landslide disaster risk awareness in Mexico: community access to mapping at local scale.	108
CAPÍTULO VII. Percepción y comunicación del riesgo de desastre.	127
CONCLUSIONES GENERALES.	146

I. INTRODUCCIÓN

La geomorfología, disciplina geológico-geográfica, está encargada del análisis de los procesos que dan origen y transforman el relieve de la superficie terrestre, incluso aquellas áreas cubiertas por superficies de agua (Lugo, 1988; Lugo, 2011). Como muchas disciplinas, la geomorfología ha evolucionado de la simple descripción de los elementos y procesos del terreno hasta el análisis cuantitativo, basado en datos, de la dinámica del relieve. Dicho análisis ha evolucionado junto con los avances tecnológicos, y se ha apoyado en una diversidad de instrumentos que le permiten adquirir información, directa e indirecta, de cada uno de los procesos que antes eran sólo descritos pero que hoy son validados o reforzados empleando la información recabada a partir de diversas técnicas de investigación (Rosenfeld, 1994; Butler y Walsh, 1998; Slaymaker, 2001; Bishop *et al.*, 2012).

Las técnicas en geomorfología pueden dividirse en dos grandes grupos: aquellas que recaban información de forma directa en el campo y las que requieren de datos que son adquiridos por equipos instalados o usados en lugares o sitios remotos. En esta segunda categoría se puede considerar a la percepción remota (PR) como una herramienta de gran relevancia debido a que aporta gran cantidad de información del objeto de estudio de la geomorfología; el relieve terrestre. De forma particular, las imágenes que se obtienen de diferentes tipos de sensores, ya sea en plataformas espaciales, aéreas, marítimas o terrestres, permiten realizar estudios en las diversas ramas de la disciplina, en ambientes montañosos, llanuras, mesetas, zonas tropicales, glaciales, desérticas, en sitios predominantemente volcánicos, sedimentarios y metamórficos o la combinación de todas, así como zonas sujetas a una constante actividad tectónica. De esta forma, hay que resaltar que la escala de trabajo es un punto para considerar ya que de esto dependerá, en gran medida, la factibilidad de los insumos a utilizar (Butler y Walsh, 1998; Bishop *et al.*, 2012).

La PR es una herramienta de amplio uso en estudios geomorfológicos centrados en diversos procesos tales como las amenazas naturales (sismos, erupciones volcánicas, inundaciones, deslizamientos de tierra). Dichos procesos terrestres dan origen a nuevas formas de relieve, y también son agentes transformadores del terreno (Van Westen, 2013). Desde la perspectiva de la reducción del riesgo de desastre, estos fenómenos tienen gran relevancia debido a su transformación en riesgos, a partir de elementos de construcción social, que con frecuencia derivan en desastres con alto impacto social y económico para las naciones, regiones o localidades afectadas (Alcántara-Ayala, 2002; Alcántara-Ayala, 2010).

Es por esto por lo que los científicos de las ciencias de la Tierra (geólogos, geógrafos, geomorfólogos, geofísicos, etc.) hacen uso de las técnicas de PR para entender y caracterizar a los procesos, llamados amenazas naturales, a partir del uso de imágenes y datos que se recaban desde diferentes tipos de sensores y plataformas (Tralli *et al.*, 2005; Bishop, 2013).

En este tenor, este trabajo tiene como objetivo mostrar el uso de las herramientas de PR para el estudio de la inestabilidad de laderas, proceso geomorfológico que en presencia de población es considerado una amenaza natural, cuyas consecuencias pueden ser adversas para

la vida y sus bienes. El estudio busca demostrar la utilidad de una nueva plataforma que permite la adquisición de imágenes a mayor escala, facilitando la identificación y estudio del fenómeno en áreas que otras plataformas no tienen la capacidad. Asimismo, esta investigación también aborda el uso de dicha plataforma en un contexto social, en donde no sólo es importante la interpretación de la información física o natural sino también de los elementos sociales que se encuentran expuestos.

Los denominados Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) denominados UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) o RPAS (*Remotely Piloted Aerial System*) constituyen dicha plataforma. Estos equipos se han convertido en una herramienta fundamental debido a la practicidad y facilidad con la cual puede adquirirse información del terreno en periodos cortos de tiempo. Esto ha sido parte fundamental para que sean empleados en diversos campos del conocimiento y con el paso de los años han venido a complementar al campo de la PR, particularmente en el campo de las plataformas y sensores.

Entre las plataformas, los VANT presentan grandes ventajas con respecto a otras de tipo aéreo ya que su tamaño los hace equipos que pueden ser transportados fácilmente y el costo de estos es infinitamente inferior al de las grandes, e históricas, plataformas aéreas, ejemplo las avionetas empleadas en la aerofotografía. Esta ventaja también es su gran limitación debido a que es imposible cubrir extensas áreas del terreno, sin embargo, el uso de los VANT está pensado para estudios locales y zonas donde el acceso representa una alta dificultad.

Hablar de los VANT como una herramienta de la PR es también considerar a los sensores. Estos equipos que registran la información electromagnética también han evolucionado y ya no son más los instrumentos de grandes dimensiones, sino que se han miniaturizado para poder montarlos en nuevas plataformas (terrestres o aéreas) y así adquirir información a mayor escala. De esta manera las cámaras (ópticas, multispectrales, térmicas), radares o sistemas de escaneo laser, que se encuentran en los satélites o aeronaves de gran tamaño, ahora se montan en estos pequeños dispositivos y se utilizan para el estudio de los procesos naturales y humanos. La geomorfología no es ajena a este desarrollo tecnológico y también hace uso de estos insumos para generar información nueva y precisa de procesos terrestres a mayor escala.

Esta investigación se enfoca en desarrollar un estudio de procesos de remoción en masa, así como del riesgo de la población expuesta, utilizando esta nueva tecnología a fin de mostrar las capacidades y limitaciones de los VANT en estudios geomorfológicos y de exposición a las amenazas naturales. El trabajo incluye la configuración del equipo, levantamiento de imágenes aéreas, procesamiento de los datos y creación de productos cartográficos, el análisis de la exposición y la percepción del riesgo de desastre asociado a eventos de inestabilidad de laderas, todos estos temas abordados a partir de la publicación de seis trabajos de investigación que desarrollan y describen el uso de imágenes, derivadas de VANT, en el análisis del riesgo y la percepción por parte de la población expuesta.

Este trabajo se ha dividido en siete capítulos. El primero de ellos es un recorrido teórico-conceptual del uso de la PR en estudios de amenazas naturales, tales como sismos, erupciones volcánicas, inundaciones e inestabilidad de laderas. Se hace una revisión general y breve de la PR, sus antecedentes, desarrollo y aplicaciones, particularmente aquellas que se realizan en el campo de la geomorfología y los procesos que se consideran como amenazas geológico-geomorfológicas.

El segundo capítulo involucra una publicación científica donde se llevó a cabo un análisis bibliométrico de los estudios que se han desarrollado en el tema de inestabilidad de laderas a partir del uso de VANT. Esta investigación abarca una revisión bibliográfica, en el periodo 2005-2019, de trabajos enfocados a procesos de remoción en masa y que emplearon drones para diferentes etapas de evaluación de riesgo, monitoreo, cartografía o desarrollo de inventarios de eventos ocurridos. Cabe destacar que en este estudio también se realiza un análisis de las técnicas, métodos y tipos de equipos VANT que se están utilizando, a nivel mundial, en investigaciones relacionadas, principalmente, a la amenaza que representa la inestabilidad de laderas. Este trabajo muestra el camino que están tomando las investigaciones alrededor del mundo, pero también brinda una señal de la oportunidad que representa la aplicación de la tecnología VANT al estudio de la vulnerabilidad y la exposición de elementos en riesgo (población, bienes, vías de comunicación, etc.).

Una comparación espacio-temporal del crecimiento urbano y la creciente exposición a la amenaza por la inestabilidad de laderas, forma parte del tercer capítulo. Esta investigación se realizó en una colonia de la ciudad de Teziutlán, Estado de Puebla, considerando un catálogo de fotografías aéreas antiguas junto con una serie de tomas realizadas con un VANT en el año de 2016. Cabe mencionar la relevancia que tiene esta ciudad no sólo como centro económico de la porción oriental de la Sierra Norte de Puebla sino porque en octubre de 1999 en este municipio un desastre desencadenado por un deslizamiento de tierra, en el cual más de un centenar de personas fallecieron. En este estudio se realizó una evaluación del crecimiento de la mancha urbana tomando como referencia inicial fotografías del año 1942; a partir de esta fecha y usando fotografías de los años 1956, 1974, 1991, 2007 y 2016 se estimó la creciente exposición de las viviendas a la inestabilidad de laderas.

El capítulo cuatro consiste en la evaluación, a nivel local, de la exposición de las viviendas a la inestabilidad de laderas en la colonia La Gloria que forma parte del área urbana de Teziutlán. Dicha evaluación consistió en un levantamiento aerofotográfico y recorrido en campo, y sirvió para definir criterios físicos y de ubicación de las casas con el objetivo de identificar el grado de exposición de las estructuras ante la ocurrencia de los procesos de ladera. Los materiales cartográficos, derivados de las imágenes aéreas, permitieron identificar, gracias a su alta resolución espacial, algunas de las características físicas de las viviendas. Por otro lado, los modelos digitales del terreno fueron empleados para extraer las propiedades geométricas del relieve, por ejemplo, la pendiente y la forma de la ladera. Hay que destacar que este trabajo es uno de los primeros que se desarrolla utilizando imágenes de VANT para el análisis de la exposición de elementos en riesgo por inestabilidad de laderas.

En el quinto capítulo se aborda un trabajo que considera la conexión entre las evaluaciones de la amenaza, por inestabilidad de laderas, y el riesgo (tópicos presentados en capítulos anteriores) con trabajos realizados con las comunidades para identificar la percepción y los juicios que las personas emiten con respecto a la exposición, la prevención y la concientización sobre el tema de los riesgos de desastre por inestabilidad de laderas. Este capítulo aborda el uso de los VANT a una escala local con el fin de evaluar la exposición y desarrollar una estrategia de cartografía comunitaria participativa empleando productos cartográficos derivados de imágenes aéreas como base para analizar la percepción del riesgo a nivel local/comunitario. Por medio de la impresión, en gran formato, de mapas y mosaicos fotográficos, se trabajó con la población para que identificara los elementos en riesgo de su comunidad, así como síntomas de inestabilidad y factores que pudieran influir en la ocurrencia de procesos de remoción en masa, por ejemplo, sitios deforestados.

Como parte de la comunicación del riesgo de desastre y el acceso de la información local por parte de autoridades y población en general, el sexto capítulo aborda el trabajo que se realizó, en conjunto con personal de Protección Civil y de Seguridad Pública, en diversas colonias y localidades de Teziutlán (expuestas a la inestabilidad de laderas) con la intención de resaltar la relevancia que tiene la creación de materiales bibliográficos y cartográficos para comunicar y difundir, entre la población y autoridades, los factores inductores del riesgo de desastre. A través de un número significativo de encuestas pudo identificar la proporción de población expuesta a este tipo de fenómeno natural, así como la percepción de la población con respecto a las actividades o acciones a considerar para comunicar el riesgo en los sitios con mayor exposición.

El último capítulo es un estudio desarrollado, junto con académicos de las Facultades de Medicina y Psicología, en siete colonias del municipio de Teziutlán y que tuvo como objetivo principal analizar la percepción, la experiencia y la comunicación del riesgo en habitantes de sitios expuestos a la ocurrencia de procesos de remoción en masa. En este trabajo se evaluó la experiencia ante eventos pasados, la sensibilización y conocimiento de las personas ante el tema de la inestabilidad de laderas, la exposición de las viviendas y de las personas, los medios de comunicación y su papel en el proceso de compartir la información referente al tema y, por último, la confianza en autoridades y diferentes entes de la sociedad civil.

Para finalizar se considera relevante mencionar que este trabajo, enfocado en el aspecto académico, también poder ser considerado como una serie de propuestas que pueden ser tomadas en cuenta en el ámbito de la reducción de riesgo de desastre.

La primera de las prioridades del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, 2015), la cual tiene como objetivo la comprensión del riesgo de desastres, es la base conceptual primordial para el desarrollo de esta serie de estudios cuyos objetivos se centran en identificar y comprender los diversos factores que componen la construcción del riesgo de desastre por procesos de remoción en masa. Dicha comprensión debe darse o fomentarse en todas las dimensiones de vulnerabilidad, capacidad, grado de exposición de personas y bienes, así como las características de las amenazas y entorno.

Asimismo, dentro de esta prioridad del Marco de Sendai, a través de este trabajo fue posible fomentar la recopilación, el análisis y el uso de datos pertinentes e información práctica para así garantizar la difusión teniendo en cuenta las necesidades de las diferentes categorías de usuarios (en el caso de este trabajo participando junto con estudiantes, civiles y autoridades de Protección Civil y Seguridad Pública).

Además de los puntos anteriores, cabe destacar que los estudios incluidos en este trabajo abordan, y aportan, en las acciones recomendadas por el Marco de Sendai relacionado con la difusión de información sobre el riesgo de desastres basada en la ubicación, incluyendo mapas de riesgos, para los encargados de adoptar decisiones (Protección Civil, autoridades municipales y comunitarias), el público en general y las comunidades con riesgo de exposición a los desastres, empleando formatos adecuados y utilizando tecnologías de información geoespacial (Sistemas de Información Geográfica y Vehículos Aéreos No Tripulados - VANT).

CAPÍTULO I. Marco teórico

Visualizar y entender los diferentes procesos naturales y humanos que ocurren en la superficie terrestre ha sido uno de los objetivos de la humanidad a fin de aprovechar los recursos, planificar el desarrollo humano y comprender la dinámica, y la causa, de los eventos naturales que demuestran el dinamismo del planeta (Chuvieco, 2002).

El ser humano, como ente pensante, ha tratado de comprender los diferentes procesos que lo rodean a fin de obtener respuestas y buscar resolver problemas. En los inicios de la humanidad, sólo podía buscar analizar los elementos que se encontraban a simple vista y desconocía aquellos que se encontraban en otros puntos más distantes, razón por la cual, muchas civilizaciones desconocían que había otros grupos humanos en otras partes del mundo “no conocido” hasta ese momento. Asimismo, cuando se realizaban exploraciones, a fin de conocer nuevos territorios, se llevaban a cabo descripciones de los objetos, fenómenos, costumbres y características de las nuevas tierras, pero desafortunadamente era imposible tener un registro permanente de los mismos, salvo las ilustraciones o aquellos objetos que pudieran ser extraídos de esas zonas en reconocimiento (Khorram *et al.*, 2012).

Se requería de nuevas formas de explorar y de ver, desde otro punto de vista o ángulo, los territorios a fin de evaluar de mejor manera las condiciones físicas y humanas que guardaba el espacio habitado y no habitado (Chuvieco, 2002).

Pasados varios milenios y a mediados del siglo XIX se dieron los primeros pasos para realizar reconocimientos visuales y registros permanentes de la superficie de la Tierra y así poder identificar los diferentes elementos que la componían, pero ahora vistos desde otra perspectiva (Konecny, 2003). Fue así como se dieron los primeros pasos de lo que hoy llamamos percepción remota o Teledetección.

I. Percepción Remota

La Percepción Remota (PR) ha sido definida de diversas formas, sin embargo, la mayoría de los autores coinciden en que es la adquisición de información de las características de un objeto, superficie o fenómeno por medio del uso de un equipo o instrumento sin que este último entre en contacto directo con el elemento que se pretende analizar o investigar.

Chuvieco (2002) considera, además de los antes mencionado que la PR no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su procesamiento o tratamiento. Es una técnica aplicada y depende, en gran medida, del estado de desarrollo tecnológico presente. Es por esta razón que los elementos tecnológicos y humanos que lo sustentan han evolucionado con el paso del tiempo.

Es un método para obtener información de objetos distantes y considerando que no existe contacto con dichos objetos es lo que Konecny (2003) define como PR.

Lillesand *et al.* (2004) definen a la PR como ciencia y arte de obtener o adquirir información de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos a través de un instrumento o equipo que no está en contacto con dicho elemento en investigación.

Mather y Koch (2011) la definen como una ciencia que comprende el análisis y la interpretación de mediciones de la radiación electromagnética que es emitida por los objetos y queda registrada por un instrumento que no entre en contacto con el mismo.

En otro tenor, Campbell y Wynne (2011), retomando diversas definiciones, consideran la PR como la práctica que deriva en la obtención de información de la superficie terrestre usando imágenes adquiridas desde una perspectiva aérea y que son resultado del registro de la energía electromagnética emitida o reflejada por la superficie.

Por su parte, Rees (2014) considera, de forma muy general, que la PR es la colección de información de un objeto sin el contacto físico con este. Para Salomonson (2014) es una técnica para obtener información acerca de los objetos a través del análisis de datos colectados o registrados a través de instrumentos, llamados sensores, que no están en contacto físico con el objeto de investigación.

Inspirados en el trabajo de Sabins (1978), Samantha y Andrew Lavender (2017) definen a la PR como la capacidad de conocer un objeto o elemento sin estar en contacto físico con el mismo. Para ambos, es esencialmente la recolección de datos a partir de diversos sensores los cuales se montan en diversas plataformas (que pueden ser aeronaves, satélites, vehículos terrestres, cámaras, etc.).

Como se puede observar, y a manera de resumen, en general los autores y estudiosos del tema consideran a la PR como la obtención de información de elementos terrestres (naturales y humanos) a partir del uso de instrumentos que miden, sin estar en contacto físico con el elemento, la energía que emite o refleja todo aquel componente de la zona o área de la cual se busque adquirir información. Este proceso no se limita sólo a la dinámica a nivel planetaria sino incluso a escalas más grandes y con mayor detalle, sin embargo, es importante mencionar que en general la definición de cada autor dependerá en gran medida del objetivo o tema que se desea desarrollar, siendo así común el asociar a la PR con cuestiones espaciales, en la mayoría de los casos y menos con estudios a escalas mayores o de gran detalle. En la actualidad, el término de PR comienza a dar cabida a todo aquello que tiene que ver con los levantamientos aéreos con drones, de esta manera las técnicas empleadas en el uso de VANT siguen teniendo sus bases en la fotogrametría, pero con la aparición de nuevos sensores para este tipo de equipos ahora se llevan a cabo metodologías que hace algunos años correspondían, exclusivamente, a la PR aplicada con imágenes de satélite. Esto nos lleva a repensar en las nuevas posibilidades de la PR y sus aplicaciones en ámbitos naturales y sociales, en este último con poco desarrollo por parte de la PR tradicional.

II. Antecedentes históricos

Diversos autores (Chuvienco, 2002; Konecny, 2003; Elachy y van Zyl, 2006; Campbell y Wynne, 2011; Khorram *et al.*, 2012; Rees, 2014; Lavender y Lavender, 2017) coinciden en que las bases de la PR, como la conocemos actualmente, se dieron en la mitad del siglo XIX, sin embargo, es necesario decir que también se menciona que estos antecedentes pueden provenir desde la Grecia antigua y algunos de los estudios que se realizaron en ese momento. Es importante dejar claro, que gran parte del desarrollo y evolución de la PR está ligada, sobremanera, a los avances tecnológicos en el tema de sensores, así como de la aeronáutica misma, sin olvidar, que, en una parte importante de la historia, los conflictos bélicos dieron impulsos importantes a este tipo de avances tecnológicos.

Para efectos prácticos y coincidiendo con la mayoría de los autores los inicios de la PR se dieron entre 1840 y 1859 cuando, de acuerdo con Samantha y Andrew Lavender (2017) así como Chuvienco (2002), se dieron los primeros ensayos por capturar imágenes usando como plataformas diferentes tipos de globos cautivos o manejados. Por un lado, en 1840, se dieron los primeros intentos para tomar fotografías aéreas desde globos, y el objetivo primordial era usar estas imágenes para analizar los elementos del sitio observado (Lavender, 2017). Para 1859 se considera que fue tomada la primera fotografía aérea, por parte de Gaspar Felix de Tournachon, hazaña que sería repetida un año después por James Wallace en la ciudad de Boston (Chuvienco, 2002).

Para inicios del siglo XX, 1909, Wilbur Wright obtuvo la primera fotografía aérea y esto dio paso al desarrollo tecnológico y científico que sentaría las bases de la toma de fotografías aéreas (Chuvienco, 2002; Lavender, 2017).

Años más tarde, la Primera Guerra Mundial, significó un gran impulso al avance tecnológico y al análisis de fotografías aéreas, lo que se manifestó también décadas más tarde con la Segunda Guerra Mundial (Chuvienco, 2002). Las campañas de reconocimiento aéreo para espiar al enemigo o definir la mejor estrategia de ataque demostraron que la PR (en este caso usando cámaras aéreas) estaba dando pasos importantes para establecerse como una herramienta en donde el campo de estudio estaba virgen para el desarrollo de nuevas tecnologías. Una de las nuevas tecnologías desarrolladas durante la etapa de la Segunda Guerra fue la aparición y uso del radar.

Durante la Guerra Fría, la carrera espacial, dio lugar a la búsqueda y desarrollo de tecnología que permitiera la adquisición de imágenes desde el espacio. Los avances soviéticos (el Sputnik 1) así como los de Estados Unidos (TIROS, Proyectos Apollo) sentaron las bases para diversos proyectos que incluían fotografías desde el espacio, sensores meteorológicos y de la superficie terrestre. De esta manera aparecieron las primeras fotografías desde el espacio (1961), las imágenes del proyecto Landsat 1 (1972), Skylab en 1973, el satélite oceanográfico Seasat (1978), el proyecto SPOT (1986), IRS-1 para 1988, y en 1991 el proyecto europeo ERS-1. A partir de aquí, el desarrollo y aparición de nuevas tecnologías tomó mayor impulso y en los

últimos 30 años han aparecido diversos sensores que monitorean la superficie terrestre y adquieren una enorme cantidad de información que debe ser administrada y procesada y que se aplica en una infinidad de investigaciones en diversos campos del conocimiento.

III. Elementos básicos de la Percepción Remota

En términos generales, la PR consiste en la detección de la energía reflejada por los objetos, a diferentes escalas, a nivel planetario sería la energía reflejada por la superficie terrestre, mientras que a escala local lo sería, por ejemplo, una zona agrícola o urbana. Esta energía registrada está relacionada con el espectro electromagnético, el cual abarca desde las ondas de radio (de larga longitud) hasta las ondas con frecuencias altas y baja longitud (como los rayos gamma).

Chuvieco (2002) considera que los elementos básicos de la PR son: la fuente de energía; superficie a capturar (que refleja la energía a coleccionar); sensor y plataforma; sistema de recepción; intérprete o agente de procesamiento (manual/automatizado); usuario final de la información generada.

En la detección de la energía reflejada se manejan dos tipos de sensores, los pasivos y los activos. Los primeros, registran la radiación emitida o reflejada por un objeto (Lavender, 2017). Dentro de estos sensores predominan los ópticos, aquellos que registran la luz reflejada.

A diferencia de los sensores pasivos, los activos emiten su propia energía y este mismo sensor se encarga de la colección y medición de la intensidad y tiempo de la señal de retorno. Ejemplos de este tipo de sensores, el radar y el LiDAR.

Algo a destacar es que la misma zona u objeto puede ser analizado con diferentes sensores y así coleccionar información sobre las diferentes características de un mismo objeto o superficie.

En la tabla 1 se presentan las plataformas más comunes, así como los sensores y la energía registrada (ya sea que sean pasivos o activos). Una plataforma puede transportar uno o más sensores.

Plataformas	Sensores
Satélite	Sensor en el espectro visible
Transbordador espacial	Sensores en infrarrojo (cercano y medio)
Avión/avioneta	Sonar
Helicóptero	Laser
VANT	Radar
Globo aerostático	
Automóvil	
Grúa	
Barco	
Submarino	
*Teléfono celular	

Tabla 1. Plataformas y sensores más empleados en aplicaciones de PR. * Actualmente algunos teléfonos de nueva generación incluyen sensores activos de tipo LiDAR.

IV. Aplicaciones de la Percepción Remota

La clave principal de la PR consiste en que no es necesario estar presente en el área en estudio para obtener información de esta, lo cual, de cierta manera, es cierto, sin embargo, como se abordará más adelante, tiene una excepción en el caso de los VANT. Pero en gran parte, esta es la fundamentación y justificación de la PR, acceder a información de diversos lugares aún sin estar presente en los mismos.

El segundo punto al que se hace referencia como parte fundamental de la PR, es la posibilidad de crear archivos o catálogos históricos de los datos registrados o colectados. Esto permite la comparación espacio-temporal de los cambios en la superficie analizada.

Estos catálogos, conformados, por imágenes que provienen de diferentes sensores y plataformas, pueden ser utilizados en una gran variedad de estudios al igual que en diversos campos del conocimiento.

Estas áreas del conocimiento o áreas de aplicación pueden ser planificación territorial, monitoreo atmosférico y oceánico (Xiao *et al.*, 2013; Schutze *et al.*, 2016), tácticas en las fuerzas armadas, servicios de inteligencia, ciencias ambientales/de la Tierra (Moore, 1996; Kovacs, 2012), cambio climático (Del Castillo *et al.*, 2020; Mutowo, 2020), producción de alimentos, extracción y gestión de recursos (como agua, bosques, renovables/no renovables), aerofotografía, ayuda humanitaria -hambrunas, epidemias, migración-(Romer *et al.*, 2016; Quinn *et al.*, 2018), derechos humanos, riesgo de desastres (Ghaffarian *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2018), redes de distribución de mercancías, aseguradoras, actividades agrícolas (producción e impactos), turismo (tradicional y geositios), arqueología, mercado inmobiliario, expansión y evolución urbana, creación y actualización de cartografía (Chuvienco, 2002; Lillesand, 2004).

V. Percepción Remota y geomorfología

El rápido avance de las tecnologías geoespaciales ha derivado en grandes adelantos en campos como la geodesia, fotogrametría, geofísica, geografía, ciencias ambientales, geomorfología, entre otras.

En el campo de la geomorfología, Slaymaker (2001) hace mención que la PR constituye una herramienta poderosa que permite mejorar la exactitud y precisión de los trabajos enfocados en los procesos que dan lugar al origen y evolución del relieve. Además, considera que transforma a la geomorfología en una ciencia más global y de mayor participación en los problemas, de índole ambiental, así como de políticas enfocadas al mismo. Slaymaker considera también que la fotografía aérea, un insumo vital en la geomorfología, forma parte de la PR y que es una técnica que se ha usado en el estudio del relieve desde hace décadas. Esta ha demostrado ser una herramienta poderosa para generar información sobre litología, patrones de drenaje y una vasta cantidad de información sobre otros procesos geomorfológicos. Además, permite el estudio de grandes áreas que, en otras circunstancias de

estudio (por ejemplo, en campo), representarían obstáculos financieros y logísticos debido a la dificultad para acceder a ciertos sitios o zonas.

Higgitt & Warburton (1999) argumentan que las técnicas de PR proporcionaron ideas frescas a los estudios geomorfológicos desde 4 puntos de vista:

- Creación de nuevas aplicaciones en geomorfología
- Precisión, nueva y mejorada, en las mediciones de parámetros del terreno
- Proporciona nuevos datos para re-investigar ideas que no habían podido ser probadas con anterioridad
- Fomenta el nuevo desarrollo en las capacidades de registro y procesamiento de datos

Durante décadas se consideró a la geomorfología como una disciplina eminentemente de campo, sin embargo, ésta realizó un progreso también en el gabinete a partir del desarrollo de nuevas técnicas y la aparición de nuevas formas de analizar el relieve y sus cambios. Los experimentos en laboratorio, así como los modelos de simulación se volvieron herramientas complementarias que apoyaron en gran medida el trabajo de los geomorfólogos (Butler y Walsh, 1998). De esta misma forma, los SIG y la PR, dieron otro impulso a la disciplina permitiendo añadir análisis espacial y extracción de información a partir de una nueva perspectiva.

Walsh *et al.* (1998) afirman que los Sistemas de Información Geográfica y la Percepción Remota ofrecen la oportunidad de generar nuevas ideas en el campo de la geomorfología. Ambas pueden ser empleadas para examinar las formas del paisaje y su condición a través del análisis de la escala, patrones y procesos. De esta manera se da lugar a los análisis de detección de cambios, uso de modelos digitales del terreno, índices y variables geomórficas extraídas de imágenes (fotografías y satelitales).

En geomorfología, las fotografías aéreas son fundamentales, sin embargo, con la aparición de las primeras imágenes satelitales diversos estudios empezaron a utilizar esta fuente de datos a fin de explotar el nuevo banco de información que se estaba gestando. Uno de los primeros trabajos donde se emplean imágenes satelitales para estudios del relieve fue el estudio de Kayan y Klemas (1978), en el cual se emplearon imágenes Landsat (ERTS-1) para realizar una investigación de geomorfología y geología estructural en el suroeste de Turquía. Kayan utilizó las bandas 7 y 5 para identificar formaciones geológicas, fallas, contraste en las pendientes del terreno, así como delimitar los tipos de suelo y roca. Justice y Townshend (1982) realizaron un estudio sobre la clasificación del terreno y de sus tipos de cobertura a partir del uso de imágenes Landsat MSS.

Gupta (1991) resume, en 4 puntos, las grandes ventajas o beneficios de emplear PR en estudios enfocados a la superficie terrestre:

- 1) Permite el estudio de diferentes elementos espaciales interrelacionados, así como apoyar para delinear elementos o fenómenos a escala regional.
- 2) Altamente factible para obtener información en áreas no accesibles.

3) Permite ahorrar tiempo, así como minimizar la fuerza de trabajo. La obtención y procesamiento de la información es rápida y de alta calidad.

4) Fomenta el desarrollo de aplicaciones multidisciplinarias. Los datos pueden ser usados por diferentes campos del conocimiento.

Como se observa la PR proporciona grandes ventajas para el desarrollo de estudios en el campo de la geomorfología y al mismo tiempo trabajar con otras disciplinas dentro de las ciencias de la Tierra. El trabajo de campo es imprescindible, pero apoyarse en estas nuevas tecnologías ha permitido a los geomorfólogos, y a otros profesionales, elaborar, en un menor tiempo, estudios relativos a los procesos terrestres.

VI. Sensores y plataformas usados en geomorfología

Como ha ocurrido en los diversos campos de las ciencias, el desarrollo tecnológico ha dado un gran impulso a nuevas investigaciones que tiempo atrás eran muy costosas o inclusive demasiado complicadas de realizar. En geomorfología, particularmente, la aparición de nuevas plataformas y sensores de medición ha posibilitado una serie de avances en los estudios del relieve terrestre, en lo relativo a su génesis, pero también en su dinámica y los cambios tanto por procesos naturales como por aquellos en donde la humanidad ha intervenido.

De esta manera, los grandes pasos en la tecnología espacial han dado lugar a nuevos sensores, con mejor resolución espacial, así como nuevas formas de detectar la energía electromagnética reflejada por los objetos de la superficie terrestre. Por otro lado, también el desarrollo de nuevas plataformas, de menor tamaño y más accesibles (desde el punto de vista económico) están permitiendo el estudio de los fenómenos terrestres a una escala que antes sólo podía realizarse con extenuantes salidas de campo y en periodos muy amplios de tiempo. La modernización en cuanto a los tiempos de toma de imágenes de satélite y la aparición de los VANT, han hecho que el análisis de los estudios con diferentes escalas temporales sea de mayor calidad y se puedan realizar a corto plazo.

Actualmente los satélites que transportan los sensores en el espacio tardan algunos días en tomar imágenes de un mismo lugar, razón por la cual es posible monitorear los cambios que se producen en el relieve o la dinámica de algún fenómeno geológico como un deslizamiento de tierra. En el caso de los VANT, el hecho de poder realizar vuelos en periodos de tiempo aún más cortos permite monitorear procesos que antes requerían de equipos más costosos o tiempos de monitoreo más prolongados debido a la escasez de datos en el tiempo de análisis (Lindner *et al.*, 2016; Eker *et al.*, 2018; Godone *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020). Además, hay que agregar que esta tecnología, los VANT, cuentan con un sensor que no sólo toma fotografías, sino que incluso tiene la posibilidad de registrar video lo que posibilita realizar otro tipo de estudios.

Otro punto para considerar y que tiene gran relevancia para la disciplina geomorfológica, es la posibilidad de crear, con las fotografías y videos, modelos tridimensionales con un mayor detalle y realismo que los modelos digitales que se han venido

utilizando con anterioridad. De esta forma, las fotografías y videos del terreno permiten elaborar modelos con los cuales analizar cambios minúsculos en el terreno, deslizamientos de tierra (Lucieer *et al.*, 2014; Warrick *et al.*, 2019), cambios en el comportamiento de las corrientes fluviales (Llena *et al.*, 2018), procesos erosivos (Meinen y Robinson, 2020), etc. Junto con esta técnica también existe otra con resultados excelentes, el LiDAR (Light Detection And Ranging, detección de luz y rango en español), la cual permite obtener datos, muy detallados, no sólo del terreno sino de los elementos que se encuentran por sobre este. Tal vez la desventaja más notable de esta técnica es que aún es demasiado costosa en comparación con los VANT, sin embargo, los datos de LiDAR presentan mayores ventajas que los obtenidos con dron.

En los párrafos siguientes se presenta una revisión de algunos de los trabajos que se han llevado a cabo en el campo de las amenazas naturales empleando PR. De igual manera, también se hace una revisión de trabajos que abordan los procesos de remoción en masa desde la perspectiva del uso de técnicas de teledetección.

VII. Aplicaciones de la PR en geomorfología (amenazas naturales)

La PR y su desarrollo han favorecido el impulso de nuevas metodologías dentro del campo de la geomorfología, que utiliza los nuevos recursos (ya sea capturados desde el espacio o desde un dron) para elaborar estudios sobre la evolución de las formas del relieve, añadiendo nuevas perspectivas y conocimientos a teorías ya validadas, pero también dando pie a la generación de nuevas teorías sobre los cambios en el relieve.

Los fenómenos naturales que la humanidad considera como amenazas, tales como los sismos, los volcanes, las inundaciones y los procesos de laderas, también son analizados a partir del uso de estas nuevas herramientas y tecnologías. En un principio, se emplearon imágenes satelitales (con resoluciones temporales y espaciales muy bajas) y actualmente se usan datos registrados por drones, equipos LiDAR e incluso de satélites los cuales representan, en términos de resolución temporal y espacial, un gran avance ya que ahora se puede contar con datos diarios y con resoluciones de cm e incluso mm. De esta manera no sólo se realizan trabajos regionales sino también estudios puntuales que permitan entender la dinámica de procesos a mayor detalle.

A continuación, se mencionan algunos de los trabajos que se están desarrollando en el campo de diversas amenazas naturales, así como de las herramientas y métodos empleados.

Sismicidad

El estudio de la sismicidad, a partir de PR (usando imágenes de satélite o fotografías aéreas), se ha desarrollado principalmente en el resultado de la ocurrencia, el impacto, los daños, que se producen posterior a la ocurrencia de un sismo de gran magnitud. En algunas ocasiones, estos estudios se enfocan en evaluar, de forma paralela, la ocurrencia de otros fenómenos naturales (por ejemplo, deslizamientos de tierra o caídas de roca) e incluso los cambios en la morfología del terreno como resultado de un evento sísmico. En los estudios a otras amenazas derivadas o asociadas a los movimientos telúricos también se incluye el impacto de tsunamis o maremotos en donde se realizan comparaciones temporales y espaciales de los daños que se producen bajo la ocurrencia de este tipo de fenómeno natural.

A continuación, se hace un breve recorrido sobre algunos de los trabajos que abordan el tema de la sismicidad empleando imágenes de sensores remotos satelitales o fotografías aéreas. Cabe aclarar que los métodos geofísicos también se consideran como PR, sin embargo, para este estudio sólo se están considerando aquellos que implican imágenes de la superficie terrestre tomados desde satélites o aeronaves.

De acuerdo con Tralli *et al.* (2005), la PR a partir de imágenes de satélite ofrece información continua de los ambientes tectónicos y contribuye al entendimiento de los sistemas de fallas. Junto con datos de campo, generalmente obtenidos con tecnología GPS, permite mejorar el análisis de los desplazamientos (horizontales y verticales) así como la validación de modelos de deslizamiento que son emitidos en un contexto general de tensión tectónica. Provee ideas sobre como la tensión es transferida de las profundidades a la superficie, cuanta energía se libera durante los sismos. En algunos casos la ocurrencia de los sismos puede producir perturbaciones, a nivel global, de la gravedad, y estos cambios pueden ser detectados con instrumentos.

Uno de los conjuntos de imágenes que se utiliza comúnmente en estudios de PR y sismicidad es el Radar Interferométrico de Apertura Sintética (InSAR) el cual provee datos sobre la deformación continua a niveles submétricos. Esta técnica es un componente integral en la capacidad de observación de la Tierra para la mitigación y respuesta ante el riesgo sísmico (CEOS, 2003).

Los estudios de sismicidad, empleando PR, se concentran en diversos temas o aspectos del fenómeno, sin embargo, en cuestiones asociadas a la disciplina geomorfológica y de riesgo de desastre, los trabajos se agrupan en las siguientes categorías: evaluaciones pre-evento sísmico, amenazas indirectas una vez ocurrido el sismo, identificación de elementos morfológicos posterior al evento y evaluación del impacto post-desastre.

a) Evaluación pre-evento

Wen *et al.* (2016) realizó un análisis de imágenes MODIS/Terra a partir de la evaluación de los datos térmicos. Esta evaluación fue realizada antes y después de la ocurrencia del sismo de Ludian (China), evento que se presentó en el año 2014. Además, agregaron al estudio el análisis de datos de la falla activa los cuales fueron asociados, espacial y temporalmente, con los datos térmicos obtenidos por PR. Los resultados sugirieron que un mes antes del sismo hubo un incremento anómalo de la temperatura el cual descendió en el tiempo posterior al evento.

Bellaoui *et al.* (2017) emplearon imágenes MODIS (un conjunto de 6 años de registros, 2000-2005) para realizar un estudio de monitoreo de la temperatura superficial a fin de encontrar elementos que explicaran, en parte, la ocurrencia del sismo del 21 de mayo de 2003 ocurrido en Argelia. Encontraron que, antes del sismo, había anomalías térmicas las cuales detectaron una vez que compararon los datos con la información colectada por estaciones meteorológicas de la zona de estudio.

Daneshvar *et al.* (2017) analizaron, con PR, anomalías atmosféricas y ionosféricas registradas antes del evento sísmico de Illapel, Chile, de septiembre de 2015. Usando imágenes obtenidas del sitio de la NASA, Giovanni, así como de la NOAA realizaron un análisis de búsqueda de anomalías para diferentes variables (cobertura de nubes, precipitación, presión del aire y vectores de viento). También descubrieron anomalías en la ionosfera un mes antes del evento.

b) Amenazas indirectas

Un estudio realizado para evaluar los desplazamientos horizontales producto de la licuefacción fue presentado por Rathje *et al.* (2017) para analizar el comportamiento de este fenómeno posterior a la ocurrencia de una serie de sismos en el periodo de 2010 a 2011 en Nueva Zelanda. El trabajo incluyó un análisis de imágenes de satélite y del cual se obtuvo como resultado la métrica de los desplazamientos del terreno a consecuencia del proceso de licuefacción.

Yang y Chen (2010) emplearon imágenes Landsat TM y ASTER para detectar deslizamientos de tierra que ocurrieron posterior al sismo de Sichuan de 2008. Se analizaron imágenes antes y después del evento a fin de determinar la distribución espacial de los procesos de ladera empleando un análisis de detección de cambios.

Por su parte, Dellow *et al.* (2017) elaboraron un inventario de deslizamientos ocurridos 14 de noviembre de 2016 a consecuencia de un sismo que tuvo lugar al NE de la localidad de Christchurch, Nueva Zelanda. Para este inventario se apoyaron en imágenes aéreas tomadas desde una aeronave y diversos helicópteros, así como imágenes de satélite WorldView 2 (de

2.4m de resolución), WorldView 3 (1.4m), Geoeye (2m), modelos digitales de elevación derivados de LiDAR y fotografías ortorectificadas anteriores y posteriores al evento. El periodo de tiempo de las imágenes y modelos comprendía del 15 al 22 de noviembre.

Liu *et al.* (2012) realizaron un estudio sobre amenazas que se presentan junto con los sismos, sin embargo, en este estudio se presentan escenarios posibles ante la ocurrencia de un sismo similar al de Wenchuan, China (12 mayo 2008), en el cual estiman las posibles consecuencias y zonas susceptibles a presentar amenazas relacionadas o secundarias como caídas de rocas o flujos de detritos. Para esto hacen uso de imágenes de satélite (multiespectral y de radar), modelos digitales de elevación y parámetros morfométricos derivados de estos.

c) Evaluación Post-evento

Una evaluación post-desastre, en el caso de la ocurrencia de un sismo, es importante cuando se requiere determinar el impacto del desastre en la infraestructura, así como en la población, esto con el fin de definir la mejor política y acciones a tomar para atender la emergencia de la mejor manera y también tener buenas bases para planear la reconstrucción. Fan *et al.* (2017) realizaron un estudio donde analizan los aspectos a ser considerados para llevar a cabo evaluaciones del impacto de un sismo, así como las metodologías y técnicas que puedan brindar información oportuna y de manera rápida para tener acceso a los daños en elementos como inmuebles, agricultura, infraestructura y recursos. Para demostrar el alcance de su trabajo elaboran la evaluación del impacto del sismo ocurrido en Ludian, China en el año 2014. En esta investigación ellos dejan asentado que el uso de la PR (a partir de imágenes satelitales y de VANT) es vital para obtener datos de los daños en un tiempo más corto que las técnicas de evaluación en campo.

Un trabajo similar, elaborado para determinar el grado de impacto en una localidad de Italia, fue desarrollado por Freeman *et al.* (2019). En este trabajo se apoyan en el uso de la tecnología de los VANT con el fin de evaluar los daños a partir de la toma e interpretación de imágenes aéreas y modelos tridimensionales derivados del procesamiento de las fotografías. Este trabajo también presenta los resultados del monitoreo post-desastre en donde muestran las acciones a empleadas para estabilizar las laderas con presencia de deslizamientos de tierra.

Hien Pham *et al.* (2014) realizaron un estudio en donde exponen los resultados de la evaluación post-desastre a partir del apoyo de PR. Este trabajo se desarrolló para la evaluación posterior al desastre ocurrido en Haití a consecuencia del sismo de 2010, en el cual el daño a inmuebles fue de gran relevancia. El trabajo de Hien Pham consistió en el uso de imágenes ópticas de alta resolución espacial (15 cm) y datos de elevación derivados de LiDAR (1 m) para llevar a cabo clasificaciones automatizadas empleando la detección orientada a objetos con el fin de identificar 3 clases de daños, inmuebles intactos, colapsados y escombros.

Otros trabajos que abordan la amenaza sísmica desde la PR son los trabajos de Ren *et al.* (2014) y Li *et al.* (2018). En el primer caso, se desarrolló el análisis de cambios topográficos

después de la ocurrencia del sismo de Wenchuan en 2008. En este estudio se emplearon modelos digitales de elevación a diferentes escalas, algunos de ellos derivados de imágenes satelitales de 2.5 m de resolución. Por su parte Li y colegas realizaron la comparación de diversos modelos de elevación elaborados antes y después del sismo de Wenchuan. Estos modelos digitales se crearon a partir del uso de imágenes estereoscópicas, los tamaños de pixel fueron de 2, 4 y 10 m. Así, a partir del análisis de cambios detectaron las zonas con mayor erosión y acumulación de materiales, en muchos casos asociados a la ocurrencia de procesos de ladera.

Como se puede observar, la PR es una herramienta fundamental en los estudios relacionados a la sismicidad, no sólo para la comprensión del fenómeno en sí sino también para evaluar el impacto que este evento puede tener sobre la población y la infraestructura. El uso de la PR representa una gran ventaja debido a que permite realizar evaluaciones post-sismo y actividades de monitoreo para definir estrategias de atención durante la emergencia, pero también para planear la reconstrucción y el regreso rápido de las actividades esenciales.

Actividad volcánica

La PR ha estado presente en el estudio de los volcanes debido a su gran relevancia como elementos geomorfológicos de gran trascendencia por lo que representan, particularmente cuando estos se encuentran en continua actividad.

Los métodos geofísicos forman parte de esos estudios de PR que se llevan a cabo para la medición de parámetros que indiquen el tipo y nivel de actividad, sin embargo, al aparecer las plataformas aéreas y espaciales, estas investigaciones tuvieron acceso a nuevas tecnologías que actualmente permiten el estudio y monitoreo de los volcanes, adquiriendo datos que comprenden desplazamientos, cambios volumétricos, y temperatura, por mencionar algunos.

Como se describe a continuación, este tipo de fenómenos naturales ahora se encuentran bajo el ojo de las plataformas aéreas y satelitales brindando información detallada, y en algunos casos en tiempo real, de las condiciones de actividad de los volcanes más activos del mundo.

Hay diversos indicadores superficiales que son captados con sensores (nubes de ceniza, emisiones de gases, productos lávicos, etc.). Algunos de los esfuerzos, usando PR, se han enfocado al análisis de diversos aspectos: monitoreo sísmico, mediciones geodésicas, cambios topográficos. Los requerimientos para el estudio de las amenazas volcánicas incluyen el análisis de la sismicidad, caracterizar la deformación del edificio volcánico, identificación de fallas, fracturas y sitios inestables en los flancos del volcán; se caracterizan las emisiones de gases, así como los cambios termales (Tralli *et al.*, 2005).

Este tipo de fenómenos requieren de un monitoreo continuo, eficiente y preciso a partir del uso de estudios en campo, así como del apoyo de PR. Las imágenes, producto del monitoreo satelital, han jugado un rol importante en el contexto de los estudios de volcanes activos. Se ha mejorado la capacidad de monitoreo y de entendimiento de los procesos volcánicos. Se utilizan sensores de diferentes tipos, tanto pasivos como activos, en donde se registran temperatura, dirección de las columnas de ceniza, monitoreo de cambios en la estructura, composición química etc. De acuerdo con Hooper *et al.* (2012), la PR aplicada a las amenazas volcánicas y sus eventos precursoros es de vital importancia. Las imágenes permiten el monitoreo continuo de la actividad, particularmente el uso de aquellas derivadas de Radar (InSAR) y la espectro-radiometría, la primera, Radar, apoya en la identificación de las deformaciones en el edificio volcánico y la segunda técnica permite detectar los productos eruptivos y cuantificar la cantidad de ceniza y gases de las nubes eruptivas.

Actualmente se realizan estudios en los cuales se emplean las imágenes de radar (Pritchard y Simons, 2004), imágenes Hyperion (hiper-espectrales) para las observaciones de flujos de detritos (Crowley *et al.*, 2003, Wright y Flynn, 2003) e incluso provenientes de la NOAA, las imágenes GOES empleadas para estudiar las emisiones de ceniza (Watanabe y Matsuo, 2003, Pieri y Abrams, 2004).

Las investigaciones van más allá del monitoreo de los volcanes, también se realizan estudios para evaluar el peligro volcánico. Tal es el caso del trabajo de Deng *et al.* (2019) en el cual elaboran un modelo digital de elevación de alta resolución espacial (10 m) a partir de imágenes de satélite del volcán nevado del Ruiz, uno de los volcanes más importantes del mundo y que tiene un capítulo muy relevante en la historia de los desastres asociados a actividad volcánica. El modelo fue obtenido a partir de la fusión de datos de la serie TanDEM-X, interferometría terrestre de radar y estructura de movimiento (SfM) a partir de fotografías de campo; y fue utilizado para realizar la simulación de escenarios de inundación empleando los modelos de flujo volcánico LaharZ y VolcFlow.

En el campo del monitoreo, Ganci, *et al.* (2020) realizaron un estudio donde demuestran la utilidad de las diferentes fuentes de imágenes y su uso, en conjunción, con modelos numéricos y simulaciones para el análisis de los flujos de lava y su comportamiento en el tiempo. Se aplicaron los datos obtenidos de imágenes MODIS, SEVIRI, EO-ALI, Landsat, Sentinel-2, ASTER, Pleiades, PlanetScope para evaluar tiempos de movimiento del flujo, detectar depósitos, espesor de flujos, así como el monitoreo de cambios en la topografía en el volcán Nabro, localizado en Eritrea.

