

FOTOGRAMETRÍA DE DRONES PARA LA PREVENCIÓN DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Oscar Daniel Rivera González ^{1*}

RESUMEN

Álvaro Obregón es una alcaldía al poniente de la Ciudad de México (CDMX), situada sobre las laderas del volcán San Miguel perteneciente a la Sierra de las Cruces. La geología de la zona de estudio está constituida en mayor porcentaje por derrames de lavas altamente accidentadas y/o fracturadas, aunado al grado de pendiente. Las áreas a lo largo de dicha alcaldía son susceptibles a presentar deslizamientos de tierras, inestabilidad de laderas, procesos gravitacionales comúnmente llamados por la población deslaves, resultando muchas veces en pérdidas humanas. El objetivo de este trabajo es generar un modelo computacional preventivo basado en el uso de drones y la técnica de fotogrametría que sirva para entender mejor las amenazas en el área de estudio a nivel local. Los resultados muestran que el modelo generado tiene un gran potencial para identificar áreas de riesgo en base a los datos morfológicos y sociales, incluyendo edificaciones, y que puede ser utilizado en circunstancias similares en otras áreas de la CDMX.

PALABRAS CLAVE

Prevención, Fotogrametría, Drones, Ladera, Deslizamientos, Ciudad de México

DRONE PHOTOGRAMMETRY FOR THE PREVENTION OF LANDSLIDES IN MEXICO CITY

ABSTRACT

Álvaro Obregón is a municipality located to the west of Mexico City (CDMX), on the slopes of the San Miguel volcano in the Sierra de las Cruces. Most of the geology of the study area is made up of spills from highly broken and/or fractured lava, together with the degree of slope. Many areas of the municipality are susceptible to landslides, slope instability, gravitational processes commonly called by locals deslaves, often resulting in human loss. The objective of this work is to generate a preventive computational model based on the use of drones and photogrammetry technique, aiming to serve to better understand the threats in the study area at the local level. The results show that the generated model has great potential to identify risk areas based on morphological and social data, including buildings, and that it can be used in similar circumstances in other areas of CDMX.

KEYWORDS

Prevention, Photogrammetry, Drones, Hillside, Landslides, Mexico City

1. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, Ciudad de México, México.

*Autor de correspondencia: ocardanielydanyboy@hotmail.com

RECIBIDO
14 de abril de 2020

ACEPTADO
15 de mayo de 2020

PUBLICADO
1 de julio de 2020

Formato cita Recomendada (APA):
Rivera González, O.D. (2020). Fotogrametría de Drones para la Prevención de Deslizamientos de Tierra en la Ciudad de México. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 4(2), 85-96.



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)

Diseño: Lupe Bezzina
Tipografía: Hospital

INTRODUCCIÓN

La problemática de deslizamientos de tierra en la Ciudad de México (CDMX) es algo que preocupa a los habitantes de la ciudad, en especialmente a aquellos que por circunstancias sociales y económicas viven en zonas de barrancas y que a diario viven en un riesgo de desastre latente. La información electrónica con la que cuenta actualmente la Procuraduría Ambiental de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México (PAOT)¹ y la Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA)², instituciones Estatales en México, es cartografía y nivel de detalle muy general y poco actualizado para la problemática de deslizamientos de tierra. A esto se suma una falta de trabajo de campo por parte de dichas instituciones debido al obstáculo en cuanto a la inseguridad y nivel alto de marginación que se da en varias zonas de la CDMX. Esto desemboca en que tales instituciones no cuentan con información contextualizada y localizada respecto de las amenazas, limitando su posibilidad de ofrecer posibles soluciones para la gestión del riesgo ante este tipo de fenómenos geomorfológicos y así tratar de evitar dichos acontecimientos y no solo repararlos, mismos que generan pérdidas de vidas humanas cuando estos ocurren.

Con base en lo anterior este trabajo se enfoca en generar un modelo preventivo utilizando fotogrametría a partir de drones, algo que en México es poco utilizado por las instituciones antes mencionadas, con el fin de alertar y concientizar a la posible población afectada. Pese a que el error en la latitud, longitud y altitud es de un máximo de 5 a 8 metros, la cartografía obtenida en este estudio se puede considerar de precisión. Se realizaron visitas de campo para marcar puntos de control, mismos que fueron utilizados para aminorar el error de latitud y longitud, todo esto con base en la metodología que se propondrá en este artículo. El trabajo se realizó en los barrios de: Las Águilas ampliación 2do Parque, dentro de la Alcaldía Álvaro Obregón, (ver Figura 1).

