

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ACTUALIZACIÓN DE MODELOS SIG DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS A ESCALA LOCAL CON VANTS. ÁREA DE ESTUDIO: ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY

RAMIREZ SERRATO NELLY LUCERO¹, YEPEZ RINCON FABIOLA DORACELY², FERRIÑO
FIERRO ADRIAN LEONARDO³ Y HUERTA GARCÍA ROBERTO EMMANUEL⁴

^{1,2,3,4} Instituto de Ingeniería Civil – Departamento de Geomatica. Universidad Autónoma de Nuevo
León. nellyrmz.serrato@gmail.com, fabiola.yepezr@uanl.mx, adrian.ferrinof@uanl.mx,
rohg@live.com.mx,

RESUMEN

En la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) existen peligros por inestabilidad de laderas, los cuales se han zonificado por diversos estudios a escala regional. Sin embargo, los casos reportados indican que el tipo de deslizamientos ocurridos son muy puntuales, requiriéndose una escala más local. Actualmente, el desarrollo de nuevas tecnologías de sensores remotos como LIDAR (Light Detection and Ranging) y el uso de fotogrametría aérea usando VANT (vehículos aéreos no tripulados), permite obtener información actualizada y, de mayor detalle. Esta investigación propone la incorporación de información de ultra alta resolución para la actualización de modelos SIG de probabilidad de ocurrencia por inestabilidad de laderas a escala regional. Los avances en la investigación permiten proponer una metodología de procesamiento de los datos para ser homologados, y referenciados, de tal manera que sean equiparables con la información a escala regional. Esto permitirá continuar con la labor de actualización de este tipo de modelos

Palabras claves: *Derrumbes, Inestabilidad de laderas, Modelos SIG, Susceptibilidad, Remoción en masa.*

ABSTRACT

In the Metropolitan Area of Monterrey (MZM) dangerous hillside instability does exist, which have been zoned by various studies on a regional scale. However, the reported cases indicate that the type of landslides occurred are very specific, requiring more local scale data. Currently, the development of new remote sensing technologies such as LIDAR (Light and range detection) and the use of aerial photogrammetry using UAV (unmanned vehicles), allows obtaining up-to-date and more detailed information. This research proposes the incorporation of ultra high-resolution information for the update of the GIS models of the probability of occurrence due to slope instability at a regional scale. Advances in research allow a good communication of the data to be homologated, references so that they are comparable with the information on a regional scale. This means continuing with the work of updating this type of models.

Keywords: *GIS models, hillside instability, landslides, mass removal, and susceptibility*

1. INTRODUCCIÓN

El mapeo físico del entorno es una herramienta necesaria en la planeación y gestión del desarrollo urbano. La conjugación del estudio del medio físico con el avance de tecnologías cada vez más precisas ofrece proyecciones mucho más cercanas a la realidad. Específicamente, la determinación espacial de zonas susceptibles al fenómeno de inestabilidad de laderas y la cuantificación de características topográficas, geomorfológicas y ambientales permitirá una mejor definición de sitios con alta

probabilidad de ocurrencia de este fenómeno. La categorización de estos sitios, delimitará cuales son los que requieren prioridad para realizar estudios específicos en los que se definan estrategias de prevención y planeación antes de iniciar una construcción; es decir, la caracterización del terreno con respecto a la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, permite definir el tratamiento que se le dará con respecto al tipo de zonificación obtenido, poniendo especial atención en los sitios que se consideren con alta susceptibilidad ante tal fenómeno.

Durante mucho tiempo, el alto costo para la obtención de datos, no permitía generar información de alta resolución para estudios regionales. Sin embargo, con la integración de nuevas metodologías como los VANT o LIDAR (aéreo y terrestre), ahora se pueden plantear metas que incluyan una mayor precisión.

Actualmente, aun no se cuenta con la adaptación metodológica que sienta las bases del nivel de resolución que se requiere para realizar este tipo de modelación, y una estandarización del tipo de resultado que se puede obtener de cada escala de trabajo.