Kereszturi *et al.* (2018) propusieron un flujo de trabajo que integra el uso de imágenes hiper-espectrales (múltiples bandas) y datos de LiDAR para el estudio de la actividad del volcán TE Maari, Nueva Zelanda. Empleando el algoritmo de Bosque Aleatorio (Random Forest) clasificaron las imágenes obtenidas de diferentes sensores y fusionaron los resultados con los datos laser para determinar zonas de alteración hidrotermal. Los autores emplearon un sensor, de espectro completo, AisaFENIX que registra dentro del rango 370 a 2500 nm; y para el levantamiento LiDAR usaron un equipo Optech ALTM 3100 EA LiDAR tomando datos a 1,200 m de altura y obteniendo una nube de puntos con 3 retornos por m².

Hill-Butler *et al.* (2020) desarrollaron una investigación de la coincidencia de la sismicidad con la actividad volcánica. Emplearon imágenes MODIS para determinar, a partir del uso del algoritmo MODVOLC, la presencia de altas temperaturas para definir la intensidad de puntos con actividad volcánica. Estos datos se ligaron a los registros de eventos sísmicos de gran magnitud para tratar de encontrar la relación entre la sismicidad y la actividad volcánica. Los resultados arrojaron que, a escala global, existen indicios de una relación coincidente entre sismos de gran magnitud y el flujo radiante volcánico global; una efímera actividad termal modificada después del sismo, a menudo reflejada en cambios en la actividad térmica de un número de volcanes activos e incluso en el flujo radiante volcánico global; y que volcanes con periodos largos de reposo pueden ser susceptibles de presentar actividad volcánica.

Ernst *et al.* (2008) realizaron una revisión de los distintos tipos de imágenes y las diferentes aplicaciones en el tema volcánico. Los autores, además del análisis de la aplicación de la PR en el estudio de la actividad volcánica, elaboran un cuadro resumen de los tipos de imágenes partiendo desde los de baja resolución hasta aquellas de alta resolución y añadiendo las derivadas de instrumento de radar. En dicho trabajo es posible ver que las aplicaciones de los sensores remotos y sus datos abarcan mapeo de productos volcánicos, caracterización de elementos termales e hidrotermales, deformación y cambios en el terreno, temperatura de los flujos de lava, rastreo y seguimiento de nubes y gases, detección de puntos calientes, cambios en la temperatura atmosférica y cartografía detallada de los elementos morfológicos (edificio, cono, barrancos) por sólo mencionar algunos ejemplos. En la tabla 2 se puede observar un resumen de lo planteado por los autores.

Inundaciones

Uno de los fenómenos naturales que más atención ha recibido dentro del campo de la PR es la ocurrencia de las inundaciones o crecidas de las corrientes fluviales. Este fenómeno ha sido estudiado desde la aparición de las primeras imágenes aéreas y hasta el día de hoy con los diferentes sensores y plataformas existentes. Se desarrollan estudios regionales, a nivel cuenca o locales aprovechando las diferentes resoluciones espaciales y temporales que brindan los diferentes tipos de imágenes disponibles. Se delimitan áreas susceptibles a las avenidas, empleando imágenes de eventos pasados y el apoyo de datos de estaciones meteorológicas e hidrométricas, así como modelos digitales de elevación (con diversos tamaños de pixel).

Tralli *et al.* (2005) considera que la PR juega un papel esencial en la reconstrucción de la historia reciente del relieve y en la predicción de eventos de inundación. Se emplean datos de sensores meteorológicos (GEOS, AVHRR, TRMM), de alta resolución temporal y pixeles de gran tamaño, para monitorear el comportamiento de un meteoro ubicado a kilómetros de distancia de una cuenca. De forma paralela se obtienen las propiedades topográficas y ambientales de la cuenca a partir de datos de radar o imágenes ópticas multispectrales, estas últimas con pixeles más pequeños que brinda un mayor detalle de la zona de estudio. De esta

manera se evalúan elementos como humedad del suelo, cobertura forestal, pendiente del terreno, morfología de las zonas susceptibles a crecidas e incluso presencia de elementos antrópicos, por ejemplo, presas.

SENSOR	APLICACIONES
Ópticos de baja resolución (geosíncronos)	
GMS	Seguimiento de nubes volcánicas y detección de puntos de calor
GOES	
Meteosat	
Meteosat MSG	
Ópticos de baja resolución (órbita cuasi-polar)	
AVHRR	Seguimiento de nubes volcánicas, mapeo de SO ₂ y detección de puntos de calor
ATSR (ERS-1 Y ERS-2)	
AATSR	
MODIS (Terra y Aqua)	
TOMS	Seguimiento y monitoreo de gases emitidos
OMI (Aura)	
SENSOR	
GOME (ERS-2)	
SCHIAMACHY (Envisat)	
GOME-2 (MetOp)	Monitoreo de temperatura en atmósfera y de SO ₂
AIRS (Aqua)	
MISR	Mapeo de productos volcánicos, identificación de elementos termales. Mapeo de SO ₂ , caracterización de zonas hidrotermales. Mapeo de productos volcánicos, monitoreo de cambios en el terreno. Temperatura de flujos de lava.
Ópticos de resolución media a alta (órbita cuasi-polar)	
Landsat MSS	
Landsat TM	
Landsat ETM+	
Landsat OLI	
ASTER (Terra)	
HRG-HRVIR (SPOT 4-5)	
EO-1 Hyperion	
ALI	
Sentinel 2	
Ópticos de muy alta resolución (órbita cuasi-polar)	Mapeo detallado del terreno (geomorfología, cambios del relieve, depósitos)
IKONOS	
Quickbird	
Geoye	
WorldView	
Radar de Apertura Sintética (órbita cuasi-polar)	Deformación del terreno, creación de modelos digitales de elevación, mapeo de rugosidad del terreno
SAR (ERS-1 y ERS-2)	
RADARSAT	
JERS SAR (ENVISAT)	
ALOS (PALSAR)	Generación de cartografía topográfica, simulación de escenarios de erupción, estudios geomorfológicos. Monitoreo de los cambios en el terreno soportado por modelos de muy alta resolución espacial.
Modelos digitales de elevación	
SRTM C-Band	
SRTM X-Band	
SPOT HRS	
ASTER	
LiDAR	

Tabla 2. Sensores y aplicaciones en la actividad volcánica (Modificado de Ernst *et al.*, 2008).

Sin embargo, el empleo de la PR no se limita a analizar las condiciones pre-inundación, también es posible realizar evaluaciones durante y posterior al evento hidrometeorológico, analizando la altura y distribución espacial del caudal y el impacto de este en los inmuebles e infraestructura, urbana o rural.

Rahman y Di (2017) realizaron una revisión de los sensores empleados para el mapeo y monitoreo de las inundaciones. Comentan que el monitoreo comprende la extensión espacial y temporal de las inundaciones, se delimita el área inundada y se vigilan los cambios en la dinámica de la corriente. Los autores consideran que este fenómeno natural ha sido estudiado empleando PR desde la década de los 70 lo que demuestra que es la amenaza natural que concentra el mayor número de estudios elaborados con datos registrados por sensores caracterizados por un amplio rango de resoluciones espaciales y temporales. Los estudios a mayor resolución y escala se empezaron a dar con la aparición del primer sensor Landsat (MSS) que tuvo un tamaño de pixel de 80 m, toda una revolución para la época. Más adelante aparece el sensor TM de Landsat y la mejora espacial y temporal revolucionó la adquisición de datos geoespaciales, imágenes de 30 m y que tenían un periodo de adquisición de 18 días con lo cual se tenían datos pre y post evento. Más adelante, con la aparición de las imágenes SPOT, los estudios sobre inundaciones empleando Landsat y SPOT aumentaron las investigaciones a detalle de la dinámica de varios de los ríos más importantes del mundo, así lo demuestran los trabajos de Blasco *et al.* (1992), Tholey *et al.* (1997), Shaikh *et al.* (2001), Bach *et al.* (2005), Jain *et al.* (2005), Thomas *et al.* (2011), Chormanski *et al.* (2011). En la actualidad, las imágenes Landsat, ASTER y las más recientes Sentinel-2, son gratuitas y han mejorado el análisis de las crecidas debido a las mejoras espaciales y temporales (simplemente Sentinel-2 cuenta con un periodo de adquisición de 7 días). Por último, las imágenes de muy alta resolución (IKONOS, GeoEye, WorldView), debido a su alto costo, aún no se amplía su uso en el estudio de las inundaciones, su acceso restringido es un aspecto común para amplios sectores públicos, por ejemplo, institutos y universidades.

Como ejemplos de investigaciones que emplearon PR para el análisis de inundaciones se puede mencionar el trabajo de Zeng *et al.* (2020) en el cual utilizaron imágenes de sensores pasivos y activos aplicados a las crecidas del río Jushui, en Wuhan, China. El sensor pasivo empleado fue MEaSUREs el cual provee datos globales de temperatura de brillo, por otro lado, los datos de sensor activo fueron obtenidos de Sentinel-1, una constelación de dos satélites que fueron lanzados por la Agencia Espacial Europea (ESA), y que corresponden a datos radar que consisten en dos configuraciones de polarización, VH y VV. Los resultados obtenidos permitieron demostrar un flujo de trabajo que facilita el monitoreo de las inundaciones, aplicando datos que espacial y temporalmente han demostrado su utilidad para delimitar las zonas susceptibles a las crecidas del río Jushui.

Qi *et al.* (2009) realizó un trabajo en el cual determinaron la extensión y frecuencia de las inundaciones en las cercanías del lago Poyang, China. Para este estudio se apoyaron de las imágenes del sistema Landsat así como del modelo digital de elevación de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). El objetivo principal consistió en evaluar el potencial de

los modelos digitales de elevación (MDE), en conjunto con imágenes satelitales, para funcionar como base para estudios de riesgo asociados a inundaciones. Las imágenes constaron de una serie de 13 escenas, de los sensores TM y ETM+, que comprendieron el periodo de 1987 a 2001. El proceso de análisis consistió en delinear las áreas inundables a partir de clasificaciones no supervisadas empleando el algoritmo ISODATA y las bandas infrarrojas de todas las imágenes. En el caso de los MDE, estos se utilizaron para estimar el área inundable a partir de los cambios en la topografía, identificando las áreas topográficamente más bajas y las zonas de pendiente que impiden la extensión del agua desbordada.

Un estudio en el cual se emplea otra herramienta de PR, el LiDAR, fue el elaborado por Meesukm *et al.* (2017). En este trabajo los autores realizaron una investigación utilizando tecnología láser para el análisis de inundaciones en una zona urbana de Ayutthaya, Tailandia. Con los datos obtenidos con LiDAR se generaron el modelo digital de superficie (DSM), modelo digital del terreno (DTM) y el modelo digital de la altura de los inmuebles (edificios, casas, oficinas, etc.), a partir de estos productos se evaluaron diferentes escenarios de inundación en la zona urbana, considerando el terreno y el relieve artificial urbano derivado de las calles y avenidas de la zona. Los resultados mostraron la utilidad y eficacia de utilizar modelos cada vez más detallados en estudios a nivel urbano, local, en los cuales, en muchos casos, hay una falta de información con un alto nivel de detalle.

En un trabajo similar al anterior, Leitao y Sousa (2018) evaluaron las inundaciones de una zona semi-urbana en Suiza a través de la fusión de datos obtenidos con LiDAR y VANT, el primero consistía en datos, con valores xyz, con los cuales se elaboró un modelo digital de elevación (DEM) con 0.5 m de resolución; los datos de VANT permitieron generar un modelo con un tamaño de pixel de 0.035 m y que fue remuestreado a 0.5 m para poder comparar los resultados con el modelo LiDAR. Con estos datos se realizaron nueve escenarios en los cuales se simuló la velocidad de flujo y la altura de la lámina de agua con el objetivo de determinar las zonas susceptibles a ser inundadas.

Procesos de remoción en masa

La inestabilidad de laderas es uno de los procesos geomorfológicos más extendidos en el mundo. Cada año ocurren cientos de miles de procesos de ladera en zonas en donde el relieve tiene a ser abrupto o a presentar cierto grado de pendiente en el terreno; sin embargo, esto no es una constante ya que incluso pueden llegar a presentarse en zonas donde el relieve tiene a ser horizontal en donde ocurren procesos en los cuales se desplazan los materiales formadores del suelo. Cabe recordar que este tipo de eventos se deben principalmente a la fuerza de gravedad, pero existen factores internos y externos que modifican la condición de estabilidad del terreno con respecto a la fuerza gravitatoria lo que puede acelerar la ocurrencia del proceso. En el campo de la PR se analizan, principalmente, aquellos factores externos que son posibles de detectar con las herramientas o técnicas de PR, ya sea imágenes satelitales, fotografías aéreas, modelos digitales derivados de equipos laser o incluso con datos de radar.

Las primeras investigaciones en las cuales se usaban técnicas de PR para estudiar procesos de remoción en masa se caracterizaron por el uso de fotografías aéreas, las cuales antecedieron a las imágenes de satélite. Las fotografías tenían sus ventajas, pero al paso del tiempo estas se vieron rebasadas por las imágenes, las cuales podían cubrir áreas más grandes y además era posible tener secuencias temporales de la misma zona, lo cual era bastante difícil de realizar con las fotografías aéreas debido al alto costo para realizar las tomas aéreas.

Fezer (1969) elaboró una revisión de las aplicaciones de la fotografía aérea en el campo de la geomorfología aplicada. En su trabajo describe a los autores que, de cierta forma, iniciaron con los estudios de PR usando imágenes de la superficie terrestre. De esta forma se tienen los trabajos de TaLaing (1959), Simonett (1963), Binggeli (1964), Maruyasu (1964), Dishaw (1967), Oka y Katsurajima (1967). Estas investigaciones se enfocaron en la identificación y caracterización de los elementos del relieve asociados a los procesos de remoción en masa; se elaboraron comparaciones temporales, pre y post evento; creación de inventarios de procesos que fueron estudiados estadísticamente; estudios de eventos ocurridos en ambientes climáticos distintos para identificar factores determinantes internos y externos.

Salgueiro (1965) fue otro que desarrollo una investigación, enfocada a deslizamientos de tierra, en la cual se comenzaba a utilizar la PR a través del uso de fotografía aérea. En su trabajo, desarrollado en Bolivia, Salgueiro analiza las características de un deslizamiento de tierra. Empleando fotografías aéreas de tres diferentes fechas (1956, 1958 y 1963) monitorea los cambios y desplazamientos del deslizamiento, los cuales traduce por medio de 3 mapas topográficos elaborados a partir de las fotografías. De esta manera, Salgueiro puede medir el volumen de material movilizado en cada uno de los años analizados.

a) Uso de imágenes de satélite

Décadas después se desarrollaron nuevas metodologías, a partir de la aparición de las primeras imágenes satelitales de los sensores Landsat y SPOT. Mantovani *et al.* (1996) elaboran un inventario de los diferentes estudios que se llevaron a cabo con apoyo de la PR a partir de imágenes satelitales. De acuerdo con los autores, las aplicaciones de la PR en el campo de los procesos de remoción en masa se enfocaban, hasta ese momento, en tres aspectos: detección y clasificación de procesos, con especial énfasis en los tipos de imágenes requeridas para los diferentes de escala de trabajo; monitoreo de actividad o desarrollo de los procesos (esto a partir del uso del sistema GPS, técnicas fotogramétricas, imágenes de satélite y datos de radar; y por último, análisis y predicción espacio-temporal de posibles o futuros eventos.

En el campo de la detección y clasificación de procesos se pueden mencionar los trabajos de Gagon 1975, McDonald and Grubbs 1975, Sauchyn and Trench 1978, Stephens 1988, Scanvic y Girault (1989), Scanvic *et al.* (1990), Huang y Chen (1991), y Vargas (1992). En dichas

investigaciones se utilizaron imágenes Landsat y SPOT para realizar la identificación de los procesos, lo que en un principio fue bastante complicado debido a la baja resolución (comparada con las imágenes actuales) de las imágenes adquiridas en esos tiempos, las cuales rondaban entre los 30 a 60 m de tamaño de pixel lo cual complicaba la identificación de elementos de aquellos procesos menores a la escala de trabajo, que casi siempre fue a escalas menores a 25,000. A pesar de esto, los autores podían extraer información relacionada con factores externos de los procesos como era la litología superficial, diferencias en la vegetación, ausencia o presencia de esta, cambios en la humedad del suelo, alteraciones repentinas en los cursos fluviales, entre otros.

Autores como Flageollet y Helluin (1984) y Marcolongo *et al.* (1986) siguieron realizando sus investigaciones con el apoyo de las fotografías aéreas (las cuales aún abundan en los institutos geográficos o cartográficos de varios países alrededor del mundo). En sus trabajos se enfocaron principalmente a realizar inventarios de procesos en los cuales clasificaban cada uno de los eventos.

b) Monitoreo con Sistemas de Posicionamiento Global

Con la aparición de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y la disponibilidad de datos de radar diversos investigadores comenzaron a utilizar la PR para monitorear los cambios espacio-temporales o desplazamientos que se presentaban en procesos activos, particularmente deslizamientos de tierra. Estas nuevas tecnologías brindan enormes ventajas en comparación con las técnicas que se venían empleando por años, ejemplos de estas eran los levantamientos topográficos (que implicaban un alto costo y un número importante de personal en campo) y la colocación de “testigos”, estacas de madera o de metal a fin de hacer mediciones, en diversos periodos de tiempo, de los desplazamientos del terreno, una técnica útil pero que tenía ciertas desventajas, como las continuas visitas a campo (con el costo económico que implicaban), la dificultad de realizar las mediciones con una simple cinta o regla, y la posibilidad de no encontrar las estacas debido a eventos de rapiña o robo. La utilización de sistemas GPS, aunque costoso, facilita el monitoreo constante y eficiente de los cambios en una ladera, su precisión ha ido mejorado con el tiempo y actualmente es posible detectar cambios milimétricos en los desplazamientos del terreno. Por otro lado, la tecnología de radar, de acuerdo con los estudios de Scanvic *et al.* (1993) puede brindar resultados muy cercanos al nivel del centímetro lo que la convierte en una técnica con muy buenas ventajas para realizar el monitoreo constante de los procesos de ladera. Actualmente, hay imágenes de radar que son de acceso gratuito y que presentan cortos periodos de tiempo entre toma de imágenes, además de que este tipo de sensor, al ser activo, no es afectado por la presencia de nubes lo que es una desventaja en el uso de imágenes de sensores pasivos como por ejemplo las que provienen del sensor Landsat.

Entre los trabajos que utilizaron los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) se pueden mencionar los de Allaway *et al.* (1998), Gili *et al.* (2000), Moss (2000), Kimura y Yamaguchi (2000), Cencetti *et al.* (2000), Malet *et al.* (2002), Coe *et al.* (2003), Mora *et al.* (2003); en estos trabajos se usó el sistema GPS con el objetivo de monitorear los cambios en el terreno como consecuencia de la presencia de un deslizamiento activo, en todos los casos el monitoreo se apoyó en puntos de control en las zonas estable e inestable del proceso. Cabe destacar que, en algunas ocasiones, este tipo de estudios comparan los datos de monitoreo con información de lluvia o contenido de humedad en el suelo a fin de detectar los umbrales de precipitación que condicionan el desplazamiento de los procesos o incluso llegan a detonar nuevos eventos en las zonas en estudio.

c) Imágenes de Radar y uso de LiDAR

Como se había mencionado con anterioridad, Scanvic *et al.* (1993) fue uno de los primeros trabajos que abordaron los procesos de remoción en masa a partir del uso de datos de radar. Esto dio comienzo al desarrollo de nuevas investigaciones que emplearían esta nueva tecnología, ejemplos son los estudios de Singhroy (1995), Singhroy *et al.* (1998), Rizo y Tesauro (2000), Tarchi *et al.* (2003), Kyriou y Nikolakopoulos (2019), Jia *et al.* (2019), Wang *et al.* (2019), Jung y Ho Yun (2020), Li *et al.* (2020). En estos trabajos se emplearon imágenes de radar como fueron RADARSAT, Sentinel-1, PALSAR y COSMO SkyMed, con objetivos que incluyen el monitoreo, la evaluación y caracterización de los procesos de remoción en masa.

De forma paralela a los avances tecnológicos en el campo de las imágenes de radar también se fue desarrollando el campo de la tecnología LiDAR (sensor activo) y las imágenes de muy alta resolución espacial. El sistema LiDAR (Light Detection And Ranging, detección de luz y rango en español) consiste en una técnica de teledetección óptica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de x, y y z (Fernández *et al.*, 2013). Su función, en general, consiste en usar la energía electromagnética para detectar un objeto o superficie (el objetivo) y determinar la distancia entre el objetivo y el instrumento (rango) para así deducir las propiedades físicas de los objetos basados en la interacción de la radiación con el objetivo (McCormick y Leavor, 2013). Al ser un sensor activo su funcionamiento no depende de alguna fuente de energía externa.

La tecnología asociada a LiDAR se utiliza, principalmente, en aplicaciones de representación cartográfica, y se está convirtiendo en una alternativa para las técnicas de topografía tradicional. Esta técnica produce series de datos, denominados nube de puntos masivos, que se pueden administrar, visualizar, analizar y compartir. Muestra representaciones, muy detalladas, de la superficie terrestre y es posible, a partir de estos datos, generar modelos digitales de superficie y del terreno, productos útiles para análisis geomorfológicos del relieve.

Esta tecnología, actualmente, es bastante restrictiva, particularmente por el costo que representa, mucho mayor que el uso de imágenes de satélite o de equipos VANT. Sin embargo, los resultados que puede arrojar, en el campo de las Ciencias de la Tierra, es de gran relevancia debido al detalle con el cual se puede observar las características del terreno.

De acuerdo con Jaboyedoff *et al.* (2012), los estudios enfocados a los procesos de ladera se dividen en 4 aspectos fundamentales: detección y caracterización; evaluación de la amenaza y mapeo de la susceptibilidad del terreno; modelación y simulación; monitoreo. En los 4 casos hay una subdivisión conforme al tipo de proceso analizado, de esta forma, tenemos estudios enfocados a deslizamientos de tierra, caídas de roca o flujos de detritos.

En el campo de la detección y caracterización se pueden mencionar los trabajos de McKean y Roering (2004), Booth *et al.* (2009), Glenn *et al.* (2006), Ardizzone *et al.* (2007), Van Den Eeckhaut *et al.* (2007), Kasai *et al.* (2009), Schulz (2007), Liu *et al.* (2010), Van Den Eeckhaut *et al.* (2011), Shi *et al.* (2018), algunos de estos trabajos desarrollaron inventarios de procesos antiguos aprovechando las ventajas del LiDAR para mostrar al relieve sin la cobertura vegetal, permitiendo así la identificación de los rasgos más distintivos de los procesos que no son visibles en fotografías aéreas o imágenes de satélite.

Los trabajos de Dietrich *et al.* (2001), Baum *et al.* (2005), Haneberg *et al.* (2005), Haneberg *et al.* (2009), Chigira *et al.* (2004), Jaboyedoff *et al.* (2008), Corsini *et al.* (2009), Barbarella *et al.* (2013), Kim *et al.* (2019) muestran la aplicación de la tecnología LiDAR para el análisis de la amenaza y la susceptibilidad del terreno a la ocurrencia de los procesos de ladera. Su aplicación fundamental es la generación de modelos digitales de elevación para la extracción de propiedades morfométricas que facilitan la evaluación del peligro y que, junto con información de otras fuentes, permite la creación de mapas de susceptibilidad (empleando modelos estadísticos o determinísticos)

Antes de la existencia de la tecnología LiDAR, el monitoreo de procesos de ladera se basaba, como se comentó líneas arriba, en el uso del sistema de Posicionamiento Global (GPS) o estaciones totales, métodos útiles pero que presentaban ciertas dificultades para la evaluación continua de los cambios en el terreno y más para zonas más amplias, esto debido a que se realizaba el monitoreo de ciertos puntos específicos tanto dentro como fuera del proceso. Con la aparición del láser este tipo de monitoreos se comenzaron a realizar en áreas mayores y además con un aumento en la velocidad de registro. El principio, de acuerdo con Jaboyedoff *et al.* (2012), requiere del levantamiento aéreo de al menos dos tiempos o momentos para poder identificar los cambios o desplazamientos en el terreno por la ocurrencia de un proceso. Al ser datos con valores x, y, z es posible comparar las coordenadas de puntos similares, ya sea a partir de densas nubes de puntos o usando modelos digitales de elevación. Cabe destacar que además es posible realizar el monitoreo del cambio de volumen en procesos como los deslizamientos o las caídas de rocas a partir de estudios antes y después del evento ocurrido. Entre los trabajos destacan Bitelli *et al.* (2004), Chen *et al.* (2006), Corsini *et al.* (2007), Teza *et al.* (2007), Dewitte *et al.* (2008), Jaboyedoff *et al.* (2009), Prokop y Panholzer (2009), Mueller y Loew (2009), Avian *et al.* (2009), Baldo *et al.* (2009), Burns *et al.* (2010), Ventura *et al.* (2011), Ghuffar (2013), Kowalski *et al.* (2018).

d) Imágenes de muy alta resolución espacial

En cuanto al uso de imágenes de muy alta resolución (que presentan tamaños de pixel menores a 5 m) se considera que hay 3 tipos fundamentales: imágenes de satélite (IKONOS, GeoEye, SPOT y WorldView), fotografías aéreas (particularmente tomadas desde avionetas en campañas de institutos cartográficos nacionales) y las fotografías adquiridas con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT). Dependiendo de la escala, temporalidad y tamaño de pixel, las imágenes pueden ser usadas en los campos mencionados por Jaboyedoff *et al.* (2012), detección y caracterización, mapeo de la susceptibilidad, y monitoreo. En el primer caso, en ocasiones se emplean las imágenes (generalmente satelitales) para la detección automática de procesos de ladera, esto a través del análisis de las características espectrales de las imágenes (Casagli *et al.*, 2005; Casagli *et al.*, 2009; Martha y Kumar, 2013; Keyport *et al.*, 2018) e incluso empleando imágenes estereoscópicas que permiten la creación de modelos digitales del terreno además de contar con bandas multiespectrales (Nichol *et al.*, 2006; Ardizzone *et al.*, 2013; Murillo-García *et al.*, 2014; Murillo-García *et al.*, 2015; Zizioli *et al.*, 2015; Ardizzone *et al.*, 2018). Este tipo de estudios se realizan antes de la ocurrencia de procesos de ladera (tratando de identificar deslizamientos antiguos) o de forma posterior con el fin de identificar, y caracterizar, todos los procesos que afectan a una región o área.

El uso de imágenes de VANT, consideradas de muy alta resolución espacial, para identificar y caracterizar procesos de remoción en masa es una metodología que se ha vuelto relevante en los últimos 25 años, en gran parte por las ventajas que tienen estos equipos con respecto a las imágenes ópticas de satélite como lo son el bajo costo del equipo (en comparación con la adquisición imágenes de satélite), la posibilidad de adquirir imágenes en cualquier momento (incluso en zonas con alta densidad de nubes), la capacidad de los equipos para llevar diferentes tipos de sensores (óptico - visual y multiespectral-, LiDAR, Radar), y trabajar en áreas de muy alta dificultad de acceso o que implica riesgo en el caso de la toma de imágenes con avionetas.

Este tema es abordado en el siguiente capítulo el cual es un análisis bibliométrico de las investigaciones, enfocadas en la inestabilidad de laderas, que emplean VANT en la adquisición de datos remotos para realizar estudios en tópicos como identificación y caracterización, monitoreo, mapeo de susceptibilidad, creación de modelos digitales del terreno y tridimensionales tipo malla. El estudio aborda la revisión de todas aquellas publicaciones realizadas en el periodo 2005-2019 y que se desarrollaron alrededor del mundo.

REFERENCIAS

- Allaway A, Merrett PJ, Eyre JM, Stead D (1998) The application of GPS in monitoring landslide movements. Proc. of 8th Int. IAEG Congress, Balkema, Rotterdam, pp. 1633-1640.
- Alcántara-Ayala I (2002) Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology* 47:107-124.
- Alcántara-Ayala I (2010) Disasters in Mexico and Central America: A Little Bit More than a Century of Natural Hazards. In Latrubesse EM (Ed.) *Natural Hazards and Human-Exacerbated Disasters in Latin America, Developments in Earth Surface Processes* vol. 13, 75-97. DOI 10.1016/S0928-2025(08)10004-9
- Ardizzone F, Cardinalli M, Galli M, Guzzetti F, Reichenbach P (2007) Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7:637-650.
- Ardizzone F, Fiorucci F, Santangelo M, Cardinali M, Mondini AC, Rossi M, Reichenbach P, Guzzetti F (2013) Very-High resolution stereoscopic satellite images for landslide mapping. In Margottini C, Canuti P, Sassa K (eds.) (eds.), *Landslide Science and Practice, Vol. 1*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 95-101. DOI 10.1007/978-3-642-31325-7_12
- Ardizzone F, Fiorucci F, Mondini AC, Guzzetti F (2018) TXT-tool 1.039-1.1 Very-High resolution stereo satellite images for landslide mapping. In Sassa K, Guzzetti F, Yamagishi H, Arbanas Ž, Casagli N, McSaveney M, Dang K (eds.) *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools*. Springer International Publishing. 83-94. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57774-6_5
- Avian M, Kellerer-Pirklbauer A, Bauer A (2009) LiDAR for monitoring mass movements in permafrost environments at the cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9:1087-1094. doi:10.5194/nhess-9-1087-2009
- Bach H, Appel F, Fellah K, de Fraipont P (2005) Application of flood monitoring from satellite for insurances. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05. Proceedings. IEEE International*, 63-66.
- Baldo M, Bicocchi C, Chiocchini U, Giordan D, Lollino G (2009) LiDAR monitoring of mass wasting processes: The Radicofani landslide, Province of Siena, Central Italy. *Geomorphology* 105:193-201. doi:10.1016/j.geomorph.2008.09.015
- Barbarella M, Fiani M, Lugli A (2013) Application of lidar-derived DEM for detection of mass movements on a landslide. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W3*. 89-98. doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-W3-89-2013
- Baum RL, Coe JA, Godt JW, Harp EL, Reid ME, Savage WZ, Schulz WH, Brien DL, Chleborad AF, McKenna JP, Michael JA (2005) Regional landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA. *Landslide* 2:266-279. doi:10.1007/s10346-005-0023-y

Bellaoui M, Hassini A, Bouchouuicha K (2017) Pre-seismic anomalies in remotely sensed land surface temperature measurements: The case study of 2003 Boumerdes earthquake. *Advances in Space Research* 59:2645-2657. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2017.03.004>

Binggeli V (1964) Der Blockstrom im Val Cadlino (The block stream of Val Cadlino, Ticino, Switzerland). *Regio Basiliensis*, 5:149-154.

Bishop MP (2013) Remote Sensing and GIScience in Geomorphology: Introduction and Overview. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Bishop, M.P. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, vol. 3, Remote Sensing and GIScience in Geomorphology, 1-24. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00040-3>

Bishop MP, James LA, Shroder Jr JF, Walsh SJ (2012) Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. *Geomorphology* 137:5-26. doi:10.1016/j.geomorph.2011.06.027

Bitelli G, Dubbini M, Zanutta A (2004) Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. In: *Proceedings of the XXth ISPRS congress, Istanbul, Turkey, Commission V, WG V/2*

Blasco F, Bellan MF, Chaudhury MU (1992) Estimating the extent of floods in Bangladesh using SPOT data. *Remote Sensing and Environment* 39:167-178.

Booth AM, Roering JJ, Perron JT (2009) Automated landslide mapping using spectral analysis and high resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. *Geomorphology* 109:132-147. doi:10.1016/j.geomorph.2009.02.027

Burns WJ, Coe JA, Kaya BS, Ma L (2010) Analysis of Elevation Changes Detected from Multi-Temporal LiDAR Surveys in Forested Landslide Terrain in Western Oregon. *Environmental & Engineering Geoscience* 16(4):315-341.

Butler DR, Walsh SJ (1998) The application of remote sensing and geographic information systems in the study of geomorphology: An introduction. *Geomorphology* 21:179-181.

Campbell JB, Wynne RH (2011) *Introduction to Remote Sensing*. 5th edition The Guilford Press NY-London, pp. 667

Casagli N, Fanti R, Nocentini M, Righini G (2005) Assessing the capabilities of VHR satellite data for debris flow mapping in the Machu Picchu Area (C101-1). In Sassa K, Fukuoka H, Wang F, Wang G (eds) *Landslides*. Springer, Berlin, Heidelberg. 61-70 https://doi.org/10.1007/3-540-28680-2_6

Casagli N, Fanti R, Righini G (2009) Integration of VHR satellite images with field data for the analysis of debris sheet instability in the Machu Picchu Area. In Sassa, K, Canuti P (eds.) *Landslides - Disaster Risk Reduction*. pringer-Verlag Berlin Heidelberg. 275-281

Cencetti C, Conversini P, Radicioni F, Ribaldi C, Selli S, Tacconi P (2000) The evolution of Montebestia landslide (Umbria, Central Italy). Site investigations, in-situ tests and GPS monitoring. *Physics and Chemistry of the Earth* 25(9):799-808.

CEOS (2003) The Use of Earth Observing Satellites for Hazard Support: Assessments and Scenarios: Final Report of the CEOS Disaster Management Support Group (DMSG), November.

Chen RF, Chang KJ, Angelier J, Chan YC, Deffontaines B, Lee CT, Lin ML (2006) Topographical changes revealed by high-resolution airborne LiDAR data: the 1999 Tsaoling landslide induced by the Chi-Chi earthquake. *Eng Geol* 88:160-172. doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.008

Chigira M, Duan F, Yagi H, Furuya T (2004) Using an airborne laser scanner for the identification of shallow landslides and susceptibility assessment in an area of ignimbrite overlain by permeable pyroclastics. *Landslides* 1:203-209.

Chormanski J, Okruszko T, Ignar S, Batelaan O, Rebel KT, Wassen MJ (2011) Flood mapping with remote sensing distinguish and hydrochemistry: A new method to the origin of flood water during floods. *Ecological Engineering* 37:1334-1349. doi:10.1016/j.ecoleng.2011.03.016

Chuvieco E (2002) Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio. *Ariel Ciencia* 3ª Edición, Barcelona España. pp. 594.

Coe JA, Ellis WL, Godt JW, Savage WZ, Savage JE, Michael JA, Kibler JD, Powers PS, Lidke DJ, Debray S (2003) Seasonal movement of the Slumgullion landslide determined from Global Positioning System surveys and field instrumentation, July 1998-March 2002. *Engineering Geology* 68:67-101.

Corsini A, Borgatti L, Coren F, Vellico M (2007) Use of multitemporal airborne LiDAR surveys to analyse post-failure behaviour of earth slides. *Canadian Journal of Remote Sensing* 33(2):116-120

Corsini A, Cervi F, Daehne A, Ronchetti F (2009) Coupling geomorphic field observation and LIDAR derivatives to map complex landslides. In: Malet JP, Remaitre A, Bogaard T (eds) *Landslides processes—from geomorphologic mapping to dynamic modeling*, proceedings of the landslide processes conference, 6-7 February 2009, Strasbourg

Crowley JK, Hubbard BE, Mars JC (2003) Analysis of potential debris flow source areas on Mount Shasta, California, by using airborne and satellite remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 87 (2-3):345-358.

Daneshvar MRM, Freund FT (2017) Remote Sensing of Atmospheric and Ionospheric Signals Prior to the Mw 8.3 Illapel Earthquake, Chile 2015. *Pure Applied Geophysics* 174:11-45. DOI 10.1007/s00024-016-1366-0

Del Castillo RF, Terrazas T, Trujillo-Argueta S, Rivera-García R (2020) Use of remote sensing and anatomical evidence at contrasting elevations to infer climate change sensitivity: preliminary results in *pinus patula*. *Botanical Sciences* 98(2):248-263. DOI: 10.17129/botsci.2425

Dellow S, Massey C, Cox S, Archibald G, Begg J, Bruce Z, Carey J, Davidson J, Della Pasqua F, Glassey P, Hill M, Jones K, Lyndsell B, Lukovic B, McColl S, Rattenbury M, Read S, Rosser B, Singeisen C, Townsend D, Villamor P, Villeneuve M, Godt J, Jibson R, Allstadt K, Rengers F, Wartman J, Rathje E, Sitar N, Zekkos Adda A, Manousakis J, Little M (2017) Landslides caused by the MW7.8 Kaikōura earthquake and the immediate response. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 50(2):106-116. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.50.2.106-116>

Deng F, Rodgers M, Xie S, Dixon T, Charbonnier S, Gallant EA, López Vélez CM, Ordoñez M, Malservisi R, Voss NK, Richardson JA (2019) High-resolution DEM generation from spaceborne and terrestrial remote sensing data for improved volcano hazard assessment — A case study at Nevado del Ruiz, Colombia. *Remote Sensing of Environment* 233:1-19. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111348>

Dewitte O, Jasselette JC, Cornet Y, Van Den Eeckhaut M, Collignon A, Poesen J, Demoulin A (2008) Tracking landslide displacements by multi-temporal DTMs: A combined aerial stereophotogrammetric and LIDAR approach in western Belgium. *Engineering Geology* 99:11-22. doi:10.1016/j.enggeo.2008.02.006

Dietrich WE, Bellugi D, Real de Asua R (2001) Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management. In: Wigmosta MS, Burges SJ (eds) *Land use and watersheds: human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas*, *Water Science and Application*, 2:195-227

Dishaw HE (1967) Massive landslides. *Photogrammetric Engineering* 33:603-608.

Eker R, Aydin A, Hübl J (2018) Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study. *Environmental Monitoring and Assessment* 190:28. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6402-8>

Elachy C, van Zyl J (2006) *Introduction to the physics and the techniques of remote sensing*. 2nd edition John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 552.

Ernst GGJ, Kervyn M, Teeuw RM (2008) Advances in the remote sensing of volcanic activity and hazards, with special consideration to applications in developing countries. *International Journal of Remote Sensing* 29(22,20):6687-6723. DOI: 10.1080/01431160802168459

Fan Y, Wen Q, Wang W, Wang P, Li L, Zhang P (2017) Quantifying disaster physical damage using remote sensing data—A technical work flow and case study of the 2014 Ludian earthquake in China. *International Journal of Disaster Risk Sciences* 8:471-488. <https://doi.org/10.1007/s13753-017-0143-8>

Fezer F (1969) Photo interpretation applied to geomorphology -a review. *Photogrammetria* 27(1):7-50.

Fernández JC, Carter WE, Shrestha RL, Glennie CL (2013). Lidar Remote Sensing. In Pelton JN, Madry S, Camacho-Lara S (eds.) *Handbook of Satellite Applications*. Springer Science+Business Media NY. 758-808. DOI 10.1007/978-1-4419-7671-0_44

Flageollet JC, Helluin E (1984) Formations quaternaires et zonage des risques de glissements de terrain a Villerville et B Cricqueboeuf (Calvados). *Dot. BRGM*, 83: 173- 183

Freeman M, Vernon C, Berrett B, Hastings N, Derricott J, Pace J, Horne B, Hammond J, Janson J, Chiabrando F, Hedengren J, Franke K (2019) Sequential Earthquake Damage Assessment Incorporating Optimized sUAV Remote Sensing at Pescara del Tronto. *Geosciences* 9(332):1-24. doi:10.3390/geosciences9080332

Gagon H (1975) Remote sensing of landslides hazards on quick clays of eastern Canada. *Proc. 10th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment*. ERIM, Ann. Arbor, Mich., 803-810.

Ganci G, Capello A, Bilotta G, Del Negro C (2020) How the variety of satellite remote sensing data over volcanoes can assist hazard monitoring efforts: The 2011 eruption of Nabro volcano. *Remote Sensing of Environment* 236:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111426>

Ghaffarian S, Kerle N, Filatoya T (2018) Remote Sensing-based proxies for urban disaster risk management and resilience: a review. *Remote Sensing* 10(11):1760. DOI: 10.3390/rs10111760

Ghuffar S, Székely B, Roncat A, Pfeifer N (2013) Landslide displacement monitoring using 3D range flow on airborne and terrestrial LiDAR data. *Remote Sensing* 5:2720-2745. doi:10.3390/rs5062720

Gili JA, Corominas J, Rius J (2000) Using global positioning system techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology* 55(3):167-192.

Glenn NF, Streutker DR, Chadwick DJ, Thackray GD, Dorsch SJ (2006) Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology* 73:131-148. doi:10.1016/j.geomorph.2005.07.006

Godone D, Allasia P, Borrelli L, Gulla G (2020) UAV and Structure from Motion approach to monitor the Maierato landslide evolution. *Remote Sensing* 12:1039. doi:10.3390/rs12061039

Gupta RP (1991) *Remote Sensing Geology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. New York, pp. 356.

Haneberg WC, Creighton AL, Medley EW, Jonas DA (2005) Use of LiDAR to assess slope hazards at the Lihir gold mine, Papua New Guinea. In: Hungr O, Fell R, Couture R, Eberhardt E (eds) *Proceedings of the international conference on landslide risk management*. Vancouver, Taylor & Francis Group, Supplementary Volume (CD), Canada

Haneberg WC, Cole WF, Kasali G (2009) High-resolution lidar-based landslide hazard mapping and modeling, UCSF Parnassus Campus; San Francisco, USA. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 68:263–276. doi: 10.1007/s10064-009-0204-3

Hien Pham TT, Apparicio P, Gomez C, Weber C, Mathon D (2014) Towards a rapid automatic detection of building damage using remote sensing for disaster management: The 2010 Haiti earthquake. *Disaster Prevention and Management* 23(1):53-66. DOI 10.1108/DPM-12-2012-0148

Higgitt DL, Warburton J (1999) Applications of differential GPS in upland fluvial geomorphology. *Geomorphology* 29: 121-134.

Hill-Butler C, Blackett M, Wright R, Trodd N (2020) The co-occurrence of earthquakes and volcanoes: assessing global volcanic radiant flux responses to earthquakes in the 21st century. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 393:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106770>

Hooper A, Prata F, Sigmundsson F (2012) Remote Sensing of volcanic hazards and their precursors. *PROCEEDINGS OF THE IEEE* 100(100):2908-2930. DOI: 10.1109/JPROC.2012.2199269

Huang SL, Chen BK (1991) Integration of Landsat and terrain information for landslide study. *Proc. 8th Thematic Conference on Geological Remote Sensing (ERIM)*. Denver, Colorado, USA, Vol. 2, 743-754.

Jaboyedoff M, Pedrazzini A, Horton P, Loyer A, Surace I (2008) Preliminary slope mass movements susceptibility mapping using LIDAR DEM. In: *Proceedings of the 6th Canadian geotechnical conference and 9th joint CGS/IAH-CNC Groundwater conference*. Edmonton, Canada, 419–426.

Jaboyedoff M, Couture R, Locat P (2009) Structural analysis of Turtle Mountain (Alberta) using digital elevation model: toward a progressive failure. *Geomorphology* 103:5-16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.04.012>.

Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellan A, Derron MH, Loyer A, Metzger R, Pedrazzini A (2012) Use of LiDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards* 61:5-28. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>.

Jain SK, Singh RD, Jain MK, Lohani AK (2005) Delineation of flood-prone areas using remote sensing techniques. *Water Resources Management* 19:333–347

Jia H, Zhang H, Liu L, Liu G (2019) Landslide deformation monitoring by adaptive distributed scatterer interferometric Synthetic Aperture Radar. *Remote Sensing* 11(2273):1-18. doi:10.3390/rs11092273

Jung J, Ho Yun S (2020) Evaluation of coherent and incoherent landslide detection methods based on Synthetic Aperture Radar for rapid response: A case study for the 2018 Hokkaido landslides. *Remote Sensing* 12(265):1-26. doi:10.3390/rs12020265

Justice C, Townshend J (1982) A Comparison of Unsupervised Classification Procedures on Landsat MSS Data for an Area of Complex Surface Conditions in Basilicata, Southern Italy. *Remote Sensing of Environment* 12:407-420.

Kasai M, Ikeda M, Asahina T, Fujisawa K (2009) LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan. *Geomorphology* 113:57-69. doi:10.1016/j.geomorph.2009.06.004

Kayan I, Klemas V (1978) Application of LANDSAT imagery to studies of structural geology and geomorphology of the Mentese Region of southwestern Turkey. *Remote Sensing of Environment* 7:51-6.

Kereszturi G, Schaefer LN, Schleiffarth WK, Procter J, Pullanagari RR, Mead S, Kennedy B (2018) Integrating airborne hyperspectral imagery and LiDAR for volcano mapping and monitoring through image classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 73:323-339. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.006>

Keyport RN, Oommen T, Martha TR, Sajinkumar KS, Gierke JS (2018) A comparative analysis of pixel- and object-based detection of landslides from very high-resolution images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 64:1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.015>

Khorram S, Koch FH, van der Wiele CF, Nelson SAC (2012) *Remote sensing*. Springer, New York, pp. 134.

Kim S, Kim M, An H, Chun K, Oh HJ, Onda Y (2019) Influence of subsurface flow by Lidar DEMs and physical soil strength considering a simple hydrologic concept for shallow landslide instability mapping. *Catena* 182:104137. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104137>

Kimura H, Yamaguchi Y (2000) Detection of landslide areas using satellite radar interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66:337 - 344.

Konecny G (2003) *Geoinformation: Remote sensing, photogrammetry and geographic information systems*. Taylor & Francis, London, pp. 248.

Kovacs K (2012) Application of remote sensing and geoinformatics in environmental sciences and agriculture. *Idojaras* 116(1):1-11.

Kowalski A, Wajs J, Kasza D (2018) Monitoring of anthropogenic landslide activity with combined UAV and LiDAR-derived DEMs – a case study of the Czerwony Wąwóz landslide (SW Poland, western Sudetes). *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 15(2):117-129. DOI: 10.13168/AGG.2018.0008

Kyriou A, Nikolakopoulos K (2019) Landslide mapping using optical and radar data: a case study from Aminteo, Western Macedonia Greece. *European Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1681905>

Lavender S, Lavender A (2017) *Practical Handbook of Remote Sensing*. CRC Press Taylor & Francis Group, Florida, pp. 212.

Leitao JP, Sousa LM (2018) Towards the optimal fusion of high-resolution Digital Elevation Models for detailed urban flood assessment. *Journal of Hydrology* 561:651-661. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.043>

Li C, Wang M, Liu K, Xie J (2018) Topographic changes and their driving factors after 2008 Wenchuan earthquake. *Geomorphology* 311:27-36. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.019>

Li Y, Jiao Q, Hu X, Li Z, Li B, Zhang J, Jiang W, Luo Y, Li Q, Ba R (2020) Detecting the slope movement after the 2018 Baige Landslides based on ground-based and space-borne radar observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 84 (101949). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101949>

Lillesand TM, Kiefer RW, Chipman JW (2004) *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons 5th edition. USA. pp. 763

Lindner G, Schrami K, Mansberger R, Hübl J (2016) UAV monitoring and documentation of a large landslide. *Applied Geomatics* 8:1-11. DOI 10.1007/s12518-015-0165-0

Liu JK, Hsu WC, Yang MS, Shieh YC, Shih TY (2010) Landslide detection by indices of lidar point-cloud density. *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing IGARSS*. 3960-3963. DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5651666

Liu JG, Mason PJ, Yu E, Wu MC, Tang C, Huang R, Liu H (2012) GIS modelling of earthquake damage zones using satellite remote sensing and DEM data. *Geomorphology* 139-140:518-535. doi:10.1016/j.geomorph.2011.12.002

Llena M, Vericat D, Martínez-Casasnovas JA (2018) Aplicación de algoritmos Structure from Motion (SfM) para el análisis histórico de cambios en la geomorfología fluvial. *Cuaternario y Geomorfología* 32(1-2):53-74. <https://doi.org/10.17735/cyg.v32i1-2.60410>

Lucieer A, de Jong SM, Turner D (2014) Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography* 38(1):97-116. DOI: 10.1177/0309133313515293

Lugo JI (1988) *Elementos de geomorfología aplicada: métodos cartográficos*. Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 128.

Lugo JI (2011) *Diccionario geomorfológico*. Geografía para el siglo XXI, Serie Textos universitarios. Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 479.

Marcolongo B, Mascellani M, Fermon F (1986) *Infrarosso termico applicato alla valutazione di zone soggette a dissesti (Val Fiorentina-Belluno)*. C.N.R.-Padova, publ. n. 86

Malet JP, Maquaire O, Calais E (2002) The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze Earthflow (Alpes-deHaute-Provence, France). *Geomorphology* 43(1-2):33-54.

Mantovani F, Soeters R, Van Westen CJ (1996) Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology* 15:213-225.