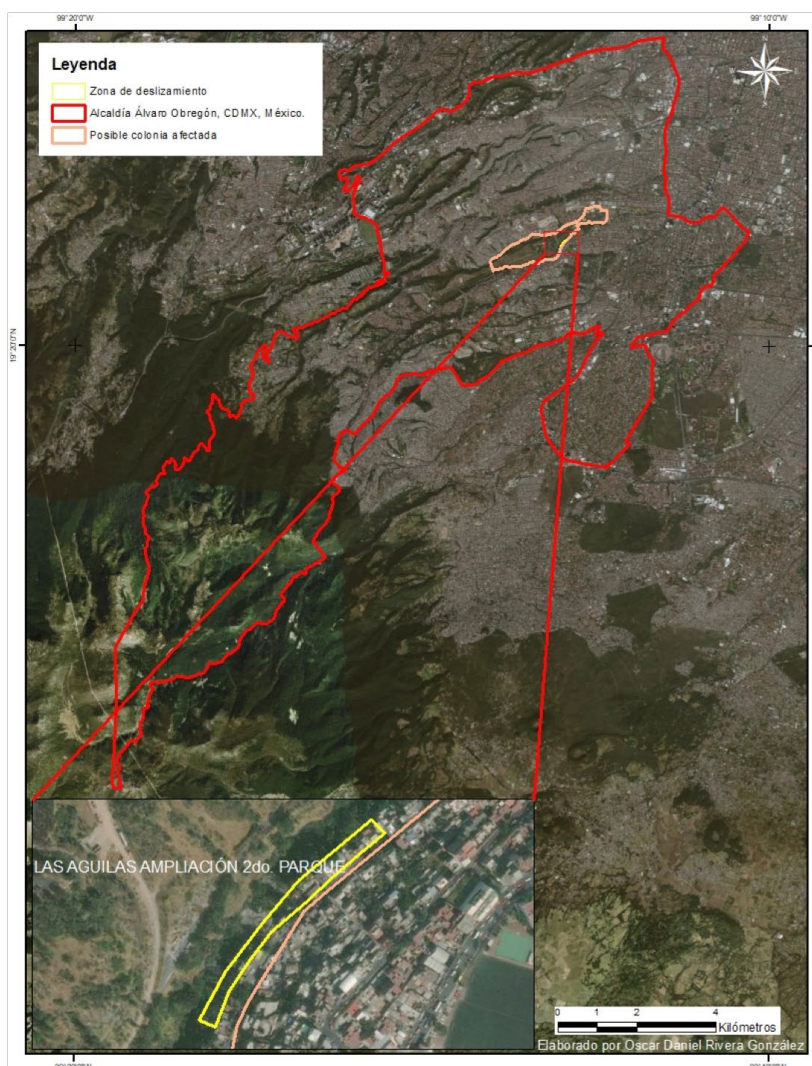


Figura 1. Zona de estudio, área inicial de 3810.23 m²
Fuente: Autor, 2020

1. Información obtenida: <http://www.paot.org.mx/micrositios/mapoteca/geovisor.php>

2. Información obtenida: <https://sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/inventario>

La literatura internacional de la utilización de fotogrametría a partir de drones y de sistemas de información geográfica (SIG) para generar modelos de prevención reales es importante abordarla, ya que esta tecnología podría ser una alternativa real y económica salvar vidas humanas en cualquier parte del mundo ante este tipo de acontecimientos geomorfológicos, pero en especial para aquellos municipios que cuentan con recursos limitados.

Según Gupta y Shukla (2018), la estimación de la dimensión de los deslizamientos de tierra es un desafío importante al preparar el mapa de inventario de deslizamientos de tierra, para el cual se requieren datos satelitales de alta resolución y fotografía aérea, lo cual suele ser muy costoso, por ello, una alternativa es la aplicación de drones para tal mapeo (Gupta & Shukla, 2018, p.903).