De acuerdo a los resultados de una modelación previa en SIG (escala 1:50,000) para zonificación de susceptibilidad de laderas se determinaron algunos sitios de interés, para ser evaluados en campo. Con el objetivo de obtener información de terreno para validar los resultados obtenidos con los modelos y realizar un levantamiento LIDAR terrestre para obtener información detallada de los echados utilizando Modelos Digitales de las laderas expuestas, la metodología fue ajustada debido a las condiciones de terreno, accesibilidad y seguridad. En todos los sitios, se llevó a cabo una metodología para la obtención de datos digitales, así

como datos geológicos de campo en donde fue posible acceder.

1.1 Antecedentes

Este proyecto se centra en la zonificación por probabilidad de inestabilidad de laderas, que para fines prácticos del presente estudio será implementado como “proceso de remoción en masa” (Ayala *et al.*, 2008; Gary *et al.*, 1972) se definen aquí como el deslizamiento de tierra, roca o suelo, pendiente abajo, causado por efectos de la gravedad (Cruden 1991; Alcántara Ayala *et al.*, 2008).

El estudio remoto de los procesos de remoción en masas se divide en dos grandes segmentos, los procedimientos a escala regional para predecir y zonificar en donde pueden ocurrir este tipo de desastres, y por otro lado, los recientes estudios a nivel local a partir de tecnologías de alta resolución y bajo costo, como lo son los drones.

El análisis de los deslizamientos a escala regional se ha estudiado a través de modelos multi-criterio en ambiente SIG, en donde se combinan una los factores involucrados, para determinar, espacialmente, los lugares más susceptibles ante la inestabilidad.

Algunos estudios se enfocan en el desarrollo de los factores que detonan la

inestabilidad de manera directa, como la presencia de precipitación máxima (Dahal *et al.*, 2008), o la influencia de terremotos como factor desencadenante (Huang *et al.*, 2012), e inclusive se considera el cambio de uso de suelo como un factor de influencia importante en la ocurrencia de deslizamientos (Glade, 2003). A pesar de eso, la mayoría de estas investigaciones coinciden en que la topografía del sitio es uno de los factores más importantes, sin embargo, los datos utilizados en el mejor de los casos son de escala 1:25,000 (Aleotti y Chowdhury, 1999) catalogando este tipo de modelación como “análisis regionales”.

Por otra parte, el uso de los drones como herramienta de apoyo ha iniciado desde los 70, dentro del área militar (Colomina y Molina, 2014), el abaratamiento del equipo incentivó su uso para disciplinas científicas, generándose apenas 10 artículos para 1990 con temática para manejo de desastres (Gomez y Purdie, 2016)

A escala local, los esfuerzos se concentran en la adquisición de datos, el monitoreo de desplazamientos sobre derrumbes ya acontecidos, con la comparación temporal de modelos de elevación digital (Lucieer *et al.*, 2014; Lindner *et al.*, 2016; Peternel *et al.*, 2017, entre otros.) Con los cuales se

han obtenido datos puntuales de seguimiento de fracturas, dirección de flujo y velocidad. Demostrando su eficiencia para el mapeo post-evento, pero ignorando los avances en predicción obtenidos a partir del procesado a escala regional.

En este proyecto se pretende implementar una metodología de actualización, que combine los avances en modelación SIG escala regional con lo obtenido a escala local. Combinando los avances de ambas metodologías.

1.2 Área de estudio

El área de estudio queda ubicada dentro de la Zona Metropolitana de Monterrey, ZMM, perteneciente al estado de Nuevo León en México, el cual comprende el municipio de Monterrey y los municipios aledaños correspondientes a su área conurbada, como San Nicolás de los Garza, Guadalupe, Santa Catarina y San Pedro Garza García, entre otros. Siendo este último el que presenta la mayor cantidad de elementos que condicionan la inestabilidad de una ladera, reportándose deslizamientos de tipo volteo en el 40% de su cobertura, correspondiente a la Sierra de las Mitras, así como la presencia de deslizamientos en el 20 % del flanco Norte y Noreste de lo que corresponde de la

Sierra Madre Oriental que pertenece a este municipio (Rodríguez, *et al.*, 2018).