Martha TR, Kumar KV (2013) September, 2012 landslide events in Okhimath, India—an assessment of landslide consequences using very high resolution satellite data. *Landslides* 10:469-479. DOI 10.1007/s10346-013-0420-6

Maruyasu T (1964) Statistical analysis of landslides and related phenomena on aerial photographs. *Journal of Japanese Society of Photogrammetry Spec. 1*. Lisbon Congress.

Mather PM, Koch M (2011) *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*. 4th Edition Wiley-Blackwell, UK, pp. 434.

McCormick MP, Leavor KR (2013) Active lidar remote sensing. In Lenoble J, Remer L, Tanre D (eds.) *Aerosol Remote Sensing*. Springer Verlag Berlin Heidelberg. 283-313. DOI 10.1007/978-3-642-17725-5_10

McDonald HC, Grubbs RC (1975) Landsat imagery analysis: an aid for predicting landslide prone areas for highway construction. *Proc. NASA Earth Resource Symposium, Houston, Texas, Vol. 1b*. 769-778.

McKean J, Roering J (2004) Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology* 57:331-351.

Meesuk V, Vojinovic Z, Mynett A (2017) Extracting inundation patterns from flood watermarks with remote sensing SfM technique to enhance urban flood simulation: The case of Ayutthaya, Thailand. *Computers, Environment and Urban Systems* 64:239-253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.03.004>

Meinen BU, Robinson DT (2020) Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS. *Remote Sensing of Environment* 239:111666. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111666>

Moore JD (1996) Applications of satellite imagery, visualizations and remote sensing in environmental/science - An Earth Systems Science approach. *IGARSS '96 - 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium: Remote Sensing for a Sustainable Future*, 1-4:922-924.

Mora P, Baldi P, Casula G, Fabris M, Ghirotti M, Mazzini E, Pesci A (2003) Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements: application to the Ca' di Malta landslide (northern Apennines, Italy). *Engineering Geology* 68:103-121.

- Moss JL (2000) Using the Global Positioning System to monitor dynamic ground deformation networks on potentially active landslides. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2(1):24-32. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85023-0](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85023-0)
- Mueller R, Loew S (2009) Predisposition and Cause of the Catastrophic Landslides of August 2005 in Brienz (Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences* 102(2):331-344. doi:10.1007/s00015-009-1315-3
- Murillo-García F, Alcántara-Ayala I, Ardizzone F, Cardinali M, Fiorucci F, Guzzetti F (2015) Satellite stereoscopic pair images of very high resolution: a step forward for the development of landslide inventories. *Landslides* 12:277-291. DOI 10.1007/s10346-014-0473-1
- Murillo-García F, Fiorucci F, Alcántara-Ayala I (2014) Development of a landslide inventory for a region in Mexico using very high resolution satellite stereo-images. In Sassa K, Canuti P, Yin Y (eds.) *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, Vol. 2. Springer International Publishing. 821-828. DOI 10.1007/978-3-319-05050-8_127
- Mutowo G (2020) Remote sensing lake level fluctuations in response to a changing climate. *Journal of Water and Climate Change* 11(1):30-38. DOI: 10.2166/wcc.2018.122
- Nichol JE, Shaker A, Wong MS (2006) Application of high-resolution stereo satellite images to detailed landslide hazard assessment. *Geomorphology* 76:68-75. doi:10.1016/j.geomorph.2005.10.001
- Oka S, Katsurajima S (1967) A consideration to landslide photography of Matsunoyama landslide district using photogrammetric methods. *Journal of Japanese Society of Photogrammetry* 6:57-64.
- Pieri D, Abrams M (2004) ASTER watches the world's volcanoes: a new paradigm for volcanological observations from orbit. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 135(1-2):13-28.
- Pritchard ME, Simons M (2004) An InSar-based survey of volcanic deformation in the central Andes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 5(2) (Art. No. Q02002). doi:10.1029/2003GC000610.
- Prokop A, Panholzer H (2009) Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9:1921-1928.
- Quinn JA, Nyhan MM, Navarro C, Coluccia D, Bromley L, Luengo-Oroz M (2018) Humanitarian applications of machine learning with remote-sensing data: review and case study in refugee settlement mapping. *Philosophical Transactions of The Royal Society A-Mathematical Physical And Engineering Sciences* 376(2128): 20170363. DOI: 10.1098/rsta.2017.0363
- Rahman MS, Di L (2017) The state of the art of spaceborne remote sensing in flood management. *Natural Hazards* 85:1223-1248. DOI 10.1007/s11069-016-2601-9

Rathje EM, Secara SS, Martin JG, van Ballegooy S, Russell J (2017) Liquefaction-induced horizontal displacements from the Canterbury earthquake sequence in New Zealand measured from remote sensing techniques. *Earthquake Spectra* 33(4):1475-1494. DOI: 10.1193/080816EQS127M

Rees WG (2014) *Physical Principles of Remote Sensing*. 3rd edition Cambridge University Press UK, pp. 492.

Ren Z, Zhang Z, Dai F, Yin J, Zhang H (2014) Topographic changes due to the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake as revealed by the differential DEM method. *Geomorphology* 217:122-130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.020>

Rizo V, Tesauro M (2000) SAR Interferometry and Field Data of Randazzo Landslide (Eastern Sicily, Italy). *Physics and Chemistry of the Earth* 25(9):771-780.

Romer H, Kiefl R, Henkel F, Wenxi C, Nippold R, Kurz F, Kippnich U (2016) Using airborne remote sensing to increase situational awareness in Civil Protection and humanitarian relief - the importance of user involvement. In Halounova L, Safar V, Raju PLN, Planka L, Zdimal V, Kumar TS, Faruque FS, Kerr Y, Ramasamy SM, Comiso J, Hussin YA, Thenkabail PS, Lavender S, Skidmore A, Yue P, Patias P, Altan O, Weng Q (eds.) XXIII ISPRS CONGRESS, COMMISSION VIII. *International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 41(B8):1363-1370. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B8-1363-2016

Rosenfeld CL (1994) The geomorphological dimensions of natural disasters. *Geomorphology* 10:27-36.

Sabins FF (1978) *Remote Sensing Principles and Interpretation*. Freeman, San Francisco.

Salgueiro PR (1965) Landslide investigation by means of photogrammetry. *Photogrammetria* 20:107-114.

Salomonson VV (2014) Remote Sensing, Historical Perspective. In: Njoku EG (eds) *Encyclopedia of Remote Sensing*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-0-387-36699-9_158

Sauchyn DJ, Trench NR (1978) Landsat applied to landslide mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 44(6):735-741.

Scanvic JY, 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.

Scanvic JY, Rouzeau O, Colleau A (1990) SPOT, outil d'aménagement exemple de réalisation par télédétection et analyse multicritère d'une cartographie des zones sensibles aux mouvements de terrain le site de La Paz-Bolivie. BRGM Serv. Géol. Nat. Dept. Télé. Orleans Cedex, France.

Scanvic JY, Rouzeau O, Carnec C (1993) Evaluation du potentiel des données SAR pour la cartographie du risque de mouvements de terrain. Proc. Int. Symp. on: From optic to radar - SPOT and ERS-1 applications, 10-13 May, Paris.

Schulz W (2007) Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington. *Engineering Geology* 89:67-87. doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.019

Schutze C, Sauer U (2016) Challenges associated with the atmospheric monitoring of areal emission sources and the need for optical remote sensing techniques-an open-path Fourier transform infrared (OP-FTIR) spectroscopy experience report. *Environmental Earth Sciences* 75:919. DOI: 10.1007/s12665-016-5482-z

Shaikh M, Green D, Cross H (2001) A remote sensing approach to determine environmental flows for wetlands of the Lower Darling River, New South Wales, Australia. *International Journal of Remote Sensing* 22:1737-1751.

Shi W, Deng S, Xu W (2018) Extraction of multi-scale landslide morphological features based on local Gi* using airborne LiDAR-derived DEM. *Geomorphology* 303:229-242. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.005>

Shuhua Q, Brown D, Tian Q, Jiang L, Zhao T, Bergen KM (2009) Inundation Extent and Flood Frequency Mapping Using LANDSAT Imagery and Digital Elevation Models. *GIScience & Remote Sensing* 46(1):101-127. DOI: 10.2747/1548-1603.46.1.101

Simonett DS (1963) The role of landslides in slope development in the high rainfall tropics. Office Naval Research Contribution 583(11):89-133, Annual Summary Report Science Progress, 1962/63, Department Geography Meteorology, University Kansas, Lawrence, Kans.

Singhroy V (1995) SAR integrated techniques for geohazard assessment, Natural Hazards: monitoring and assessment using remote sensing techniques. *Advances in Space Research* 33(3):205-290.

Singhroy V, Mattar KE, Gray AL (1998) Landslide characterization in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images. *Advances in Space Research* 21(3):465-476.

Slaymaker O (2001) The role of remote sensing in geomorphology and terrain analysis in the Canadian Cordillera. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 3(1):11-17. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(01\)85016-9](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(01)85016-9)

Stephens PR (1988) Use of satellite data to map landslides. Proc. 9th Asian Conference on Remote Sensing, Bangkok. J.11.1-J11.7

TaLaing (1959) Landslide studies. In: Lueder DR (Editor), *Aerial Photographic Interpretation*. Mc Graw-Hill, New York, N.Y., pp.339-341.

- Tarchi D, Casagli N, Moretti S, Leva D, Sieber A (2003) Monitoring landslide displacements by using ground-based synthetic aperture radar interferometry: Application to the Ruinon landslide in the Italian Alps. *Journal of Geophysical Research* 108(B8):1-14. doi:10.1029/2002JB002204
- Teza G, Galgaro A, Zaltron N, Genevois R (2007) Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach. *International Journal of Remote Sensing* 28:3425-3446. doi:10.1080/01431160601024234
- Tholey N, Clandillon S, De Fraipont P (1997) The contribution of spaceborne SAR and optical data in monitoring flood events: examples in northern and southern France. *Hydrological Processes* 11:1409-1413.
- Thomas RF, Kingsford RT, Lu Y, Hunter SJ (2011) Landsat mapping of annual inundation (1979-2006) of the Macquarie Marshes in semi-arid Australia. *International Journal of Remote Sensing* 32:4545-4569.
- Tralli D, Blom RG, Zlotnicki V, Donellan A, Evans DL (2005) Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 59:185-198. doi:10.1016/j.isprsjprs.2005.02.002
- UNISDR (2015) Sendai framework for disaster risk reduction 2015-2030. UNISDR, Geneva
- Van Den Eeckhaut M, Poesen J, Verstraeten G, Vanacker V, Nyssen J, Moeyersons J, Van Beek LPH, Vandekerckhove L (2007) The use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. *Earth Surface Processes and Landforms* 32:754-769. DOI: 10.1002/esp.1417
- Van Den Eeckhaut M, Poesen J, Gullentops F, Vandekerckhove L, Hervás J (2011) Regional mapping and characterisation of old landslides in hilly regions using LiDAR-based imagery in Southern Flanders. *Quaternary Research* 75:721-733. doi:10.1016/j.yqres.2011.02.006
- Van Westen CJ (2013) Remote sensing and GIS for natural hazards assessment and disaster risk management. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Bishop, M.P. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, vol. 3, Remote Sensing and GIScience in Geomorphology, 259-298. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00040-3>
- Vargas GC (1992) Methodologie pour l'établissement de cartes de sensibilité aux mouvements de terrain fonde sur l'utilisation d'un couple stereographique SPOT XS/TM. Application 'a la region de Paz deg Rio (Colombie). Proc. 9er Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el estudio de Riesgos Naturales, Bogotá, Colombia. 201-220.
- Ventura G, Vilardo G, Terranova C, Sessa EB (2011) Tracking and evolution of complex active landslides by multi-temporal airborne LiDAR data: The Montaguto landslide (Southern Italy). *Remote Sensing of Environment* 115:3237-3248. doi:10.1016/j.rse.2011.07.007
- Walsh S, Butler D, Malanson GP (1998) An overview of scale, pattern, process relationships in geomorphology: a remote sensing and GIS perspective. *Geomorphology* 21:183-205.

- Wang G, Wang Y, Zang X, Zhu J, Wu W (2019) Locating and monitoring of landslides based on small baseline subset interferometric synthetic aperture radar. *Journal of Applied Remote Sensing* 13(4):1-20. doi: 10.1117/1.JRS.13.044528
- Warrick J, Ritchie A, Schmidt KM, Reid ME, Logan J (2019) Characterizing the catastrophic 2017 Mud Creek landslide, California, using repeat structure-from-motion (SfM) photogrammetry. *Landslides* 16:1201-1219. DOI 10.1007/s10346-019-01160-4
- Watanabe H, Matsuo K (2003) Rock type classification by multiband TIR of ASTER. *Geosciences Journal* 7(4):347-358. DOI: 10.1007/BF02919567
- Wright R, Flynn LP (2003) On the retrieval of lava-flow surface temperatures from infrared satellite data. *Geology* 31(10):396-893.
- Wu JD, Li Y, Li N, Shi PJ (2018) Development of an asset value map for disaster risk assessment in China by spatial disaggregation using ancillary Remote Sensing data. *Risk Analysis* 38(1):17-30. DOI: 10.1111/risa.12806
- Wen X, Zhang H, Zhou B, Huang H, Yuan Y (2016) Analysis of MODIS Satellite Thermal Infrared Information Before and After MS 6.5 Ludian Earthquake. In Bian F and Xie Y (eds.) *GRMSE 2015, CCIS 569*, 417-433. DOI: 10.1007/978-3-662-49155-3_43
- Xiao ZY, Jiang H, Song XD, Zhang XY (2013) Monitoring of atmospheric nitrogen dioxide using Ozone Monitoring Instrument remote sensing data. *Journal of Applied Remote Sensing* 7:073534. DOI: 10.1117/1.JRS.7.073534
- Xu Q, Li WL, Ju YZ, Dong XJ, Peng DL (2020) Multitemporal UAV-based photogrammetry for landslide detection and monitoring in a large area: a case study in the Heifangtai terrace in the Loess Plateau of China. *Journal of Mountain Science* 17(8):1826-1839. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6064-9>
- Yang X, Chen L (2010) Using multi-temporal remote sensor imagery to detect earthquake-triggered landslides. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12:487-495. doi:10.1016/j.jag.2010.05.006
- Zeng Z, Gan Y, Kettner A, Yang Q, Zeng C, Brakenridge GR, Hong Y (2020) Towards high resolution flood monitoring: An integrated methodology using passive microwave brightness temperatures and Sentinel synthetic aperture radar imagery. *Journal of Hydrology* 582:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124377>
- Zizioli D, Meisina C, Zucca F, Bordoni M, Notti D, Remondino F, Gamba P (2015) Evaluation of Pleiades images for rainfall-triggered shallow landslides mapping. In Lollino G, Giordan D, Crosta GB, Corominas J, Azzam R, Wasowski J, Sciarra N (eds.) *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2*. Springer International Publishing Switzerland. 405-409. DOI: 10.1007/978-3-319-09057-3_64

CAPÍTULO II: The use of UAVs for landslide disaster risk research and disaster risk management: a literature review

Ricardo J. Garnica-Peña

Posgrado en Geografía, UNAM

Irasema Alcántara-Ayala

Instituto de Geografía, UNAM

Abstract: On a global scale, from 2005 to 2019, there were 275 high-magnitude, low-frequency disasters that involved 14,172 fatalities and four million affected people. Similar patterns have taken place during longer periods of time in recent decades. This paper aims to analyse the contribution of the international landslide research community to disaster risk reduction and disaster risk management in reference to the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in a literature review. The first section notes the relevance of disaster risk research contributions for the implementation of initiatives and strategies concerning disaster risk management. The second section highlights background information and current applications of drones in the field of hazards and risk. The methodology, which included a systematic peer review of journals in the ISI Web of Science and SCOPUS, was presented in the third section, where the results include analyses of the considered data. This study concludes that most current scholarly efforts remain rooted in hazards and post-disaster evaluation and response. Future landslide disaster risk research should be transdisciplinary in order to strengthen participation of the various relevant stakeholders in contributing to integrated disaster risk management at local, subnational, national, regional and global levels.

1 Introduction

1.1 Impact of disasters associated with landslides

Owing to the growing impact of disasters on society, the scientific community has been committed to reducing disaster risk and strengthening disaster risk management, particularly in the last two decades (Lavell and Maskrey 2014; Briceño 2015; Cutter et al. 2015; Alcántara-Ayala et al. 2015; Oliver-Smith et al. 2016). As a result of current population growth and urbanization, areas highly susceptible to landslides are increasingly sites for human settlement, thus causing frequent modification of hillslopes. As a result, there has been an increase in the number of landslide-related disasters.

Notwithstanding the contributions of landslide research, local studies and recommendations made through various policies aimed at disaster risk reduction, landslide disaster events have

increased in recent years as confirmed by EM DAT records. Accordingly, from 2005 to 2019 there were 275 high magnitude, low-frequency disasters that involved 14,172 deaths and nearly four million affected people (EM-DAT database) (Fig. 1).

At the regional level, the highest number of recorded events was in Asia with 64.4%, followed by the Americas (18.2%), Africa (13.8%), Oceania (2.2%) and Europe (1.5%). As far as individual countries are concerned, China had the highest number of events with 38 (14.2%), followed by Indonesia (N=29, 10.5%), Afghanistan (N=18, 6.5%), India (N=14, 5.1%), Nepal (N=12, 4.4%), Colombia (N=11, 4%), Pakistan (N=11, 4%), Myanmar (N=10, 3.6%) and Philippines (N=10, 3.6%) (EM-DAT database) (Fig. 1).

Out of the total number of fatalities, 66% (N=9,350) were concentrated in Asia, 18.4% (N=2,608) in Africa, 14.6% (N=2,076) in the Americas and the remaining 0.8% (N=114) and 0.2% (N=24) in Oceania and Europe, respectively. Countries with highest number of human losses were China, with approximately one fifth of the total (23.8%, N=3,374), followed by Philippines with 9.1% (N=1,283), 7.9% in Sierra Leone (N=1,118), 7.0% in Indonesia (N=998), 6.3% in Afghanistan (N=886), 5.3% in Colombia (N=758) and 4.6% in India (N=657) (EM-DAT database) (Fig. 1).

Single events with highest number of losses occurred in China (August 8, 2010: 1,471 fatalities), Philippines (February 2006: 1,126 fatalities in the disaster of Leyte), Sierra Leone (August 2017: 1,102 deaths) and Uganda (March 2010: 388 fatalities and in 2015, there were 350 deaths in the El Cambray II landslide) (EM-DAT database) (Fig. 1).

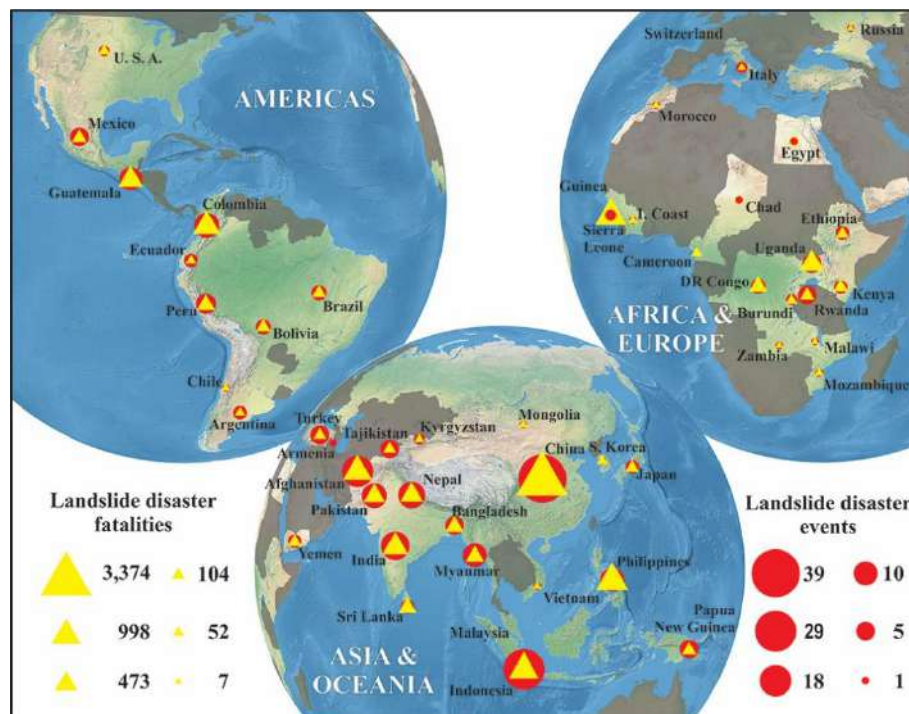


Fig. 1 Number of high-magnitude, low-frequency landslide disasters and associated fatalities around the globe from 2005 to 2019. Source: EM-DAT database.

1.2 Science, technology and policymaking

Historical and contemporary consequences of disasters provide a sound evidence base for disaster risk reduction. Thereby, strategies should be directed towards integrated disaster risk management, alongside integrated disaster risk research. Thus, moving towards integrated research on disaster risk has allowed the establishment of transdisciplinary alliances at different scales, including all relevant stakeholders, from grassroots to policymakers, to address the challenges publicised by international agendas such as the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (SFDRR) (UNISDR 2015), the Sustainable Development Goals (UN 2015) and the Climate Change Agreement (UNFCCC 2015).

Among the four priorities of the SFDRR, the first priority, understanding disaster risk, stresses that disaster risk management policies and practices should be based on an understanding of disaster risk in all its spheres of vulnerability, capacity, exposure of persons and assets, hazard characteristics and the environment (UNISDR 2015). Therefore, at the national and local levels, disaster risk information should be provided periodically and on a real-time basis, with the support of geospatial information technology to enhance measurement, collection, analysis and dissemination of data. Location-based disaster risk information, including risk maps, should be available for decision makers, the general public and communities at risk through use of geospatial information technology. On the global and regional levels, such endeavours should also identify research and technology gaps and provide recommendation priority areas for research in disaster risk reduction (UNISDR 2015).

Along these lines, landslide and other types of hazards and disaster risk research have immensely benefited from geospatial information technology such as popular Geographical Information Systems (GIS) and remote sensing techniques. Various techniques have been applied to improve our understanding of landslide dynamics, provide key instrumentation and monitoring data, assess landslide hazards and risks and map areas affected by landslide disasters (Dai and Lee 2002; Berardino et al. 2003; Canuti et al. 2004; Cheng et al. 2004; Ayalew and Yamagishi 2005; Bai et al. 2009; Pradhan 2010; Niethammer et al. 2012; Kosolapov et al. 2018; Bilasco et al. 2019; Borrelli et al. 2019; Melis et al. 2020; Eker and Aydin 2021).

Central to this task, the 21st century has witnessed the progressive incorporation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), commonly known as drones, as one of the major low-cost tools to gain a better understanding of hazards dynamics but also to address significant issues of disaster risk and disaster response. Landslide research has been no exception. Consequently, this paper aims to analyse the use of UAVs by the international landslide research community for disaster risk reduction and disaster risk management through a systematic literature review.

In an attempt to recognise the evolution of the use of UAVs for landslide disaster risk research and disaster risk management on a global scale and to identify research gaps, this systematic literature review examines related peer-reviewed published literature. This endeavour is not intended as a comprehensive analysis of the techniques and use of UAVs for landslide hazard

assessment per se but rather as a recognition of the contribution of drones to the different dimensions of landslide disaster risk research and disaster risk management.

The paper begins by noting the relevance of disaster risk research contributions for the implementation of initiatives and strategies concerning disaster risk management. It will then provide background information and current applications of drones in the field of hazards and risk. The third section is concerned with the method, which included a systematic peer-review literature of journals within the ISI Web of Science and SCOPUS. The final section, where results are presented, reflects on the extent to which existing publications of UAVs have contributed to landslide disaster risk research.

2 Unmanned Aerial Vehicles (UAV): Background information

2.1 Origins and significance

Technological advancement of UAV has made impressive progress in recent years, nonetheless, this cannot be regarded as a new development, as it resulted from the evolution of certain technologies being experimented with throughout the 20th century (Colomina and Molina 2014). According to Valavanis (2007), UAVs appeared in 1917 during World War I, where they were put to military uses. However, he posited that UAVs had their origins approximately 2,500 years ago, when humans, by imitating birds, sought to create the first objects that could fly. Therefore, in a sense, the birth of UAVs can be tied to the developments within the field of aeronautics.

Colomina and Molina (2014) suggested that this technology dates back specifically to 1916, with the Wright Brothers and their flying machine, and their initial prototype was modified and advanced by the military actions that arose around 1930. Significant progress was made regarding the use of drones for espionage, terrain recognition and mapping. Likewise, Nonami et al. (2010) highlighted the relevance of the Vietnam War, the Cold War and the Gulf War in adding to the development of UAVs, increasing their use in military tactical operations.

Undoubtedly, the technological makeup of UAV equipment during the first half of the 20th century was not nearly as complex as the drones we are familiar with today. Currently there are various versions of UAVs whose use depends to a large extent on the objectives assigned to it. UAVs have the ability to acquire aerial images that can then be useful for spatial analysis of broad swathes of territory through geospatial techniques. As a result, UAVs are included within the field of remote sensing. Indeed, UAV equipment for military use remains the most advanced in terms of technology, particularly the time of autonomy and the ability to carry large sensors.

UAVs and associated data collection have become great assets for the general population along with the use of GIS. They are put to everyday uses to collect, manage, analyse and map compiled information. This has given a greater significance to geospatial studies, such as photogrammetry and remote sensing, increasing the possibility of developing studies with a

different spatial-temporal basis (Colomina and Molina, 2014). Nonetheless, there are a series of advantages and limitations that should be considered when using UAVs (Table 1).

With regard to their applications, UAVs have been widely studied in various fields of knowledge, geosciences being among the most prominent. Numerous studies have found UAVs to be a useful tool for data acquisition in areas such as agriculture, forestry, architecture, archaeology, civil engineering, photogrammetry, environmental studies, geophysics, geology, geomorphology, geography and urban studies (Eisenbeiss 2009; Colomina and Molina 2014; Cigna 2018; Singh 2018 and Niedzielski 2018).

Advantages	Sources	Limitations	Sources
UAVs can be used under high-risk circumstances without endangering human life in remote areas	Boccali et al. 2017; Nikolakopoulos et al. 2018	There is limited UAV sensor payload in weight and dimension	Carvajal et al. 2011; Nikolakopoulos and Koukouvelas 2017
UAVs can be used in areas where access is difficult and where no manned aircraft are allowed	Danzi et al. 2013; Bouali et al. 2017; Afif et al. 2019	UAVs need to acquire a higher number of images in order to obtain the same image coverage and comparable image resolution to those derived from large-format cameras	Buill et al. 2016; Fiorucci et al. 2018
UAVs can be used with multiple sensors	Stoll 2013; Koschitzki et al. 2017; Themistocleous 2018; Yaprak et al. 2018	UAVs cannot be used in cloudy and rainy weather conditions	Chou et al. 2010; Koschitzki et al. 2017; Ardi et al. 2018; Fiorucci et al. 2018
UAVs possess real-time capabilities and the ability for fast data acquisition	Ahmad et al. 2013; Barrile et al. 2017	Low-cost UAVs sensors are normally less stable than high-end sensors	Lazar et al. 2018; Ghorbanzadeh et al. 2019
UAVs are less expensive and have lower operating costs than manned aircrafts	Akcay 2015; Barlow et al. 2017; Afif et al. 2019	Low-cost UAVs are normally equipped with less powerful engines, limiting the reachable altitude Low-cost UAVs are not equipped with air traffic communication equipment	Danzi et al. 2013; Sun et al. 2019 Van der Sluijs et al. 2018; Menegoni et al. 2019

Table 1 Advantages and Limitations of the Use of UAVs for Hazard and Disaster Risk Research

In the specific area of disaster response, several investigations have determined that the use of UAVs is fundamental not only for post-disaster analysis but for assessing pre-disaster conditions, in other words, for predicting and describing disaster risk (Giordan et al. 2017; Nikolakopoulos and Koukouvelas 2017; Giordan 2018). In this regard, the primary value of UAV technology has been its efficiency in recording aerial images for the generation of cartographic products that can be used, well in advance, in the analysis of hazards, exposure, and vulnerability, in addition to the assessment of disaster impact.

2.2 Classification

For Dalamagkidis (2015) UAV is an unmanned aircraft supported by a remote-control system. Nonetheless, different terms are used to describe UAVs. UAVs have also been referred to UAS (Unmanned Aerial System), RPV (Remotely Piloted Vehicle), RPAS (Remotely Piloted Aircraft

System) or simply as 'drones'. Such terms are strongly associated with requirements and concepts used in the military or civil field. For example, the U.S. Air Force uses the acronym 'RPA' to describe the aircraft and the pilot, while 'RPAS' is used in the UK, and the Federal Aviation Administration recognizes the term 'UAS' (Dalamagkidis 2015). Moreover, it has also been pointed out that the term 'UAV' is widely used in the fields of artificial intelligence and robotics, computational science and in photogrammetry and remote sensing. Along the same lines, the term 'RPV' was first used in 1970 by the United States Department of Defense, whereas today the National Aeronautics and Space Administration (NASA) uses 'ROA' and 'RPA' (Eisenbeiss 2009). Certainly, the use of the concept, in legal terms, will depend largely on the aeronautical authorities of each country, as well as the regulations and laws established for each case.

There are several types of UAV classifications. These vary according to factors such as shape, weight, operational altitude, type of airspace used, autonomy, military use and others. Valavanis (2015) suggested that the primary classification pertains to the weight of the aircraft (see Table 2). According to this classification, most of the equipment used for scientific research is classified into the micro or mini categories, since very often equipment heavier than 25 kg requires specific permits for use, along with an operator's license.

Additionally, equipment used in the scientific field includes UAVs with rotors (4 or 8 motors) or fixed wings; both versions possess well-defined qualities for their use, which will depend largely on the objectives of the investigation.

Type	Mass (kg)	Range (km)	Flight alt. (m)	Endurance (h)
Micro	< 5	< 10	≤ 500	≤ 1
Mini	< 20-150 ^a	< 10	150-300 ^a	≤ 2
Tactical				
Close range (CR)	25-150	10-30	3,000	2-4
Short range (SR)	50-250	30-70	3,000	3-6
Medium range (MR)	150-500	70-200	3,000	6-10
Low altitude long endurance (LALE)	500-1,500	> 500	3,000	> 24
Medium altitude long endurance (MALE)	1,000-1,500	> 500	3,000	24-48

Note: a = varies according to the legislation of each country

Table 2 UAV Categorization for Differentiation of Existing Systems. Source: Van Blyenburgh (2006).

UAVs are also classified in terms of take-off and landing configuration: Horizontal Take-off landing (HTOL) and Vertical Take-off landing (VTOL) (Hassanalian et al. 2017). VTOL posse an advantage over the HTOLs when it comes to the aircraft floating or staying stable in flight, however, it also presents limitations as cruising speed is lower than HTOL, and therefore, they are not considered for long distance missions in which higher speed is required. VTOL equipment is widely used due to its ability to take off vertically. Development of equipment combining the capabilities of both types has been sought. Thus, various configurations have been created depending on the size of the UAV equipment. In equipment heavier than 2 kg, 4 hybrid configurations are available, namely tilt-rotor, tilt-wing, tilt-body and ducted fan UAV.

For most commercial equipment of the type of micro drones, which are characterised by less than 2 kg of weight, configurations include fixed-wing, flapping wing, tilt-rotor, ducted fan and rotary wing. The latter, among the best known and used internationally, are also subdivided according to the number of engines, for example, twincopter, tricopter, quadrotor, hexacopter, octocopter, etc.

In the analysis carried out in this work, it was observed that the use of commercial, VTOL equipment with a rotary wing configuration predominated.

2.3 Characteristics and sensors

As mentioned earlier, commonly used equipment for scientific investigations is classified as micro or mini, since most UAVs involved in these investigations have an average weight between 1 and 25 kg, a range less than 10 km and a flight ceiling close to 500 m (Van Blyenburgh 2006). The autonomy time of the equipment can vary between 15 to 90 min depending on batteries, as well as type of equipment being used. A good example of maximum flight time is fixed-wing SenseFly eBee X RTK. This type of equipment, with various degrees of flight autonomy, has been used in several studies where flight missions covering very large areas are required (Dall'Asta et al. 2016; Harder et al. 2016; Kraaijenbrink et al. 2016; Lambiel et al. 2017).

Similarly, the choice of equipment depends on the area to be examined and the scale of work. Fixedwing equipment allows for coverage of larger areas, unlike the propeller-based models. Nonetheless, the latter can obtain better-quality oblique images.

The types of sensors also vary. They can be optical (DJI equipment, EVO, Yuneec, SenseFly eBee), multispectral (MAPIR Camera, Parrot SEQUOIA), radar, LiDAR (RIEGL Vux-1UAV, VelosUAV, OnyxStar Xena) or those that include thermal cameras (FLIR Duo Pro R, DJI Zenmuse XT, Workswell WIRIS®Pro). Efforts are currently being made to add other types of sensors in order to extract more information about different phenomena.

2.4 Applications

UAVs are used in a diverse array of research studies and in many different disciplines. UAVs have been the subject of studies on agriculture (Tekin and Fornale 2019), forestry and fires (Merino et al. 2015), archaeology and cultural heritage (Themistocleous et al. 2017), environmental sciences (Jayaweera et al. 2019), wildlife (Zmarz et al. 2018), geomorphology, geology and geophysics (Walter et al. 2018).

Within the natural hazards field, there are several studies developed to address the characteristics and dynamics of floods (Murphy et al. 2016; Serban et al. 2016; Izumida et al. 2017; Cescutti et al. 2018; Langhammer and Vackova 2018; Yalcin 2018; Leal Alves et al. 2020), earthquakes and tsunamis (Li et al. 2011; Nedjati et al. 2016; Vollgger and Cruden 2016; Dominici et al. 2017; Valkaniotis et al. 2018; Mavroulis et al. 2019; Koukouvelas et al. 2020), fires (Merino et al. 2012), volcanic processes (Mori et al. 2016; Thiele et al. 2017; Darmawan et

al. 2018; Favalli et al. 2018; De Beni et al. 2019; Kazahaya et al. 2019) and landslides, which are the object of the present study (Stumpf et al. 2013; Lucieer et al. 2014; Barlow et al. 2017; Tanteri et al. 2017; Chang et al. 2018; Comert et al. 2018).

Some of the reasons that justify the use of UAVs in studies within the field of Earth sciences include rapid image accessibility (post-disaster events), low cost compared with satellite imagery, access to difficult areas or under high-risk circumstances, best option to acquire images of small areas with higher pixel resolution, easy operation, possibility of mounting different types of sensors, transportation convenience without the need for large vehicles, among some other aspects.

3 Methodology

A systematic search approach was used to seek out published, peer-reviewed investigations focused on the use of UAVs for landslide research on a global scale (Fig. 2).

Originally the search strategy was to review 20 years of literature, although in the end, our focus was limited to the period between 2000 and 2019. However, since the major publications on this topic started in 2005, the timeframe was set up as 2005 to 2019. Aiming at analysing consistent peer-reviewed studies, only publications in English were considered. Owing to the systematic nature and comprehensiveness of databases, searches were undertaken in the main bibliographic repositories 'ISI Web of Science' and 'SCOPUS'. Initial results were screened to fit into this study's research plan in two phases: first, title and abstract, and second, full text. Articles that met the inclusion criteria in the first phase were reviewed at the full text phase (Fig. 2).

Inclusion criteria of the papers analysed included peer-reviewed publications during the period January 2005 and December 2019, with a global geographic scope and containing the terms 'UAV', 'RASP', 'drone' and 'unmanned', in addition to 'landslide', 'mass movement', 'slope failure', 'mass wasting', 'slope instability', 'slope processes', 'unstable slope', 'avalanche', 'rock-fall' and 'rock-slide'. Landslide-related terms were added to exclude all publications concerning study by use of UAVs related to other types of hazards such as earthquakes, floods, forest fires, etc. (Fig. 2).

Based on the search strategy and inclusion criteria, 333 publications were identified within the ISI Web of Science, whereas in SCOPUS 398 articles met the conditions. After manual and automatic deduplication, a total of 241 publications (191 ISI Web of Science and 50 SCOPUS) were included in this study (Fig. 2).

The following general categories of variables were extracted from the articles to create a structured matrix of information for further analysis of knowledge gaps and knowledge clusters: (1) year of publication; (2) type of publication (journals or books); (3) Global Citation

Score (for ISI Web of Science); (4) list of authors; (5) main scientific field; (6) list of institutions; (7) countries; (8) country where research was carried out; (9) topics of the research (hazard, vulnerability, risk assessment, response and post-disaster assessment); and (10) method of analysis (monitoring, landslide inventory, DEM, landslide characterization and survey/ mapping).

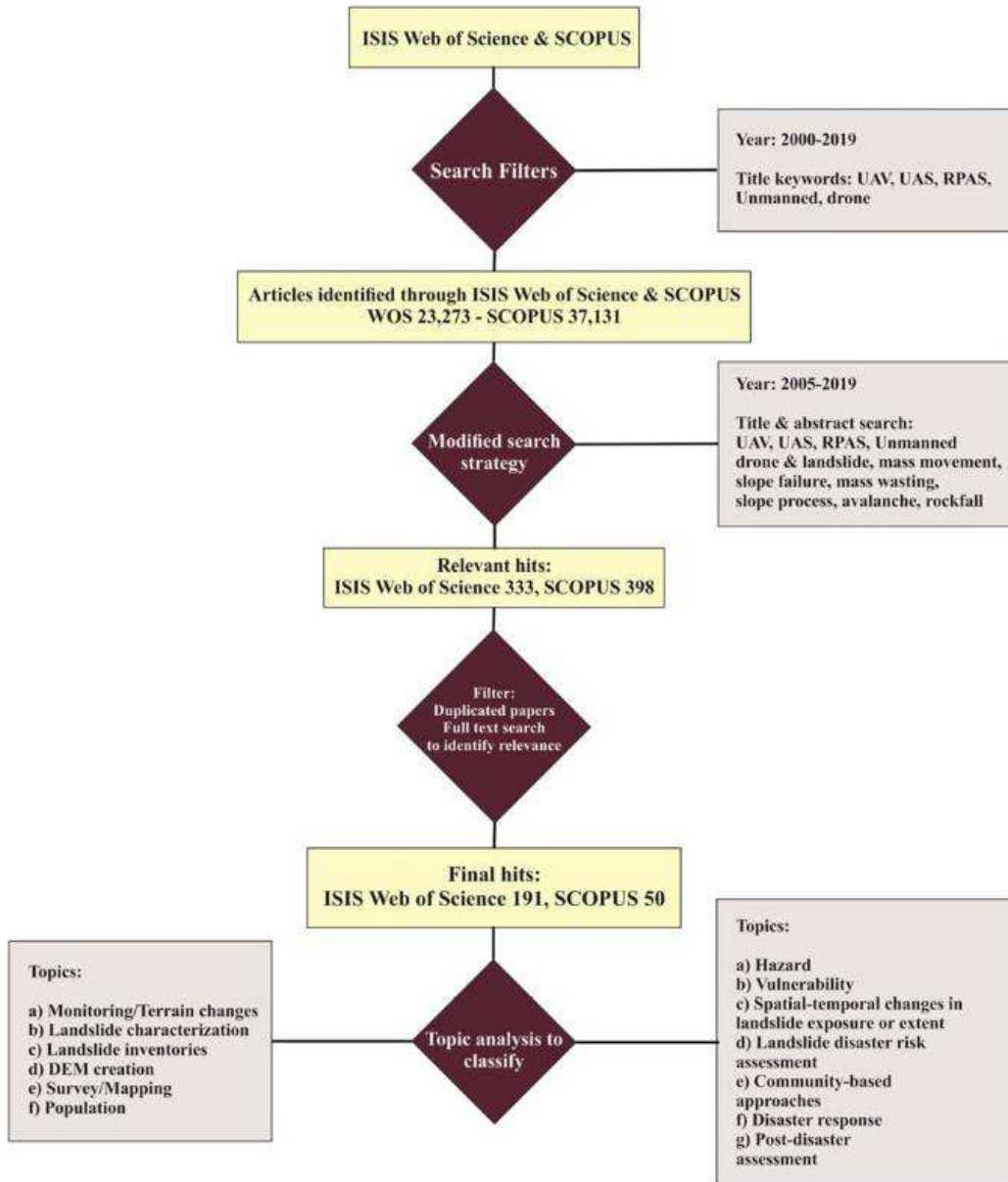


Fig. 2 Systematic mapping procedure.

4 Results

4.1 General description

Results from the search process showed that 241 publications were selected, out of which 191 were included in the ISI Web of Science and 50 in SCOPUS. Identified as selection factors were number of publications per year, the publication's influence, a focus on disaster risk research, countries of publication and disciplines studying the use of UAVs for landslide disaster risk research and management. The same procedure was followed by those publications included in SCOPUS by using Excel, except in the case of the Global Citation Score of authors.

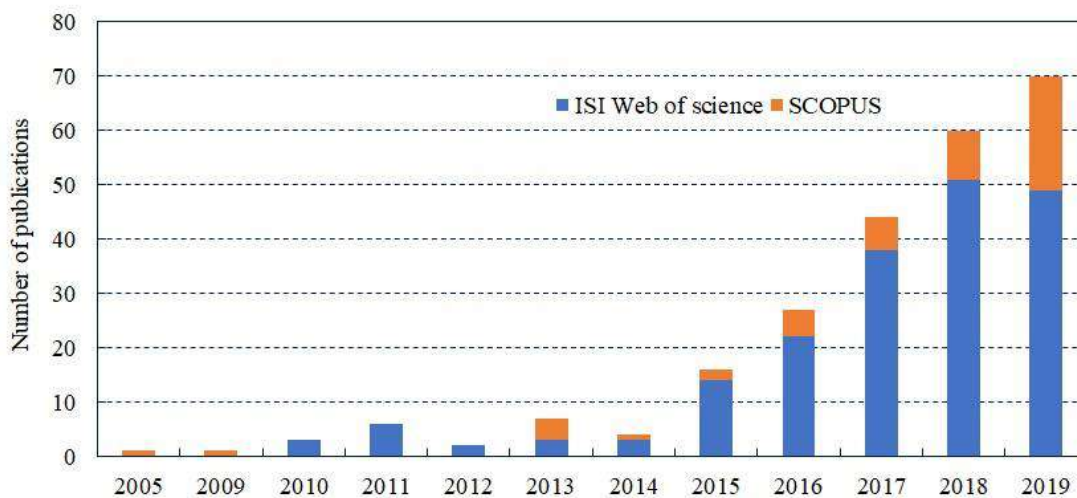


Fig. 3 Temporal distribution of published investigations.

Of the total number of publications ($N=241$), 24 were published from 2005 to 2014 and 217 between 2015 and 2019. Despite the fact that there were no records for the years 2006, 2007 and 2008, there was a noticeable development in these investigations starting in 2015 ($N=14$) showing an ascending trend until 2019 when 29% of the total publications were produced ($N=70$) (Fig. 3).

At the regional level, authors from European countries published 62.2% of the total articles (37.2% in collaboration with institutions from the same continent and 25% from other regions), while those from Asia participated in 48.1% (35.1% with institutions from the same region and 13% with the participation of authors from other continents). Authorship from the Americas accounted for 17.8% (12.9% in association with institutions from the same region and 4.9% from other geographical areas), while Oceania and Africa published 1.7% and 0.8%, respectively, in partnership with institutions from other global regions.

Journal	Number of records
<i>Landslides</i>	29
<i>International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives)</i>	15
<i>Remote Sensing</i>	11
<i>Natural Hazards and Earth System Sciences</i>	9
<i>Engineering Geology</i>	8
<i>ISPRS International Journal of Geo-Information</i>	6
<i>Journal of Mountain Science</i>	6
<i>Geomorphology</i>	5
<i>Geosciences</i>	5
<i>Bulletin of Engineering Geology and the Environment</i>	4
<i>Environmental Earth Sciences</i>	4
<i>Geomatics Natural Hazards & Risk</i>	4
<i>Advancing Culture of Living with Landslides, vol 2: Advances in Landslide Science</i>	3
<i>International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-G)</i>	3
<i>International Journal of Remote Sensing</i>	3
<i>IOP Conference Series: Earth and Environmental Science</i>	3
<i>ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences</i>	3
<i>Journal of Applied Remote Sensing</i>	3
<i>Landslides and Engineered Slopes: Experience, Theory and Practice, vols 1-3</i>	3
<i>Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications IX</i>	2
<i>Earth Surface Dynamics</i>	2
<i>Earthquake Spectra</i>	2
<i>Engineering Geology for Society and Territory, vol 2: Landslide Processes</i>	2
<i>First Break</i>	2
<i>Geoenvironmental Disasters</i>	2
<i>IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium</i>	2
<i>MATEC Web of Conferences</i>	2
<i>Natural Hazards</i>	2
<i>Progress in Earth and Planetary Science</i>	2
<i>Sensors</i>	2
<i>XXIII ISPRS Congress, Commission V</i>	2
Journals with 1 Publication	90
Total	241

Table 3 Publications with the Most Articles Issued

Literature analysed from the period 2005 to 2019 was shown to include 153 journal articles (63.5%), 87 conference proceeding papers (36.1%) and one review paper (0.4%). The largest number of studies were published in the journal Landslides (N=29), followed by the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives) (N=15), Remote Sensing (N=11), Natural Hazards and Earth System Sciences (N=9) and Engineering Geology (N=8). All of them included records published from 2015 to 2019 (Table 3).

Fields of research associated with the publications included civil engineering (N=35), geology (N=34), earth sciences (N=28) and geography (N=22). Most of these studies are from geosciences, environment-related disciplines and geospatial information science and new technologies (Fig. 4). It is worth mentioning that among these disciplinary areas, hazard evaluation approaches predominate.

Of the total number of publications, 81.3% (N=196) were focused on hazards, 17% on post disaster assessment (N=41), 0.8% on disaster response activities (N=2), 0.4% on community-based approaches (N=1) and 0.4% on spatial-temporal changes in landslide exposure or extent (N=1). No publications were concerned with vulnerability related aspects or landslide disaster risk assessment (Table 4).

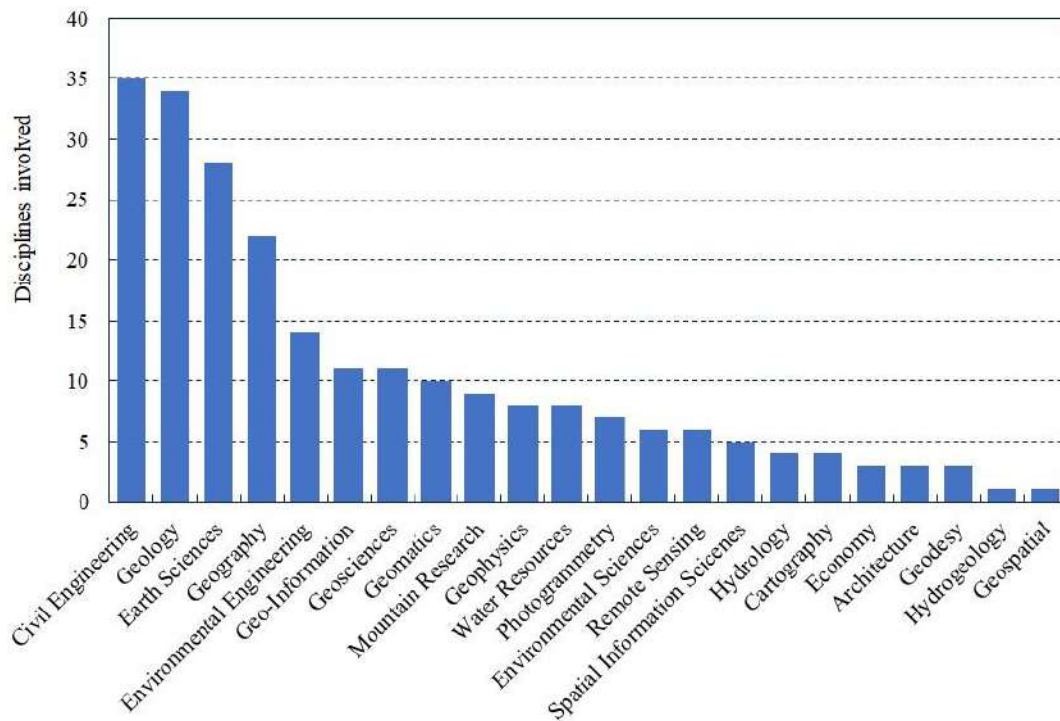


Fig. 4 Disciplines engaged in landslide disaster risk research using UAVs.