La importancia de lo mencionado por Gupta y Shukla (2018) está en el costo para el obtener un vuelo para la obtención de fotografías de alta resolución, lo cual en México es actualmente muy costoso con base en fotografías aéreas tomadas por avionetas, por lo que para realizar este tipo de estudios fotogramétricos será de bastante apoyo el vuelo y obtención de fotografías aéreas con base en drones, lo que tal vez sigue siendo caro, sin embargo, con un costo todavía menor. Gupta y Shukla (2018) además insisten: "las imágenes basadas en drones en combinación con algoritmos de reconstrucción de escenas 3D proporcionan herramientas flexibles y efectivas para mapear y monitorear deslizamientos de tierra, además de evaluar con precisión las dimensiones de los deslizamientos de tierra" (Gupta & Shukla, 2018, p.903).

Por lo tanto, la fotogrametría a partir de drones puede ser una alternativa importante para el análisis con base en los SIG, lo que permitirá contrastar los resultados cualitativos y cuantitativos, para así poder proponer medidas de mitigación de riesgo y tratar de aminorar o evitar pérdidas de vidas humanas por este tipo de acontecimientos geomorfológicos.

Por otra parte, es importante comprender por diversos autores la posible solución a este tipo de problemáticas de deslizamiento de tierras y cuál es su origen, ya que es un punto medular para comprender y dar una posible solución acertada, en cuanto a la gestión pública urbana y poder llevarlo a cabo con la explicación del modelo que se presentará más adelante.

Según Oliver-Smith et al. (2016), las amenazas, junto con las condiciones imperantes de exposición, vulnerabilidad y resiliencia, "causan" riesgo (Oliver-Smith et al., 2016, p.38). En el área de estudio, se observa que la problemática planteada es de carácter urbano (social, económico y político), pero también geográfico y geomorfológico, mismo que se presenta en muchas zonas de la CDMX inclusive a lo largo de todo México, por sus características, edafológicas, geológicas, hidrológicas, entre otras. Aunque la complejidad de estudiar el riesgo requiere de muchos elementos, al menos como lo plantean Oliver-Smith et al. (2016), este estudio busca aportar en el estudio de las amenazas a través de un modelo computacional preventivo que sirva para informar mejores políticas de gestión del riesgo en zonas periurbanas de la CDMX. Es importante mencionar que dentro de la zona de estudio en la cual se generó el presente modelo preventivo, existe población que vive con algún grado de vulnerabilidad y susceptible a eventos geomorfológicos extremos, lo cual se observará luego en las conclusiones del modelo y el procedimiento empírico: cierta población vive muy expuesta a algún tipo de evento extremo con alto riesgo de pérdidas humanas, ya que en cualquier momento puede generarse un deslizamiento de tierra, el cual afectará las construcciones superiores que se encuentran sobre la ladera o a lo largo de la misma.

El tema de la planeación urbana es vital para evitar este tipo de fenómenos geomorfológicos con consecuencias negativas para la vida y la actividad urbana. Según Jacobs (2011), "urbanizar el espacio urbano significa ordenarlo de una manera considerada pertinente, someterlo a una determinada jerarquía, diseñarlo para que cumpliera ciertas funciones, normativizarlo y legalmente, garantizar su transparencia tanto funcional como perceptiva" (Jacobs, 2011, p.20).

Lo antes mencionado es el punto medular en el tema de esta investigación en cuanto a la planeación urbana, ya que para construir edificaciones en un espacio en el cual puedan habitar cierto tipo de población, se deberá poner atención en la estructuración desde la planeación, urbanización, geografía y terminarlo con una legalización transparente y que funcione de manera adecuada.

Es importante explicar la problemática del peligro que sufren algunas zonas geomorfológicamente no aptas para la urbanización, tras el paso de cualquier acontecimiento geológico y comprendiendo que los desastres no son naturales, por otro lado, si son un producto de la construcción social del riesgo, mismo que debe ser atendido por las autoridades con base en una adecuada gestión y coordinación con los posibles habitantes afectados.

Al respecto, Maskrey (1993) señala: "Por Vulnerabilidad vamos a denotar la incapacidad de una comunidad para 'absorber', mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente, o sea su 'inflexibilidad' o incapacidad para adaptarse a ese cambio, que para la comunidad constituye, por las razones expuestas, un riesgo. Riesgo x Vulnerabilidad = Desastre.", (Maskrey, 1993, p.17).