La ZMM, se encuentra localizada sobre el sistema Montañoso de la Sierra Madre Oriental, el cual está conformado por rocas sedimentarias de origen mesozoico y cenozoico que fueron plegados y arrastrados durante la orogenia laramide ocurrida entre el cretácico tardío y el Terciario Temprano (Eguiluz *et al.*, 2000). La formación conocida como la curvatura de Monterrey se compone de pliegues con orientación NW-SE que cambian su

orientación a E-W en la parte norte del municipio.

En la Figura 1 se observa el área de estudio, el polígono de color rojo representa la cobertura de datos obtenida para generar un modelo SIG de escala regional, que va a ser actualizado con la metodología propuesta en este proyecto. Se consideraron 7 áreas específicas de comparación (AOIs), dentro de las cuales se han realizado vuelos que serán descritos como parte de la metodología de este proyecto (polígonos rojos).

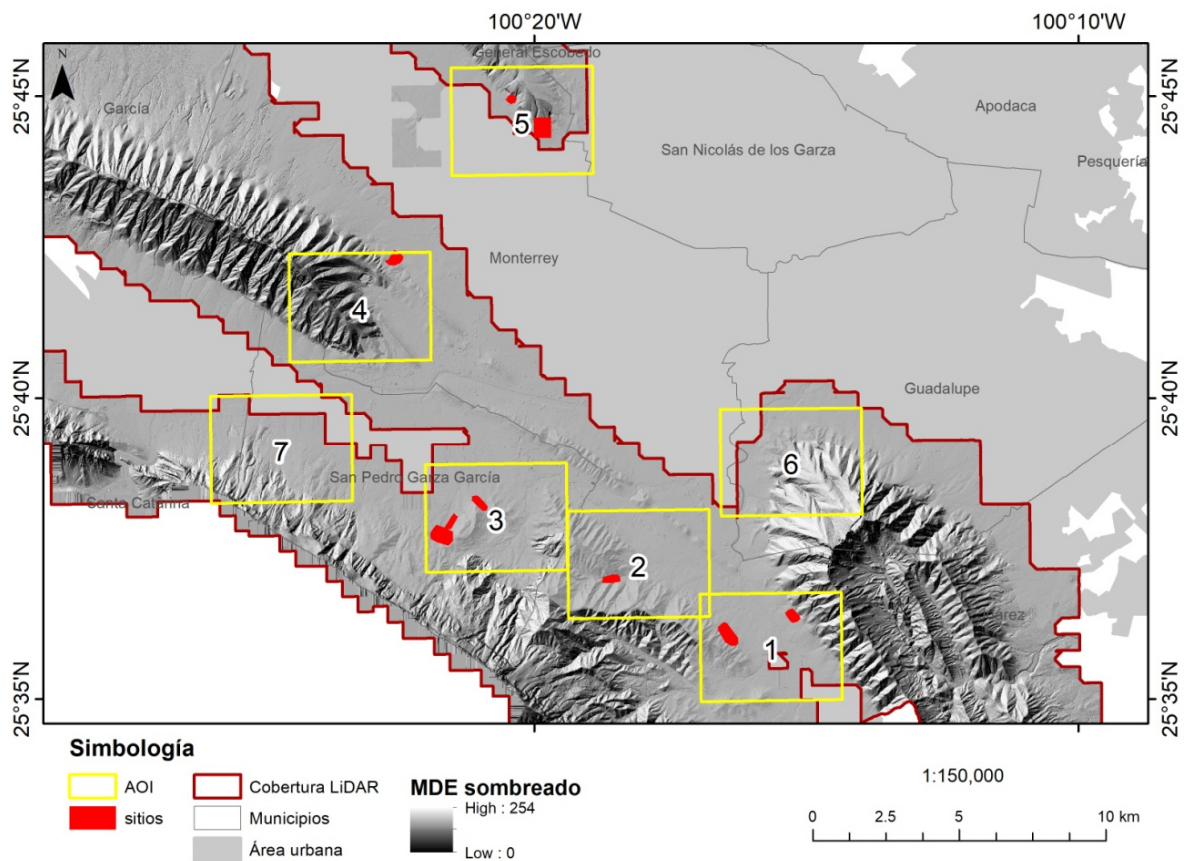


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El equipo utilizado para este estudio, mostrado en la Figura 2, está conformado por: un LiDAR terrestre modelo a) Escáner Topcon GLS 1500, el cual cuenta con campo de visión de $360^{\circ} \times 270^{\circ}$, alta precisión de hasta 4mm y con capacidad de captura de 30,000 puntos por segundo, efectividad de alcance de 150 hasta 330m el cual pertenece al Departamento de Topografía de la Facultad de Ingeniería Civil (UANL) y b) un VANT de la marca

DJI Phantom 3 Professional altura máxima de 6000 msnm, con modo de posicionamiento de GPS/GLONASS, y un tiempo de vuelo estimado de 23 min (por batería/aproximadamente) equipado con una cámara de 12.4M/ FOV 94° , c) un DJI Inspire 2, el cual puede elevarse hasta 5000 m con un tiempo de vuelo aproximado de 27 min, equipado con una cámara Zenmuse x4s, de 20M y FOV 84° y d) adicionalmente, se utilizó una brújula geológica marca Brunton.



Figura 2. Imagen de los insumos utilizados en campo: a) Dron DJI inspire 2, b) Dron DJI phantom 3, c y d) Lidar terrestre marca topcon (Elaboración propia).

2.1 Obtención de datos fotogramétricos:

El procesado de la información se realizó mediante la técnica fotogramétrica (SFM, Structure from Motion).

Este procesado consiste en la alineación de imágenes para definir los puntos de coincidencia entre imágenes (método SIFT, Lowe, D. G., 2004) el posicionamiento de estos puntos, a partir de la perspectiva que se genera con respecto a la posición del sensor (en este caso la cámara). Esta nube de puntos media, es rellenada para crear la nube de puntos densa, mediante el método CMVs/PMVS (Furukawa, Y., y Ponce, J., 2009)

2.2 Metodología para obtención de datos comparativos a modelo SIG regional:

Uno de los objetivos de este proyecto es la integración de un modelo SIG de alta resolución, para lo cual se obtuvieron datos de campo. Parte de estos datos de campo consisten en la toma de fotografías y videos del sitio de estudio para obtener reconstrucciones 3D.

Para el apropiado manejo de los datos, estos puntos tuvieron que ser nivelados verticalmente, para esto se implementó una normalización con el MDE de INEGI de 5m, el cual esta corregido previamente

con la base de datos activa del mismo INEGI). El MDE, es una representación 3D únicamente del terreno, por lo que, para obtenerlo, se tiene que filtrar la nube de puntos corregida, para este proyecto se separó en dos clases, una que contenía todos los puntos referentes al suelo (suelo desnudo, vialidad), y en otra todo lo que no era suelo (casas, autos, vegetación, etc.). Todos los puntos que no pertenecieran a la categoría de suelo fueron eliminados. Con base en estos puntos, se hace una triangulación para obtener las superficies del terreno. Con esta metodología se obtiene el MDE.

Para obtener la ortofoto digital, se utiliza como base el archivo de superficies, sobre él se imprime la “textura” del terreo, que proviene de la transferencia de color de la imagen sobre la superficie coincidente espacialmente. Tanto el MDE como la ortofoto, tienen que ajustarse para estandarizar la resolución del trabajo de campo, por lo que se realiza un remuestreo de la información, de tal manera que todos los datos resultantes se delimiten por un tamaño de pixel de 10 cm.