Methodological Approach/ Topics of research	Hazard	Vulnerability	Spatial-temporal changes in landslide exposure or extent	Landslide disaster risk assessment	Community based approaches	Disaster response	Post-disaster assessment
Monitoring, terrain changes	67	0	0	0	0	1	5
Landslide characterization	117	0	1	0	0	2	29
Landslide inventories	4	0	0	0	0	1	11
DEM	122	0	0	0	0	1	21
Surveying, mapping	197	0	1	0	1	2	39
Population	0	0	0	0	0	0	0

Table 4 Methodological Approaches and Landslide-Related Research Focus of Publications

4.2 Hazards

Out of the 241 publications reviewed, 81% (N=195) had studies on the use of UAVs to carry out aerial photographic surveys to produce orthophotos (Afif et al. 2019; Cardenal et al. 2019; Nikolakopoulos et al. 2019) which identified geomorphological and morphometric attributes of mass movement processes as well as symptoms of hillslope instability such as ground deformation, cracks, formation of escarpments and changes in the morphology of the terrain or in the volume of displaced or moving masses (Rothmund et al. 2015; Busa et al. 2019; Karantanellis et al. 2019). Oblique photos, video and point cloud generation records were also among the main topics of this type of application (Francioni et al. 2015; Rossi et al. 2016; Pfeiffer et al. 2019).

In the study of aerial images produced by UAVs, 48.5% of the publications (N=117) emphasized landslide characterisation: area, length, slope and volume were noted from the images and information obtained in the field (Shi et al. 2015; Chang et al. 2018; Chudy et al. 2019). A total of 51% (N=122) of the publications studied UAVs in relation to digital terrain models for morphometric and susceptibility analyses and for monitoring changes or the landslide dynamics of active processes (Tanteri et al. 2017; Yeh et al. 2018; Sun et al. 2019). These models were both digital surface models (DSM) and terrain models (DTM) with pixel sizes smaller than one meter. They were also used to produce high-resolution 3D views of the sites investigated.

Publications that addressed issues such as monitoring (or changes in the terrain) and inventory creation only accounted for 27.4% (N=66) and 1.7% (N=4) of the total. In the first case, studies were mainly focused on monitoring landslide dynamics (Stumpf et al. 2013; Barlow et al. 2017; Obanawa and Hayakawa 2018), the evolution of landforms (Lucieir et al. 2014; Rau et al. 2014; Hsieh et al. 2016; Comert et al. 2018; Ghorbanzadeh et al. 2019; Horacio et al. 2019; Li et al. 2019), as well as the processes of removal and accumulation of soil or rock, characterisation of joints, identification and dynamics of fault fractures, fissures and scarps and changes in the relief in comparison with elevation models or point clouds (Stumpf et al.

2013; Francioni et al. 2015; Letortu et al. 2018). In most cases, the work was done by combining different types of spatial data (satellite images, LIDAR, digital elevation models, historical photographic records, etc.) with UAV images.

From the total papers reviewed, 224 (92.9%) of studies used only one drone to carry out the related research, while the remaining 17 (7.1%), reported the use of more than one drone. Out of the 185 types of UAVs that were included in the analysed literature, 164 were micro, 20 were mini and only one was a medium UAV.

Publications featuring models of UAVs were only reported in 62.2% of the contributions. DJI Phantom equipment was the most used (Table 5). RGB cameras were adapted to the drones in 95% of the cases, followed by LIDAR (3%), multispectral cameras (1.5%) and a magnetometer.

UAVs models	Percentage
DJI Phantom 4 pro	11.8
DJI Phantom 2	8.7
DJI Phantom 3 Pro	8.1
DJI Phantom 3 Adv	6.2
Asctec Falcon 8	5.6
DJI phantom 4	5.0
SenseFly eBee	3.7
DJI Mavic pro	2.5
F1000 Feima Robotics	2.5
DJI Phantom 3 Standard	2.5
DJI S1000	1.9
DJI Inspire 1	1.9
Mikrokopter Okto XL	1.9
DJI Inspire 2	1.9
Quest 300	1.9
DST drone Saturn	1.9
Other models (42)	32.3

Table 5 Models of UAVs Used in the Reviewed Publications

4.3 Vulnerability

Despite the term ‘vulnerability’ frequently being used in landslide disaster risk context to refer to physical fragility of buildings, this study, much like Alcántara-Ayala (2021), understands the notion of vulnerability as the set of socioeconomic, cultural, political, institutional and environmental conditions or processes which increase the likelihood of individuals, groups of people/communities, assets or systems of being negatively impacted by landslides. Therefore, owing to the evident linkages of vulnerability studies with the social conditions of the exposed population to the potential occurrence of landslides, this issue has not yet been addressed from the perspective of UAV use.

4.4 Spatial-temporal changes in landslide exposure or extent

Only one publication focused on evaluating urban growth and associated spatial-temporal exposure of buildings and people in a mountainous area highly susceptible to landslides (Garnica and Alcántara 2017).

4.5 Landslide disaster risk assessment

Owing to the positioning of landslide disaster risk in the interface between societies and the environment, on the edge of socio-environmental processes within specific territorial contexts, landslide disaster risk assessment involves qualitative and/or quantitative approaches to identify the multidimensional nature of disaster risk including landsliding characterisation and estimating conditions of exposure and vulnerability. When combined, these conditions could negatively affect communities, livelihoods, assets and the environment (Alcántara-Ayala 2016). This conceptual approach to integrated landslide disaster risk research has not been widely represented in the scientific literature, which is not surprising given the lack of publications that include the use of UAVs related to this kind of approach.

4.6 Community-based approaches

Lin et al. (2019) is the only article suggesting the possibility of using UAV images to encourage education and community mapping in regions affected by landslides.

4.7 Disaster response

Two articles were found regarding the use of UAVs in disaster response. De Cubber et al. (2014) deployed a UAV in the Balkans in spring 2014 to work with traditional relief workers in damage assessment, area mapping, visual inspection and re-localizing the still dangerous remains of military ordnance that shifted during flooding and landslides. Likewise, in order to support decision making regarding reopening a main road, investigations of an earthquake-triggered rockfall in central Italy were carried out by Santangelo et al. (2019).

4.8 Post-disaster assessment

A total of 41 publications (17%) that covered topics of post-disaster evaluations using UAV were identified (Wen et al. 2011). These included the impact of landslide disasters along with the characterisation of landslide processes (Coe et al. 2016; Dang et al. 2016; Catane et al. 2019). Of particular relevance were 11 studies (N=4.6%) in which landslide inventories generating spatial distribution maps were developed (Yang et al. 2015; Zekkos et al. 2017; Chen et al. 2018; Saito et al. 2018).

These investigations were mostly directed towards the creation of aerial photography surveys to subsequently produce maps, orthophotos and digital elevation models. Characteristics of the landslide processes, and to a lesser extent damage or impacts on populations or roads, were also considered. Based on such experience, several authors agreed that UAVs could be regarded as very good tools for monitoring, surveys and mapping in terms of immediate response and economic thrift but also considered that lack of autonomy time, since it ranged from 15 to 45 min depending on the type of equipment used, is the most significant disadvantage, as it prevents the UAV from operating in a wide geographical area.

5 Discussion

Aligned with the SFDRR, the science and technology communities are committed to reinforcing strategies to leverage innovation and technology development for disaster risk management (UNISDR 2015), particularly through scientific assessments, synthesis of policy-relevant scientific evidence, scientific advice to decision makers and monitoring and review, along with the cross-cutting capabilities of communication and engagement and capacity development (Aitsi-Selmi et al. 2015).

The goal of this review was to gather the available evidence regarding the progress of the use of UAVs for landslide disaster risk research and disaster risk management on a global scale and to identify research gaps. We identified 241 peer-reviewed articles that investigated such outcomes: 12% of these were published in the *Landslides* journal.

This paper began by presenting the significance of landslide disasters on societies around the globe. From a technical perspective there are advantages and limitations regarding the use of UAVs for hazard and disaster risk research and disaster response (Table 1). In broad terms, it can be said that UAVs are inexpensive equipment able to reach remote sites, and in so doing, they reduce the chance of people being exposed to harm, particularly during or after a disaster. Despite being capable of producing high resolution images, workload and time invested in the generation of cartographic products can be substantial. Nonetheless, recent investigations on their various applications suggest their unlimited potential for use in Integrated Landslide Disaster Risk Management (Alcántara-Ayala 2021).

This review showed that literature on the use of UAVs for Disaster Risk Reduction (DRR) and Disaster Risk Management (DRM), while making technological advances, deals particularly with landslide dynamics and disaster response. Among the various topics, five relatively distinctive foci were found (Table 4). Most of the studies reviewed focused on landslide hazards (81.3%), followed by post disaster assessment (17%). Quite clearly, social aspects related to vulnerability dimensions have not been privileged so far in this type of research.

Methodologies involved included five major steps: (1) mission planning; (2) flight survey; (3) postprocessing (ground control points, images) by using Structure from Motion (SfM) techniques using diverse software (Agisoft, Pix4D, Photomodeler, Contextcapture, Trimble business); (4) UAV-derived products (point clouds, orthoimages, DSM/DTM, 3D models); and

(5) main areas of analysis (landslide inventories, participatory mapping, assessing losses, landslide monitoring, extraction of landslide geometrical and geomorphological features, elements exposed to landslides, emergency and early warning systems, landslide post-disaster impact analysis, landslide susceptibility mapping, landslide simulation and augmented reality).

From a natural hazards perspective, the main research contributions of published papers were mostly focused on mapping geometric or geomorphologic features (28.2%); landslide monitoring (27.4%); multitemporal analysis of landslides to analyse morphology, displacement, volumes and development of cracks (10%); landslide susceptibility in terms of hazard or risk (8.7%); landslide inventories (5.4%); landslide simulation (3.7%); reconstruction of topography (2.5) and landslide dynamics (1.7%).

According to the papers included in the review, the use of UAVs in landslide studies was considered a good alternative to traditional techniques as UAVs are inexpensive, lightweight, compact, and capable of reaching difficult-to-access areas, integrating different sensors and producing high-resolution imagery suitable for temporal surveys and post disaster emergencies. Among the principal drawbacks of UAVs are the lack of operability under particular weather conditions (wind, rainfall), they only have a limited area of coverage and a short flight range, do not perform well in dense vegetation, have a limited autonomy time and are hampered by aerial flight regulations.

Given the technical nature of UAVs and their capabilities for survey and mapping, it is not surprising that a great percentage of the published literature deals with identifying hazards and disaster response. Additionally, one potential reason for such an outcome could be the prevalence of hazard-centric research undertaken mostly from mono-disciplinary perspectives. Likewise, despite the encouraging results of how the SFDRR takes care of its main priorities, there is still a wide misunderstanding of the notion of disaster risk; yet often, disaster risk and disasters are seen as synonymous with hazards, lacking a comprehensive understanding of the processes involved in the social construction of risk (Lavell and Maskrey 2014; Oliver-Smith et al. 2016; Satake et al. 2018). Undoubtedly, “Governance arrangements, risk assessments, early warning systems, and other institutional and technical capacities still concentrate on natural hazards” (Briceño 2015). In the same vein, efforts remain unbalanced as disaster risk governance still focuses on disaster response and recovery (Lavell and Maskrey 2014; Briceño 2015).

6 Concluding Remarks

Although the use of drones in DRR is a relatively new field of study and the literature available is limited, results from this systematic review map focused on the application of UAVs in landslide disaster risk research. Disaster risk management on a global scale revealed that there have been increasing numbers of publications on the subject in the last fifteen years, but especially in the last lustrum.

Evidence for the identification of several knowledge gaps was found. Geographical representation is not well balanced. At a regional level, research has been conducted mostly in Europe and by developed countries, while most of the articles were published in China, Italy and the United States. Mapped literature has also shown the current state of the DRR landslide research base and the wide range of disciplines involved.

The existing evidence to date suggests that although several studies have focused on landslide hazards and response, it would be desirable to conduct further research to address topics associated with vulnerability, exposure and disaster risk assessment and also to further strengthen collaborations among countries and regions.

While we concur with many of these studies about the need to promote real-time access to reliable data, as that produced by UAVs after, for example, a landslide or a disaster occurs, in situ information regarding communities and property/assets at risk is also needed for analysis and dissemination of data to be used by different stakeholders to reduce disaster risk.

The role of science and technology in the DRR policy arena is still insufficient, and more detailed and cost-effective research is needed to identify key lessons and policy challenges, as well as strengthening capacity building at a local level. Based on the analysis presented here, it was found that research related to the use of UAVs for disaster risk reduction can be considered a cost-effective approach whose future progress will have the utmost relevance in developing nations where funding available for science is limited.

The understanding of landslide disaster risk and the contributions provided by landslide research are highly valuable for strengthening disaster risk reduction initiatives. Owing to the complexity of landslides, efforts should be made to address all aspects of disaster risk. Therefore, this study advocates for more partnerships between the natural and social sciences in the coming years, as well as other stakeholders, including communities at risk. There needs to be greater consideration of potential synergies in integrated landslide disaster risk research using UAVs, including improved understanding of disaster risk by considering hazards, vulnerability and exposure. Failure to include such approaches precludes subsequent analysis and hampers the efficacy of landslide disaster risk research for guiding DRR policy and practice.

Acknowledgments

This work was carried out within the framework of the PAPIIT project IN300818, sponsored by DGAPA-UNAM. Thanks are due to EM-DAT: The CRED/OFDA International Disaster Database. The authors would like to thank the Editor and two anonymous reviewers for providing comments and suggestions that helped to improve the manuscript.

References

- Afif HA, Rokhmatuloh R, Hernina R (2019) UAV Application for Landslide Mapping in Kuningan Regency, West Java. *E3S Web of Conferences* 125:1-4. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912503011>
- Ahmad A, Tahar KN, Udin WS, et al. (2013) Digital Aerial Imagery of Unmanned Aerial Vehicle for Various Applications. 2013 IEEE International Conference on Control System, Computing And Engineering (ICCSCE 2013) 535-540.
- Aitsi-Selmi A, Blanchard K, Al-Khudhairi D, et al. (2015) UNISDR STAG 2015 Report: Science is used for disaster risk reduction. <http://preventionweb.net/go/42848>.
- Akcay O (2015) Landslide Fissure Inference Assessment by ANFIS and Logistic Regression Using UAS-Based Photogrammetry. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4(4):2131-2158. <https://doi.org/10.3390/ijgi4042131>
- Alcántara-Ayala I, Altan O, Baker D, et al. (2015) Disaster Risks Research and Assessment to Promote Risk Reduction and Management, In: Ismail-Zadeh A. and Cutter S. (eds.), ICSU-ISSC Ad Hoc Group on Disaster Risk Assessment, Paris: ICSU.
- Alcántara-Ayala I (2016) On the multi-dimensions of Integrated Research on Landslide Disaster Risk, In Aversa S, Cascini L, Picarelli L, and Scavia C. (eds.) *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice* CRC Press, Balkema, Taylor & Francis Group pp 155-168. Volume 1. ISBN: 978-1-138-02989-7.
- Alcántara-Ayala I (2021) Integrated Landslide Disaster Risk Management (ILDRiM): the challenge to avoid the construction of new disaster risk, *Environmental Hazards*, <https://doi.org/10.1080/17477891.2020.1810609>
- Ardi ND, Iryanti M, Asmoro CP, et al. (2018) Mapping Landslide Potential Area using Fault Fracture Density Analysis on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Image. *1ST UPI International Geography Seminar 2017*, 145:1-5. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/145/1/012010>
- Ayalew L, Yamagishi H (2005) The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65:15-31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Bai SB, Wang J, Lü GN, et al. (2009) GIS-Based and Data-Driven Bivariate Landslide-Susceptibility Mapping in the Three Gorges Area, China. *Pedosphere* 19(1):14-20. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(08\)60079-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60079-X)
- Barlow J, Gilham J, Cofra II (2017) Kinematic analysis of sea cliff stability using UAV photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10):2464-2479. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1275061>

- Barrile V, Bilotta G, Nunnari A (2017) 3D Modeling with Photogrammetry by UAVs and Model Quality Verification. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 4:129-134. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-129-2017>
- Berardino P, Constantini M, Franceschetti G, et al. (2003) Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy). *Engineering Geology* 68:31-51. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00197-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00197-7)
- Bilasco S, Rosca S, Petrea D, et al. (2019) Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences 451-465. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00020-X>
- Boccali C, Biolchi S, Zavagno E, et al. (2017) Rock Fall Characterization in Climbing Spots: The Case Study of the "Napoleonica" Tourist Route (Trieste, NE Italy). *Advancing Culture of Living with Landslides, Vol 2: Advances in Landslide Science* 107-115. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53498-5_13
- Borrelli L, Conforti M, Mercuri M (2019) LiDAR and UAV System Data to Analyse Recent Morphological Changes of a Small Drainage Basin. *International Journal of Geo-Information* 8(536) <https://doi.org/10.3390/ijgi8120536>
- Bouali EH, Oommen T, Vitton S, et al. (2017) Rockfall Hazard Rating System: Benefits of Utilizing Remote Sensing. *Environmental & Engineering Geoscience* 23(3):165-177. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.23.3.165>
- Briceño S (2015) Looking back and beyond Sendai: 25 years of international policy experience on disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Science* 6(1):1-7. <https://doi.org/10.1007/s13753-015-0040-y>
- Buill F, Nunez-Andres MA, Lantada N, et al. (2016) Comparison of Photogrammetric Techniques for Rockfalls Monitoring. *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2016)* 44(1-4). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/44/4/042023>
- Busa J, Rusnak M, Kusnirak D, et al. (2019) Urban landslide monitoring by combined use of multiple methodologies-a case study on Sv. Anton town, Slovakia. *Physical Geography* 41(2):169-194. <https://doi.org/10.1080/02723646.2019.1630232>
- Canuti P, Casagli N, Ermini L, et al. (2004) Landslide activity as a geoinicator in Italy: significance and new perspectives from remote sensing. *Environmental Geology* 45:907-919. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/s00254-003-0952-5>
- Cardenal J, Fernandez T, Perez-Garcia JL, et al. (2019) Measurement of Road Surface Deformation Using Images Captured from UAVs. *Remote Sensing* 11(12). <https://doi.org/10.3390/rs11121507>
- Carvajal F, Aguera F, Perez M (2011) Surveying a Landslide in a road embankment using Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. *International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-G)* 38(1, C22):201-206.

Catane SG, Veracruz NAS, Flora JRR, et al. (2019) Mechanism of a low-angle translational block slide: evidence from the September 2018 Naga landslide, Philippines. *Landslides* 16(9):1709-1719. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01212-9>

Cescutti F, Cefalo R, Coren F (2018) Application of Digital Photogrammetry from UAV Integrated by Terrestrial Laser Scanning to Disaster Management Brcko Flooding Case Study (Bosnia Herzegovina). In Cefalo R, Zielinski J, Barbarella M (Eds) *New Advanced GNSS and 3D Spatial Techniques*. Springer International. Pp 245-260. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56218-6_20

Chang KJ, Chan YC, Chen RF, et al. (2018) Geomorphological evolution of landslides near an active normal fault in northern Taiwan, as revealed by lidar and unmanned aircraft system data. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18(3):709-727. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-709-2018>

Chen ML, Lv PF, Zhang SL, et al. (2018) Time evolution and spatial accumulation of progressive failure for Xinhua slope in the Dagangshan reservoir, Southwest China. *Landslides* 15(3):565-580. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0946-8>

Cheng KS, Wei C, Chang SC (2004) Locating landslides using multi-temporal satellite images. *Advances in Space Research* 33:296-301. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00471-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00471-X)

Chou TY, Yeh ML, Chen YC, et al. (2010) Disaster Monitoring and Management by the Unmanned Aerial Vehicle Technology. *100 Years ISPRS Advancing Remote Sensing Science*, PT 2, 38:137-142.

Chudy F, Slamova M, Tomastik J, et al. (2019) Identification of Micro-Scale Landforms of Landslides Using Precise Digital Elevation Models. *Geosciences* 9(3). <https://doi.org/10.3390/geosciences9030117>

Cigna F (2018) Observing Geohazards from Space. *Geosciences* 8(2). <https://doi.org/10.3390/geosciences8020059>

Coe JA, Baum RL, Allstadt KE, et al. (2016) Rock-avalanche dynamics revealed by large-scale field mapping and seismic signals at a highly mobile avalanche in the West Salt Creek valley, western Colorado. *Geosphere* 12(2):607-631. <https://doi.org/10.1130/GES01265.1>

Colomina I, Molina P (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92:79-97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>

Comert R, Avdan U, Gorum T (2018) Rapid mapping of forested landslide from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 42(3-4):171-176. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-171-2018>

Cutter SL, Ismail-Zadeh A, Alcántara-Ayala I, et al. (2015) Global risks: Pool knowledge to stem losses from disasters, *Nature* 522 (7556): 277-9. <https://doi.org/10.1038/522277a>

Dai FC, Lee CF (2002) Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42:213-228. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00087-3)

Dalamagkidis K (2015) Definitions and Terminology. In Valavanis KP and Vachtsevanos GJ (eds.), *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer, ISBN 978-90-481-9706-4, 3022 p.

Dall'Asta E, Forlani G, Roncella R, et al. (2016) Unmanned Aerial Systems and DSM Matching for Rock Glacier Monitoring. *J. Photogramm. Remote Sens.* 127:102-114. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.10.003>

Dang K, Sassa K, Fukuoka H, et al. (2016) Mechanism of two rapid and long-runout landslides in the 16 April 2016 Kumamoto earthquake using a ring-shear apparatus and computer simulation (LS-RAPID). *Landslides* 13(6):1525-1534. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0748-9>

Danzi M, Di Crescenzo G, Ramondini M, et al. (2013) Use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for photogrammetric surveys in rockfall instability studies. *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*, 24:82-85.

Darmawan H, Walter TR, Brotopuspito KS, et al. (2018) Morphological and structural changes at the Merapi lava dome monitored in 2012–15 using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 349:256-267. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.11.006>

De Beni E, Cantanero M, Messina A (2019) UAVs for volcano monitoring: A new approach applied on an active lava flow on Mt. Etna (Italy), during the 27 February-02 March 2017 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 369:250-262. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.12.001>

De Cubber G, Balta H, Doroftei D, et al. (2014) UAS deployment and data processing during the Balkans flooding. 12th IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, SSRR 2014-Symposium Proceedings, <https://doi.org/10.1109/SSRR.2014.7017670>

Dominici D, Alicandro M, Massimi V (2016) UAV photogrammetry in the post-earthquake scenario: case studies in L'Aquila. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 8(1):87-103. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1176605>

Eisenbeiss H (2009) UAV Photogrammetry. PhD Thesis. ETH Zurich. Germany. p 236.

Eker R, Aydin A (2021) Long-term retrospective investigation of a large, deep-seated, and slowmoving landslide using InSAR time series, historical aerial photographs, and UAV data: The case of Devrek landslide (NW Turkey). *CATENA* 196. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104895>

EM-DAT database, The CRED/OFDA International Disaster Database, available at: <https://www.emdat.be/database> (Accessed on 7 February 2020)

Favalli M, Fornaciai A, Nannipieri L, et al. (2018) UAV-based remote sensing surveys of lava flow fields: a case study from Etna's 1974 channel-fed lava flows. *Bull Volcanol* 80:29. <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1192-6>

Fiorucci F, Giordan D, Santangelo M, et al. (2018) Criteria for the optimal selection of remote sensing optical images to map event landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18(1):405-417. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-405-2018>

Francioni M, Salvini R, Stead D, et al. (2015) An integrated remote sensing-GIS approach for the analysis of an open pit in the Carrara marble district, Italy: Slope stability assessment through kinematic and numerical methods. *Computers and Geotechnics* 67:46-63. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.02.009>

Garnica-Peña RJ, Alcantara-Ayala I (2017) Multi-temporal Landslide Evaluation by Using UAV: Some Insights on Disaster Risk in Teziutlan, Puebla Mexico. In Mikoš M, Tiwari B, Yin Y, Sassa K (eds.), *Advancing culture of living with landslides, vol 2: advances in landslide science*. pp 209-218. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53498-5_24

Ghorbanzadeh O, Meena SR, Blaschke T, et al. (2019) UAV-Based Slope Failure Detection Using Deep-Learning Convolutional Neural Networks. *Remote Sensing* 11(17). <https://doi.org/10.3390/rs11172046>

Giordan D, Hayakawa Y, Nex F, et al. (2018) Review article: the use of remotely piloted aircraft systems (RPASs) for natural hazards monitoring and management. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18(4):1079-1096. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1079-2018>

Giordan D, Manconi A, Remondino F, et al. (2017) Use of unmanned aerial vehicles in monitoring application and management of natural hazards. *Geomatics Natural Hazards & Risk* 8(1):1-4. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1315619>

Harder P, Schirmer M, Pomeroy J, et al. (2016) Accuracy of snow depth estimation in mountain and prairie environments by an unmanned aerial vehicle. *Cryosphere* 10:2559-2571. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2559-2016>

Hassanalian M, Abdelkefi A (2017) Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences* 91:99-131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>

Horacio J, Munoz-Narciso E, Trenhaile AS, et al. (2019) Remote sensing monitoring of a coastal-valley earthflow in northwestern Galicia, Spain. *CATENA* 178:276-287. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.028>

Hsieh YC, Chan YC, Hu JC (2016) Digital Elevation Model Differencing and Error Estimation from Multiple Sources: A Case Study from the Meiyuan Shan Landslide in Taiwan. *Remote Sensing* 8(3). <https://doi.org/10.3390/rs8030199>

Izumida A, Uchiyama S, Sugai T (2017) Application of UAV-SfM photogrammetry and aerial lidar to a disastrous flood: repeated topographic measurement of a newly formed crevasse splay of the Kinu River, central Japan. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17(9):1505-1519. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1505-2017>

Jayaweera M, Gunawardana B, Gunawardana M, et al. (2019) Management of municipal solid waste open dumps immediately after the collapse: An integrated approach from Meethotamulla open dump, Sri Lanka. *Waste Management* 95:227-240. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.019>

Karantanellis E, Marinos V, Vassilakis E (2019) 3D hazard analysis and object-based characterization of landslide motion mechanism using uav imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 42(2):425-430. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-425-2019>

Kazahaya R, Shinohara H, Ohminato T, et al. (2019) Airborne measurements of volcanic gas composition during unrest at Kuchinoerabujima volcano, Japan. *Bulletin of Volcanology* 81(7). <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1262-9>

Koschitzki R, Schwalbe E, Cardenas C, et al. (2017) Photogrammetric monitoring concept for remote landslide endangered areas using multi-temporal aerial imagery. 2017 First IEEE International Symposium of Geoscience and Remote Sensing (GRSS-CHILE), 108-113.

Kosolapov AE, Skripka GI, Bepalova LA, et al. (2018) Study of Morphological and Morphometric Characteristics of Tsimlyansk Reservoir Shores Using Unmanned Aerial Vehicles and GIS Technologies. *Arid Ecosystems* 8(3):184-189. <https://doi.org/pbidi.unam.mx:2443/10.1134/S2079096118030034>

Kraaijenbrink PDA, Shea J, Pellicciotti F, et al. (2016) Object-based analysis of unmanned aerial vehicle imagery to map and characterise surface features on a debris-covered glacier. *Remote. Sens. Environ.* 186:581-595. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.013>

Koukouvelas IK, Nikolakopoulos KG, Zygouri V, et al. (2020) *Geomorphology* 367. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107306>

Lambiel C, Rüttimann S, Meyrat R, et al. (2017) Capturing the Crisis of an Active Rock Glacier with UAV Survey. In *Proceedings of the 19th EGU General Assembly, EGU2017, Vienna, Austria, 23-29 April*, p. 7014.

Langhammer J, Vackova T (2018) Detection and Mapping of the Geomorphic Effects of Flooding Using UAV Photogrammetry. *Pure Appl. Geophys.* 175:3223-3245. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1874-1>

Lavell A, Maskrey A (2014) The future of disaster risk management. *Environmental Hazards* 13(4): 267-280. <https://doi.org/10.1080/17477891.2014.935282>

Lazar A, Begus T, Vulic M (2018) Monitoring of the Belca Rockfall. *Acta Geotechnica Slovenica* 15(2):2-15. <https://doi.org/10.18690/actageotechslov.15.2.2-15.2018>

Leal-Alves DC, Weschenfelder J, da Guia Alburquerque M, et al. (2020) Digital elevation model generation using UAV-SfM photogrammetry techniques to map sea-level rise scenarios at Cassino Beach, Brazil. *SN Applied Sciences* 2(2181). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03936-z>

Letortu P, Jaud M, Grandjean P, et al. (2018) Examining high-resolution survey methods for monitoring cliff erosion at an operational scale. *Giscience & Remote Sensing* 55(4):457-476. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1408931>

Li CC, Zhang GS, Lei TJ, et al. (2011) Quick image-processing method of UAV without control points data in earthquake disaster area. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 21(3):523-528. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61635-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61635-5)

Li HB, Qi SC, Chen H, et al. (2019) Mass movement and formation process analysis of the two sequential landslide dam events in Jinsha River, Southwest China. *Landslides* 16(11):2247-2258. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01254-z>

Lin SW, Hsueh TF (2019) Using drone as a map to draw landslide hazard areas in the application of Community Environmental Education. 2019 5TH International Conference on Energy Materials and Environment Engineering 295. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/295/3/032057>

Lucier A, de Jong SM, Turner D (2014) Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography* 38(1):97-116. <https://doi.org/10.1177/0309133313515293>

Mavroulis S, Andreadakis E, Spyrou N-I, et al. (2019) UAV and GIS based rapid earthquake-induced building damage assessment and methodology for EMS-98 isoseismal map drawing: the June 12, 2017 Mw 6.3 Lesvos (Northeastern Aegean, Greece) earthquake. *Int J Disaster Risk Reduct* 37:101-169. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101169>

Melis MT, Da Pelo S, Erbi I, et al. (2020) Thermal Remote Sensing from UAVs: A Review on Methods in Coastal Cliffs Prone to Landslides. *Remote Sensing* 12(1971). <https://doi.org/10.3390/rs12121971>

Menegoni N, Giordan D, Perotti C, et al. (2019) Detection and geometric characterization of rock mass discontinuities using a 3D high-resolution digital outcrop model generated from RPAS imagery - Ormea rock slope, Italy. *Engineering Geology* 252:145-163. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.02.028>

Merino L, Caballero F, Martínez-de-Dios JR, et al. (2012) An Unmanned Aircraft System for Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement. *J Intell Robot Syst* 65:533-548. <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9560-x>

Merino L, Martínez-de Dios J, Ollero A (2015) Cooperative Unmanned Aerial Systems for Fire Detection, Monitoring, and Extinguishing. In Valavanis KP. and Vachtsevanos GJ. (eds.), *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer, ISBN 978-90-481-9706-4, p 3022.

- Mori T, Hashimoto T, Terada A, et al. (2016) Volcanic plume measurements using a UAV for the 2014 Mt. Ontake eruption. *Earth Planet Sp* 68(49). <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0418-0>
- Murphy R, Dufek J, Sarmiento T, et al. (2016) Two case studies and gaps analysis of flood assessment for emergency management with small unmanned aerial systems. In: 2016 IEEE international symposium on safety, security, and rescue robotics (SSRR) 54–61.
- Nedjati A, Izbirak G, Vizvari B, et al. (2016) Complete coverage path planning for a multi-UAV response system in post-earthquake assessment. *Robotics* 5:26. <https://doi.org/10.3390/robotics5040026>
- Niedzielski T (2018) Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Geosciences: Introduction. *Pure and Applied Geophysics* 175(9):3141–3144. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1992-9>
- Niethammer U, James MR, Rothmund S, et al. (2012) UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology* 128:2–11. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.012>
- Nikolakopoulos KG, Koukouvelas IK (2017) Emergency response to landslide using GNSS measurements and UAV. *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications VIII*, 10428. <https://doi.org/10.1117/12.2278728>
- Nikolakopoulos KG, Antonakakis A, Kyriou A, et al. (2018) Comparison of Terrestrial Laser Scanning and Structure-from-Motion Photogrammetry for steep slope mapping. *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications IX*, 10790. <https://doi.org/10.1117/12.2326175>
- Nikolakopoulos K, Kyriou A, Koukouvelas I, et al. (2019) Combination of Aerial, Satellite, and UAV Photogrammetry for Mapping the Diachronic Coastline Evolution: The Case of Lefkada Island. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8(11). <https://doi.org/10.3390/ijgi8110489>
- Nonami K, Kendoul F, Susuki S, et al. (2010). *Autonomous Flying Robots: Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles*, Springer, p 328.
- Obanawa H, Hayakawa YS (2018) Variations in volumetric erosion rates of bedrock cliffs on a small inaccessible coastal island determined using measurements by an unmanned aerial vehicle with structure-from-motion and terrestrial laser scanning. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5. <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0191-8>
- Oliver-Smith A, Alcántara-Ayala I, Burton I, et al. (2016) *Forensic Investigations of Disasters (FORIN): a conceptual framework and guide to research (IRDR FORIN Publication No.2)*. Beijing: Integrated Research on Disaster Risk. p 56.

- Pfeiffer J, Zieher T, Rutzinger M, et al. (2019) Comparison and time series analysis of landslide displacement mapped by airborne, terrestrial and Unmanned Aerial Vehicle based platforms. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 2:421-428. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-421-2019>
- Pradhan B (2010) Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. *Advances in Space Research* 45:1244-1256. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.006>
- Rau JY, Jhan JP, Rau RJ (2014) Semiautomatic object-oriented landslide recognition scheme from multisensor optical imagery and DEM. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52, 2:1336-1349. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2250293>
- Rossi G, Nocentini M, Lombardi L, et al. (2016) Integration of multicopter drone measurements and ground-based data for landslide monitoring. In Aversa S, Cascini L, Picarelli L, and Scavia C. (eds.) *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice* CRC Press, Balkema, Taylor & Francis Group. pp 1745-1750. ISBN: 978-1-138-02988-0.
- Rothmund S, Walter M, Joswig M (2015) Linking Sub-surface Slidequakes to Superficial Fissure Growth and Displacement Analysis: The Super-Sauze Mudslide Field Campaign (2010) *Engineering Geology for Society and Territory, Vol 2: Landslide Processes*. 391-394. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3-61>
- Saito H, Uchiyama S, Hayakawa YS, et al. (2018) Landslides triggered by an earthquake and heavy rainfalls at Aso volcano, Japan, detected by UAS and SfM-MVS photogrammetry. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5. <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0169-6>
- Santangelo M, Alvioli M, Baldo M, et al. (2019) Brief communication: Remotely piloted aircraft systems for rapid emergency response: road exposure to rockfall in Villanova di Accumoli (central Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19(2):325-335. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-325-2019>
- Satake K, McLean C, Alcántara-Ayala I (2018) Understanding Disaster Risk: The Role of Science and Technology. *Journal of Disaster Research*, 13(7):1168-1176. <https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p1168>
- Serban G, Rus I, Vele D, et al. (2016) Flood-prone area delimitation using UAV technology, in the areas hard-to-reach for classic aircrafts: case study in the north-east of Apuseni Mountains, Transylvania. *Natural Hazards* 82:1817-1832. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2266-4>
- Shi BQ, Liu C (2015) UAV for Landslide Mapping and Deformation Analysis. *International Conference on Intelligent Earth Observing and Applications 2015* 9808. <https://doi.org/10.1117/12.2207411>

Singh K, Frazier A (2018) A meta-analysis and review of unmanned aircraft system (UAS) imagery for terrestrial applications. *International Journal of Remote Sensing* 39(15-16): 5078-5098. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1420941>

Stoll JB (2013) Unmanned Aircraft Systems for rapid near surface geophysical measurements. *UAV-G2013*, 391-394.

Stumpf A, Malet JP, Kerle N, et al. (2013) Image-based mapping of surface fissures for the investigation of landslide dynamics. *Geomorphology* 186: 12-27. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.010>

Sun SQ, Li SC, Li LP, et al. (2019) Slope stability analysis and protection measures in bridge and tunnel engineering: a practical case study from Southwestern China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78(5):3305-3321. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1362-y>

Tanteri L, Rossi G, Tofani V, et al. (2017) Multitemporal UAV Survey for Mass Movement Detection and Monitoring. In Mikoš M, Tiwari B, Yin Y, Sassa K (eds.), *Advancing Culture of Living with Landslides, Vol 2: Advances in Landslide Science*. pp 153-161. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53498-5_18

Tekin A, Fornale M (2019) The development of a low-cost UAV-based image acquisition system and the procedure for capturing data in precision agriculture. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 43(3):288-298. <https://doi.org/10.3906/tar-1806-1>

Themistocleous K, Danezis C, Mendonidis E, et al. (2017) Monitoring ground deformation of cultural heritage sites using UAVs and geodetic techniques: the case study of Choirokoitia, JPI PROTHEGO project. *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications VIII*. <https://doi.org/10.1117/12.2279478>

Themistocleous K (2018) Local Monitoring Techniques for Cultural Heritage Sites Affected By Geo-Hazards. *Sixth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCY2018)* 10773. <https://doi.org/10.1117/12.2503914>

Thiele ST, Varley N, James MR (2017) Thermal photogrammetric imaging: A new technique for monitoring dome eruptions. *J Volcanol Geotherm Res* 337:140-145. <https://doi.org/10.1016/j.jvolg eores.2017.03.022>

UN (2015) *Transforming the world: The 2030 Agenda for sustainable development* (No. A/RES/70/1), vol. 05445, UN, New York.

UNFCCC (2015) *The Paris Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change* <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>.

UNISDR (2015) *Sendai framework for disaster risk reduction 2015-2030*. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva: UNISDR.

- Valavanis K, Kontitsis M (2007) A Historical Perspective on Unmanned Aerial Vehicles. In Valavanis K. (ed.), *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*. Springer Netherlands. Series Volume 33, pp 15-46. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6114-1>
- Valavanis KP, Vachtsevanos GJ. (eds.) (2015) *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer p 2077. On-line ISBN 978-90-481-9707-1.
- Valkaniotis S, Papathanassiou G, Ganas A (2018) Mapping an earthquake-induced landslide based on UAV imagery; case study of the 2015 Okeanos landslide, Lefkada, Greece. *Engineering Geology* 245:141-152. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.08.010>
- Van Blyenburgh P (2006) UAV systems: global review. Presented at the Avionics'06 conference, Amsterdam.
- Van der Sluijs J, Kokelj SV, Fraser RH, et al. (2018) Permafrost Terrain Dynamics and Infrastructure Impacts Revealed by UAV Photogrammetry and Thermal Imaging. *Remote Sensing* 10(11). <https://doi.org/10.3390/rs1011734>
- Vollgger SA, Cruden AR (2016) Mapping folds and fractures in basement and cover rocks using UAV photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia. *J Struct Geol* 85:168–187. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.02.012>
- Walter T, Salzer J, Varley N, et al. (2018) Localized and distributed erosion triggered by the 2015 Hurricane Patricia investigated by repeated drone surveys and time lapse cameras at Volcán de Colima, Mexico. *Geomorphology* 319:186-198. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.07.020>
- Wen Q, He HX, Wang XF, et al. (2011) UAV Remote Sensing Hazard Assessment in Zhouqu Debris Flow Disaster. *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions* 2011 8175. <https://doi.org/10.1117/12.898019>
- Yalcin E (2018) Generation of high-resolution digital surface models for urban flood modelling using UAV imagery. In: *WIT transactions on ecology and the environment*, WIT Press. Lightning Source, UK, Great Britain, pp 357–366.
- Yang ZH, Lan HX, Gao X, et al. (2015) Urgent landslide susceptibility assessment in the 2013 Lushan earthquake-impacted area, Sichuan Province, China. *Natural Hazards* 75(3):2467-2487. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1441-8>
- Yaprak S, Yildirim O, Susam T, et al. (2018) The Role of Unmanned Aerial Vehicles in Monitoring Rapidly Occurring Landslides. *Geodetski List* 72(2):113-132.
- Yeh FH, Huang CJ, Han JY, et al. (2018) Modeling Slope Topography Using Unmanned Aerial Vehicle Image Technique. *The Third International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment (SIBE 2017)* 147. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814707002>

Zekkos D, Clark M, Cowell K, et al. (2017) Satellite and UAV-enabled mapping of landslides caused by the November 17th 2015 Mw 6.5 Lefkada earthquake. ICSMGE 2017 - 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2017-september. pp 2235-2238.

Zmarz A, Rodzewicz M, Dabski M, et al. (2018) Application of UAV BVLOS remote sensing data for multi-faceted analysis of Antarctic ecosystem. Remote Sensing of Environment 217:375-388. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.031>

CAPÍTULO III: Multi-temporal Landslide Evaluation by Using UAV: Some Insights on Disaster Risk in Teziutlán, Puebla México

Ricardo J. Garnica-Peña

Posgrado en Geografía, UNAM

Irasema Alcántara-Ayala

Instituto de Geografía, UNAM

This paper aimed at analyzing some insights related to landslide disaster risk at local scale in a mountain region of Mexico by using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The developed methodology to produce UAV derived imagery is presented. Point cloud LiDAR, the Digital Surface Model (DSM) derivative, and the orthophoto generated have a resolution of 0.05 m. Moreover, an analysis of the growth of human settlements at local scale was carried out from 1942 to 2016, and related to landslide exposure. The latter resulted from a landslide susceptibility map produced with the DSM using the weight of evidence method. According to the results, at the present time the France vicinity (Teziutlán, Puebla) covers an area of 67.85 ha, although the inhabited surface is of 35.46 ha. In seven and a half decades, the size of the expansion of the dwellings was increased seven-fold. The 54% of total surface can be characterized as moderately or highly susceptible to landslides. Likewise, estimations suggested that 52.27% (35.46 ha) of the total surface of the neighborhood is occupied by households; out of which, 18.74 ha, the equivalent of 50.81% of the total inhabited area is situated in the high and moderate landslide susceptibility zones.

Landslide Evaluation by Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV)

Field surveys and mapping by using aerial photographs analyses and interpretation of satellite images have been used as one of the main inputs for landslide hazard evaluation for decades. Nowadays, with the introduction of Unmanned Aerial Vehicles (UAV), the availability of high resolution aerial photographs and images at low cost has increased, providing the opportunity to carry out landslide assessments immediately after the event, in areas potentially unstable, or by considering the evaluation of the transformations of the terrain and the likely impact of the exposed communities and socio-economic and environmental assets during a determined period of time.

In this paper, an analysis of some insights related to landslide disaster risk at a local scale by using UAV is presented. The objective of the analysis is two-fold. On one hand, attention is given to the methodological procedure developed to carry out the research using a Micro Aerial Vehicle (MAV) in a mountain region of Mexico, and on the other, the study is focused

on a multi-temporal analysis of exposure to landslides based on a susceptibility map and the identification of population growth during seven decades of a neighborhood situated in Teziutlán, Puebla, México.

Teziutlán, Puebla: General Context

The municipality of Teziutlán is situated in the Northern Mountain Range of Puebla, Mexico (Fig. 1), in an area where the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Sierra Madre Oriental (Eastern mountain range) physiographic provinces are intersected.

From a geological perspective, the area is characterized by sedimentary rocks that are overlain by volcanic rocks, especially by lava flows and pyroclastic materials derived from the activity of Los Hornos Caldera Volcano (Dávila-Harris and Carrasco-Núñez 2014). Altitude ranges from 700 to 2800 m a.s.l. Climate is warm and temperate, and precipitation occurs all year long varying from 1100 to 3600 mm per year (INEGI 2009).

Teziutlán has been historically affected by landslides, being the most severe episode the disaster of October 1999, when 109 people died in a single landslide and casualties in the region were as high as 263, in addition to 1475,654 inhabitants that were affected (Bitrán and Reyes 2000; Alcántara-Ayala 2004, 2008).

Francia was one of the most affected neighborhoods in 1999. It is emplaced on a ravine developed on pyroclastic materials that was originated in the southern sector of the municipality. Erosion processes and mass failures take place along the ravine where houses have been built on potentially unstable steep slopes.

Materials

Micro Aerial Vehicle

A DJI Phantom 3 Advanced© computer (Fig. 2) along with the Map Pilot© application was used to undertake this research project. The latter allows flight planning to take vertical aerial photographs. The equipment comprises a Sony Exmor R BSI 1/2.3 with an effective resolution of 12.4 Mp. Owing to its size and weight, load capacity, height and duration of flight, and distance from the control system, this equipment is considered within the Micro Aerial Vehicles (MAV). A maximum speed of 16 m/s can be reached with this UAV. Battery lasts about 23 min and it relies on GPS and GLONASS systems.

The MapPilot© application (produced by MapsMadeEasy) was used in setting up the area of flight and, together with the height of flight, it was possible to estimate lines, travel duration, number of aerial shots, and the size of the resulting files and pixel size. This process was carried out in the office before undertaking fieldwork. Through this application it was also possible to include maps, satellite images or vector files from other sources.



Fig. 1 Location of the area of study



Fig. 2 DJI Phantom 3 advanced equipment (top) and camera (bottom)

Methodology

Imagery Derived from the MAV

The methodology involved four steps: (1) identification of the flight area; (2) flight planning; (3) generation of the light path and footprints; and (4) image processing (Fig. 3).

The identification of the flight area involved the selection of a neighborhood currently exposed to hillslope instability. As such the locality of France was chosen. The area of analysis comprised 0.3 km². The second step was the identification of obstacles that could potentially affect the flight of the drone. Therefore, a cloud of points associated to a digital surface model with a resolution of 2 m per pixel, derived from a LiDAR image provided by INEGI was used. Minimum and maximum altitudinal values within areas of 100 m² were recognized by producing a Digital Surface Model (DSM) and a raster map. Highest areas showed a 40 m difference to nearby or adjacent areas suggesting a flight height greater than this value. These areas corresponded to high tension towers and some trees (Fig. 4).

Two lines of flight were defined afterwards: north-south and west-east. During both flights images with a pixel size of 5.2 cm were recorded. The total number of photographs was 462.

Configuration of the flight included an 80% overlap in both directions, so that a greater number of matches could be acquired. The generation of flight paths and footprints was produced by using the ARCGIS model builder module, so that a file of points with reference to the center coordinates of each photo and the area of each photograph could be generated. The following step was to determine the distribution and coverage of the photographs to know the area with the highest number of matches or coverage by images (Fig. 5). Finally, by using the Pix4D software it was possible to generate an orthophoto (see Fig. 6: year 2016), the corresponding digital surface model (Fig. 7), the point cloud and a 3D model of the France neighborhood (Fig. 10).