Con base en lo anterior es importante establecer la importancia del concepto de vulnerabilidad en cuanto al entendimiento en el aspecto de la prevención ante riesgos geomorfológicos y enfocados en zonas urbanas, mismas que sufren deslizamientos año con año en algún lugar de la CDMX. Según Ruiz (2011), "El concepto de vulnerabilidad ha sido explorado desde campos de conocimiento muy diversos, como la antropología, la sociología, la ecología política, las geociencias y la ingeniería" (Ruiz, 2011, p.64). Por lo anterior, el presente artículo de investigación intenta informar futuros trabajos multidisciplinarios ya que la información obtenida y generada puede ser entendida desde diversas perspectivas que estudian al territorio, ciencias sociales y ciencias naturales, precisando que el concepto de vulnerabilidad, peligro, amenaza, riesgo, no son sinónimos.

Por otra parte, existe otra variable y amenaza que hace que esta peligrosidad aumente de manera gradual, al darse episodios de los movimientos sísmicos que se presentan a lo largo de la CDMX y en ocasiones afectando también el colapso de techo de minas, mismas que se incrementaron en cuanto a la extracción de material entre los años de 1824 a 1910, al incrementarse el urbanismo en las construcciones cercanas al centro de CDMX.

Debe entenderse que el tema urbano no es el culpable en cuanto al crecimiento de estas amenazas geomorfológicas, es más bien el crecimiento desregulado y desmedido en el que impera el tema de corrupción y por ende la ocupación de zonas no aptas para el urbanismo. Como propone Fariña (2013), "Aptitud para la urbanización, a pesar de que ya es un tópico afirmar que el suelo está destinado a urbanizar debería planificarse, no todo el suelo necesariamente presenta buenas condiciones para la urbanización". (Fariña, 2013, p.40).

La cita anterior pone también sobre relieve que en ocasiones crece este riesgo geológico y geomorfológico en dichos asentamientos urbanos, ya que en temporada de lluvias se reblandece el suelo en algunas regiones, debido a que pueden registrarse deslaves, deslizamientos de laderas, desbordamientos de ríos y arroyos, afectaciones en caminos y tramos carreteros, así como inundaciones en zonas bajas y saturación de drenajes en zonas urbanas.

El Gobierno Mexicano Federal, Estatal o Alcaldía y en específico el de la Ciudad de México, son quienes deben poner atención al tipo de uso de suelo y para qué es apto, ya que zonas de la alcaldía Álvaro Obregón y sus alrededores no son aptas para la construcción urbana, así mismo éstas instituciones deben definir el número de niveles en las viviendas ya existentes, en específico en la zona a estudiada, por lo que es muy importante tomar en cuenta al tema y estudio de la edafología.

Sin la adecuada gestión urbana-geográfica por parte del Gobierno Mexicano, ante estas problemáticas, la población no siempre tiene la capacidad de absorber y resistir estos hechos naturales, especialmente cuando la población se encuentra en precarias condiciones de vivienda y a nivel socioeconómico. Estas observaciones fueron corroboradas luego durante las vistas de campo y en entrevistas informales con los vecinos del lugar. También se destaca la escasa coordinación entre los organismos de Protección Civil, Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas con los habitantes, dando como resultado afectaciones y/o catástrofes urbanas, así como pérdida de vidas humanas.

Con base en lo anterior se hace necesario implementar de forma urgente y adecuada, nuevas políticas públicas o actualizar las mismas, las cuales podrían resolver problemáticas de esa índole y que año con año cobran vidas humanas a lo largo de la alcaldía Álvaro Obregón e inclusive en toda la CDMX.

Otro factor importante en el desarrollo de las amenazas es destacado por Alcántara-Ayala (2000): "Los procesos de ladera ocurren gracias a la combinación de este tipo de factores, ya que todos ellos contribuyen en diferente grado a su inestabilidad. Sin embargo, según ciertas circunstancias, algunos de estos elementos pueden ser considerados como factores desencadenantes decisivos como, por ejemplo, la presencia de lluvias extraordinarias en materiales permeable" (Alcántara-Ayala, 2000, p.13-14). Lo anterior explica que el acarreo de material, mismo que genera derrumbes

en edificaciones de construcción y autoconstrucción, sepulta hogares y/o edificaciones enteras. Esto es fundamental para la planeación, por lo cual el aparato Federal, Estatal o Alcaldía, deberá implementar medidas de prevención ante la problemática antes planteada y realizarla de manera correcta, ya que, en caso de no llevarse una adecuada planeación urbana, los resultados son y seguirán siendo devastaciones urbanas, sociales y geográficas.