2.3 Modelo SIG multi-criterio:

El modelo metodológico implementado para calcular la susceptibilidad por

inestabilidad de laderas basa su proceso en técnicas multi-criterio, en la que se consideran los elementos entre naturales y antropogénicos, de las que depende la estabilidad natural del terreno para mantenerse estable. Tales factores se segregan entre:

Factores topográficos

Factores geotécnicos

Factores antropogénicos

Y Factores Ambientales

Estos factores se procesan dentro de una suma lineal ponderada con base en la siguiente ecuación:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij} \quad \text{Ec. (1)}$$

En donde r_i es el nivel de adecuación de la alternativa i ; w_j es el peso del criterio j , v_{ij} es el valor ponderado de la alternativa i en el criterio j . Es decir, es la suma del valor categorizado de cada criterio multiplicado por el peso relativo asignado, lo cual se podría adaptar de la siguiente manera:

$$S = w_A v_{iA} + w_B v_{iB} + w_C v_{iC} + w_D v_{iD} \quad \text{Ec. (2)}$$

En donde S es la susceptibilidad por inestabilidad de laderas, A corresponde a los factores topográficos, C a los factores

geotécnicos y D a los factores ambientales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como parte de la metodología propuesta se han realizado visitas de campo a 13 sitios específicos. Estos sitios corresponden a las 7 áreas de interés propuestas originalmente (Figura 1) como parte de la metodología de integración con la información a escala regional.

Durante la visita se realizaron vuelos para obtener las imágenes estereoscópicas. En la Tabla 1, se presenta la información de los vuelos, junto con la cantidad de puntos obtenidos para su reconstrucción, y el porcentaje de puntos eliminados para la generación del modelo de elevación.

De levantamientos anteriores, realizados para este mismo proyecto, se pudo determinar la implementación de los drones como herramienta de obtención de datos, demostrando que geoméricamente, la tendencia es la misma, pero de menor resolución que los datos obtenidos mediante metodología LIDAR.

El procesado de la información se siguió marcando la metodología que finalmente es propuesta en la Figura 3. En donde la información es procesada, después de obtener el modelo de elevación digital,

para actualizar las corrientes de flujo (determinando áreas de captación), actualizando el uso de suelo (mediante la clasificación supervisada de la imagen ortorectificada) y actualizando el factor topográfico.

El Factor topográfico, se compone no solo del análisis morfológico del terreno, sino de la conjugación entre la inclinación y la orientación del corte de la ladera con respecto los estratos geológicos.

Tabla 1. Las tablas tendrán un espaciamiento sencillo tanto para el contenido como en el encabezado.

Sección	ID	vuelo	fecha	puntos	Solo suelo	%filtrado
SMO	corona	1	25/02/2016	21669020	8944707	58.7
SMO	corona	1 scnd	06/04/2017	12037776	7384443	38.7
SMO	corona	2	24/02/2016	21668916	5289560	75.6
SMO	corona	2 scnd	06/04/2017	12037718	4596316	61.8
Mitras	mitras	1	22/11/2018	4807566	2395413	50.2
Mitras	mitras	1 ladera	22/11/2018	34290941		
Silla	silla/parque	1	03/03/2016	4099782	2391402	41.7
Silla	Silla/aguilas	1	19/01/2019			
SMO	sonoma	1	14/02/2018	18128038		
SMO	tanques	1	13/02/2018	25534710	11909708	53.4
Topo Chico	topo chico	1	18/02/2016	1593308	1212567	23.9
Topo Chico	topo chico	2	16/02/2016	3030628	2071107	31.7
SMO	alpino	1	09/10/2018	28911130	15473112	46.5

Fuente: Elaboración propia.

Para el segmento geológico se realizó una capa base, para el modelo SIG a escala regional digitalizando las cartas físicas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, y el Servicio Geológico Mexicano SGM. Actualizando esta información con la toma de datos en laderas expuestas dentro del área de estudio.