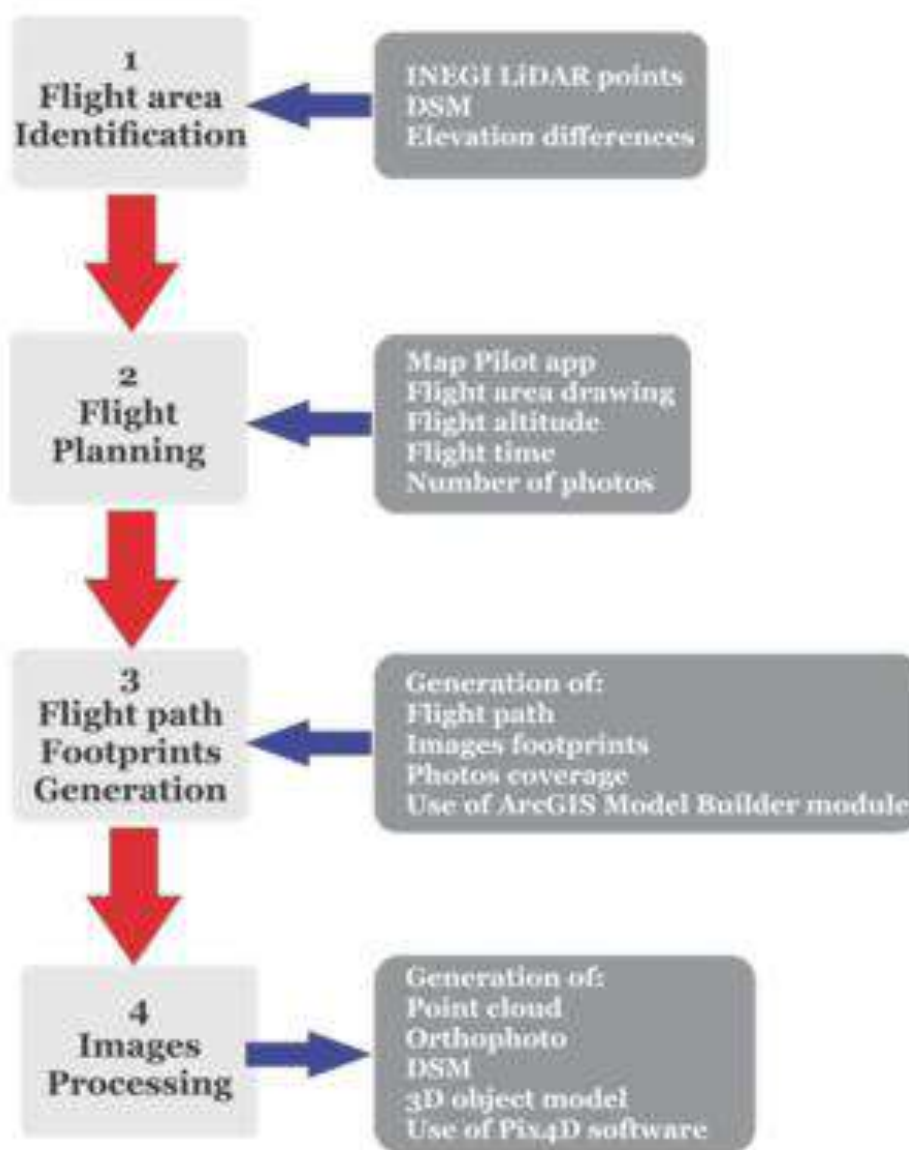


Fig. 3 Methodological framework for producing current images by using a MAV

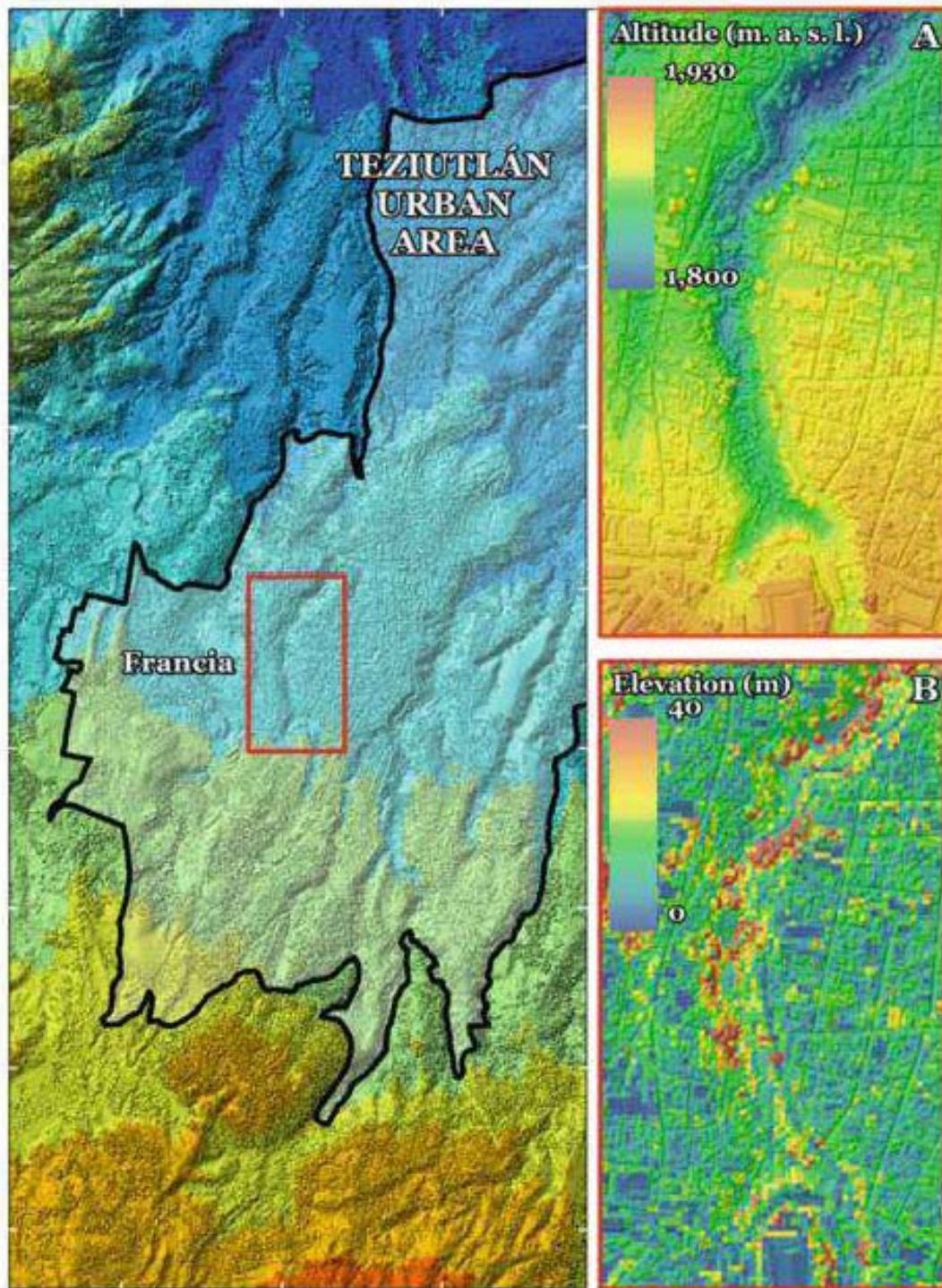


Fig. 4 Teziutlán's LiDAR point cloud, DSM and raster showing elevation differences in the terrain

Aerial Photographs

Additionally, five images of the area generated by the National Institute of Statistics, Geography and Informatics (INEGI) dated back from 1942, 1956, 1974, 1991, and 2007 were also used to analyze the population growth.

Multi-temporal Analysis of Aerial Photographs

Aerial photographs were geo-referenced based on a 2007 orthophoto. Dwellings established in the area where the neighborhood of Francia is situated at the present time were delineated by using ARCGIS by taking into account all the available images. Moreover, population growth was estimated in terms of the extent of the settlements developed on yearly basis.

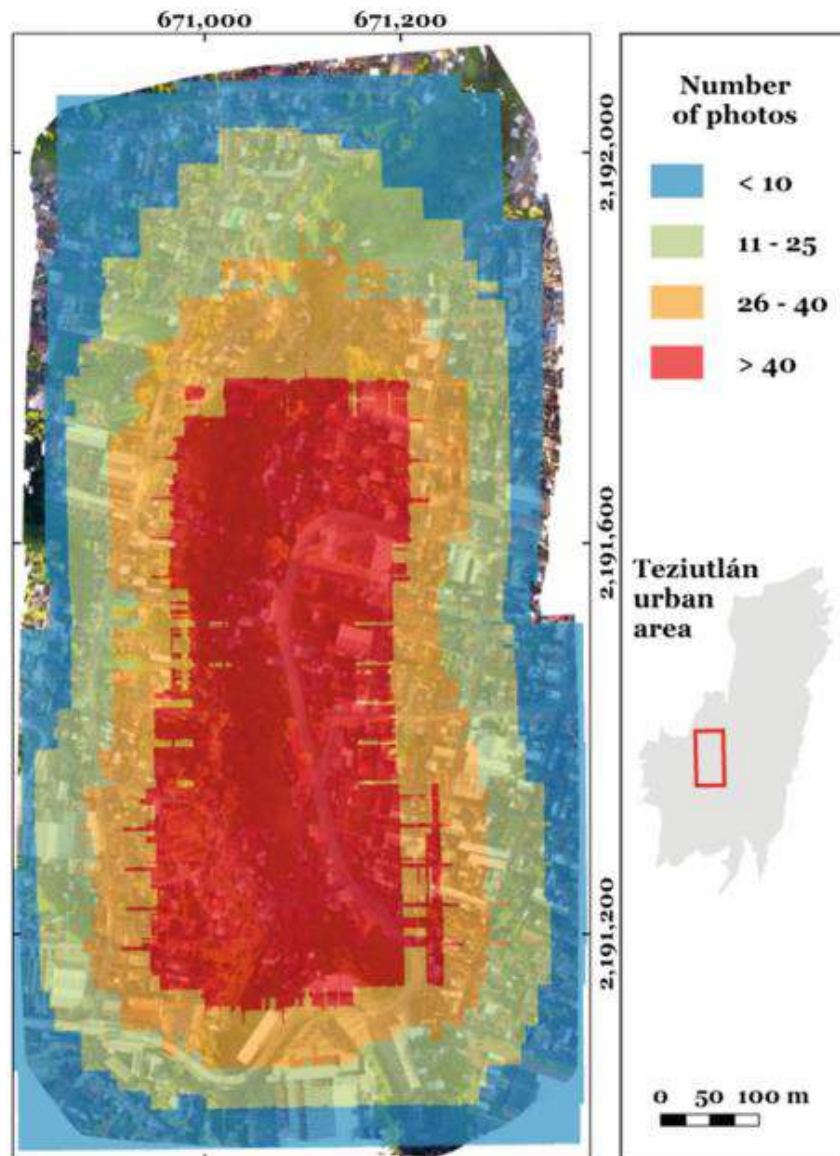


Fig. 5 Number of photos comprised within the aerial coverage



Fig. 6 Imagery used for analysing population growth

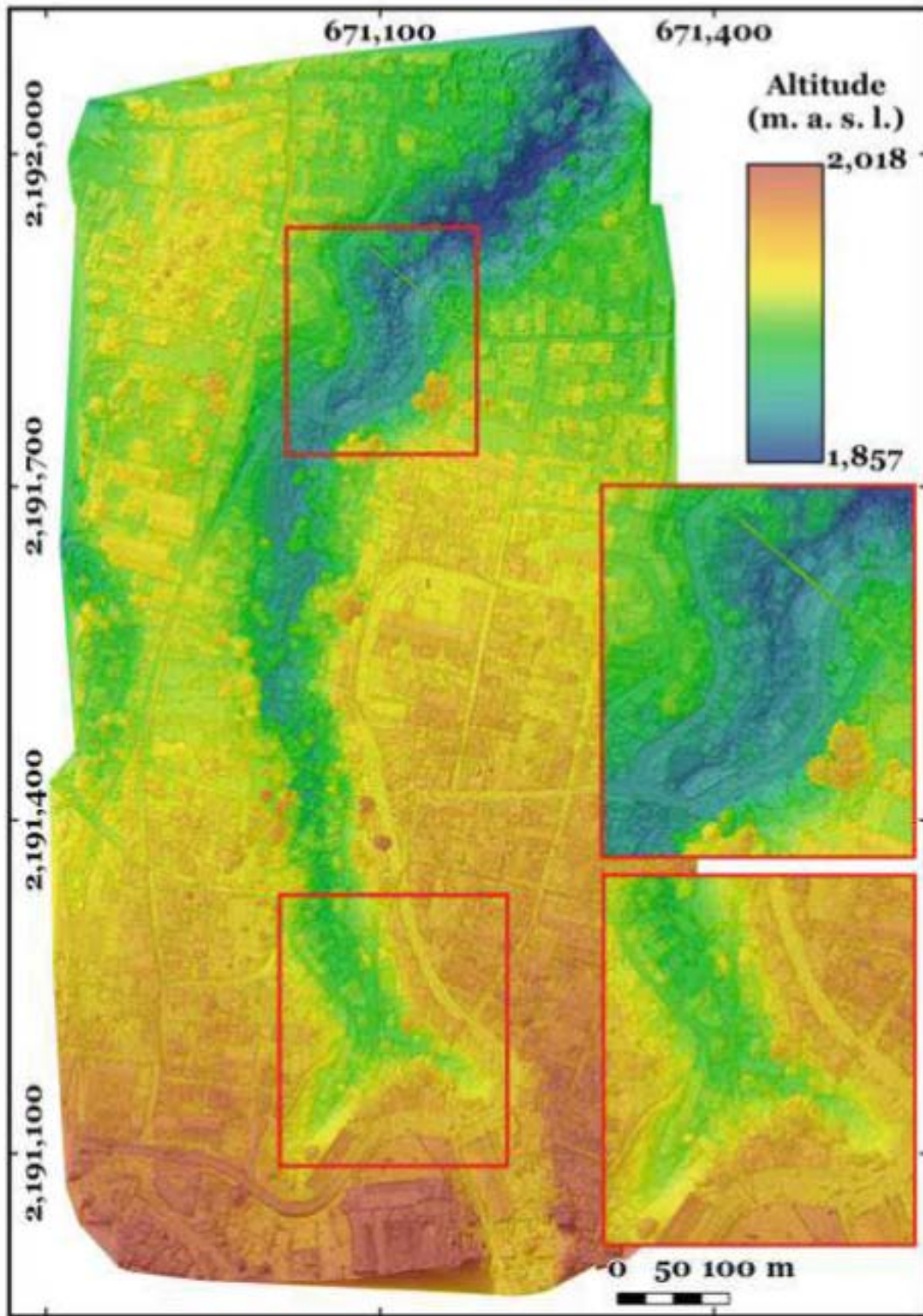


Fig. 7 Digital surface model derived from the drone

Results

The orthophoto and the digital surface model generated by using the drone have a resolution of 5 cm per pixel (see Figs. 6 and 7). The former was used to analyze the population growth and to estimate the actual area exposed to landsliding, whereas the latter served as a basis for the development of a landslide susceptibility map at local scale.

The resolution of the generated imagery showed a significant improvement over other commercial mapping products. Point cloud LiDAR, the DSM derivative, and the orthophoto possess better resolution (0.05 m) than that of the orthophoto of 2007 produced by INEGI (0.50 m) and an available Quickbird image of 2008 (0.50 m).

Population growth was analyzed from 1942 to 2016. In 1942, the surface occupied by human settlements was 5.75 ha, after almost three lustrums it increased to 13.83 and in 1974 it reached 18.10 ha. Later in 1995 it was in the order of 29.67 ha and two decades later, at the present time (2016) population dwellings have expanded occupying 35.46 ha. In seven and a half decades, the size of the neighborhood was increased seven-fold (Fig. 8; Table 1).

A landslide susceptibility map (Fig. 9) was produced by using the weight of evidence method (see Bravo 2015). Variables considered included geology, geomorphology, steepness, slope geometry, stream power index, wetness index, distance to lineaments, lineaments density, distance to rivers, and distance to roads, density of roads, vertical relief dissection, and relative relief.

The research site covers an area of 67.85 ha. The area of low susceptibility to landslides was estimated in the order of 30.97 ha, whereas moderate susceptibility was of 26.55 ha and high susceptibility occupied an area of 10.33 ha. That means that 54% of the total area comprising the Francia neighborhood is moderately or highly susceptible to landslides.

According to field investigations and interpretation of aerial photographs, 12 landslides occurred in the analyzed area; 10 of them in 1999 and the rest before that time. In terms of typology 8 were characterized as debris flows and 4 as translational landslides. All of them are located on andesite-basalt rocks overlain by ignimbrite ash-fall deposits.

Additionally, it was estimated that 52.27% (35.46 ha) of the total surface of the vicinity is occupied by dwellings. Out of which, 18.74 ha, the equivalent of 50.81% of the total inhabited area is situated in the high and moderate landslide susceptibility zones (Fig. 10).

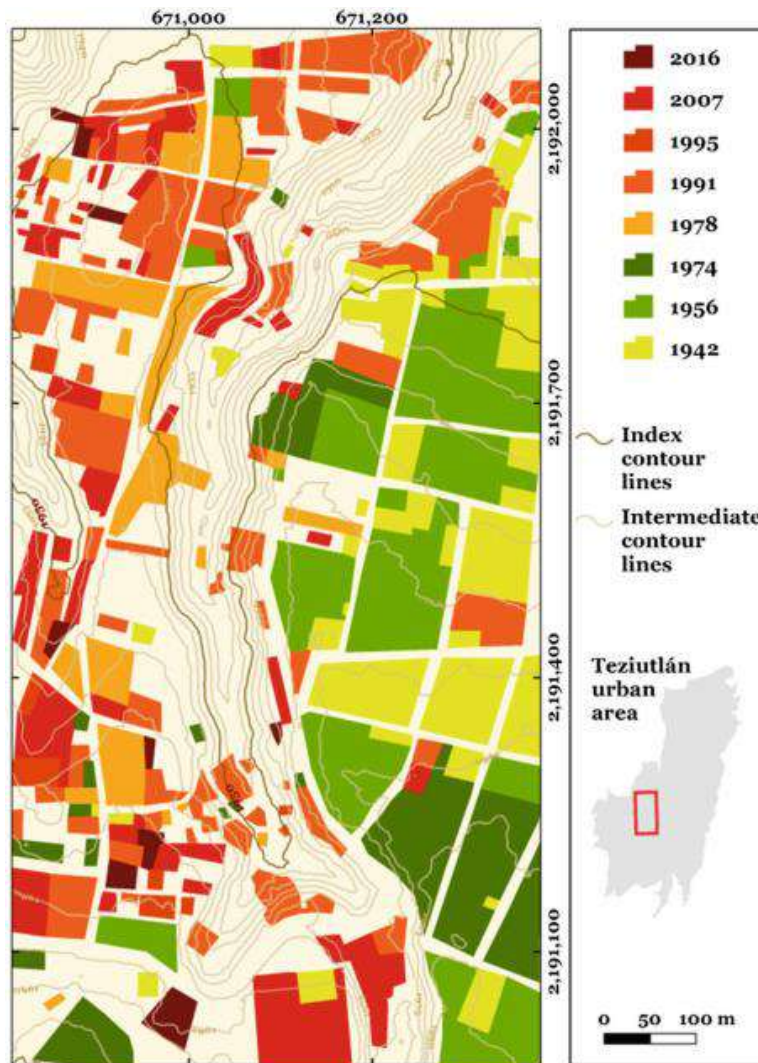


Fig. 8 Population growth in the Francia neighborhood

Year	AISG (ha)	ASL (%)	TISG (ha)	CASL (%)
1942	5.75	8.15	5.75	8.15
1956	8.08	14.75	13.83	22.90
1974	4.27	8.05	18.10	30.95
1978	3.33	3.22	21.4	34.17
1991	7.70	10.30	29.12	44.47
1995	0.55	0.12	29.67	44.59
2007	5.09	5.88	34.76	50.48
2016	0.70	0.33	35.46	50.81

AISG annual inhabited surface growth; ASL area susceptible to landslides; TISG total inhabited surface growth; CASL cumulative area susceptible to landslides

Table 1 Inhabited surface growth and landslide exposure

Conclusions

High resolution-low cost imagery can be easily obtained by using Unmanned Aerial Vehicles and successfully applied for landslide hazard evaluation.

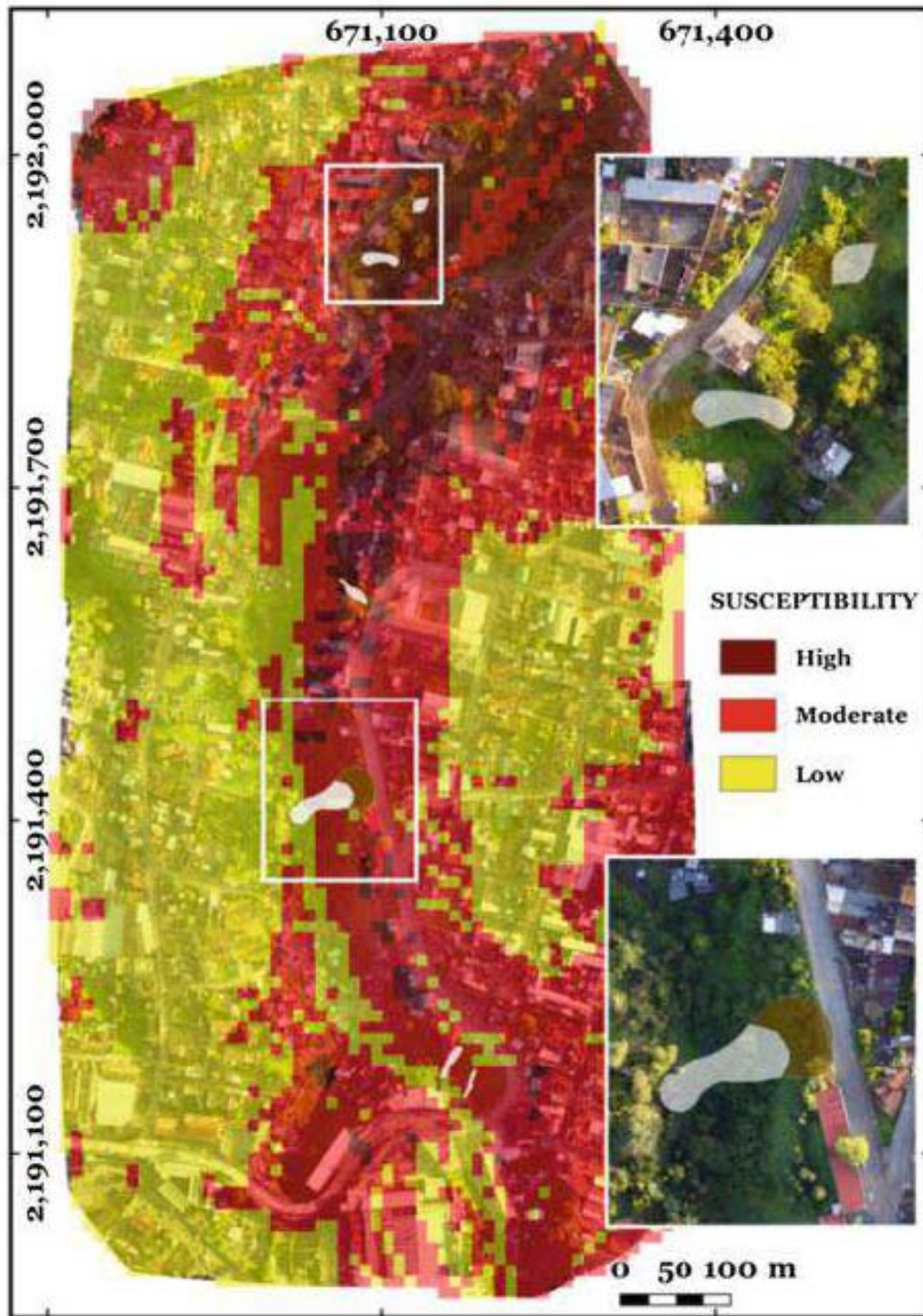


Fig. 9 Landslide susceptibility map of the Francia neighborhood



Fig. 10 3D image of the Francia neighborhood generated by using the drone

References

Alcántara-Ayala I (2004) Hazard assessment of rainfall induced landsliding in Mexico. *Geomorphology* 61:19–40

Alcántara-Ayala I (2008) On the historical account of disastrous landslides in Mexico: the challenge of risk management and disaster prevention. *Adv Geosci-ADGEO* 14:159–164. ISSN 1680-7340

Bitrán D, Reyes C (2000) Evaluación del impacto económico de las inundaciones ocurridas en octubre de 1999 en el estado de Puebla. In: Bitrán D (ed) *Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana durante 1999*. Cuadernos de Investigación 50, CENAPRED, México, pp 161–194 (In Spanish)

Bravo Carvajal IY (2015) *Análisis de susceptibilidad a procesos de remoción en masa en el municipio de Teziutlán, Puebla*, Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 182 p (In Spanish)

Dávila-Harris P, Carrasco-Núñez G (2014) An unusual syn-eruptive bimodal eruption: The Holocene Cuicuiltic Member at Los Humeros caldera, Mexico. *J Volcanol Geoth Res* 271:24–42

INEGI (2009) *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Teziutlán*. Puebla, Instituto Nacional de Geografía y Estadística (In Spanish)

CAPÍTULO IV: On the use of UAVs for landslide exposure of households: La Gloria neighbourhood, Teziutlán, Puebla

Ricardo J. Garnica-Peña

Posgrado en Geografía, UNAM

Galdino García-Marroquin

Colegio de Geografía, UNAM

Irasema Alcántara-Ayala

Instituto de Geografía, UNAM

Owing to landslide susceptibility of pyroclastic deposits, coupled with high vulnerability and exposure, the Sierra Norte de Puebla region, in Mexico, is characterised by significant levels of landslide disaster risk. This study aimed at evaluating landslide exposure of households in La Gloria neighbourhood, Teziutlán, Puebla, an area that was severely affected by the disaster of October 1999. The methodological approach comprised three stages: (1) definition of the parameters used for developing the landslide exposure index; (2) aerial survey using a drone; and, (3) elaboration of the landslide exposure map. According to the produced landslide exposure map, 57% of the households are in areas of high level of exposure, whereas 32% and 11% are in moderate and low exposure zones, correspondingly.

Introduction

In Mexico, disasters associated with rainfall induced landsliding are of major relevance due to high vulnerability levels of population and exposure. In October 1999, hundreds of rainfall-induced landslides affected considerably the municipality of Teziutlán, in the Sierra Norte de Puebla (SNP). Damages were severe in various neighbourhoods, among them, La Gloria, situated in the urban area of the municipality capital (figure 1). Although no fatal victims were registered, considerable effects on housing were accounted for. Owing to high levels of vulnerability, exposure and landslide susceptibility, the potential occurrence of disasters in Teziutlán is evident.

Different cartographic tools, and scientific and technological developments have been used for hazard characterisation and disaster risk assessment, including instrumentation, monitoring and remote sensing. As such, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have long been used in various fields to gain knowledge of territories; recently their application has been also directed to landslide disaster risk research, risk reduction and disaster response based on both social and physical approaches (Niethammer et al. 2012; Erenoglu 2016; Thiebes et al. 2016; Casagli et al. 2017; Peppas et al. 2017; Chen et al. 2018; Busa et al. 2019).

Along this vein, this study aimed at analysing landslide exposure of households comprised within La Gloria neighbourhood, at local scale, by using UAVs or drones. This included field characterisation and the generation of high-accuracy cartography.

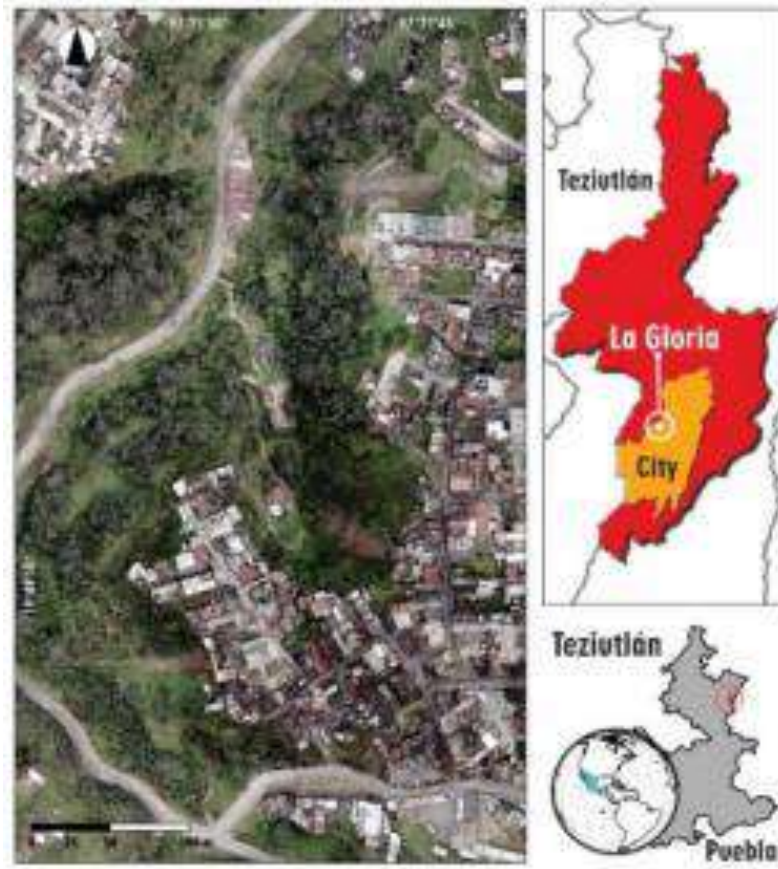


Fig. 1 Location of La Gloria neighbourhood, Teziutlán.

Teziutlán, Puebla: general context

The municipality of Teziutlán is in the northeast of the state of Puebla in The Sierra Norte de Puebla (SNP), a region where the physiography of the country combines two main provinces; the Volcanic Trans-Mexican Belt and the Sierra Madre Oriental (Fig. 1). It comprises 32 localities and in 2015 had a population of 97,590 inhabitants. Population density was estimated as 1,054 inhabitants per km² (INEGI 2015).

The SNP comprises high mountain ranges and steep hills with variable altitude ranging from 1000-3000 m.a.s.l. (Alcántara-Ayala et al. 2017). In Teziutlán there are sedimentary and metamorphic rocks of different ages; the oldest metamorphic rocks are shales of the Chilis formation (SGM, 2011). However, it is the Quaternary volcanic material, particularly the presence of pyroclastic deposits generated from the Caldera de Los Humeros, overlaying the

sedimentary and metamorphic rocks, the most important lithological unit highly susceptible to landsliding (Fig. 2).



Fig. 2 Aerial view of La Gloria neighbourhood, Teziutlán.

The municipality is in a transition zone from the temperate climates of the Sierra Norte to the warmer areas of the plain of the Gulf of Mexico. There are three types of climate. In the northern part, the semi-warm humid climate with rains all year round covers most of the area (INEGI, 2015). The central portion is characterised by humid temperate climate with rainfall all year around, while the southern part, humid temperate climate with precipitation in summer, covers a small portion of the territory (García, 1998).

Landslide exposure: methodology

According to the UNISDR (2017), exposure is the situation of people, infrastructure, housing, production capacities and other tangible human assets located in hazard-prone areas". In the case of landslides, exposure is strongly linked not only to areas susceptible to landslides, but to housing conditions. Garnica-Peña and Alcántara-Ayala (2017) mention that urban growth and lack of planning are among the main drivers of landslide exposure clearly expressed in the unplanned household spatial distribution and existing conditions in Francia neighbourhood (Teziutlán city) and these two factors also are relevant in the case of La Gloria neighbourhood (Fig. 3).

The involved methodology included three main steps: (1) definition of the parameters used to elaborate the exposure index applied for housing conditions in La Gloria neighbourhood; (2) aerial survey using UAVs; and (3) the development of the landslide exposure map.



Fig. 3 Poor housing and unmanaged settlement construction on unstable slopes in La Gloria neighbourhood increase exposure conditions to landslides and other hazards.

Definition of the parameters

Parameters used to prepare the exposure index included information on quality and materials of the households (walls, floor and ceiling), conditions of maintenance of buildings and access to basic services (drinking water, electricity, sewerage). Field evaluation was carried out by using Mapit GIS Pro. This allowed high-accuracy GPS records in addition to the corresponding information about characterization of the 298 households comprised within the neighbourhood to be included on a database, on which also photographs were integrated. Evaluation was carried out in the field on house to house basis.

Aerial survey using UAVs

The aerial survey using a DJI Phantom 4 Pro drone included flight route cabinet planning and aerial survey and image processing. Flight route planning was done using the MapPilot).

Flight routes were planned with North-South orientation, and East-West with a total of 96.2 hectares of coverage at a height of 150 meters. This involved 791 images with a resolution of 4.1 cm. The overlay used was 80x80 between each photograph (Fig. 4).

Criteria	Oblique flight 1		Oblique flight 2		Oblique flight 3	
Flight height above ground level (m)	50	75	50	80	50	80
Radius (m)	156	156	130	130	120	120
Images	80	80	80	80	80	80
Angle (°)	15	24	21	32	22	33

Table 1. Characteristics of the scheduled flights

In order to get an optimum coverage of the area, it was necessary to implement, in addition to the E-O and N-S routes, a specific project for the oblique shots of the surface (Table 1). This project was divided into 3 subprojects of 2 levels each. Oblique photographs were taken by using the FVP Camera (Fig. 4).

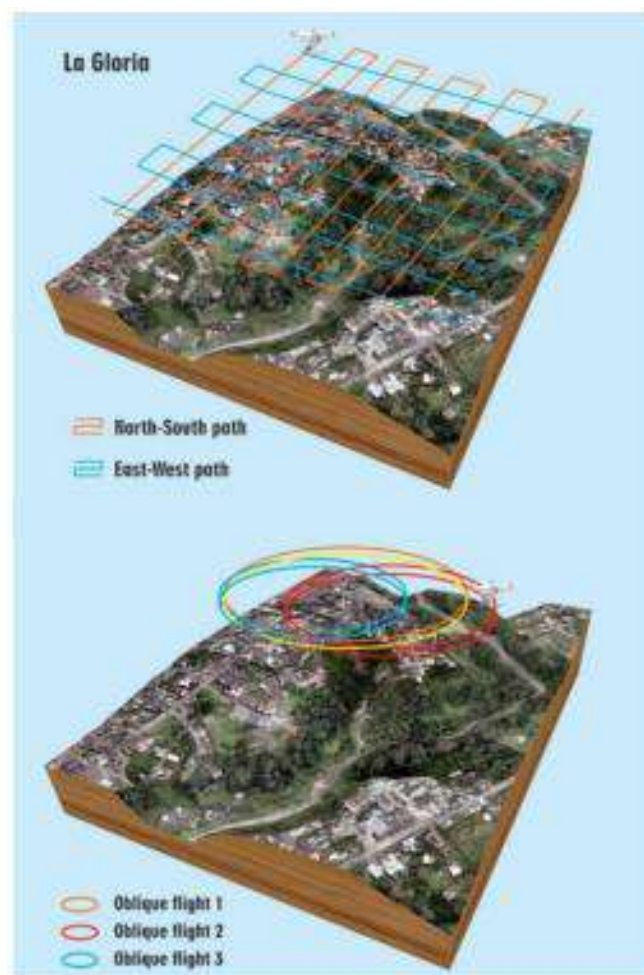


Fig. 4 Grid and oblique surveys.

Images obtained from the UAV aerial survey were processed using the ContextCapture software. The program allowed to assemble the 3D model of the study area. Subsequently, a Raster mosaic, a Digital Elevation Model (MDE) and the map of landslide exposure indicators were produced in ArcGis.

Landslide exposure map

The digital surface model and point clouds derived from the aerial survey were used to create a digital terrain model (DTM) by removing buildings and any other element different from the terrain. This procedure was carried out using the LAS dataset tools of the ESRI ArcGIS 10.6 program. The DTM was afterwards utilised to calculate the topographic wetness index (TWI), shape of the slopes (concave, straight and convex), and the slope of the terrain (slope). This information was combined with the inventory and landslides susceptibility map of the municipality of Teziutlán prepared by Murillo-García and Alcántara-Ayala (2017) and Murillo-García et al. (2019), respectively. Data concerning field evaluation of the households was also included to develop a landslide exposure index. This included six criteria: level of landslide susceptibility, topographic wetness index, hillslope shape, proximity to existing landslides, number of built household storeys, as well as the condition or level of deterioration of the facade.



Fig. 5 Landslide exposure in La Gloria neighbourhood.

Before the elaboration of the final landslide exposure map, several weighting tests were carried out. Landslide susceptibility, proximity to landslides and number of household storeys were among the most significant factors (Figs. 5 and 6). Three classes were established for the landslide exposure map; low, moderate and high.

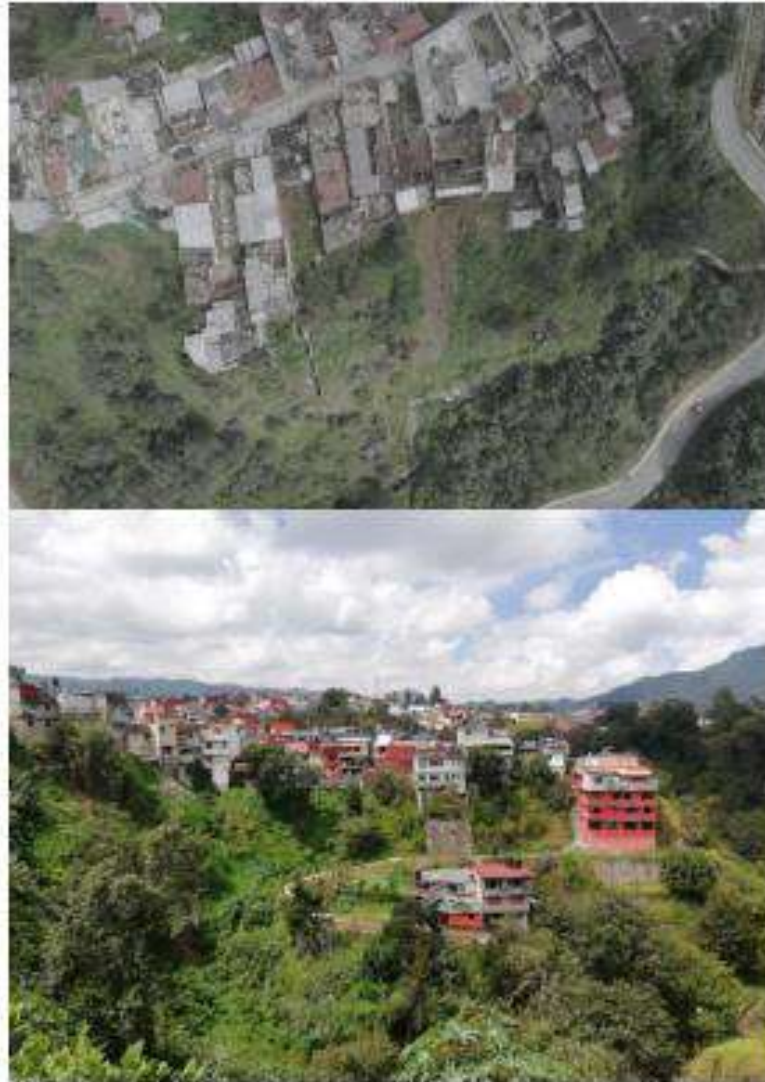


Fig. 6 Households in La Gloria neighbourhood.

Results

The predominant land use in La Gloria neighbourhood is of housing type (96%) and the remaining 4% housing with commerce. In terms of the characterisation of existing dwellings, 64% of households have between two and three storeys built, and 53% of the total properties possess a good building structural condition, 45% are characterised by moderate condition, while the outstanding 2% of the houses is very deteriorated.

According to the produced map, 57% of the households are in areas of high level of exposure, whereas 32% and 11% are in moderate and low exposure zones, respectively. Those considered as of low exposure are near downtown Teziutlán (Fig. 7). Owing to lack of population data at local scale, it was not possible to estimate how many people live in those areas exposed to landslides. Nonetheless, raising landslide disaster risk awareness is relevant for all inhabitants of the neighbourhood. As for the proximity to landslides, it was possible to estimate that 42% of households is located within 0-25 meters from landslides, followed by 37.5% of houses situated 25-50 meters away, and the remaining 19.79% where the distance is more than 50 meters.

Concluding remarks

Owing to the social and physical context of the municipality, landslide disaster risk in Teziutlán will continue to be of major concerns in the years to come. Disaster reduction would require efforts to decrease vulnerability and exposure. However, twenty years after the disaster of 1999, there has not been a sound transformation regarding policy making and practice in DRR. As such, scientific studies become more valuable as they intend to raise awareness and preparedness of the population and local authorities.

The performed evaluation expresses clearly the positive aspects with respect to the use of UAVs for landslide exposure mapping. UAVs can be regarded as an accessible alternative, effective and low-cost tool that allows the analysis of exposure conditions of dwellings. Urban growth, unplanned land-use and lack of territorial management in an area highly susceptible to landslides, are among the main drivers of landslide exposure in La Gloria neighbourhood.

Consequently, there is an evident need to delineate and implement regulation frameworks regarding the use of the land, especially in areas with greater exposure. This ought to contemplate that real estate companies should provide hazard studies and risk assessments to demonstrate viability of future constructions so that no more inhabitants are placed at risk. What is more, strong relationships between Civil Protection and land-use authorities must be enhanced, from an integrated disaster risk management (IDRiM) perspective.

It is considered necessary to carry out this type of studies in other localities of Teziutlán, both urban and rural, where population growth results in the occupation of areas susceptible to landslides derived from regional or local migration. Nonetheless, what also remains as a challenge is the availability of economic and human resources, in the understanding that in addition to financial support to develop strategic initiatives, disaster risk management needs to be carried out by people with the appropriate skills and committed to disaster risk reduction.

The participation of local communities becomes also quite relevant not only for coordinated response, but in terms of their collaboration in local initiatives on which their necessities are

reflected and the constrains they face are considered. Landslide disaster risk awareness and preparedness should also need to be sustain through time to guarantee efficient efforts to reduce disasters.

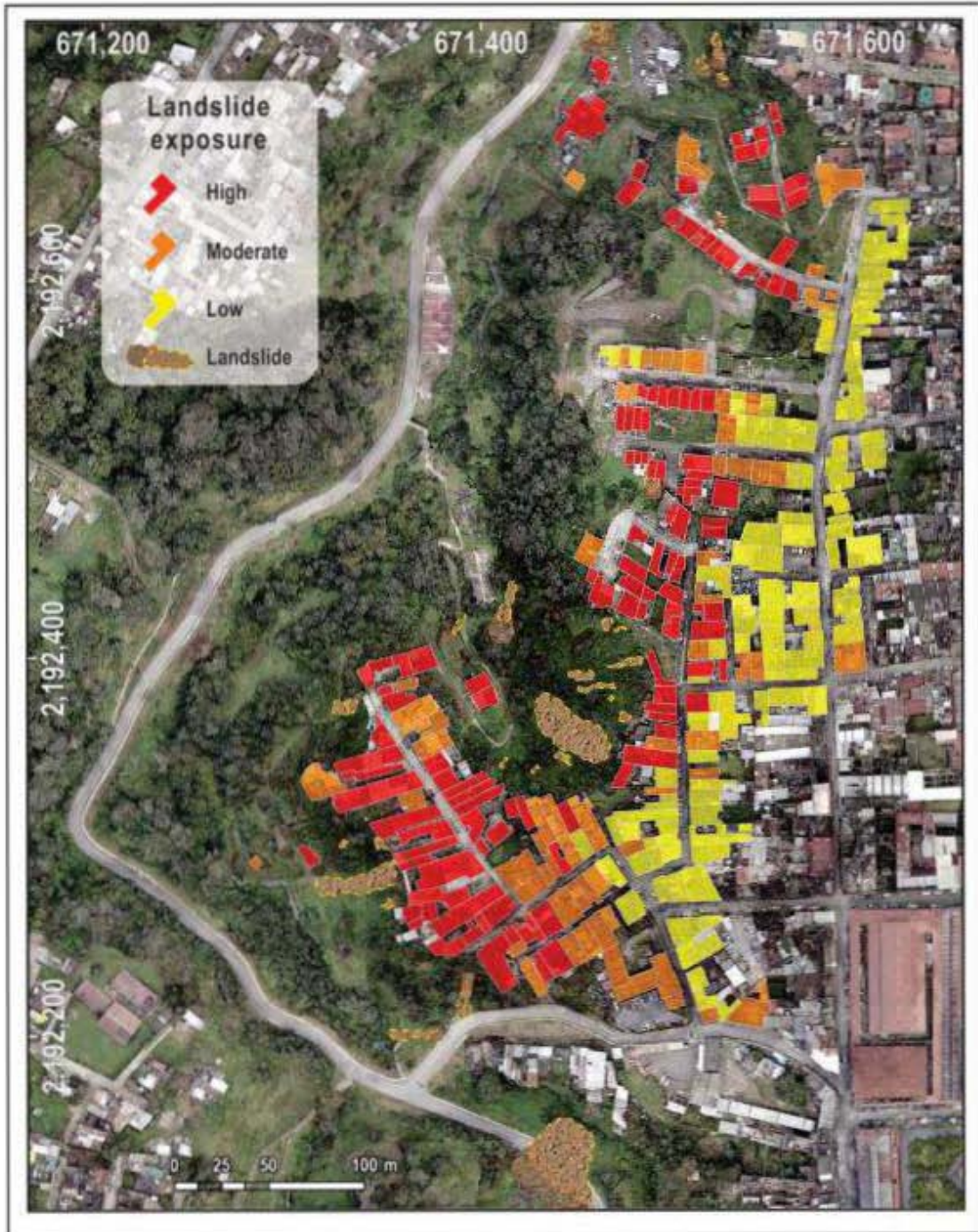


Fig. 7 Landslide exposure map of La Gloria neighbourhood, Teziutlán, Puebla, México.

References

- Alcántara-Ayala I, Garnica-Peña RJ, Coll-Hurtado A, Gutiérrez de MacGregor MT (Coords.) (2017) Inestabilidad de laderas en Teziutlán, Puebla. Factores inductores del riesgo de desastres, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 223 pp. In Spanish.
- Busa J, Rusnak M, Kusnirak D, Greif V, Bednarik M, Putiska R, Dostal I, Sladek J, Rusnakova D (2019) Urban landslide monitoring by combined use of multiple methodologies a case study on Sv. Anton town, Slovakia. *Physical Geography*. 10.1080/02723646.2019.1630232
- Casagli N, Frodella W, Morelli S, Tofani V, Ciampalini A, Intrieri E, Raspini F, Rossi G, Tanteri L, Lu P (2017) Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. *Geoenvironmental Disasters* 4(1). 10.1186/s40677-017-0073-1.
- Chen ML, Lv PF, Zhang SL, Chen XZ, Zhou JW (2018) Time evolution and spatial accumulation of progressive failure for Xinhua slope in the Dagangshan reservoir, Southwest China. *Landslides* 15(3):565-580. 10.1007/s10346-0180946-8
- Erenoglu RC (2016) Generating a digital elevation model using unmanned aerial system for a deep-seated rotational landslide on forest cover and vegetation. *Austrian Journal of Forest Science* 133(1):47-61.
- García E (1998) Climas de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). In Spanish.
- Garnica-Peña RJ, Alcántara-Ayala I (2017) Landslide synchronic evaluation by using Unmanned Aerial Vehicles (UAV): some insights on disaster risk in Teziutlán, Puebla, México, In: Mikos M, Tiwari B, Yin Y, and Sassa K (Eds) *Advancing Culture of Living with Landslides*, Vol. 2. *Advances in Landslide Science*, 209218, Springer. 10.1007/978-3-319-53498-5_24
- INEGI (2015) Encuesta Intercensal 2015. <http://www.inegi.org.mx>
- INEGI (2015) Unidades climatológicas (Climatologic units) <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/infoescala.aspx>. In Spanish.
- Murillo-García F, Alcántara-Ayala I (2017) Landslide inventory, Teziutlán municipality, Puebla, México (1942–2015). *Journal of maps*, 13(2):767-776.
- Murillo-García F, Steger S, Alcántara-Ayala I (2019) Landslide susceptibility: a statistically based assessment on a depositional pyroclastic ramp. *Journal of Mountain Science* 16(3):561-580.
- Niethammer U, James MR, Rothmund S, Travelletti J, Joswig M (2012) UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology* 128:2-11. 10.1016/j.enggeo.2011.03.012

Peppas MV, Mills JP, Moore P, Miller PE, Chambers JE (2017) Brief communication: Landslide motion from cross correlation of UAV-derived morphological attributes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17(12):2143-2150. 10.5194/nhess-17-2143-2017

SGM (2011) Carta Geológico-Minera: Teziutlán E14-B15 (Geological-Mining map: Teziutlán E14-B15), Servicio Geológico Mexicano. In Spanish.

Thiebes B, Tomelleri E, Mejia-Aguilar A, Rabanser M, Schlogel R, Mulas M, Corsini A (2016) Assessment of the 2006 to 2015 Corvara landslide evolution using a UAV derived DSM and orthophoto. *Landslides and Engineered Slopes: Experience, Theory and Practice* 1-3:1897-1902.

UNISDR (2017) Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction. Geneva: UNISDR.

CAPÍTULO V: Landslide exposure community-based mapping: a first encounter in a small rural locality of Mexico

Ricardo J. Garnica-Peña

Posgrado en Geografía, UNAM

Gerardo Cardón-Idelfonso

Colegio de Geografía, UNAM

Irasema Alcántara-Ayala

Instituto de Geografía, UNAM

This research aimed to analyse the exposure of households and other buildings to landslides by means of community-based mapping in Huehueymico, a small rural locality of 884 inhabitants located in Teziutlán, Puebla, Mexico. Despite the severe impact of the disaster of October 1999 associated with rainfall induced landslides, there has been a lack of interest of local authorities to promote landslide disaster risk preparedness in rural isolated areas. Under such account, it is suggested that community-based mapping can be regarded as a very valuable alternative to enhance disaster risk education as a first encounter between residents and landslide disaster risk awareness. The methodology undertaken comprised the use of an unmanned aerial vehicle (UAV), in order to generate high resolution base maps, field evaluation of the conditions and state of conservation of the buildings, and a couple of workshops directed to undertake the community-based mapping. Results regarding the landslide exposure community-based map are presented in this investigation.