Existen leyes, reglamentos, artículos, normas, estatutos y otros, mismos que mencionan que está prohibida la construcción en estas áreas urbanas no aptas debido a las características geográficas y geomorfológicas en dichas zonas, sin embargo, por diversas problemáticas políticas, corrupción, intereses personales, entre otras, no se llevan a cabo. En tal sentido, este modelo pretende también concientizar a la población posiblemente afectada en coordinación con las autoridades encargadas de la gestión urbana, misma población que con base en el modelo presentado en su mayoría deberá quizás deba ser reubicada, o ser parte de estrategias de mitigación de las amenazas. En caso de reubicación, es importante que posteriormente dichas zonas se rehabiliten para evitar futuras construcciones, ya sea como áreas naturales protegidas, parques lineales, deportivos, ciclo pistas, entre otras, tema que debe resolverse con el estudio de diversas disciplinas como el urbanismo, geografía, economía ambiental, ciencias de la tierra, geología, sociología, entre otras.

Examinando lo anterior se muestran dos noticias periodísticas a modo de ejemplo, mismas que relatan la problemática en zonas urbanas que se ven afectadas ante los deslizamientos de tierra, en la Alcaldía Álvaro Obregón.

Primera noticia periodística: Periódico José Cárdenas, 24 de mayo de 2015.

“En Álvaro Obregón existen 976 puntos que están en riesgo de deslave y para atenderlos se requiere de una inversión superior a los 2 mil millones de pesos [mexicanos], aseguró el director de Protección Civil y Zonas de Alto Riesgo de esta demarcación, Jorge Reyes de la Rosa, en entrevista. Según el funcionario, colonias propensas a sufrir algún deslave en esta temporada de lluvias son: Olivar del Conde, Galeana, Golondrinas, Tetelpan, Santa Rosa Xochiac, San Bartolo Ameyalco, Tlacoyaque, Paraje El Caballito, Chamontoya, entre otras. En 60% del área afectada hay viviendas asentadas en las barrancas. De acuerdo con Reyes de la Rosa, durante la temporada de lluvias se genera una saturación de humedad que puede generar un deslizamiento en las barrancas, además del agua que se avienta a la barranca, erosiona, deslava y arrastra materiales” (Cárdenas, 2015).

Segunda noticia periodística: Periódico Eje Central, 2 de septiembre de 2017.

“Un deslizamiento de tierra de una barranca dañó la barda de un salón de clases de la primaria República de Jamaica, en la colonia Pirul, delegación Álvaro Obregón. La afectación fue en aproximadamente tres metros de largo del muro causando daños en la ventana y la barda de la escuela. En tanto la Secretaría de Protección Civil de la Ciudad de México activó la Alerta Amarilla por lluvia para Azcapotzalco, Miguel Hidalgo y Cuauhtémoc, que se suman a otras 12 delegaciones. La alerta amarilla se mantiene para Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Tlalpan, Coyoacán, Tláhuac, Xochimilco, Benito Juárez, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa y Venustiano Carranza” (Eje Central, 2017).

Las dos noticias mostradas dan cuenta de la vulnerabilidad con el cual viven distintas familias dentro de la alcaldía Álvaro Obregón. Es importante precisar que se muestran solo dos noticias periodísticas ante esta problemática, sin embargo, se invita al lector a consultar aún más registros en los diferentes sitios web de internet y así observar el crecimiento de estos acontecimientos geomorfológicos.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Antes de comenzar la metodología para el modelo de prevención, es prudente precisar que técnicamente se deberá contar con un dron lo suficientemente equipado para vuelos de fotogrametría profesional, mismos que cuentan con cámaras de alta resolución, esto para que la calidad de las imágenes, ya que el orto mosaico convertido posteriormente en formato *Raster* arrojará datos confiables, por otra parte se debe tomar en cuenta las características climatológicas como la hora del día y vientos que puedan afectar el vuelo. El equipo de cómputo debe ser lo suficientemente robusto en general en cuanto a sus características informáticas, esto para la obtención de datos e imágenes que necesitan los *softwares* de SIG Agisoft Photoscan, ArcGIS y QGIS, ya que el vuelo fotogramétrico a partir de drones puede presentar gran detalle que