Como resultado se obtuvo una comparación entre el error que se genera

entre el modelo original escala 5m, con respecto a una escala mediana de 1m y finalmente con respecto a los resultados obtenidos a escala local, con información proveniente de los VANTs, escala remuestreada de 0.1, como se muestra en la Figura 4.

Con los resultados obtenidos se muestra que el error promedio desciende a 0.08 m (desviación estándar de 0.45 m) a escalas locales, con respecto al 1.56 m (desviación

estándar de 2.72 m) proveniente de la escala más gruesa estudiada (5m), aunque se debe aclarar que el atlas nacional de riesgos de escala gruesa, utiliza

información de hasta 30 m de resolución, lo que amplía aun más el espectro del error obtenido.

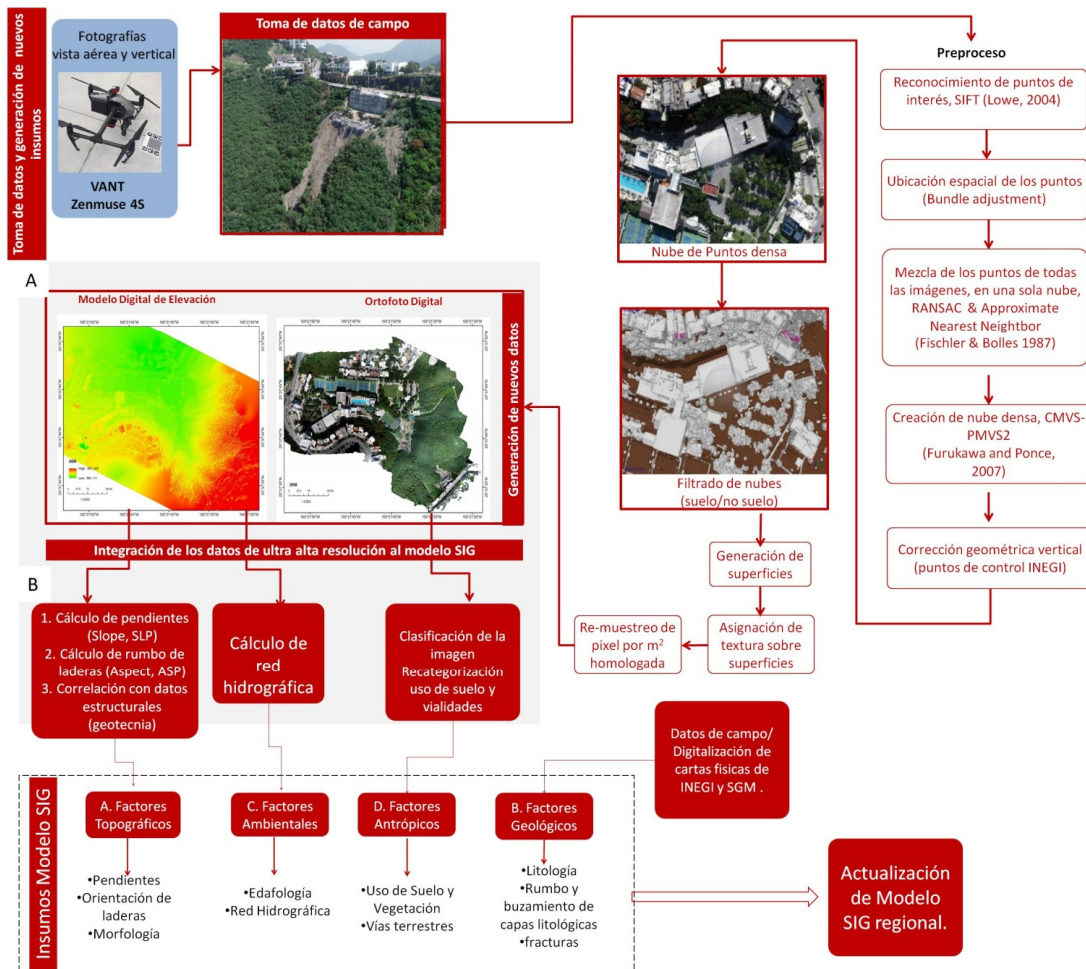


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología propuesta (Elaboración propia).