Introduction

Owing to the extreme rainfall event of October 1999, hundreds of landslides occurred in the Sierra Norte de Puebla (SNP), causing considerable negative effects in the localities of the region (Lugo et al., 2005). Teziutlán, Puebla was one of the municipalities where the greatest human and economic losses were concentrated, including 263 human losses and 1.5 million affected people. Damages were especially severe in the neighbourhoods of La Gloria, Juárez, Atoluca, France, Siete Sabios, La Aurora, Huehueymico, among others (Bitrán, 2001).

After the 1999 disaster, diverse investigations have been carried out in Teziutlán at municipal and local scales to understand landslide dynamics and the construction of landslide disaster risk associated to high levels of vulnerability and exposure (Alcántara-Ayala et al. 2017). However, there has been an absence of attention to rural isolated localities. Therefore, in this

research, a landslide community-based approach was undertaken to create a participative landslide exposure map, as a first step into the enhancement of landslide disaster risk awareness for the residents of the locality of Huehueymico, a rural area, where 12 people lost their lives and 24 houses were affected during the disaster of 1999.

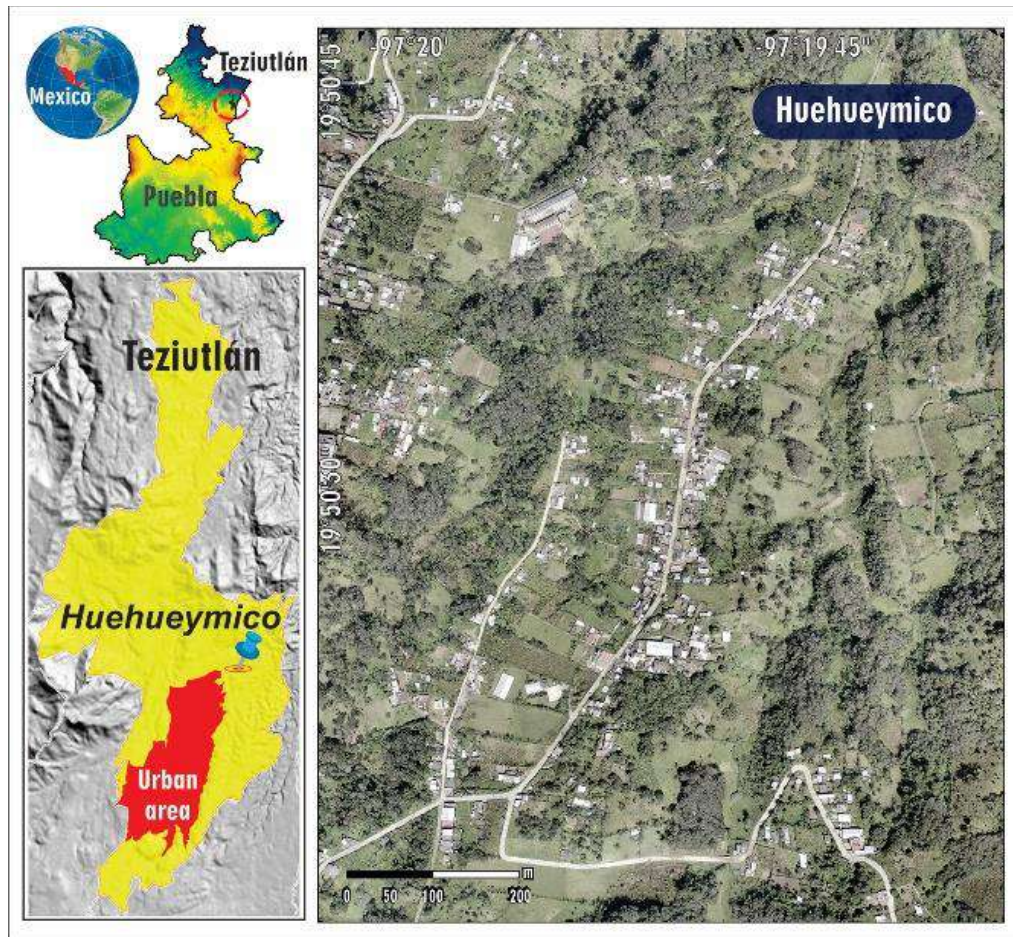


Fig. 1 Location of Huehueymico, in the municipality of Teziutlán, Puebla, Mexico.

Study area

Huehueymico is one of the 33 rural towns of Teziutlán and is located approximately 4 km northeast of the municipal capital (Fig. 1). It is comprised within the Trans-Mexican Volcanic Belt in the SNP, in the province of Puebla, Mexico, at 1,720 ma.s.l.

Existing data on the population of the rural town of Huehueymico are scarce. Most updated information indicates that in 2010, there was a population of 884 inhabitants, 414 males and 470 females, and a total of 178 inhabited households.

The lithological character of the town of Huehueymico is associated entirely with volcanic activity. According to the Mexican Geological Service (SGM, 2011), Huehueymico is situated on the highly landslide susceptible pyroclastic ramp formed by deposits of the Caldera de los Humeros Volcano, located to the south of Teziutlán. According to García (2004), the climate present in the study area is temperate humid with rainfall all year round and average annual temperature that varies between 12 ° C and 18 ° C. Both, lithological and the climatic factors are of great relevance for the occurrence of landslides.

Community-based mapping

Participatory or community-based mapping was originated within the field of cultural geography in the 1990s, at the time when it was decided to bring back the development of indigenous mapping (Diez et al. 2012). The greatest advantage of this type of cartography is the involvement of communities contributing to the generation of information regarding their own environment, culture, traditions and problems (Mora and Jaramillo, 2003). In other words, community mapping takes advantage of local knowledge for research, and problem solving.

Samodra et al. (2018) pointed out that community mapping is an effective method for generating information in areas where research has not been carried out or with scarce or no data. Several studies have been undertaken to use community-based mapping to involve people into different aspects linked to disaster risk reduction (DRR). Cadag and Gaillard (2012) carried out Participatory 3-Dimensional Mapping in the Philippines pointing out its significance for risk assessment and DRR planning. The work of Sullivan-Wiley and collaborators (2019) included participatory mapping related to floods, droughts, landslides, among other hazards in Uganda.

Although very often community mapping is not sustainable due to lack of funding, there are successful cases in both developed and developing countries, such as Jushibo in Japan or Guardianas de la Ladera (guardians of the hillslopes) in Colombia, on which community participation plays an essential role for disaster risk reduction.

According to Barragán-Giraldo (2016) four criteria should be met for the elaboration of participatory mapping: (1) production process: refers to the strategy and the objective with which the community mapping will be carried out, which must be inclusive and open; (2) community ideology: community mapping must be related to a topic of importance for the communities, concerning their needs and potentially usable by them; (3) local knowledge: maps should show local information and knowledge; (4) cartographic convention: it is not necessary that participatory maps resemble official maps; however, the closer, the more likely they could be considered as appropriate communication tools.

By involving communities in participatory mapping, it is possible to identify and understand the different ingredients of disaster risk and to engage people in diverse activities aimed at reducing existing vulnerability (Canevari-Luzardo et al. 2015) and exposure, including strategies for raising awareness and preparedness at local level.

The significance of community-based mapping provides the possibility to generate spatial information, that can be used not only by researchers, but by the communities, and other type of stakeholders to manage their territory. The motivated participation of residents is essential to obtain valuable information from their environment based on scientific and traditional knowledge to get them involved into decision making and practice. Through mapping people get in contact with their own space (Mora and Jaramillo, 2003). recognise needs and can be committed to a series of challenges to improve living conditions.

Recent literature has shown the significance of community-based approaches for landslide research and disaster risk reduction strategies at local levels in different mountain regions of the world (Karnawati et al. 2011, 2018; Fukuoka and Dok 2013; Coutinho et al. 2016; Alcántara-Ayala et al. 2018).

Methodology

The methodology involved in the research comprised three phases developed during the summer of 2019: (1) Aerial survey using UAV; (2) Field evaluation of households and buildings; and (3) Community-based mapping workshops in the locality of Huehueymico, Teziutlán, Puebla.

Aerial survey using UAV

Due to the lack of high-resolution images of the area of interest, the mapping base was created from an aerial survey using UAV. A rotating wing drone DJI Phantom 4 PRO with an integrated camera was used for this purpose.

Flight lines for the drone were drawn using the Map Pilot application. In total, five flights were prepared: two vertical and three circular lines for oblique shots using the “point of interest” capture option. Linear flights were performed with an overlap of 80% at the top and bottom of the image, and with 40% overlap for the sides of the photographs (Table 1).

Criteria	North-South survey	East-West survey
Area (ha)	88.13	71.87
Flight height above ground (m)	150	150
Images	701	590
Mean pixel resolution (cm)	4.1	4.1
Overlapping (%)	80x80	80x80
Total flight time (minutes)	38	30

Table 1. Criteria used for the grid surveys.

Circular flights were made at two different heights, 50 and 60 meters, in order to obtain greater detail of the lateral sections of constructions, aimed at getting a better resolution of the orthophoto (Fig. 2).

Photographs taken with the drone were processed using the Bentley ContextCapture software in order to generate various photogrammetric products. These products comprised a three-dimensional mesh model (3D mesh), an orthophoto, a digital surface model (DSM) and point cloud in LAS format. The orthophoto and the DSM were generated at 5 cm pixel size and were used to create a pair of maps, 6.5 x 4.5 m in size, which were printed out to perform the community-based mapping workshop.

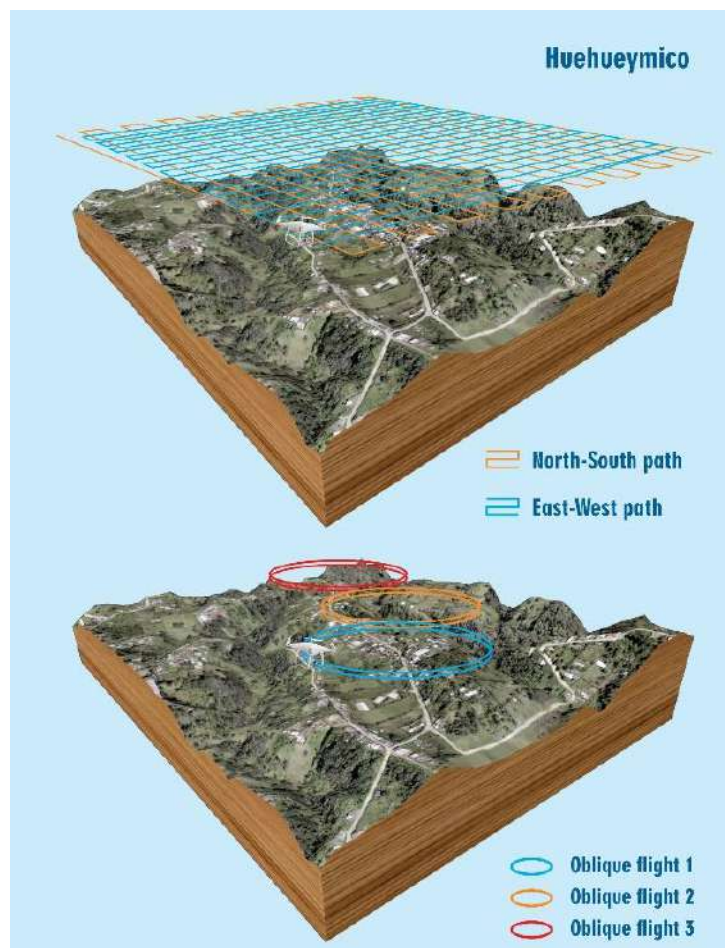


Fig. 2 Vertical and oblique surveys.

Field evaluation of buildings

Owing to its condition of rural locality, no official cartography was available to start the research. Based on field evaluation and information provided by the residents of Huehueymico, it was possible to identify and map the boundaries of the locality.

By using Mapit GIS and a GPS, buildings were evaluated in the field in terms of conservation state, land use and available basic services. Assessed elements included location relative to the slope, existence or conditions of sewer systems, lighting, water intake, foundations, in addition to land use, number of house storeys, type of floor, presence of vegetation and cracks, and level of deterioration of households or buildings.

The information resulted from field evaluation was used in combination with terrain attributes derived from the DSM produced through the aerial survey using UAV, including slope shape, topographic wetness index, slope inclination, distance to river currents, along with proximity to existing landslides, were used to define a landslide exposure index. In this context, exposure was defined as “the situation of people, infrastructure, housing, production capacities and other tangible human assets located in hazard-prone areas” (UNISDR 2017). Buildings were classified into three categories: high, moderate and low exposure to landslide.

Community-based workshop

A couple of community-based workshops were carried out at the middle school of Huehueymico; only members of the student community participated (Fig. 3). The first stage of the workshop consisted of a series of introductory lectures to provide information and insights concerning landslides, risk, vulnerability, exposure, disasters, GIS, UAVs and basic cartography. Examples of cartographic inputs from previous work developed for the Sierra Norte de Puebla elaborated with UAVs were also provided.

An orthophoto and an altimetric map generated from the aerial survey using UAV were printed on canvases (Fig. 3). Relevant landslide symbology was created to be used in the community mapping workshops. It included a series of elements to identify landslide symptoms and controlling factors. Additionally, iconography was used to identify meeting points, potential evacuation routes and roads in good and poor conditions. The iconography was printed out on 9 cm by 6 cm cardboard for better manageability.

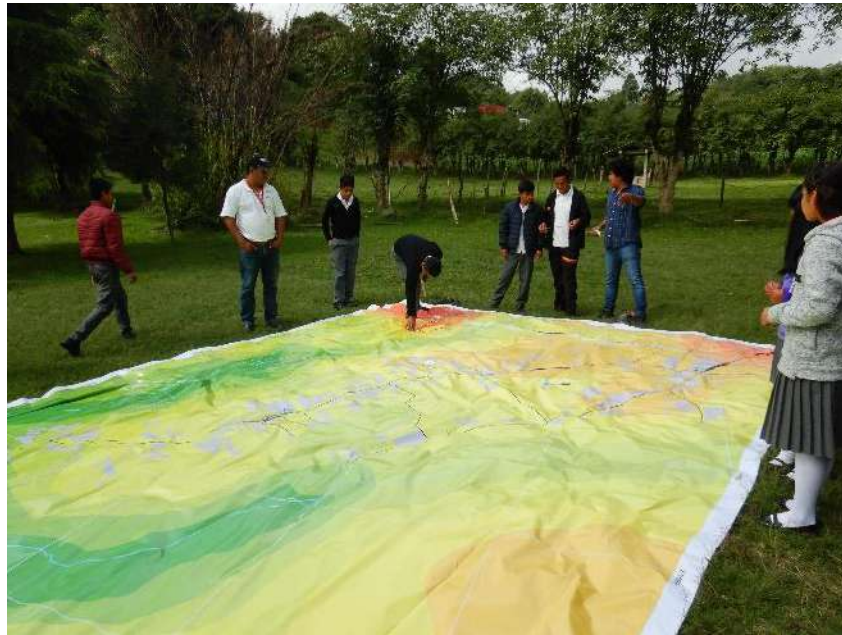


Fig. 3 Community-based mapping workshop.



Fig. 3 Community-based mapping workshop.

Maps were extended on the yard of the middle school and symbols placed on two tables located near the maps. Participants were invited to walk on the large size maps to recognise territorial features of Huehueymico. They were later asked to locate particular features of its locality, such as the church, schools and their own houses in both maps. Once the participants were familiarised with their locality through both maps, recognition of landslide symptoms, controlling factors, existing landslides (Fig. 4), meeting points, and households was undertaken.

Discussions regarding factors influencing the stability of the slopes were held. After a consensus was reached with regards to the elements that needed to be included in the map and their location, the information was combined with the field evaluation of households and building regarding exposure by using GIS.

Validation of the resulted maps was undertaken by walking around the locality aided by a high-accuracy GPS receiver, and with the information provided by the civil protection authorities (Fig. 5).

Concluding remarks

Owing to its high resolution, drone-generated cartographic inputs allowed efficient identification of different components of landslides exposure at the local level through field evaluation and community-based mapping. Although much remain to be done, the performed landslide mapping was highly valued for raising awareness by participants and was considered by them as a significant first step into landslide disaster risk awareness (Fig. 6).



Fig. 4 Rainfall induced landslide triggered in 2018.



Fig. 5 Community-based mapping workshop.

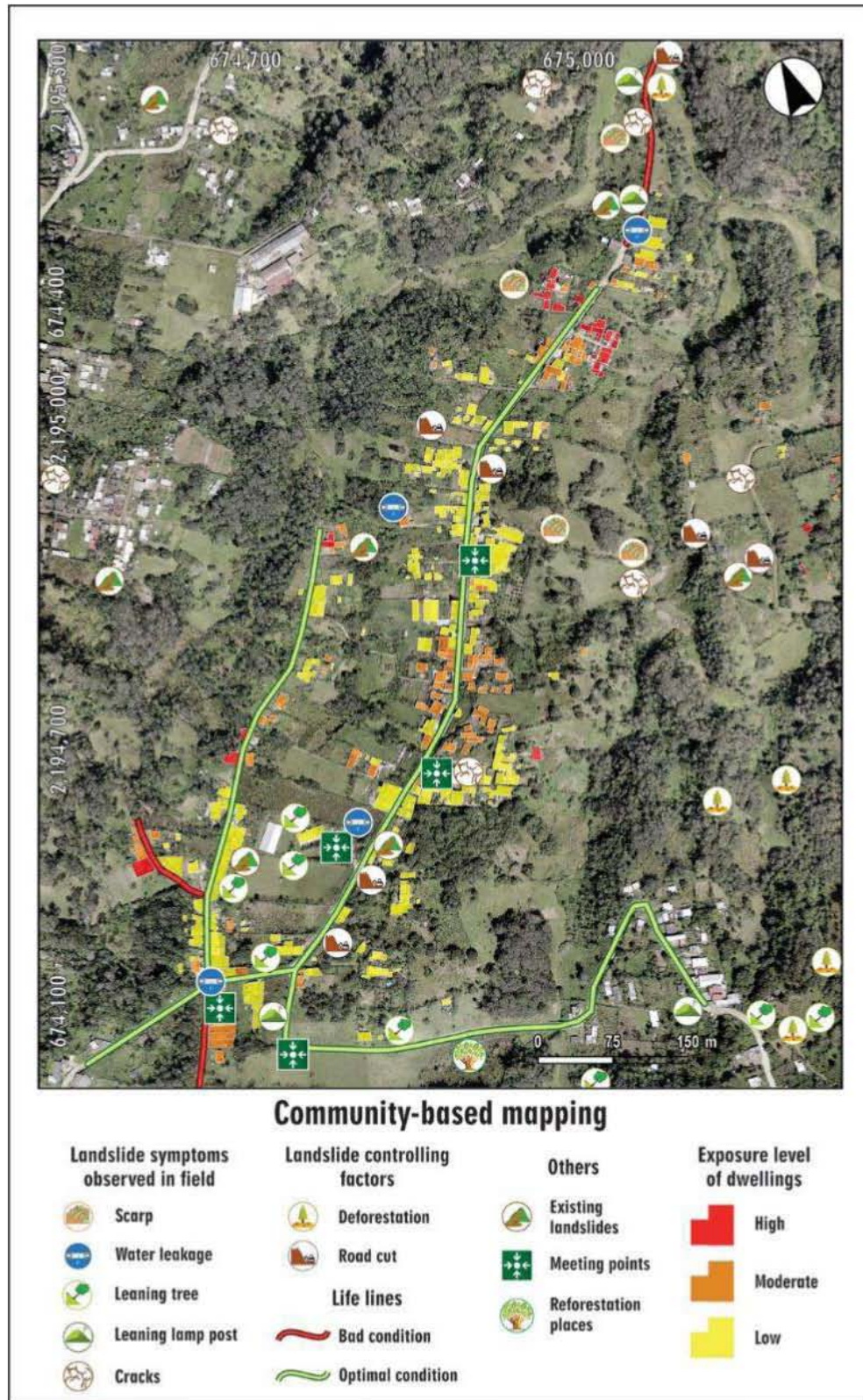


Fig. 6 Landslide exposure community-based map of Hueyhueymico, Teziutlán, Puebla, México.

References

- Alcántara-Ayala I, Garnica-Peña RJ, Coll-Hurtado A, Gutiérrez de MacGregor MT (Coords.) (2017) *Inestabilidad de laderas en Teziutlán, Puebla. Factores inductores del riesgo de desastres*, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 223 pp. In Spanish.
- Alcántara-Ayala I, Garnica-Peña RJ, Murillo-García FG, Salazar-Oropeza MO, Méndez-Martínez A, Coll-Hurtado A (2018) Landslide disaster risk awareness in Mexico: community access to mapping at local scale. *Landslides* 15(8):1691-1704. 10.1007/s10346-018-1010-4
- Barragán-Giraldo DF (2016) Cartografía social pedagógica: entre teoría y metodología. *Revista Colombiana de Educación* 70:247-285.
- Bitrán D (2001) Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-1999. CENAPRED
- Cadag JRD, Gaillard JC (2012) Integrating knowledge and actions in disaster risk reduction: the contribution of participatory mapping. *Royal Geography Society*. 44 (1): 100-109.
- Canevari-Luzardo L, Bastide J, Choutet I, Liverman D (2017) Using partial participatory GIS in vulnerability and disaster risk reduction in Grenada. *Climate and Development*, 9(2):95-109.
- Coutinho RQ, Henrique HM, Duarte CC, Nascimento DM (2016) Risk mapping for landslides and erosion in the municipality of Ipojuca-PE-Rurópolis community. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice* 699-706.
- Diez J, Escudero H (2012) *Cartografía social. Investigación e intervención desde las ciencias sociales, métodos y experiencias de aplicación*. Colección Extensión. Universidad de la Patagonia. Argentina
- Fukuoka H, Dok A (2013) Precursor process and triggering mechanism of rapid landslides under extreme weather conditions, and an attempt of ICT-based participatory joint mapping of past landslides with experts in developing countries. *Journal of Disaster Research* 1:165-166.
- García E (2004) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Insititio de Geografía, Serie Libros Num. 6. Universidad Nacional Autónoma de México, 91 pp. In Spanish.
- Garnica-Peña, RJ, Alcantara-Ayala, I (2017) Multi-temporal Landslide Evaluation by Using UAV: Some Insights on Disaster Risk in Teziutlan, Puebla Mexico. *Advancing culture of living with landslides, vol 2: advances in landslide science* 209-218. 10.1007/978-3-319-53498-5-24.
- Karnawati D, Fathani TF, Wilopo W, Andayani B (2018) Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools. *TXT-tool 4.062-1.1 community hazard maps for landslide risk reduction* 599-606. 10.1007/978-3-319-57777-7-36.
- Lugo J, Zamorano J, Capra L., Inbar M, y Alcántara-Ayala I (2005) Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: Causa y efectos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 22: 212-228.

Mora H, Jaramillo M (2003). Aproximación a la construcción de Cartografía social a través de la Geomática. *Ventana Informática* 11(enero-junio):129-146.

Samodra G, Chen G, Sartohadi J, Kasama K (2018) Generating landslide inventory by participatory mapping: an example in Purwosari Area, Yogyakarta, Java. *Geomorphology* 306:306-313.

SGM (2011) Carta Geológico-Minera: Teziutlán E14-B15 (Geological-Mining map: Teziutlán E14-B15), Servicio Geológico Mexicano. In Spanish.

Sullivan-Wiley KA, Gianotti AGS, Connors JPC (2019) Mapping vulnerability: Opportunities and limitations of participatory community mapping. *Applied Geography* 105:45-57. 10.1016/j.apgeog.2019.02.008

UNISDR (2017) Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction. Geneva: UNISDR.

CAPÍTULO VI: Landslide disaster risk awareness in Mexico: community access to mapping at local scale

Irasema Alcántara-Ayala

Instituto de Geografía, UNAM

Ricardo J. Garnica-Peña

Posgrado en Geografía, UNAM

Franny Murillo-García

Posgrado en Geografía, UNAM

Miguel Octavio Salazar-Oropeza

Centro de Comando, Control, Comunicación y Cómputo (C4), Teziutlán, Puebla, México

Arturo Méndez-Martínez

Protección Civil, Teziutlán, Puebla, México

Atlántida Coll-Hurtado

Instituto de Geografía, UNAM

Recent investigations have sought to understand the spatial-temporal distribution of landslides in Teziutlán, Puebla, a municipality historically affected by landslides. The latest initiative, under the umbrella of the ICL-IPL Project “Landslide disaster risk communication in mountain areas”, was the publication of a book of Atlas type comprising a collection of 142 maps and their corresponding explanatory texts that included a context analysis of landslide disaster risk drivers at various scales, from regional to local. This paper aims to recognise and address the necessity to further enhance the guiding principle of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction to focus on the understanding of disaster risk drivers at local level, for the determination of measures to reduce disaster risk. We present an initial contribution to promote landslide disaster risk awareness in the urban area of Teziutlán by providing to the community direct access to maps of landslide disaster risk at local scale; this is a first step towards the establishment of a robust strategy to communicate landslide risk in the long term. Effective implementation calls for decreasing vulnerability and exposure. Beyond contexts of vulnerability reflected by social, economic, cultural, political, and institutional conditions, it may be difficult to picture the spatial interactions of exposure of communities, assets, and the environment because the means of analysing spatial relationships between society and nature are not commonly available in mountain areas. Therefore, for people to better understand risk, maps of landslide susceptibility and risk exposure present a good way for the inhabitants to familiarise themselves with the spatial context of the dynamics in which they are immersed.

Introduction

The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030 is an action-oriented agenda aiming at a substantial reduction of disaster risk and losses of lives, livelihoods, and health and of the economic, physical, social, cultural, and environmental assets of persons, businesses, communities, and countries. It establishes and promotes seven global targets, thirteen guiding principles, and the following four priorities of action: (1) understanding disaster risk; (2) strengthening disaster risk governance to manage disaster risk; (3) investing in disaster risk reduction for resilience; and (4) enhancing disaster preparedness for effective response and to “Build Back Better” in recovery, rehabilitation, and reconstruction (UNISDR 2015a).

Although the Sendai Framework lacks explicit emphasis on the need for delineating strategies to improve disaster risk communication, it is clear that “Understanding disaster risk”, and therefore also the accomplishment of the other priorities, requires a solid and scientifically based initiative of communication.

In addition to designing disaster risk communication strategies at national and subnational levels, those at the local scale demand major attention, since disaster risk reduction (DRR) is very much embedded within specific societal and territorial contexts, as the type of information that is needed emerges from the spatial temporal dynamics of the interactions among hazards, vulnerabilities, and exposure.

As a voluntary commitment towards the implementation of the framework, the International Consortium on Landslides (ICL) (Sassa 2004a) in collaboration with the International Strategy for Disaster Reduction (ISDR) established the ISDR-ICL Sendai Partnerships 2015–2025 for Global Promotion of Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk; these aim to pursue prevention and to provide practical solutions, education, communication, and public outreach to reduce landslide disaster risk (Sassa 2015, 2017a, b; Alcántara-Ayala et al. 2017a). Among the diverse fields of cooperation in research and capacity building, ICL recognised the need to enhance an “open communication with society through integrated research, capacity building, knowledge transfer, awareness raising, training, and educational activities to enable societies to develop effective policies and strategies for reducing landslide disaster risk, to strengthen their capacities for preventing hazards from developing into major disasters, and to enhance the effectiveness and efficiency of relief programs” (Sassa 2017b).

One of the major activities of ICL, also included within the Sendai Partnerships, is focused on the development of the International Program on Landslides (IPL), a strategy directed towards conducting international cooperative research and capacity building in landslide risk mitigation, particularly in developing countries (Sassa 2004b). Under this umbrella, the Institute of Geography of the National Autonomous University of Mexico (UNAM), categorised as an ICL World Centre of Excellence (WCoE), is undertaking the IPL Project “Landslide disaster risk communication in mountain areas”. The underlying rationales of this

project are as follows: to contribute to integrated research on landslides in Mexico; to link scientific contributions with the needs of civil protection authorities in vulnerable communities; to develop landslide risk perception studies; to build a strategy of landslide risk communication; and to support capacity building.

Within this project, during recent years, several landslide research and educational activities have been carried out in collaboration with civil protection authorities of Teziutlán, Puebla, at municipal and local levels, as well as with the Centre for Command, Control, Communications and Computing of Teziutlán; this centre is responsible for coordinating and supervising security plans and programmes, including those related to civil protection. Quite recently, a series of maps and accompanying texts on drivers of landslide disaster risk were produced and published for the municipality (Alcántara-Ayala et al. 2017b). These include a landslide inventory and maps at regional, municipal, and local scales, on which several aspects concerning hazard, vulnerability, and exposure are depicted.

These maps and texts targeting different aspects of landslide disaster risk in Teziutlán were presented during a community workshop to the population living in the most critical areas at risk. The book was formally presented in the municipal auditorium with the support of the local authorities. Large printed maps were also made available, explained and discussed with the public, who included school teachers, community leaders, local civil protection committees, and neighbourhood elders (Fig. 1). These materials are being used by the members of each neighbourhood in collaboration with the corresponding civil protection authorities in order to identify specific actions to be undertaken in the short and medium terms.

This paper aims to recognise and address the necessity to further enhance one of the guiding principles of the Sendai Framework; this states that “While the drivers of disaster risk may be local, national, regional or global in scope, disaster risks have local and specific characteristics that must be understood for the determination of measures to reduce disaster risk”. Along this line of thought, we present an initial contribution to promote landslide disaster risk awareness in the urban area of Teziutlán, by providing the community with direct access to landslide disaster risk mapping at local scale. This is a first step towards the establishment of a robust strategy for landslide risk communication in the long term.

Hillslope instability in Teziutlán, Puebla: an overview

Teziutlán is one of the 217 municipalities within the state of Puebla, Mexico (Fig. 2). It is in the mountainous region of the Sierra Norte de Puebla, between the Sierra Madre Oriental and the TransMexican Volcanic Belt. Given its geological, geomorphological, and climatic character, the terrain is highly susceptible to landslides. Historically, it has been affected by landslide events, some of them having involved severe disasters, such as was the case in October 1999 (Alcántara-Ayala 2004).

The municipality of Teziutlán has a total population of 97,590 inhabitants distributed in thirty-four localities, five of which are considered urban areas. Atoluca, Acateno, San Sebastián, and Xoloateno have a population between 2500 and 15,000 inhabitants, and in the city of Teziutlán itself, there are 75,331 inhabitants (INEGI 2010). Additionally, the municipality has twenty-nine rural localities. Higher population density is concentrated in the centralsouth sector (INEGI 2015).

In the period between 2000 and 2010, the main urban localities underwent population growth, whereas most of the rural localities showed a decrease in population, which can be attributed to the intense migratory flow from these less-favoured areas in search of work (González Sánchez et al. 2017).



Fig. 1 Presentation of the publication concerning drivers of landslide disaster risk in Teziutlán, Puebla

Notwithstanding that the level of marginalisation of the municipality of Teziutlán as a whole is regarded as low, at the local scale several localities show high or very high degrees of marginalisation. Likewise, the urban locality of Teziutlán has a combination of very low, low, and medium levels of marginalisation, depending on the specific neighbourhood under consideration (González Sánchez et al. 2017). As the social and economic conditions of the inhabitants vary within the municipality, vulnerability, and exposure to hazards, particularly to landslides, also differ.

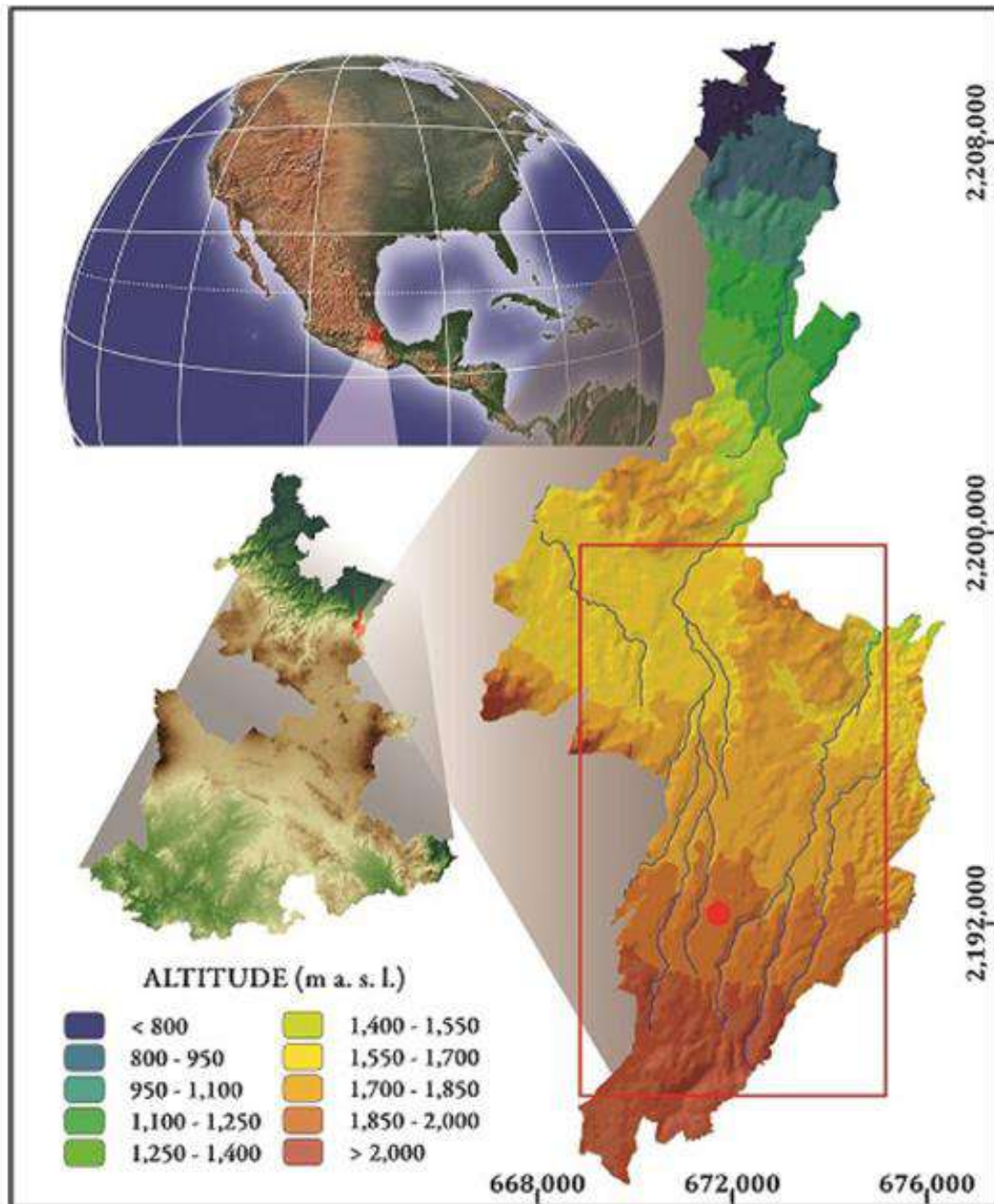


Fig. 2 Location of the municipality of Teziutlán, Puebla, Mexico

Slope instability is caused not only by steep gradients but also to a great extent by the geological character of the region (Fig. 3). The main lithological types are metamorphic and sedimentary rocks, associated with the uplift of the Sierra Madre Oriental; these are largely covered by volcanic deposits from the Caldera de los Humeros volcano, situated approximately 18 km south of the city of Teziutlán, the municipal seat of government.

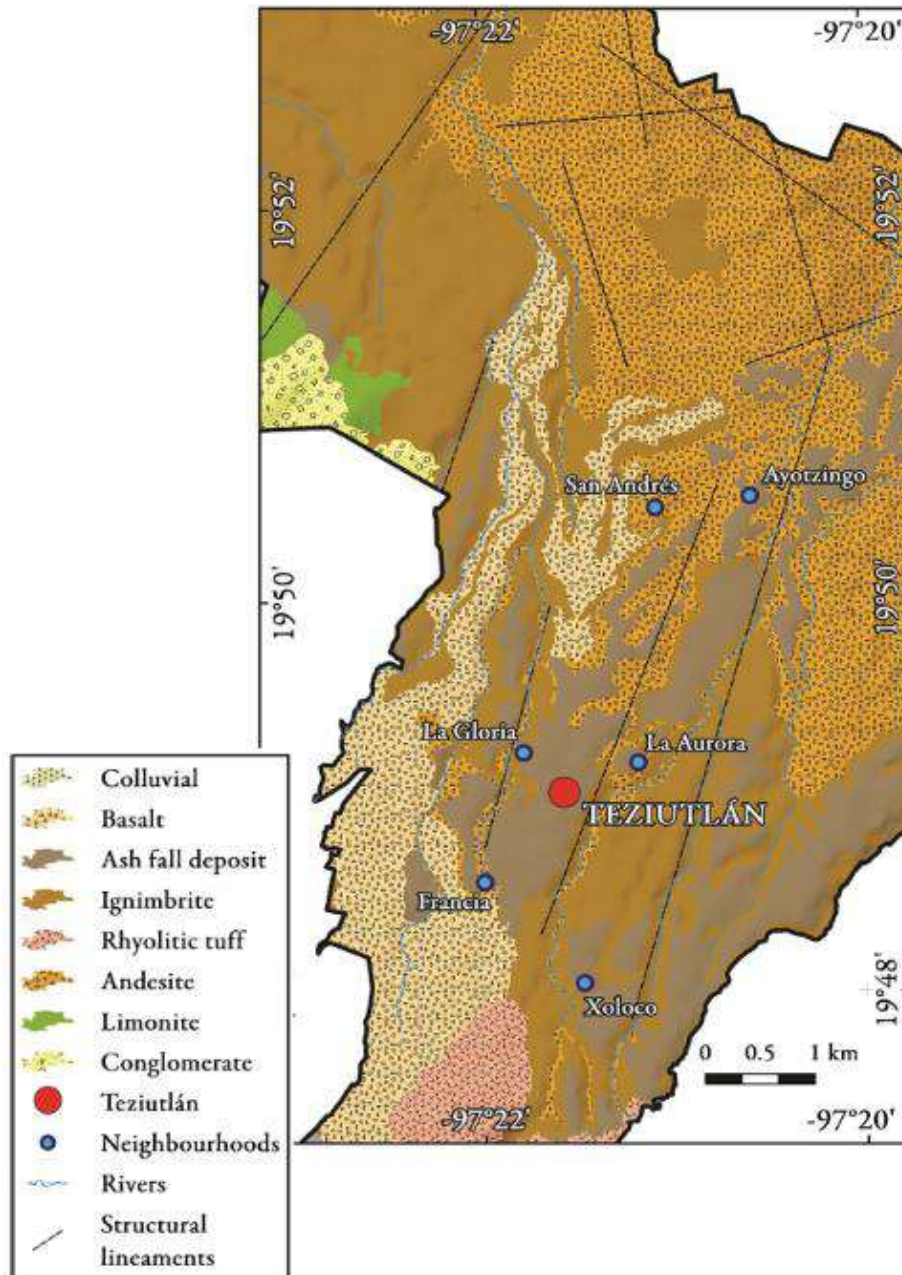


Fig. 3 Geological map of the immediate surrounds of the city of Teziutlán (adapted from Salinas-Rodríguez and Castillo-Reynoso 2011)

The most ancient geological unit of the city is the Chililis shale, originally formed by andesitic lavas that were metamorphosed during the lower Permian period. The Chililis shale is covered by sedimentary rock units; the Cahuwasas formation (170 Ma.), formed by limolite, polymictic conglomerates, and some horizons of sandstones, can be observed on the slopes of the Chignautla hill in the western part of the municipality (Salinas-Rodríguez and Castillo Reynoso 2011).

The metamorphic and sedimentary units are covered by deposits of volcanic material from Caldera de Los Humeros, whose activity began approximately in 5.1 Ma (Salinas-Rodríguez and Castillo-Reynoso 2011). The oldest igneous rocks in the municipality correspond to the Teziutlán formation (1.5 Ma, Pliocene), formed by lava flows of andesite and basaltic andesite. The next eruptive stage of the Caldera de Los Humeros, an explosive eruption that took place 470 thousand years ago, expelled 115 km³ of material over a surface of 3500 km²; this modified the existing relief since it caused the collapse of the caldera, and the consequential deposits covered the sedimentary and metamorphic sequence of the Chililis and Cahuwasas formations as well as a large part of the andesite of the Teziutlán formation. Those deposits were classified as the Xaltipan Ignimbrite (Ferriz and Mahood 1984).

Almost all of the Xaltipan Ignimbrite deposits appear to be poorly consolidated and unwelded. They are widely distributed in the north and south-central region of the municipality and can be categorised as a pyroclastic flow of pumice (Ferriz and Mahood 1984). Also from a geological perspective, a consolidated rhyolite tuff can be observed to the south of the area of interest. The activity in the Caldera de Los Humeros terminated with the eruption of the San Antonio volcano, which expelled basalt-olivine lava flows that are prominent in the south-central region (Ferriz and Mahood 1984). Younger units correspond to the alluvial and colluvial deposits situated to the centre east of the municipality. According to field observations, the identified colluviums may be related to the occurrence of mass movement processes of considerable volume.

As mentioned earlier, of particular relevance was the disaster that took place on 4–5 October 1999, in which 109 people died as a result of a single landslide in the La Aurora neighbourhood. It is estimated that the volume of the displaced mass was in the order of 7350 m³ (Alcántara-Ayala 2004). By analysing oblique aerial photographs of 1942, it was possible to identify on the hillside of La Aurora (depopulated at that time) what seems to be the scar of an ancient mass movement process in the same place as the landslide of 1999; hence, it is very likely that the slide of 1999 was a reactivation of an old movement (Murillo-García et al. 2017).

Most of the landslides in 1999 occurred on the sequence of volcanic ash fall deposits and on the slopes formed by the Xaltipan Ignimbrite. Some movements started as planar or rotational landslides and were transformed into flows. This is the case of the slides in the La Aurora and San Andrés neighbourhoods. At the present time, the area where the La Aurora landslide occurred remains uninhabited and the vestiges of some of the buried or damaged houses are still visible at the site. However, in the area adjacent to the landslide, new homes have been built (Murillo-García et al. 2017).

The risk of landslide disaster results from the combination of landslide hazards, vulnerability of communities, and their exposure to landslides. When a terrain is naturally unstable, landslide dynamics are hard to control. As natural hazards cannot be avoided, the only possibility of reducing disaster risk is by decreasing vulnerability and exposure.

During recent years, several investigations have sought to understand the spatial-temporal distribution of landslides in Teziutlán (Alcántara-Ayala 2004; Murillo-García et al. 2015; Murillo-García and Alcántara-Ayala 2017) and also the diverse dimensions of vulnerability. Regarding the latter, the most recent initiative has been the publication of a book of Atlas type that includes a collection of 142 maps and their corresponding explanatory texts (all of them in Spanish), organised into five sections for which a contextual analysis is provided at a range of scales, from regional to local (Alcántara-Ayala et al. 2017b). The publication aims to provide the elements needed to understand the interactions among the environment and society that determine disaster risk; with this in view, it emphasises that disasters are not caused by natural phenomena or extreme events, but are socially constructed, since they are governed to a great extent by the lack of adequate territorial management and they result from historical structural processes.

For the purposes of this paper, we have included three maps to illustrate the information provided to the community so that they may better understand landslide disaster risk. These maps were created by the academics and students participating in the research project, but also resulted from collaboration with people in charge of civil protection and security plans and programmes of the municipality of Teziutlán. Although it could be perceived by some people as a top-down approach, the book incorporates the perspective of the community, and we have also recognised that in addition to this type of scientific mapping, community-based mapping is of the utmost significance for DRR. The latter endeavour, complementary to the work presented here, is currently in progress.

Landslide disaster risk mapping at local scale

Landslide inventory map (1942–2015)

One of the main contributions to understanding the dynamics and potential impact of landslides is the construction of landslide inventories. Their compilation and use have been documented by studies in many regions of the world, including the use of a range of approaches and techniques (Guzzetti et al. 2012).

This landslide inventory (Fig. 4) was constructed from a series of black and white aerial photographs for the years 1942, 1956, 1974, 1978, 1980, 1991, and 1999, aerial colour photographs from 2007, high-resolution satellite images from 2000, annual satellite imagery covering the period 2003–2015, and fieldwork. A detailed explanation of the procedure can be found in Murillo-García and Alcántara-Ayala (2017).

In total, 47 landslides were mapped. The main types found were silt planar slides, debris flow slides, and slides; the last, slides, occupied the greatest total landslide area; 40% of the landslides were in urban areas, followed by 19% in grasslands. Approximately two-thirds of the total number of landslides occur in the Xaltipan Ignimbrite (Table 1).

Landslide susceptibility map

To develop the landslide susceptibility map (Fig. 5), nine conditioning factors were used in addition to the information associated with the landslide inventory. The inventory was used as the dependent variable, presence or absence of landslides. Only one point or pixel was taken into account for each landslide included in the inventory. The selected point for each landslide was the central point of the initiation zone or scarp area. Eight of the nine conditioning factors were extracted from Digital Elevation Models with a pixel size of 5 m: slope angle, altitude, slope orientation, convergence index (slope geometry), relative position within the hillside, distance from water currents, distance from natural springs of water, and topographic moisture index.

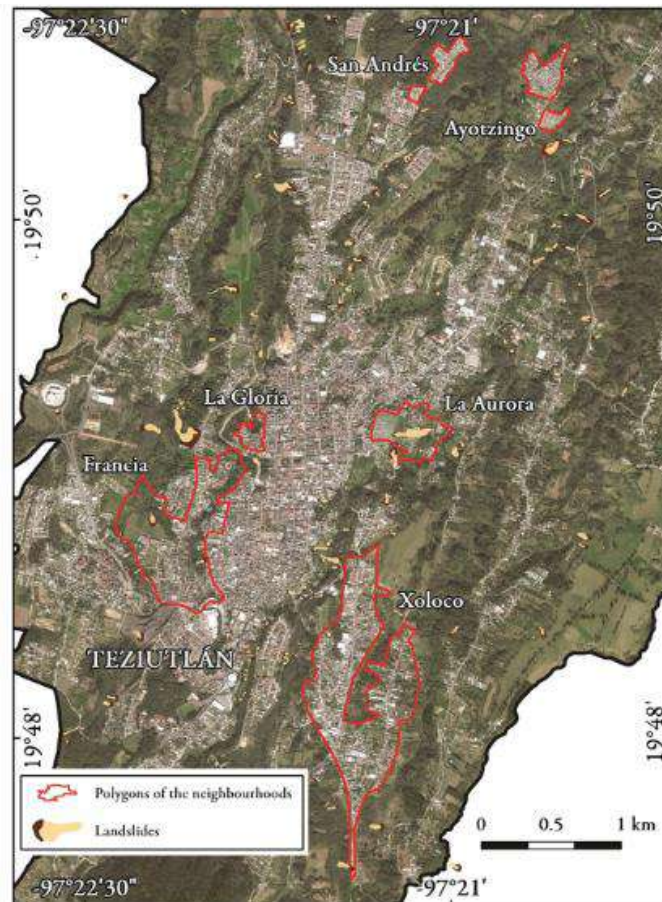


Fig. 4 Landslide inventory 1942–2015 for Teziutlán, Puebla (adapted from Murillo-García and Alcántara-Ayala 2017)

Additionally, lithologic units were included as a categorical variable. Selection of these variables was based on the experience of the researchers and statistical values such as the ROC curve and the coefficients resulted from a logistic regression and the odds ratios. Technical support vector machines were used for classifying each pixel into three different susceptibility classes. Cross-fold validation was used to select the best model performance; the ROC curve of the selected model showed a predictive value of 0.794 and a smoothed predictive surface (Murillo-García et al. 2017).

Susceptibility classes were categorised as high, medium, and low. Values of pixels were simplified to represent such classes according to the size of existing housing unit blocks of the urban area by using the majority pixel resampling method. High susceptibility values can be found on the slopes surrounding the pyroclastic ramp on which the city of Teziutlán is built. The neighbourhoods of San Andrés, La Gloria, Xoloco, and Francia are situated on highly susceptible land, whereas La Aurora lies on the contact between high and medium susceptibility since it includes a gentler slope that corresponds to the landslide depletion zone of the 1999 event. Contrastingly, Ayotzingo, the neighbourhood to which those people affected by the disaster of October 1999 were relocated, shows low susceptibility.