necesita resoluciones de píxeles muy específicas, aunado que los SIG necesitan un almacenamiento de memoria suficiente, todo esto para no tener problemas en la obtención e interpretación de los datos finales. Por último, el trabajo empírico, mismo que sin duda es de gran importancia en cuanto a las entrevistas con los habitantes, el trabajo de fotointerpretación real y el contraste con la información obtenida en gabinete.

El vuelo fotogramétrico se generó obteniendo un error aproximadamente de 5 a 8 metros en la longitud, latitud o altitud, con trabajo empírico en cuanto a marcas con puntos de control, posteriormente estas fotografías se procesaron con el *software* Agisoft Photoscan, precisando que se voló un dron a una altura de 70 a 80 metros y para generar el modelo final se utilizaron los *softwares* ArcGIS y QGIS, mismos que se detallan más adelante.

Explicando de manera general la obtención del modelo, la primera parte de la metodología explica que, posterior a la toma de las fotografías, se genera un archivo *Raster* que detalla las características geomorfológicas del terreno. En una segunda parte, con el *software* ArcGIS, se genera una triangulación de red irregular, misma a la que se le resta la nueva triangulación de red irregular, lo cual se explicara a detalle a continuación. Este último paso da como resultado el modelo computacional completo.

Parte 1: Generación de modelo computacional con Software Agisoft Photoscan

Esta sección detalla la metodología para el desarrollo del modelo preventivo que explica el posible deslizamiento de tierra y sus repercusiones urbanas que se pueda generar en la zona de estudio, precisando la afectación de viviendas desde una perspectiva cuantitativa dando como resultado metros cúbicos (m³) de tierra desplazada.

Para una mejor comprensión, se muestra paso a paso la generación del modelo. Primero, y posterior al vuelo fotogramétrico, se generó una nube de puntos dispersa, misma que se generó a partir de la latitud, longitud y altitud al descomponer cada una de las fotografías obtenidas a partir del vuelo. Seguidamente, se obtiene la nube de punto densa, con base en el proceso del modelo que generó la nube de puntos dispersa (ver Figura 2).