Para obtener estos valores se registraron 40 puntos de control, de los cuales 2 registraron valores de error de hasta 12 m con respecto al modelo de 5 m, mientras que en los modelos locales los valores mayores no pasan de los 2 m de

diferencia. De acuerdo a los modelos obtenidos y tomando en cuenta los datos de error, se obtuvo un porcentaje de cambio de cobertura de los modelos locales (VANT) con respecto al modelo medio (1 m), los resultados indican que



Figura 4. Gráficos de comparación de resultados, entre la metodología tradicional de escala 5m con respecto a una escala de mediana resolución (1 m) y el error generado a una escala local (VANT, 0.1 m).

existe un porcentaje de cambio en el terreno del 40 %, mientras que un 58 % de la cobertura se encuentra dentro del rango de error permitido (± 2 m), es decir, no presenta cambios, por otro lado, la cobertura que presenta errores máximos es del 0.67 % con respecto al total del área muestreada, registrándose en zonas montañosas de vegetación intensa con presencia de dosel arbóreo, o matorral, los cuales no permiten la buena reconstrucción de la altura del suelo.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La integración de la información de ultra alta resolución proveniente de los drones, LIDAR terrestre y metodología tradicional como ejercicio para reconocimiento de facetas en las laderas, permitió la delimitación del uso únicamente de drones para el trabajo de campo, por el mejor balance entre rendimiento, resolución y practicidad. Siendo los drones, una herramienta de gran utilidad para la generación de información actualizada y precisa.

La metodología propuesta permite la integración de nueva información dentro de los modelos regionales, lo que permitirá una mejor evaluación futura sobre estudios específicos de caso, mejorando su precisión de 1.56 a 0.08 m. Esta metodología permite también el monitoreo de zonas en riesgo, para este proyecto se determinó que el 40 % del área muestreada sufrió cambios en el terreno, ya sea por extracción de material como acumulaciones de material antropogenico.

REFERENCIAS

- Alcántara Ayala, I., y Murillo García, F. (2008). Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones geográficas* (66), 47-64.
- Alcántara Ayala, I., y Murillo García, F. (2008). Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones geográficas* (66), 47-64.
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 58(1), 21-44.
- 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.
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 43(1), 27-29.
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Masuda, T., & Nishino, K. (2008). GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 54(2), 311-324.
- Deweza, T. J. B., Girardeau-Montautb, D., Allanica, C., & Rohmer, J. (2016). "Facets: a Cloudcompare Plugin to Extract Geological Planes from Unstructured 3d Point Clouds". *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 799-804.
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García, M., & Marrett, R. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental. México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 1-26.
- Furukawa, Y., & Ponce, J. (2009). Carved visual hulls for image-based modeling. *International Journal of Computer Vision*, 81(1), 53-67.
- Glade, T. (2003). Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *Catena*, 51(3-4), 297-314.
- Gomez, C., & Purdie, H. (2016). UAV-based photogrammetry and geocomputing for hazards and disaster risk monitoring—a review. *Geoenvironmental Disasters*, 3(1), 23.
- Huang, R., Pei, X., Fan, X., Zhang, W., Li, S., & Li, B. (2012). The characteristics and failure mechanism of the largest landslide triggered by the Wenchuan earthquake, May 12, 2008, China. *Landslides*, 9, 131–142.
- Lucieer, A., Jong, S. M. D., & 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.
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2): 91–110.
- Rodríguez, M., Valero, A., Navarro, I., y Bermúdez, J. E., en prensa, consultado en 2018. Riesgos Naturales en el Municipio de San Pedro Garza García, N. L. México: Tipos, Características y Factores condicionantes.