Class		Number of landslides	%	Total landslide area (m ²)	Mean landslide area (m ²)
Typology	Silt flow slides	2	4	810	405
	Debris flow slides	11	23	5112	464
	Silt planar slides	14	30	4992	356
	Slides (planar or rotational) or silt falls to flow slides	11	23	30,207	2746
	Silt rotational slides	1	2	226	226
	Soil silt falls	8	17	747	93
Land cover	Grasslands	9	19	6761	751
	Secondary vegetation (arable land or abandoned grasslands)	4	9	1926	4815
	Arable land	3	6	5680	1876
	Urban areas	19	40	20,635	1086
	Road cuts	11	23	3486	316
	Forest	1	2	3658	3658
Lithology	Basalt	7	14	5896	842
	Ash fall deposits	4	9	14,477	3619
	Ignimbrite	28	59	14,171	506
	Andesite	8	17	7550	943

Table 1 Basic landslide inventory statistics according to the typology proposed by Hungr et al. 2014

High susceptibility coincides with the slopes of the valleys that cross the pyroclastic ramp. There is also an association between the type of rock and high susceptibility. Areas of Xaltipan Ignimbrite are highly susceptible to landsliding. These zones deserve special attention from the authorities, with the construction of new housing or infrastructure being limited or even prohibited (Murillo-García et al. 2017).

Exposure of the population to landslides

Teziutlán is the largest of all urban areas of the municipality, in terms of both size and number of inhabitants. It has six neighbourhoods. There are 722 residential city blocks within the urban area of the city with a total population of 75,331 inhabitants (INEGI 2010). Ayotzingo and San Andrés are in the north, whereas La Gloria is in the central-western sector. In these three neighbourhoods, residential city blocks are more densely populated, showing a variation with a range of 300 to 700 inhabitants per block.

La Aurora, Francia, and Xoloco neighbourhoods, which also belong to the urban area of Teziutlán, have a medium to low population density ranging from < 100 to 500 inhabitants per block. The city has an estimated 15,681 inhabited dwellings. Among the neighbourhoods in the central and northern zone, there are more than three people per room in 6 and 9% of homes in La Aurora and Ayotzingo, respectively, but in < 3% of homes in San Andrés and La Gloria. In Francia and Xoloco in the centre-south area, there are > 3 people per room in 3 and 6% of homes correspondingly.

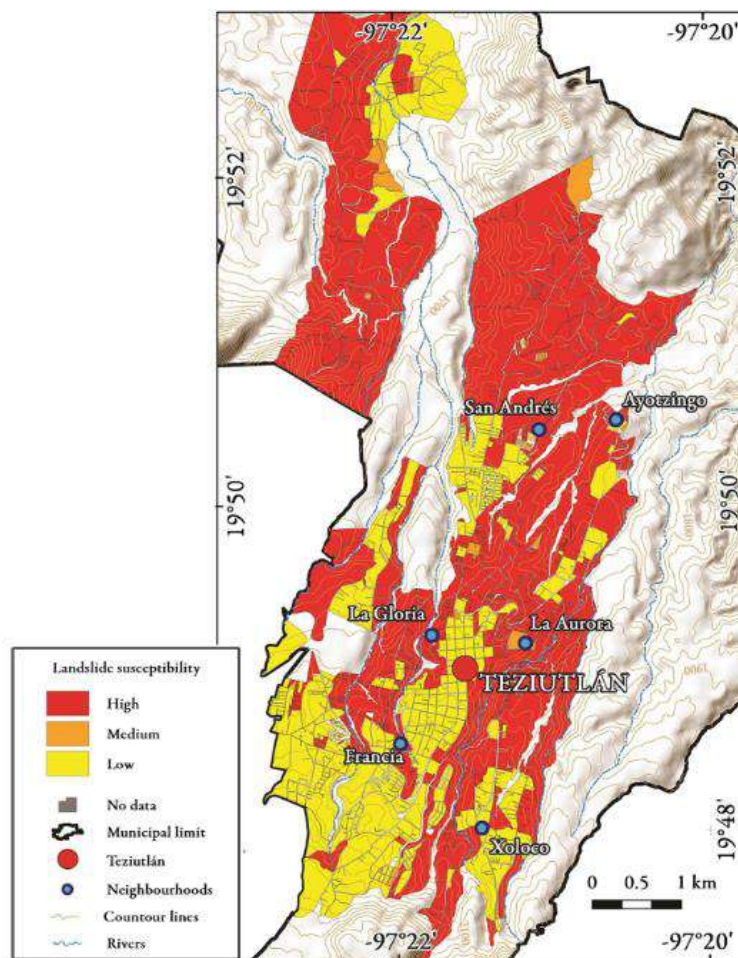


Fig. 5 Landslide susceptibility map (adapted from Alcántara-Ayala et al. 2017c and Murillo-García et al. 2017)

Of the 722 urban residential blocks within the urban area of Teziutlán, 296 are in areas of high susceptibility, 34 in medium, and 392 in low susceptibility to landslides. This means that there is a population of 39,981, 1510, and 33,840 inhabitants, respectively, in the aforementioned categories exposed to landslides. These figures correspond to values of 53, 2, and 45% of the total urban population, respectively (Fig. 6) (Alcántara-Ayala et al. 2017c). As noted above, the eruption of Caldera de Los Humeros produced the Xaltipán Ignimbrite and fall deposits that determine the spatial distribution of landslide susceptibility in the municipality. Consequently, a large percentage of the urban blocks considered to be of low susceptibility are in the centre of Teziutlán, that is, in places where the settlements were developed on more resistant materials than their surrounding areas.

Landslide risk awareness

Understanding risk perception is a precondition for implementing risk communication (Alcántara-Ayala and Moreno 2016). In an effort to analyse the spatial distribution of landslide disaster risk perception, some results of in-depth semi-structured interviews previously undertaken (Landeros-Mugica et al. 2016; Alcántara-Ayala and Moreno 2016; Hernández-Moreno and Alcántara-Ayala 2017) were used to generate maps.

The level of engagement of society to DRR expresses the sensitivity of communities towards landslide risk as a function of experience, knowledge, trust and credibility, necessities, benefits, responsibility, feelings, judgements, attitudes, faith, and so forth. A society engaged in DRR becomes a public sphere as people become involved in a matter of common concern.

In order to exemplify some aspects of landslide risk awareness, two maps have been included in this paper to show how we tried to analyse the following: people's perception in terms of identifying and prioritising a series of actions associated with DRR that would be required to ensure the safety of the inhabitants (Fig. 7) and the response of inhabitants regarding the extent to which they trusted the sources of information on how to prevent or respond to a landslide event (Fig. 8). These aspects are of major relevance for disaster risk communication, particularly in developing countries.

Predominantly, for the whole urban area, high ranks were assigned to the eleven actions associated with DRR that are deemed necessary for the inhabitants to be safe. Among them, implementing a warning system for communities at risk, promoting programmes for community preparedness, and providing health programmes for people affected by disasters were regarded as highly necessary by 77, 75, and 72% of the respondents correspondingly (Alcántara-Ayala and Moreno 2016).

In La Aurora, only 86% of the interviewees considered landslide warning systems to be highly necessary, whereas in all the other mapped neighbourhoods (Fig. 7), the percentages were higher. Likewise, in La Aurora, only 86% perceived as highly necessary a relocation of people who live in areas at risk. This indicates that for these respondents, the importance of disaster prevention measures is overshadowed by disaster response, higher priority being assigned to

the identification of shelters, and caring for the victims (both actions with 95%). Likewise, 95% of the interviewed inhabitants of Ayotzingo—a neighbourhood that was formed to house the people displaced during the disaster of 1999—also perceived response measures to have higher priority than those of prevention.

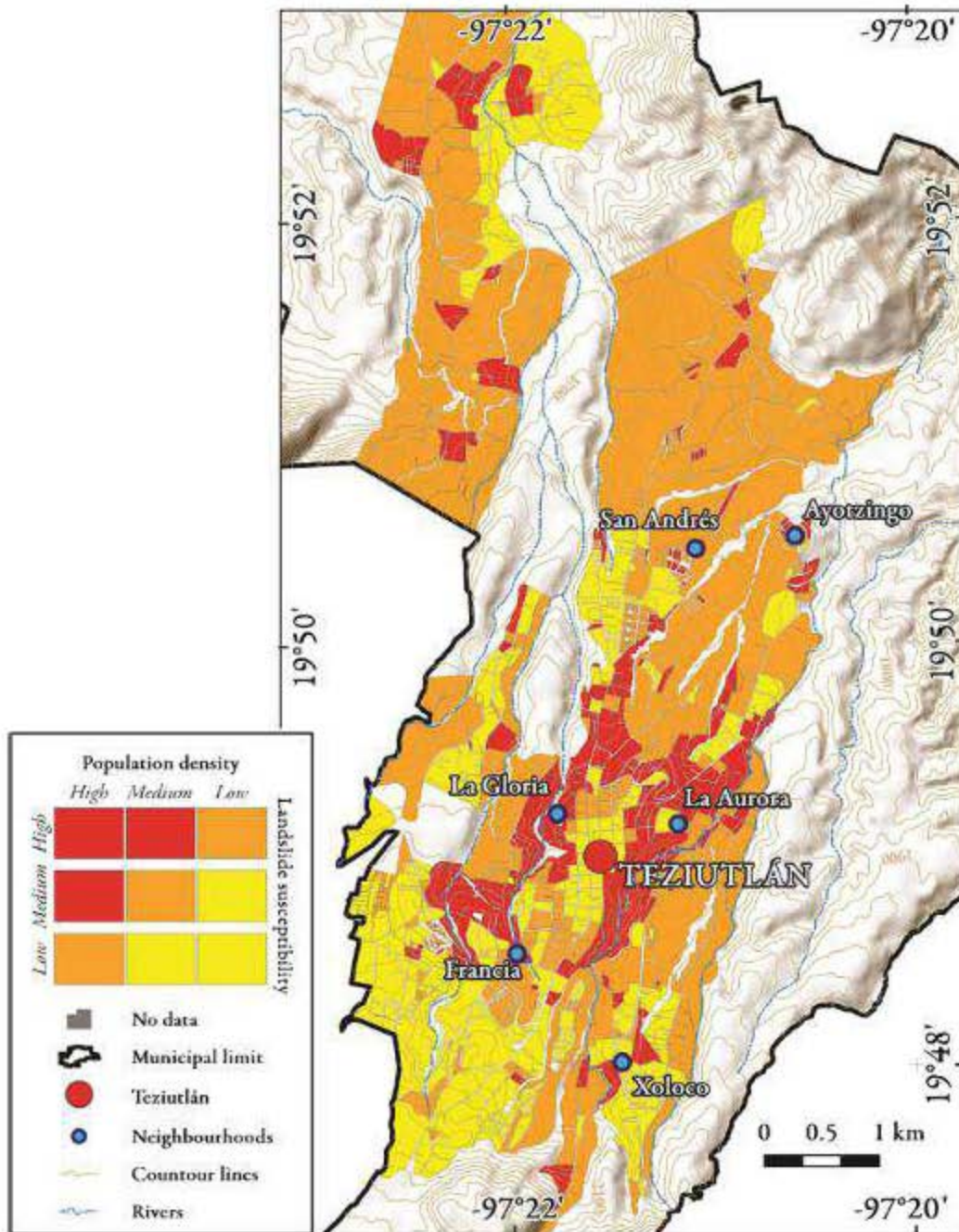


Fig. 6 Exposure of inhabitants to landslide risk as a function of population density and susceptibility of the terrain (adapted from Alcántara-Ayala et al. 2017c and MurilloGarcía et al. 2017)

Among the several sources of information to the community on how to prevent or respond to a landslide event, scientists were the most trusted (22%), followed by the Red Cross (21%) and civil protection (18%) (Alcántara-Ayala and Moreno 2016).

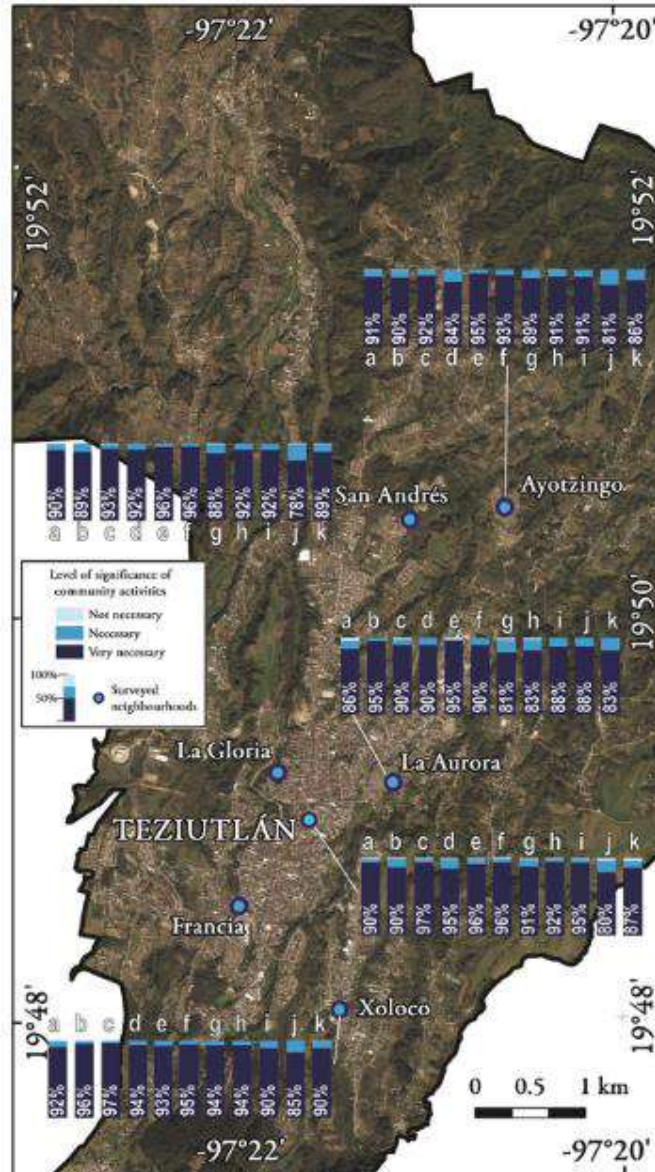


Fig. 7 Risk perception of local inhabitants to identify and prioritise 11 actions associated with DRR: (a) implementing a warning system for communities at risk; (b) promoting programmes for community preparedness; (c) providing health programmes for people affected by disasters; (d) getting people involved in landslide risk communication programmes; (e) providing information on the best practices for protecting belongings during an emergency; (f) promoting evacuation drills in areas at risk; (g) guaranteeing equality for the attention of affected people; (h) relocating people that live in areas at risk; (i) landslide instrumentation and monitoring; (j) prohibiting the construction of dwellings in areas at risk; and (k) establishment of shelters (adapted from González Sánchez et al.

2017)

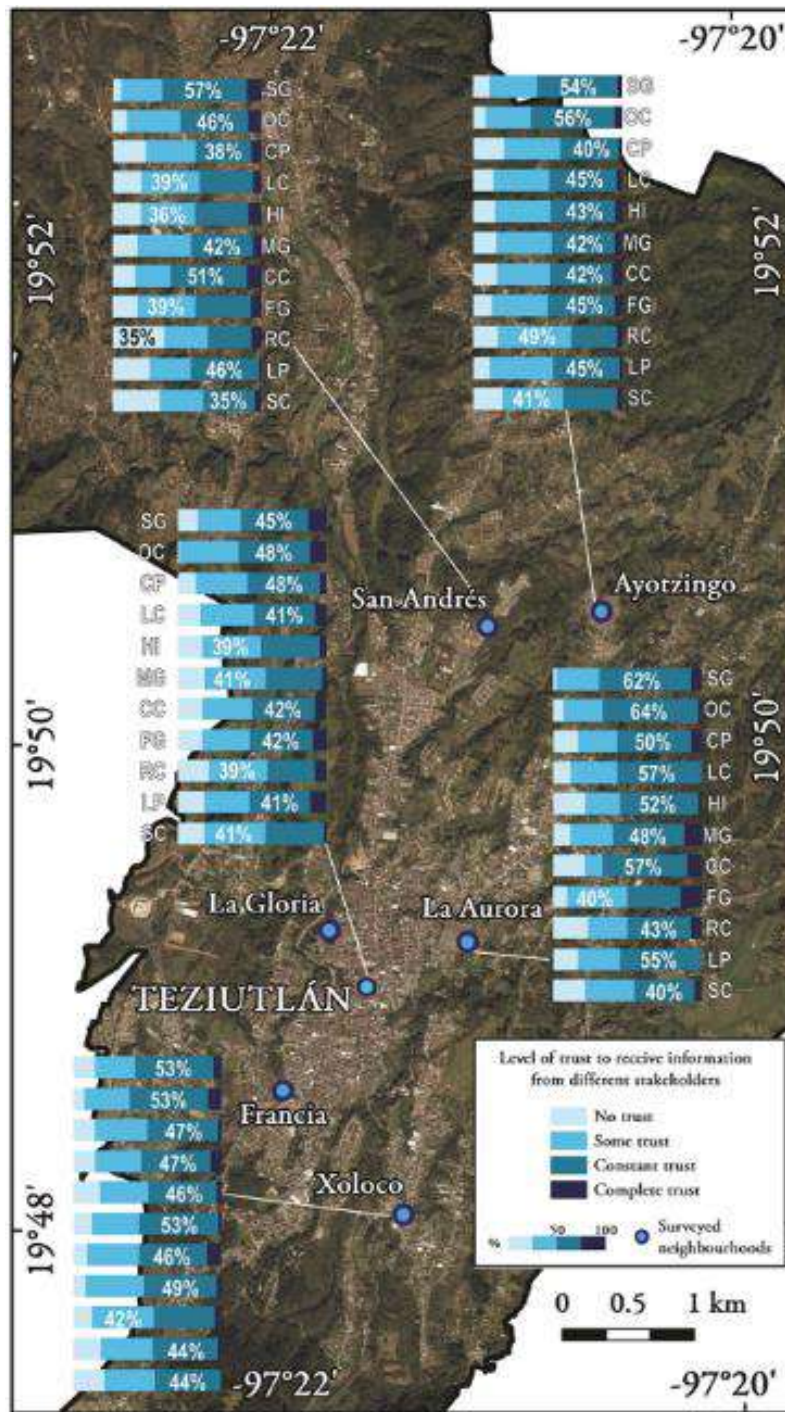


Fig. 8 Levels of trust in sources of information (identified by initials) about landslide disaster prevention and response: SG, state government; OC, people from other communities; CP, civil protection; LC, Lions Club International; HI, health institutions; MG, municipal government; CC, community chieftain or elder; FG, federal government; RC, Red Cross; LP, local police; SC, scientists (adapted from González Sánchez et al. 2017)

Discussion and concluding remarks

Public awareness in this context has been defined as the extent of common knowledge about disaster risks, the factors that lead to disasters, and the actions that can be taken individually and collectively to reduce exposure and vulnerability to hazards (UNISDR 2015b). However, quite commonly, efforts have fallen short of expectations since knowledge is mainly directed towards response and recovery; a proper understanding of disasters as a social construct is lacking, and the roles of disaster risk drivers and dissemination of information concerning exposure are frequently neglected.

According to the results presented in this work, there is a growing interest within the community of Teziutlán to engage in actions leading to DRR. However, they still do not have enough information and knowledge to prevent their prioritising response measures to the detriment of measures associated with disaster prevention.

One-way communication is certainly not appropriate, since disaster risk communication should be embedded within the public sphere, with diverse stakeholders becoming involved in a matter of common concern; schemes that are community based are required for channelling into DRR and DRM.

Community-based initiatives can naturally be linked to the concept of social capital. In the influential work of Bourdieu (1980), social capital is defined as “the sum of resources, actual and virtual, that accrue to an individual or a group by virtue of possessing a durable network or less institutionalised relationships of mutual acquaintance and recognition”. More recently, the Organisation for Economic Co-operation and Development referred to “networks together with shared norms, values and understandings that facilitate cooperation within or among groups” (Cote and Healy 2001). Disaster risk communication, therefore, should also lead to the creation of social capital. From this perspective, DRR and DRM should favour the integration of the fields of cooperation, equality, trust, credibility, reciprocity, identity, solidarity, tolerance, engagement, sense of belonging, and group membership.

There is no doubt about the urgent need to facilitate partnerships focused on landslide disaster risk awareness and the preparedness of communities at local level to understand and reduce disaster risk. Notwithstanding the significance of community-based knowledge and action, a scientific approach can also provide the necessary inputs for the people to understand the social construction of disaster risk and disasters (Oliver-Smith et al. 2016); for this, comprehension of the diverse dimensions of vulnerability and exposure, and especially disaster risk drivers, is highly relevant.

DRR and DRM require solid science-based risk communication strategies according not only to the hazard or series of hazards to which communities are exposed but also to the diverse dimensions of vulnerability. Furthermore, when communicating disaster risk, exposure becomes a key issue since it can be regarded as the location or spatial distribution of people, assets, livelihoods, and infrastructure potentially affected by the hazards.

Although such endeavour demands strategies at national and subnational level, impacts should be addressed, and therefore initiatives undertaken, at local level. Effective implementation calls for decreasing vulnerability and exposure.

Beyond contexts of vulnerability reflected by social, economic, cultural, political, and institutional conditions, it may be difficult to picture the spatial interactions of exposure of communities, assets, and the environment because the means of analysing spatial relationships between society and nature are not commonly available in mountain areas. Therefore, for people to better understand risk, maps may present a good way for the inhabitants to familiarise themselves with the spatial context of the dynamics in which they are immersed.

At neighbourhood level, there is a significant degree of heterogeneity in knowledge, experience, perception, and access to landslide disaster risk information. Consequently, communication should be a priority within DRR and DRM, because landslides are a recurrent hazard for mountain communities. Although both prevention and response are crucial aspects, the former requires a more robust strategy of communication derived from risk perception analysis; this should strengthen the understanding of risk and stress the need to avoid the inadvertent creation of new risks of landslide disaster (Alcántara-Ayala 2017). For this, community-based strategies in which social capital is considered to be fundamental will be a valuable contribution to the implementation of the ISDR-ICL Sendai Partnerships 2015–2025 for Global Promotion of Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk.

References

- Alcántara-Ayala I (2004) Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology* 61:19–40
- Alcántara-Ayala I, Moreno AR (2016) Landslide risk perception and communication for disaster risk management in mountain areas of developing countries: a Mexican foretaste. *J Mt Sci* 13(12):2079–2093
- Alcántara-Ayala I (2017) Landslide Risk Communication, In: K. Sassa et al. (eds.), *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools*, https://doi.org/10.1007/978-3-319-57777-7_47, Springer
- Alcántara-Ayala I, Sassa K, Mikoš M, Han Q, Rhyner J, Takara K, Nishikawa S, Rouhban B, Briceño S (2017a) The 4th world landslide forum: landslide research and risk reduction for advancing the culture of living with natural hazards. *Int J Disaster Risk Sci* 8:498–502. <https://doi.org/10.1007/s13753-017-0139-4>
- Alcántara-Ayala I, Garnica Peña RJ, Coll-Hurtado A, Gutiérrez de MacGregor, MT (Eds.) (2017b) *Inestabilidad de Laderas en Teziutlán, Puebla. Factores inductores del riesgo [Hillslope instability in Teziutlán, Puebla: drivers of risk]* Instituto de Geografía, UNAM, 223 pp, ISBN: 978-607-02-9136-4

Alcántara-Ayala I, Suárez-Lastra M, Garza-Merodio GG, Ruiz-Rivera N, Garnica-Peña RJ, Murillo-García FG, Salazar-Oropeza MO, Méndez-Martínez A, Delgado-Campos GJ (2017c) IV. Espacio urbano de Teziutlán (Mapas a escala 1:30,000) 4c. Factores inductores del riesgo de desastre por inestabilidad de laderas [urban areas of Teziutlán (maps at scale 1: 30,000) 4c. Disaster risk drivers associated with hillslope instability], In: Alcántara-Ayala I, Garnica-Peña RJ, Coll-Hurtado A, Gutiérrez de MacGregor MT (Eds.) (2017) *Inestabilidad de Laderas en Teziutlán, Puebla. Factores inductores del riesgo [Hillslope instability in Teziutlán, Puebla: drivers of risk]*, Instituto de Geografía, UNAM, 152–162, ISBN: 978-607-02-9136-4

Bourdieu P (1980) *Le capital social: notes provisoires*. [Social capital: interim notes] *Actes Rech. Sci Soc* 31:2–3

Cote S, Healy T (2001) *The well-being of nations. The role of human and social capital*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris

Ferriz H, Mahood G (1984) Eruption rates and compositional trends at Los Humeros volcanic center, Puebla, Mexico. *J. Geophys. Res. Earth* 89:8511–8524

González Sánchez J, Gutiérrez de MacGregor MT, Coll-Hurtado A, Garnica Peña RJ, Maldonado Martínez A, Alcántara Ayala I (2017) III. El municipio de Teziutlán (mapas a escala 1:62,000) 3b. Factores inductores de la vulnerabilidad [III. The municipality of Teziutlán (maps at 1: 62,000 scale) 3b. Drivers of vulnerability]. In: Alcántara Ayala I, Garnica Peña RJ, Coll-Hurtado A, Gutiérrez de MacGregor MT (eds) (2017) *Inestabilidad de Laderas en Teziutlán, Puebla. Factores inductores del riesgo [Hillslope instability in Teziutlán, Puebla: drivers of risk]*. UNAM, Instituto de Geografía, p 223

Guzzetti F, Mondini AC, Cardinali M, Fiorucci F, Santangelo M, Chang KT (2012) Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth-Sci Rev* 112:42–66

Hernández-Moreno G, Alcántara-Ayala I (2017) Landslide risk perception in Mexico: a research gate into public awareness and knowledge. *Landslides* 14(1):351–371

Hungr O, Leroueil S, Picarelli L (2014) The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11:167–194

INEGI (2010) *Censo de Población y Vivienda [Population and Housing Census]*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México

INEGI (2015) *INEGI. Encuesta Intercensal 2015 [Inter-census survey]*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México

Landeros-Mugica K, Urbina-Soria J, Alcántara-Ayala I (2016) The good, the bad and the ugly: on the interactions among experience, exposure and commitment with reference to landslide risk perception in México. *Nat Hazards* 80:1515–1537

Murillo-García FG, Alcántara-Ayala I, Ardizzone F, Cardinali M, Fiorucci F, Guzzetti F (2015) Satellite stereoscopic pair images of very high resolution: a step forward for the development of landslide inventories. *Landslides* 12(2):277–291. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0473-1>

Murillo-García FG, Alcántara-Ayala I (2017) Landslide inventory map of the municipality of Teziutlán, Puebla, México (1942-2015). *Journal of Maps* 13(2):767-776

Murillo-García FG, Garnica-Peña RJ, Alcántara-Ayala I, Ruiz-Cortés NS (2017) V. El municipio de Teziutlán (mapas a escala 1:62,000) 5a. Factores condicionantes de la susceptibilidad a PRM. [the municipality of Teziutlán (maps at 1: 62,000 scale) 5a. Factors determining landslide susceptibility] in: Alcántara Ayala I, Garnica Peña RJ, Coll-Hurtado a, Gutiérrez de MacGregor MT (Eds.) (2017) *Inestabilidad de Laderas en Teziutlán, Puebla. Factores inductores del riesgo* [hillslope instability in Teziutlán, Puebla: drivers of risk] Instituto de Geografía, UNAM, 164-170, ISBN: 978-607-0291364

Oliver-Smith A, Alcántara-Ayala I, Burton I, Lavell A (2016) *Forensic Investigations of Disasters (FORIN): a conceptual framework and guide to research* (IRDR FORIN Publication No. 2). Beijing: Integrated Research on Disaster Risk, ICSU, 56 pp.

Salinas-Rodríguez JM, Castillo-Reynoso JE (2011) *Carta Geológica Minera. Teziutlán E14B15 Puebla* [Geological map of mines. Teziutlán E14B15 Puebla]. Servicio Geológico Mexicano

Sassa K (2004a) The international consortium on landslides. *Landslides* 1(1):91-94

Sassa K (2004b) The international programme on landslides. *Landslides* 1(2):95-99

Sassa K (2015) ISDR-ICL Sendai partnerships 2015-2025 for global promotion of understanding and reducing disaster risk. *Landslides* 12(4):631-640

Sassa K (2017a) Progress of ISDR-ICL Sendai partnerships 2015-2025 for global promotion of understanding and reducing landslide disaster risk. *Landslides* 14:783-788

Sassa K (2017b) The ISDR-ICL Sendai partnerships 2015-2025: background and content. In: Sassa K, Mikoš M, Yin Y (eds) *Advancing culture of living with landslides*. WLF. Springer, Cham, p 2017

UNISDR (2015a) *Sendai framework for disaster risk reduction 2015-2030*. UNISDR, Geneva

UNISDR (2015b) *Proposed updated terminology on disaster risk reduction: a technical review*: http://www.preventionweb.net/files/45462_backgroundpaperonterminologyaugust20.pdf

CAPÍTULO VII: Percepción y comunicación del riesgo de desastre

Irasema Alcántara-Ayala
Instituto de Geografía, UNAM
Ricardo J. Garnica-Peña
Posgrado en Geografía, UNAM
Javier Urbina-Soria
Facultad de Psicología, UNAM
Ana Rosa Moreno
Facultad de Medicina, UNAM
Karina Landeros-Mugica
Facultad de Psicología, UNAM

En esta sección se presentan doce mapas, en los cuales se trata de plasmar algunos elementos de la percepción del riesgo de los habitantes de Teziutlán. Sin embargo, los valores que se consideran corresponden únicamente a las casas encuestadas, y aunque pueden ser representativos de las colonias, es importante sólo considerarlos como referente.

Los aspectos que se abordan se centran en el tipo de experiencia que han tenido los habitantes con la ocurrencia de deslizamientos (directa o indirecta), así como elementos relativos a la sensibilización y conocimiento (causas y grado de exposición), a la concientización, acciones comunitarias) y a la comunicación del riesgo (medios de información, grado de confianza).

Con la finalidad de tener un marco de referencia, en todos los mapas se incluye un triángulo (Δ) que identifica la localización de cada una de las viviendas en las que se realizaron las entrevistas, y cuyo color corresponde al grado de susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con el mapa 3b de la Sección III (muy baja-verde, baja-amarillo, media-naranja, alta-rojo, muy alta-rojo intenso). Dicho triángulo está rodeado por un círculo, que también corresponde a la localización de la vivienda, y cuyo color representa los diferentes elementos de la percepción del riesgo de las personas encuestadas señalados en la leyenda de cada mapa.

Susceptibilidad

De acuerdo con el mapa III 3b, en el centro de Teziutlán, el 61% de las casas encuestadas se encuentran en zona de muy baja susceptibilidad a procesos de remoción en masa, mientras que el 17% y el 15% se encuentran en zonas de baja, y media susceptibilidad respectivamente,

y tan solo el 6% y 2% de las viviendas se encuentra en zona de alta y muy alta susceptibilidad. De manera contrastante, el 85% y el 84% de las viviendas donde se aplicaron las entrevistas en las colonias Juárez-Ávila Camacho y Aire Libre, respectivamente, están ubicadas en áreas de alta y muy alta susceptibilidad a los deslizamientos. En el caso de La Aurora, el 74% de las viviendas encuestadas se encuentran situadas también en zonas de alta y muy alta susceptibilidad. En San Andrés, casi la mitad de las casas están en zonas de susceptibilidad media (49%), mientras prácticamente una de cada tres se encuentra en área de alta susceptibilidad. En Ayotzingo, el 42% se sitúan en alta y muy alta susceptibilidad, mientras que en Xoloco en estos mismos niveles se ubica el 23% de las viviendas (Tabla 1).

Experiencia

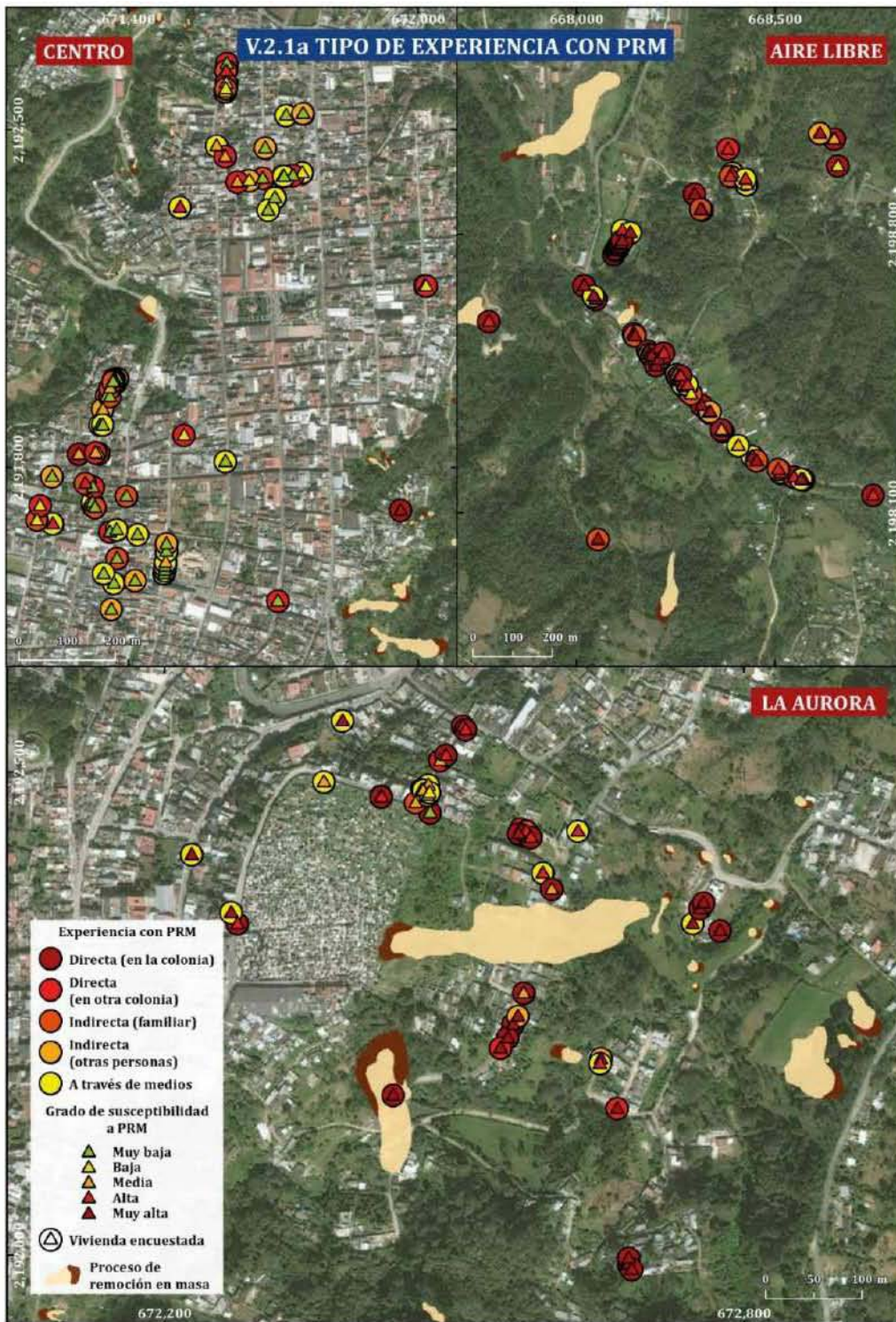
En el centro de Teziutlán, solamente el 3% de los entrevistados indicó que había tenido experiencia directa con deslizamientos en su colonia, mientras que el 20% y el 21% señalaron que su experiencia había sido en otra colonia o bien a través de algún familiar o amigo. El restante 56% de los entrevistados manifestaron que su experiencia era de tipo indirecto ya que sabían de los problemas relacionados con la ocurrencia de deslizamientos por información recibida de otras personas (23%) o bien, a través de los medios de comunicación (33%). En el caso de Ayotzingo, prácticamente uno de cada dos entrevistados (52%) indicó que había tenido experiencia con la ocurrencia de deslizamientos en otra colonia, es decir, en su colonia de origen de la cual tuvieron que ser desplazados a consecuencia del desastre de 1999. En Aire Libre, La Aurora y Juárez-Ávila Camacho, también se puede decir que de manera general uno de cada dos entrevistados (44%, 50%, 47% respectivamente) tuvo experiencia directa con la ocurrencia de deslizamientos, aunque ellos no han sido reubicados. En el caso de San Andrés sólo uno de cada cinco entrevistados señaló haber tenido experiencia con deslizamientos en la misma colonia (20%), mientras que en Xoloco el mayor porcentaje de los entrevistados indicó haber tenido experiencia indirecta únicamente a través de los medios de comunicación (40%) (ver mapas V.2.1a, V.2.1b, y Tabla 2).

Sensibilización y conocimiento

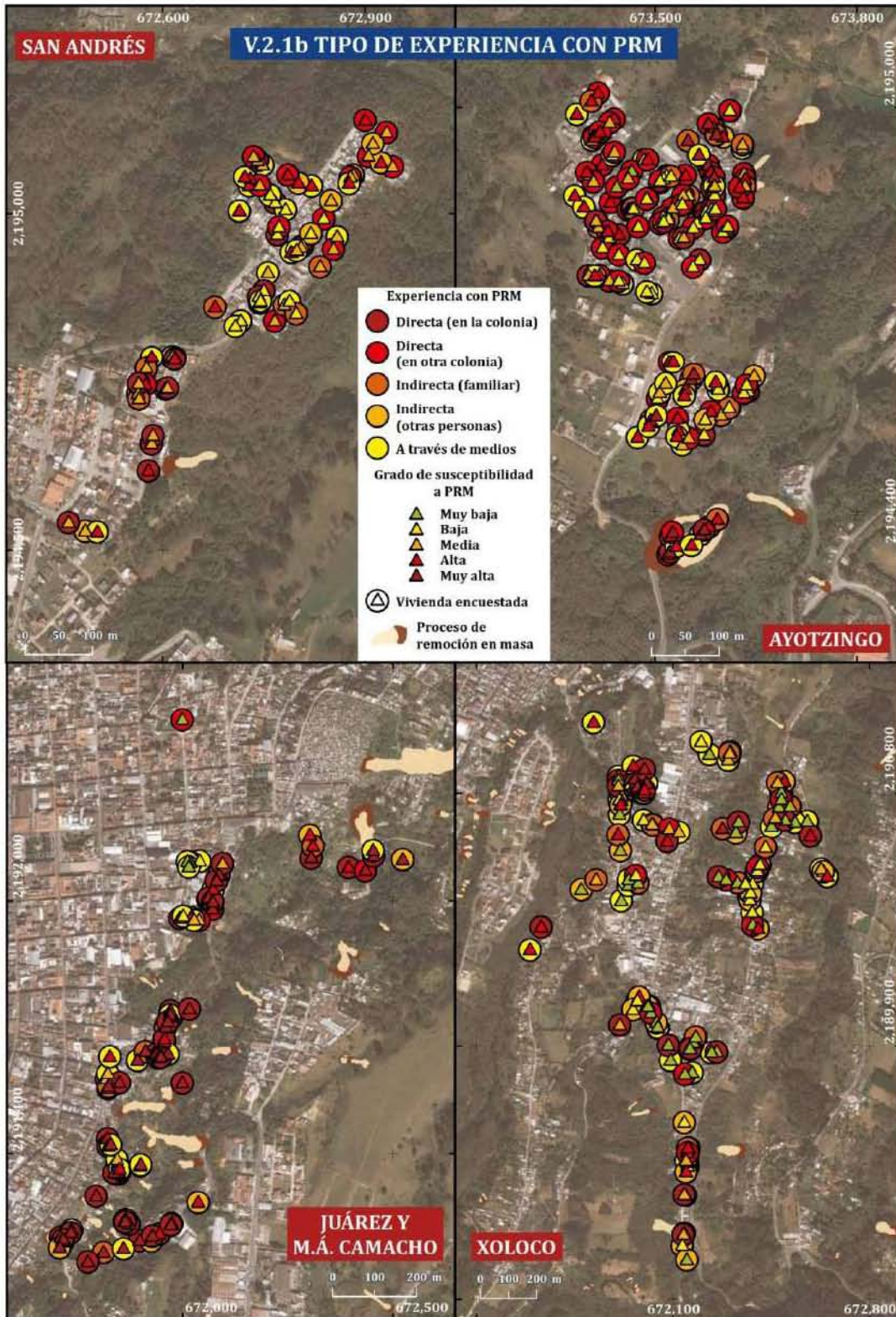
Causas de la inestabilidad

Existen diferentes factores que contribuyen a la ocurrencia de deslizamientos; éstos son percibidos de manera distinta por los habitantes de Teziutlán. Sin embargo, el mayor porcentaje de entrevistados en cada una de las colonias percibe que los temblores son la causa principal de la inestabilidad de laderas, y la construcción en laderas la segunda más importante. Uno de los factores condicionantes más relevantes de la inestabilidad en Teziutlán es la presencia de materiales volcánicos de poca resistencia (Ignimbrita Xaltipán y depósitos de caída). No obstante, para gran parte de los entrevistados la presencia de suelo blando no es indicativo de una causa significativa. En relación a las causas relacionadas con las actividades antrópicas cabe destacar que solamente en las entrevistas aplicadas en la zona

del centro de Teziutlán se registró como importante la presencia de canales y drenajes de agua, aunque esto fue en una mínima proporción (2%) (mapas V.2.2a V.2.2b).



Mapa 2.1a



Mapa 2.1b

Colonias o Barrios	Susceptibilidad muy baja (%)	Susceptibilidad baja (%)	Susceptibilidad media (%)	Susceptibilidad alta (%)	Susceptibilidad muy alta (%)
Centro	61	17	15	6	1
Aire Libre	0	4	12	28	56
La Aurora	2	2	22	29	45
San Andrés	0	22	49	29	0
Ayotzingo	2	37	19	32	10
Juárez-Ávila Camacho	5	2	8	23	62
Xoloco	41	18	18	17	6

Tabla 1. Grado de susceptibilidad a deslizamientos de las viviendas encuestadas.

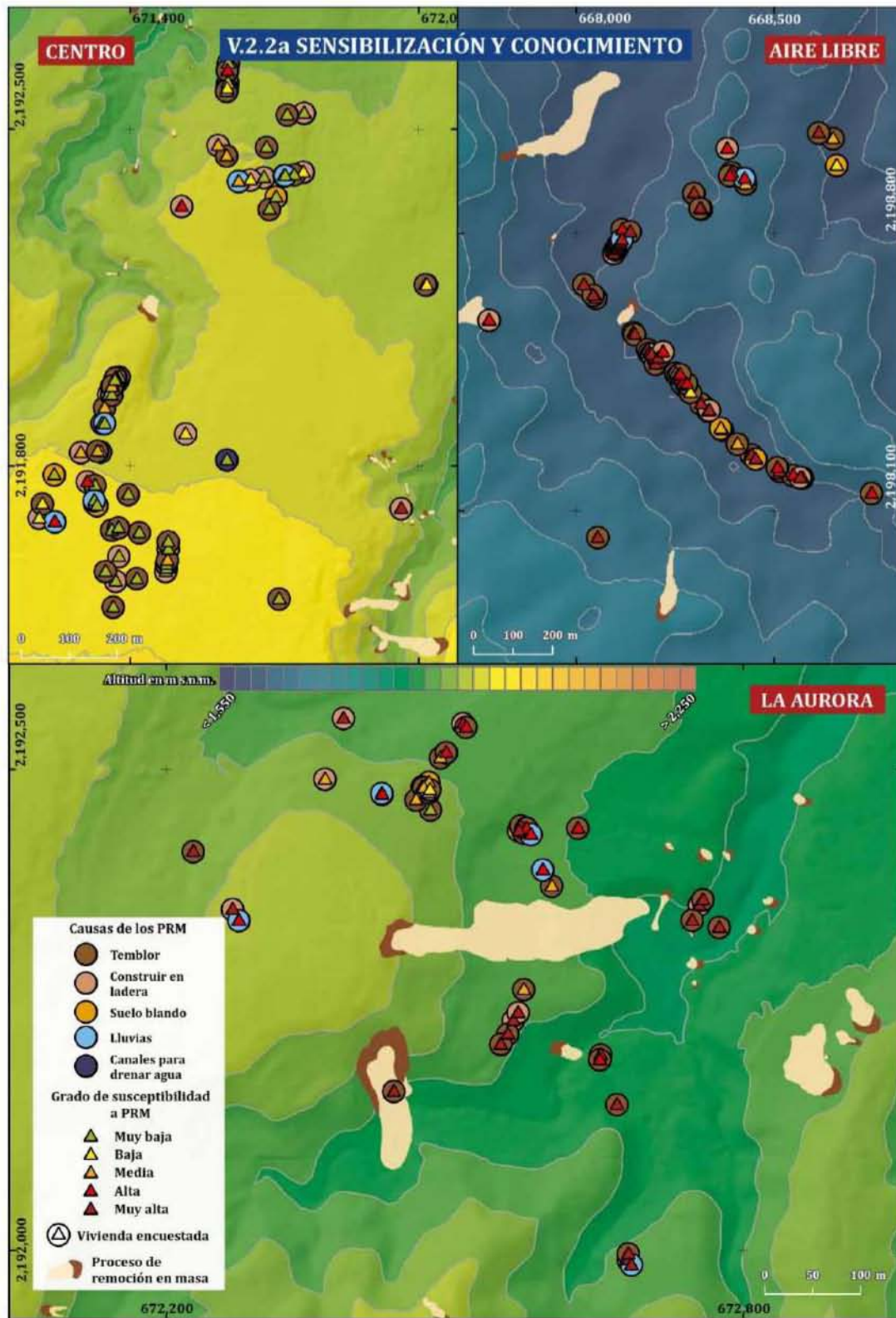
Colonias o Barrios	Misma colonia (%)	Otra colonia (%)	Familiar (%)	Otras personas (%)	Medios de comunicación (%)
Centro	3	20	21	23	33
Aire Libre	44	3	16	5	32
La Aurora	50	9	5	5	31
San Andrés	20	24	8	11	37
Ayotzingo	8	52	13	3	24
Juárez-Ávila Camacho	47	8	11	10	24
Xoloco	14	9	12	25	40

Tabla 2. Tipo de experiencia con la ocurrencia de deslizamientos reportada en las viviendas encuestadas.

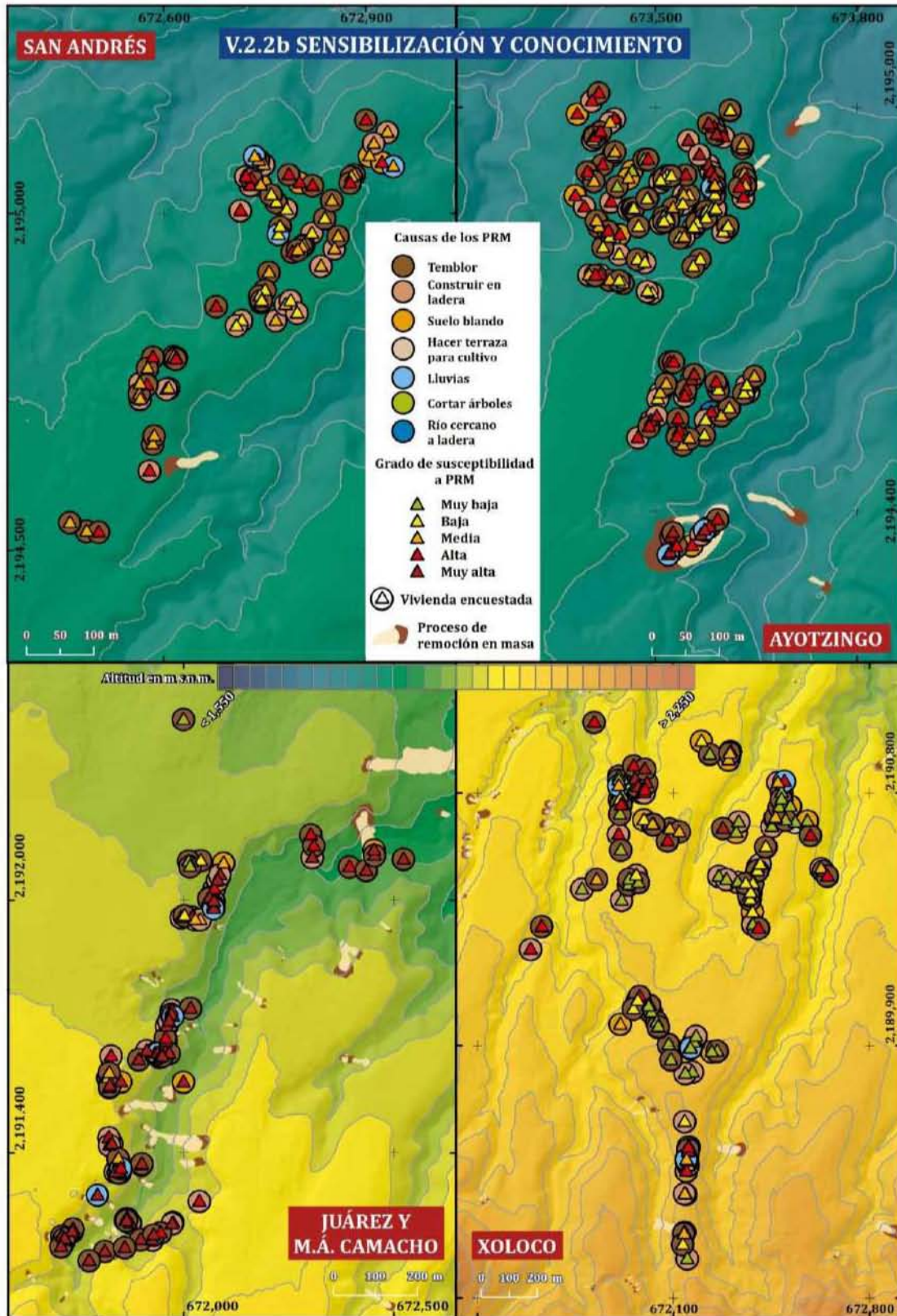
Llama la atención asimismo y de manera preocupante, la falsa impresión que tienen los habitantes de que las zonas con muchos árboles son potencialmente inestables. Los porcentajes de población que tienen esta percepción fueron de 31% en San Andrés, 35% en el centro, 46% en Aire Libre, 51% en Ayotzingo, 54% en Xoloco, 55% en La Aurora, y 59% en La Juárez-Ávila Camacho.