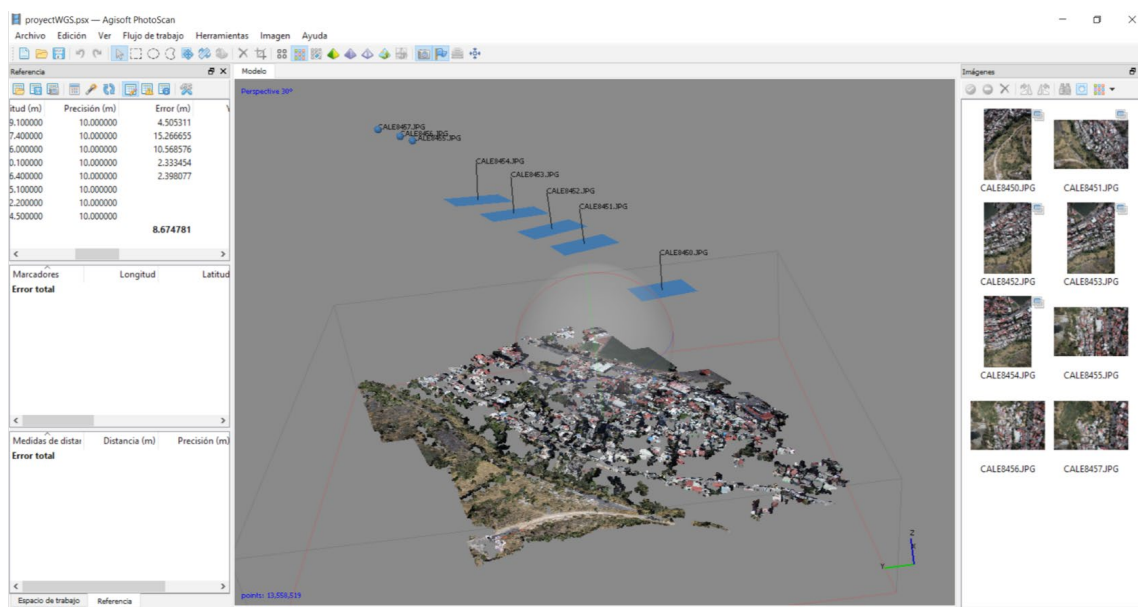


Figura 2. Impresión de pantalla con base en datos de fotogrametría con drones, Software Agisoft PhotoScan

Fuente: Autor, 2020

Con la nube de punto densa se obtiene la malla de color, misma que servirá para generar el píxeleado y detalle en cuanto a la fotointerpretación del modelo 3D o imagen *Raster*.

El siguiente paso es obtener la malla sombreada, misma que se obtiene del procesamiento de las tres mallas anteriores, lo cual da paso a la malla con textura.

Finalmente, el resultado será la malla con textura, la cual representa el modelo real del terreno también conocido como archivo *Raster* con extensión (tiff, dem, bil, geotiff), precisando que esta malla tiene un error de 5 a 8 metros en las tres vertientes mencionadas anteriormente, el cual podrá ser utilizado en cualquier programa de SIG (ver Figura 3). Es importante mencionar

que se observa el error total antes de poner los puntos de control directamente en campo el cual es 8.67 metros (ver Figura 3), mismo que se minimiza con la metodología que se mostrará a continuación utilizando el *software* ArcGIS y QGIS.

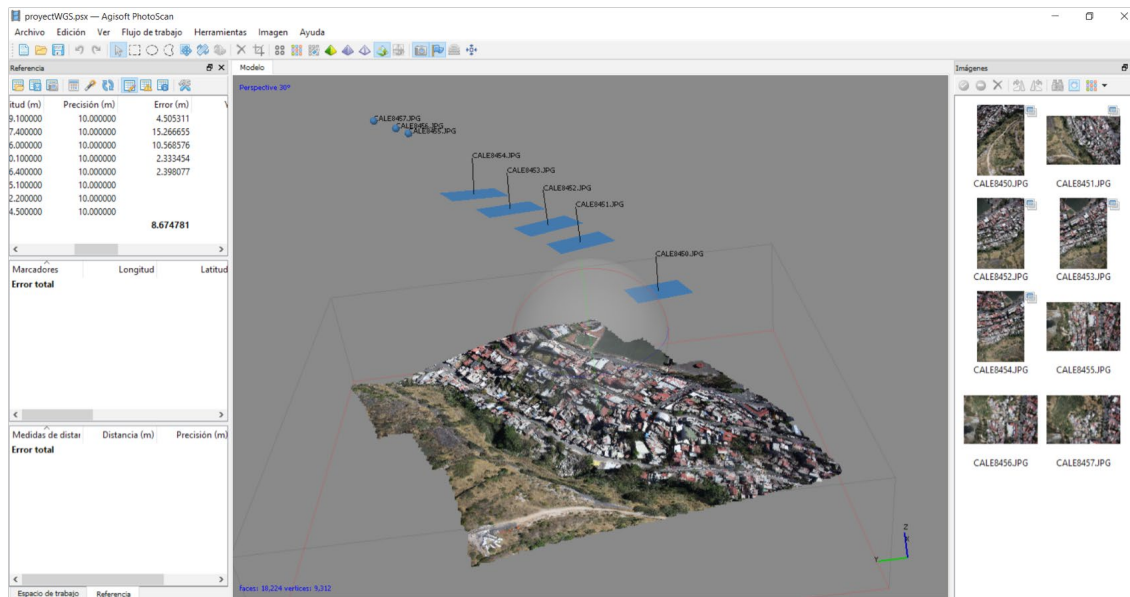


Figura 3. Impresión de pantalla con base en datos de fotogrametría con drones, Software Agisoft PhotoScan Fuente: Autor, 2020

Parte 2: Generación de modelo con Software ArcGIS, QGIS y aplicación de móvil GPS Essentials

Complementando lo anterior se realizó el trabajo de fotointerpretación, con apoyo de trabajo empírico en cuanto a las marcas o puntos de control, mismos que fueron obtenidos con el *software* GPS Essentials, integrado a un teléfono móvil marca Swiss Mobility (ver Figura 4), mismo que fue utilizado para guardar los puntos de control en archivo KMZ y posteriormente trasladados al *software* Agisoft Photoscan (ver Figura 5).