Exposición de las viviendas

Es interesante notar que para un porcentaje muy alto de los entrevistados en todas las colonias las casas ubicadas en el centro de Teziutlán son percibidas como de poco y muy poco riesgo. De manera complementaria, en todas las colonias se registraron altos valores en cuanto al grado de exposición a la inestabilidad de laderas de las viviendas construidas al pie, en la orilla, y en la parte alta de las laderas (ver Tabla 3).



Mapa 2.2a



Mapa 2.2b

Colonias o Barrios		Centro (%)	Aire Libre (%)	La Aurora (%)	San Andrés (%)	Ayotzingo (%)	Juárez-Ávila Camacho (%)	Xoloco (%)
Casas ubicadas en el centro	Muy poco riesgo	37.87	17.54	26.19	36.11	25.00	36.26	27.96
	Poco riesgo	43.93	43.85	50.00	43.04	49.30	48.35	47.45
Causas de la ocurrencia de deslizamientos	Temblores	46.96	63.15	64.28	55.55	54.86	51.64	50.84
	Construir en ladera	33.33	21.05	16.66	30.55	32.63	26.37	30.50
	Suelo blando	10.60	8.77	7.14	8.33	7.63	12.08	14.40
	Construcción de terrazas para cultivo	N/A	N/A	N/A	1.38	2.08	N/A	0.84
	Lluvias fuertes	7.57	5.26	11.90	4.16	2.08	N/A	3.38
	Río cercano a la ladera	N/A	1.75	N/A	N/A	0.69	1.069	N/A
	Canales para drenar agua	1.51	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cortar árboles	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	3.29	N/A	
Exposición de las viviendas construidas:	Al pie	74.24	63.15	59.52	52.77	76.38	76.92	71.18
	En la orilla	81.81	64.91	71.42	66.66	74.30	75.82	77.96
	En la parte alta	75.75	50.87	73.80	47.22	65.97	63.73	70.33

Tabla 3. Percepción del riesgo en relación con las causas de la inestabilidad de laderas y la exposición de las viviendas en cuanto a su ubicación.

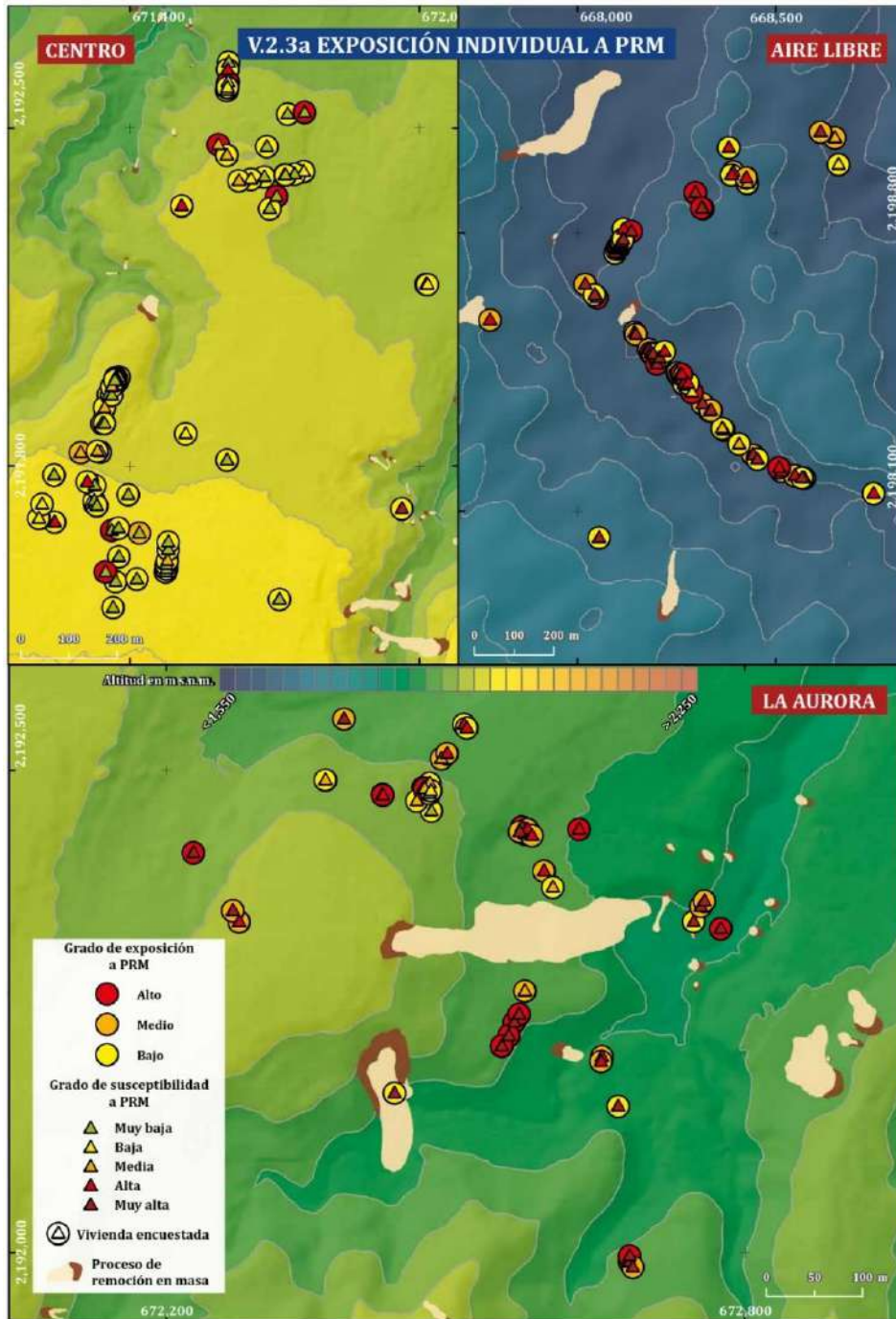
Exposición de la sociedad

Para quienes se dedican al estudio de los riesgos y desastres, así como a la protección civil, suele ser familiar el concepto de optimismo irrealista, que se refiere a que ante una situación de peligro las personas consideran que ellos estarán a salvo. A este fenómeno se le conoce también como el mito de la invulnerabilidad personal, pues a pesar de que la gente espera que ante una circunstancia de riesgo se tengan pérdidas humanas y de bienes, tienden a creer que dichos daños los sufrirán otras personas, no ellas.

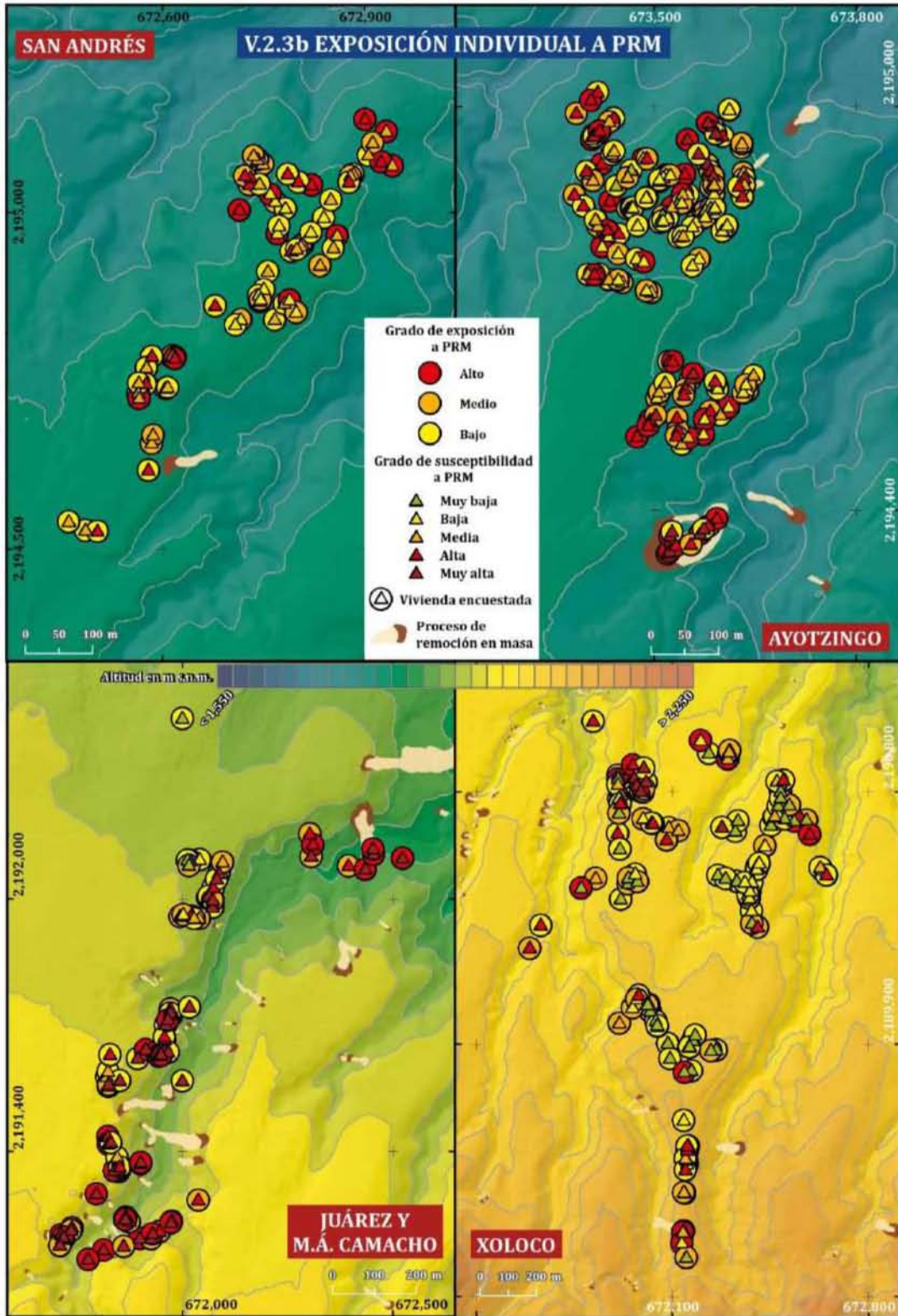
En el cuestionario que se aplicó a 590 habitantes de siete colonias de Teziutlán (ver sección III 3d), se incluyó una pregunta en la que se les pidió que evaluaran el riesgo personal de sufrir daños por deslizamiento, deslave o derrumbe (mapas V.2.3a y V.2.3b) en una escala de (1) baja exposición, (2) media exposición, y (3) alta exposición. También se les solicitó que hicieran lo mismo respecto de su familia (mapas V.2.4a y V.2.4b), y las personas que viven en su colonia (mapas V.2.5a y V.2.5b). En la Tabla 4 se presentan los resultados de dicha pregunta. Se aprecia claramente que el fenómeno de optimismo irreal se dio en todas las colonias, aunque se presentan también algunas diferencias. Las colonias en las que se percibe mayor exposición para sí mismos son La Aurora y Juárez-Ávila Camacho, que son las que más daños sufrieron en el desastre de 1999 y que presentan una alta susceptibilidad a deslizamientos. En sentido opuesto, la colonia Centro es la que indica una menor percepción de riesgo o exposición, lo cual es lógico pues se trata de una zona en la que la susceptibilidad es baja. Las otras colonias, San Andrés, Aire Libre, Xoloco y Ayotzingo presentan situaciones intermedias.

Otro resultado interesante es que, en todas las colonias, la percepción de riesgo o exposición personal es menor a la percepción de exposición para los vecinos de la misma colonia. Es decir, a pesar de que se habita en condiciones geográficas y de susceptibilidad similares, los otros, son más susceptibles de sufrir daño. La misma situación se da cuando se compara la exposición personal con el riesgo atribuido a quienes viven en otras colonias, pues en todos los casos, incluyendo colonias de gran susceptibilidad como La Aurora y Juárez, se asigna un

riesgo mayor a quienes residen en sitios geográficamente alejados. Aunque se esperaba esta tendencia, es sorprendente la claridad con la que las personas encuestadas establecen una diferencia entre ellos y sus allegados (familia) y quienes viven geográficamente más alejados y no se tiene con ellos una relación afectiva, asignando a estos últimos grupos un nivel de riesgo o exposición mucho mayor al que perciben para sí mismos (ver Tabla 4).



Mapa 2.3a



Mapa 2.3b

Colonias o Barrios	Exposición individual (%)			Exposición familiar (%)			Exposición de la colonia (%)			Exposición de otras colonias (%)		
	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
Centro	83.33	6.06	10.60	74.24	24.24	1.51	71.21	19.69	9.09	25.75	53.03	21.21
Aire Libre	47.36	35.08	17.54	43.85	40.35	15.78	36.84	47.36	15.78	36.84	47.36	15.78
La Aurora	33.33	35.71	30.95	28.57	45.23	26.19	19.04	50.00	30.95	23.80	45.23	30.95
San Andrés	56.93	25	18.05	59.72	31.94	8.33	31.94	48.61	19.44	22.22	58.33	19.44
Ayotzingo	45.83	29.16	25.00	47.22	36.80	15.79	36.11	42.36	21.52	21.52	56.25	22.22
Juárez-Ávila Camacho	35.16	27.47	37.36	35.16	27.47	51.51	20.87	35.16	43.95	10.98	54.94	34.06
Xoloco	58.46	28.81	12.71	55.08	34.74	10.16	39.83	47.45	12.71	17.79	65.25	16.94

Tabla 4. Percepción del riesgo en relación con las causas de la inestabilidad de laderas y la exposición de las viviendas en cuanto a su ubicación.

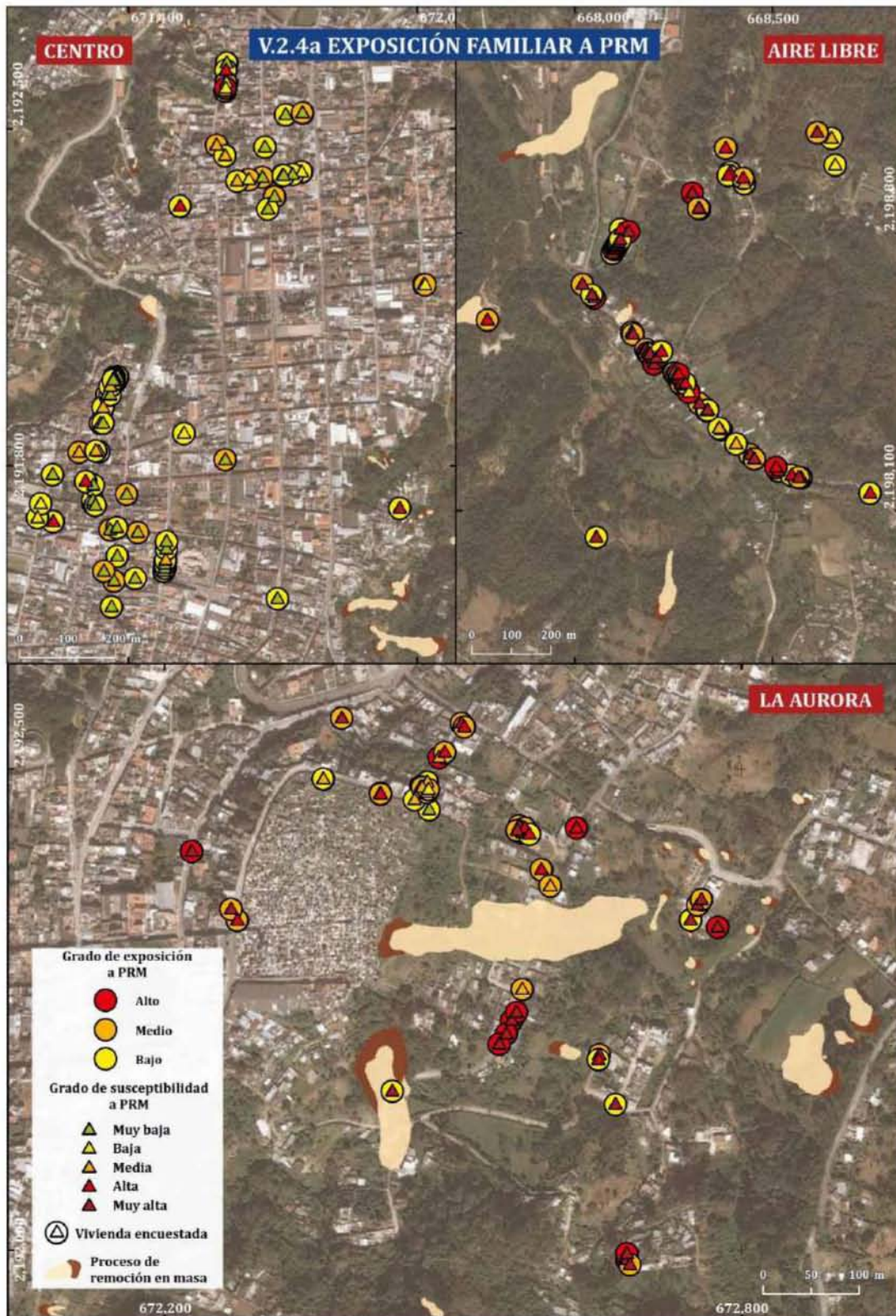
Con estos datos se confirma plenamente el mito de la invulnerabilidad personal, referente a que, si bien una persona se sabe en cierto nivel de riesgo, por un proceso de optimismo irrealista y no fundamentado, considera que otras personas, geográfica y afectivamente alejadas, están en una situación de mayor riesgo. Las implicaciones de esta forma de ver las circunstancias ambientales debieran llevar a la reflexión, por parte de quienes están a cargo de los aspectos preventivos en la reducción de desastres, para que se atiendan debidamente y se brinde mayor atención a los aspectos de percepción y comunicación de riesgos dentro de los esquemas de prevención de desastres y en las políticas públicas enfocadas a la reducción de los mismos.

Concientización

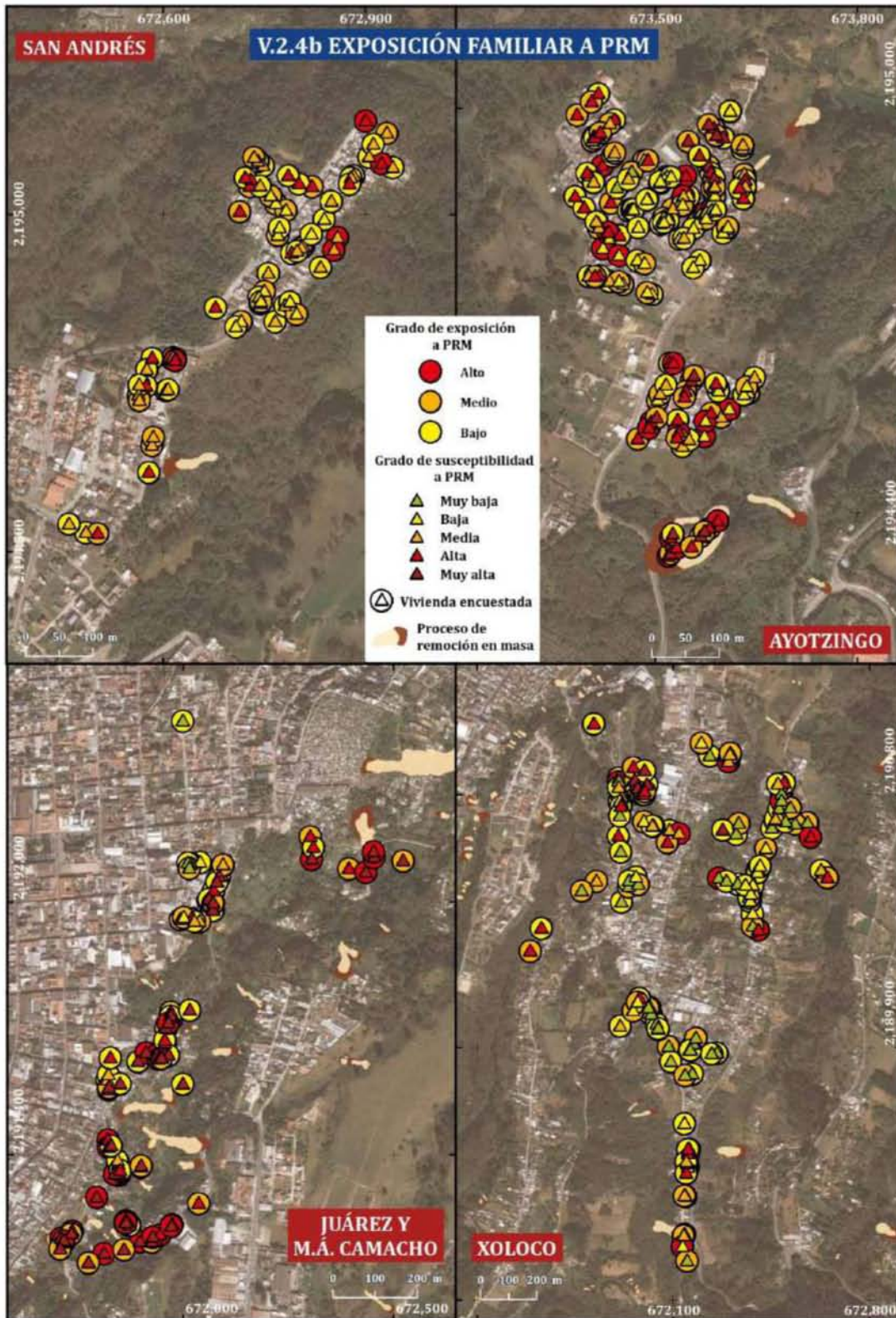
Acciones comunitarias

En las entrevistas se incluyeron preguntas relacionadas a las diferentes actividades o acciones que deben desarrollar los habitantes de Teziutlán para disminuir el riesgo de desastre por inestabilidad de laderas. Una de las preguntas más importantes fue acerca de la percepción de los pobladores en cuanto a la necesidad de que se prohibieran las construcciones en zonas de riesgo (mapas V.2.6a y V.2.6b). En todas las colonias los valores positivos en cuanto a que es muy necesario realizar ese tipo de restricciones fueron mayores al 80%. En Aire Libre fue del 81% de los encuestados, seguido de La Aurora con 83%, Ayotzingo (91%), San Andrés (92%), Juárez-Ávila Camacho (93%), Xoloco (94%), y el Centro (96%).

De manera adicional, como se señaló en la sección III 3d, la mayor parte de la población (Aire Libre-93%; La Aurora-95%; San Andrés-96%; Ayotzingo-97%; Xoloco y el centro de Teziutlán-98%; Juárez-Ávila Camacho-100%) tiene deseos de llevar a cabo diferentes actividades que les ayuden a reducir su vulnerabilidad ante la ocurrencia de posibles deslizamientos, entre las cuales destaca la implementación de un sistema de alerta temprana.



Mapa 2.4a



Mapa 2.4b

Comunicación del riesgo

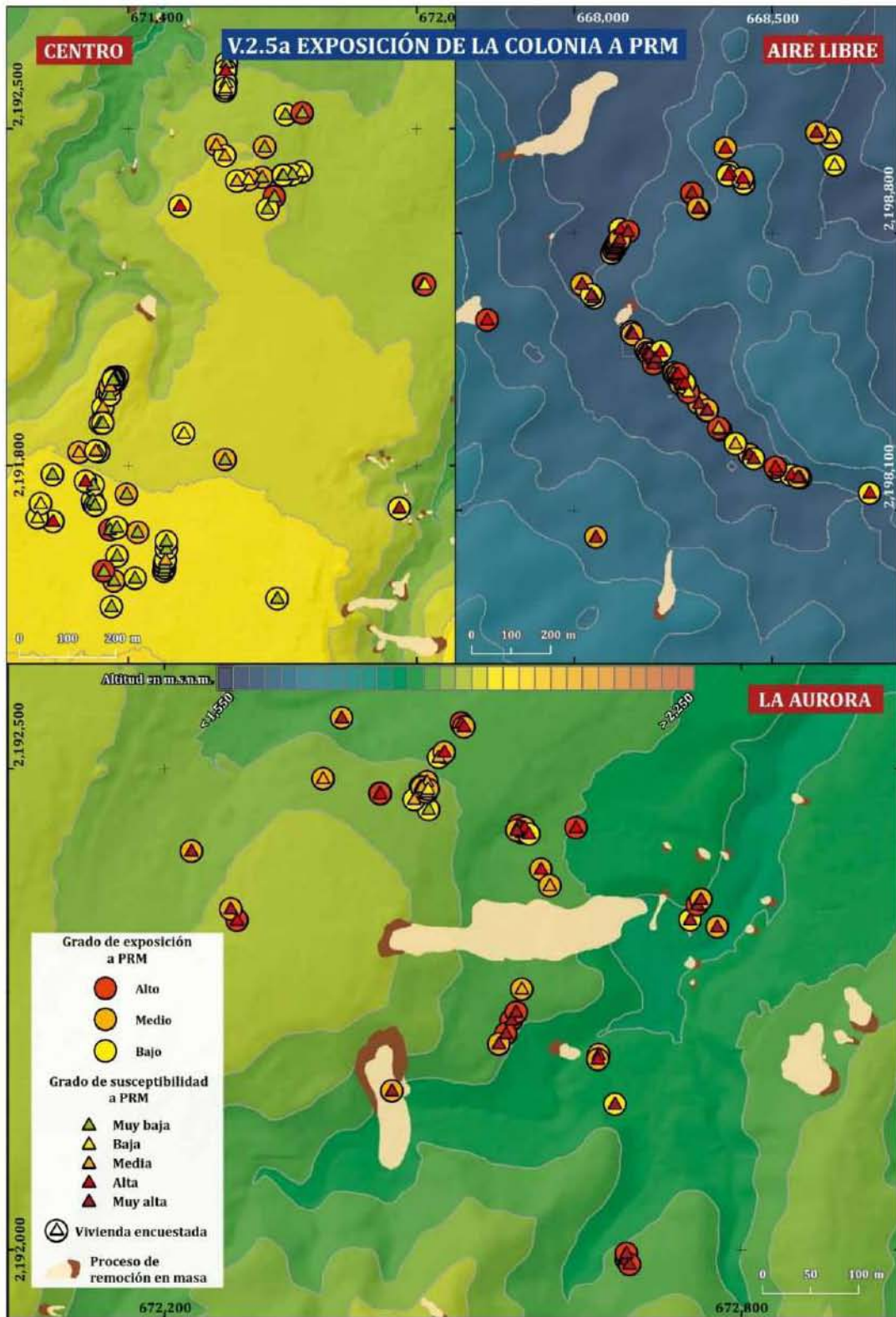
Es necesario que las autoridades municipales establezcan un programa de comunicación de riesgos de desastre por deslizamientos con base en los requerimientos y características de cada colonia. Para el desarrollo de estrategias específicas se podrían tomar en cuenta aspectos tales como el género, los grupos de edad, el grado de confianza y otros de los elementos considerados en el análisis de percepción (ver Sección III 3d). En las Tablas 5, 6 y 7 se incluye información acerca de los medios de comunicación a través de los cuales la población ha recibido información relacionada con la inestabilidad de laderas (Tabla 5), así como de los medios preferidos para seguir recibiendo este tipo de información (Tabla 6), y la confianza que tienen los pobladores de recibir información de diferentes actores sociales (Tabla 7).

Medios por los que ha recibido información*		Radio	TV	Pláticas	Libros de texto (escolares)	Folletos	Internet
Centro	Mujeres (%)	48	20	14	7	7	6
	Hombres (%)	36	27	6	9	9	9
Aire Libre	Mujeres (%)	43	17	9	9	17	-
	Hombres (%)	36	9	18	9	14	6
La Aurora	Mujeres (%)	42	17	4	-	17	4
	Hombres (%)	44	33	5	-	11	-
San Andrés	Mujeres (%)	24	26	8	-	4	3
	Hombres (%)	16	17	3	-	3	2
Ayotzingo	Mujeres (%)	47	17	13	5	14	3
	Hombres (%)	42	16	9	7	16	9
Juárez-Ávila Camacho	Mujeres (%)	34	37	12	-	7	4
	Hombres (%)	14	14	5	-	2	5
Xoloco	Mujeres (%)	39	14	18	8	15	5
	Hombres (%)	50	14	14	2	16	5

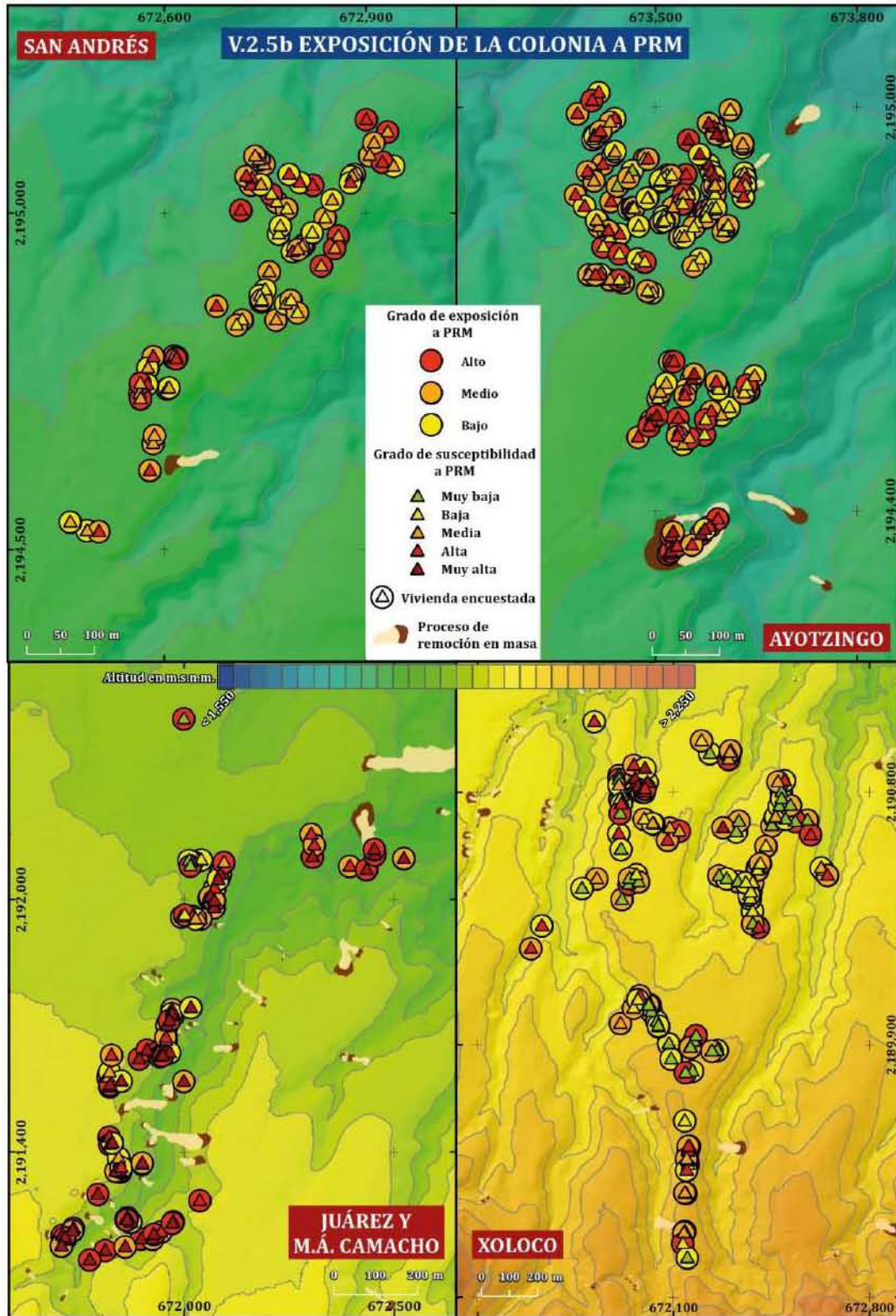
Tabla 5. Medios a través de los cuales la población entrevistada ha recibido información relacionada con la ocurrencia de deslizamientos (*Puede haber más de una respuesta por lo que la suma de todos los tipos de información no es 100%).

Medios por los que le gustaría recibir información*		Radio	TV	Pláticas	Libros de texto (escolares)	Folletos	Internet
Centro	Mujeres (%)	34	11	14	9	9	7
	Hombres (%)	23	9	23	6	27	9
Aire Libre	Mujeres (%)	20	26	14	3	6	-
	Hombres (%)	23	23	14	9	18	18
La Aurora	Mujeres (%)	13	42	4	8	13	13
	Hombres (%)	11	28	22	-	6	17
San Andrés	Mujeres (%)	29	22	19	-	13	11
	Hombres (%)	20	10	11	-	12	6
Ayotzingo	Mujeres (%)	37	15	14	2	13	8
	Hombres (%)	13	11	16	7	24	9
Juárez-Ávila Camacho	Mujeres (%)	38	35	28	-	8	19
	Hombres (%)	15	11	10	-	28	12
Xoloco	Mujeres (%)	18	11	22	8	16	4
	Hombres (%)	23	16	23	-	16	11

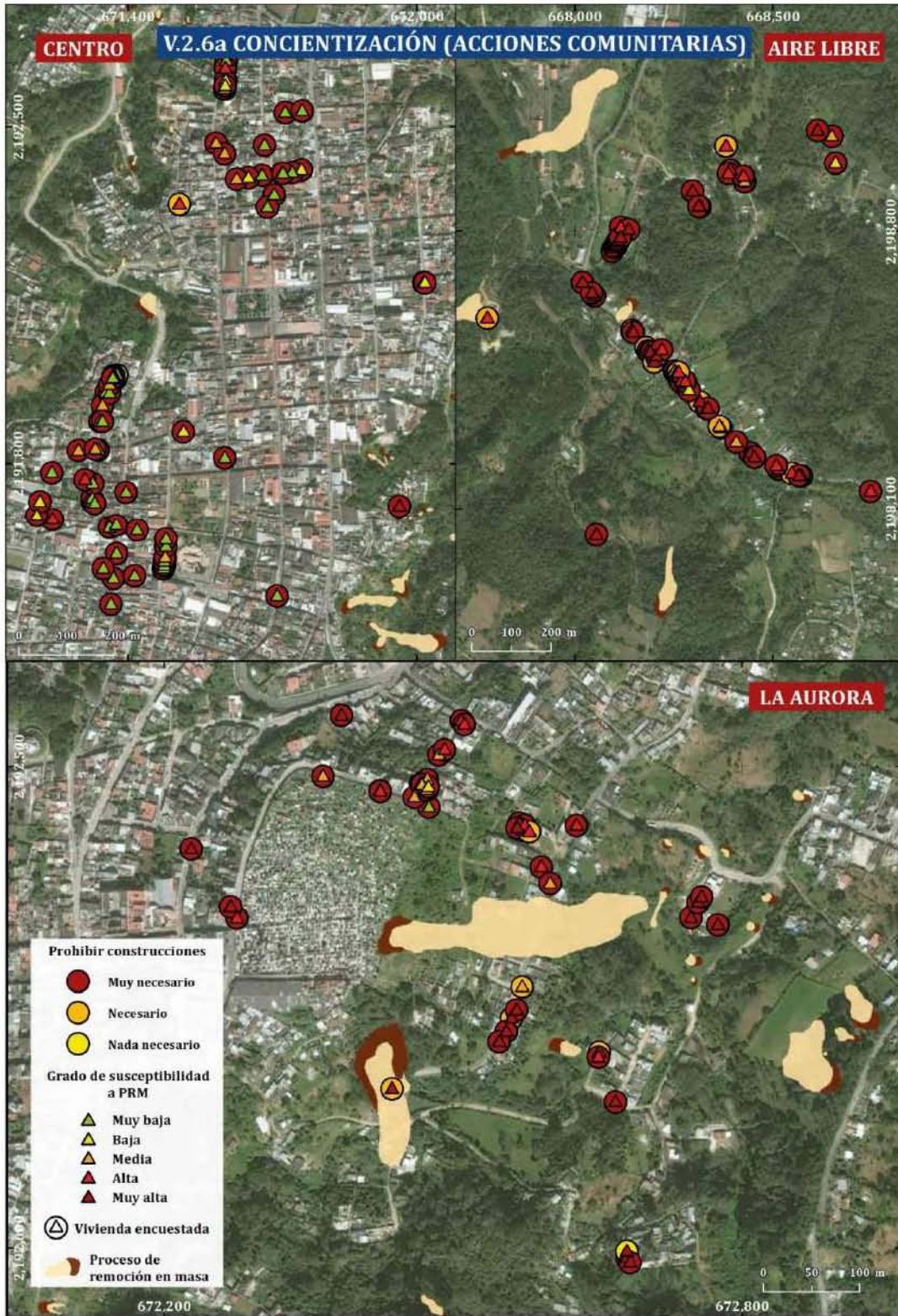
Tabla 6. Medios a través de los cuales la población entrevistada prefiere recibir información relacionada con la ocurrencia de deslizamientos (*Puede haber más de una respuesta por lo que la suma de todos los tipos de información no es 100%).



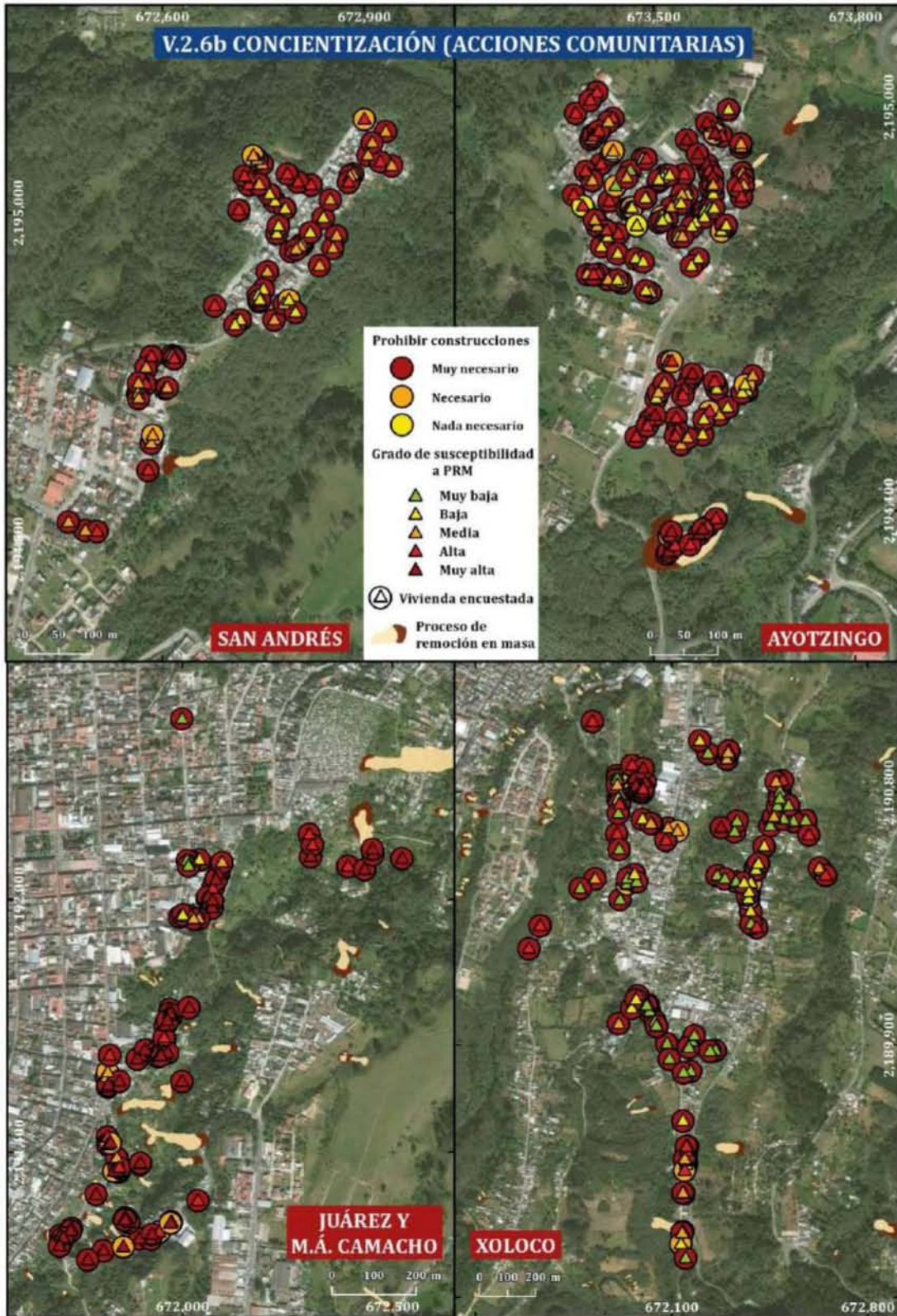
Mapa 2.5a



Mapa 2.5b



Mapa 2.6a



Mapa 2.6b

Confianza en diversos actores como fuente de información*		Autoridades gubernamentales	Organizaciones civiles	Instituciones del sector salud	Investigadores y científicos
Centro	Mujeres	55	17	8	11
	Hombres	11	5	3	1
Aire Libre	Mujeres	47	11	8	8
	Hombres	16	5	4	4
La Aurora	Mujeres	23	10	4	5
	Hombres	11	7	5	4
San Andrés	Mujeres	54	14	24	15
	Hombres	18	7	15	8
Ayotzingo	Mujeres	88	34	14	2
	Hombres	38	30	7	10
Juárez-Ávila Camacho	Mujeres	40	7	16	9
	Hombres	17	4	7	4
Xoloco	Mujeres	62	23	15	18
	Hombres	34	14	6	7

Tabla 7. Confianza en diversos actores sociales como fuente de información (*Menciones).

CONCLUSIONES GENERALES

La relación geomorfología y PR tiene un vínculo muy fuerte y el desarrollo en cualquiera de las dos disciplinas implica también del avance en la otra. La geomorfología ha sabido aprovechar los avances tecnológicos en el campo de los sensores y plataformas para incrementar el desarrollo de investigaciones que se apoyan en la PR para el estudio de la dinámica y evolución de los procesos terrestres. Esto se ve reflejado en la basta cantidad de publicaciones en las que el uso de la PR es fundamental para el entendimiento de los procesos geomorfológicos.

Esta relación de los geomorfólogos con la PR implica también la interacción con expertos de otras disciplinas; esto fomenta la multi e inter-disciplina y la aplicación de diversos estudios en ámbitos de interacción entre ciencias de la Tierra y ciencias sociales.

La PR es una de las mejores herramientas del siglo XXI, y por ende, puede ser utilizada en una amplia diversidad de temas. Por ello, grupos multinacionales y regionales siguen invirtiendo capital financiero y humano para seguir desarrollando sensores y plataformas cada vez más sofisticados con el objetivo de entender de mejor manera los procesos que se dan a nivel global pero también a escalas mayores, como se lo puede observar en los estudios de cambio climático o la agricultura de precisión, por nombrar un par de ejemplos.

Los Vehículos Aéreos No Tripulados, como parte de la PR, se han convertido en una herramienta indispensable en el ámbito de las ciencias naturales y sociales. No se puede negar su capacidad y utilidad para generar información a escalas cada vez más grandes. Su portabilidad y la capacidad de montar diversos sensores lo hacen un equipo indispensable para estudios temporales y para la adquisición de datos en momentos cruciales, por ejemplo, la ocurrencia de un desastre. Es necesario reconocer sus limitaciones, pero, aun así, y con los avances tecnológicos, sería impensable descartar estos equipos para el desarrollo de estudios del territorio.

La inestabilidad de laderas como proceso presente en prácticamente todo el planeta ha sido evaluada desde diversos puntos de vista y con diversas metodologías dentro de las ciencias de la Tierra; la conjunción PR y geomorfología ha participado de esa extensa variedad de investigaciones y, en forma puntual, los VANT y la geomorfología están, desde hace quince años aproximadamente, generando nueva información con respecto a los procesos de ladera pero también a la construcción del riesgo de desastre asociado a este tipo de eventos naturales. Es importante seguir desarrollando nuevas investigaciones, aprovechando la aparición de nuevos sensores y plataformas, que abonaran a la creación de nuevas líneas de investigación enfocadas al estudio de la inestabilidad de laderas.

El uso de VANT, en geomorfología y en la reducción del riesgo de desastre, ofrece muchas posibilidades para la realización de nuevos estudios, y todavía se encuentra en desarrollo la generación de literatura especializada en cuanto a las aplicaciones particulares de este tipo de tecnología.

Con respecto a las investigaciones enfocadas a la inestabilidad de laderas los estudios se han centrado particularmente en los aspectos físicos del fenómeno. No obstante, los aspectos asociados a la vulnerabilidad están en etapas muy tempranas de evaluación. Por esto es deseable realizar más investigaciones, apoyadas en VANT, para abordar temas relacionados con la vulnerabilidad, la exposición y la evaluación del riesgo de desastres.

Para el tema del análisis del riesgo por inestabilidad de laderas, estas nuevas herramientas brindan nuevas oportunidades para realizar trabajos dentro de la temática de la exposición y la vulnerabilidad, las cuales requieren del apoyo de productos cartográficos cada vez de mejor resolución y calidad y que sean de fácil y pronta adquisición. Estos productos son muy útiles cuando se trabaja directamente con la población ya que el gran nivel de detalle de las imágenes permite a la gente identificar de mejor manera todos aquellos elementos que conforman su territorio y de esta manera es posible plasmar aquellos sitios que consideran seguros, así como en los que se identifican síntomas de inestabilidad o factores que puedan inducir a la ocurrencia de un proceso de ladera. Esto da pie a nuevas formas de entender y comunicar el riesgo, así como de trabajar en conjunto con las comunidades en riesgo, lo que abona a la intención original que es la reducción del riesgo del desastre.

Este trabajo documenta la utilidad del uso de las nuevas tecnologías aerofotográficas, en especial de los Vehículos Aéreos No Tripulados en el análisis de los diversos elementos asociados con el riesgo de desastre por inestabilidad de laderas. Si bien ciertamente la evaluación de la dinámica de la amenaza -esto es de la génesis y evolución de los procesos de remoción en masa-, es de gran relevancia para entender la susceptibilidad de las laderas, no es suficiente contar sólo con este tipo de información para entender el riesgo de desastre. Consecuentemente, la posibilidad, aquí empleada, de explorar la aplicación de este tipo de herramientas para determinar el grado de exposición de los diferentes elementos en riesgo, constituye un aporte que deber ser empleado en evaluaciones futuras a nivel local, en las cuales también se incluyan las causas o factores que inducen y reproducen la vulnerabilidad. Esta última, debe entenderse en el ámbito de la toma de decisiones vinculada al asentamiento de poblaciones en sitios no aptos y propensos a la inestabilidad de laderas, así como de los procesos sociales de construcción del riesgo de desastre.