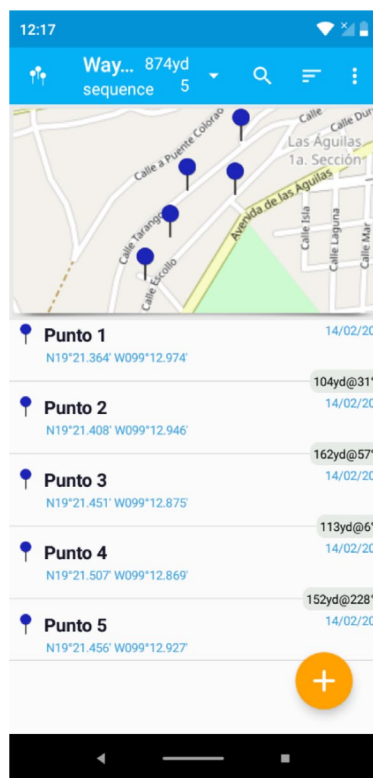


Figura 4. Impresión de pantalla para teléfono móvil, toma real de puntos de control con latitud y longitud, Software GPS Essentials Fuente: Autor, 2020

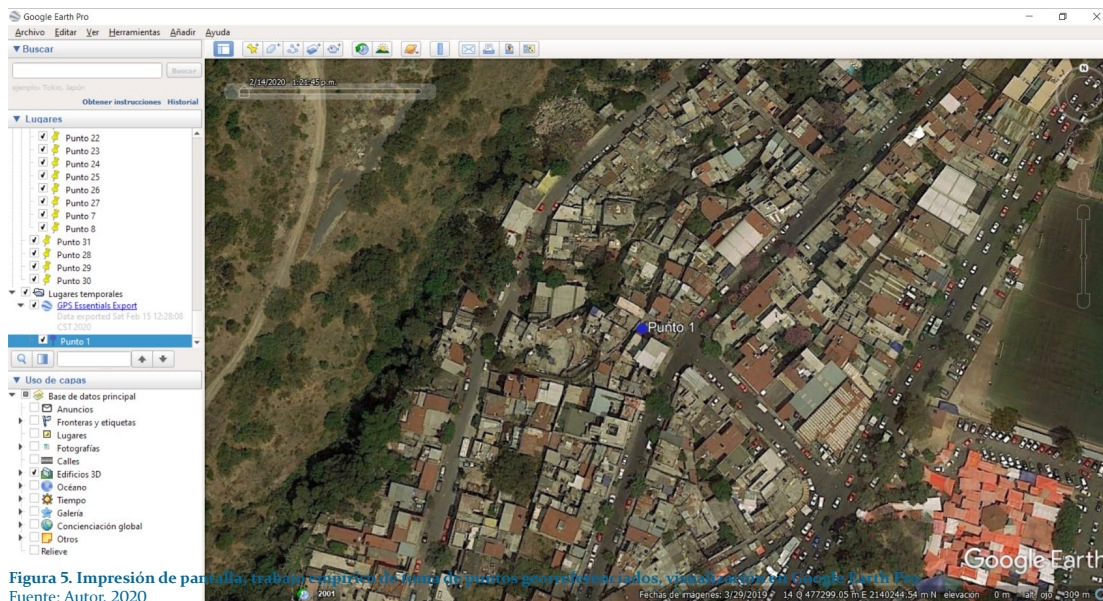


Figura 5. Impresión de pantalla, trabajo en punto 1 de zona de estudio geográfica, los virtualizados en Google Earth Pro. Fuente: Autor, 2020

Con base en lo anterior, el primer modelo consiguió generar una gráfica de perfil de la zona de estudio con base en la imagen *Raster*, misma que se realizó de sur a norte, donde se observa una mayor vulnerabilidad física para presentar deslizamientos de tierra, en el siguiente grafico se muestra un corte vertical sobre el terreno, generado con SIG (ver Figura 6).

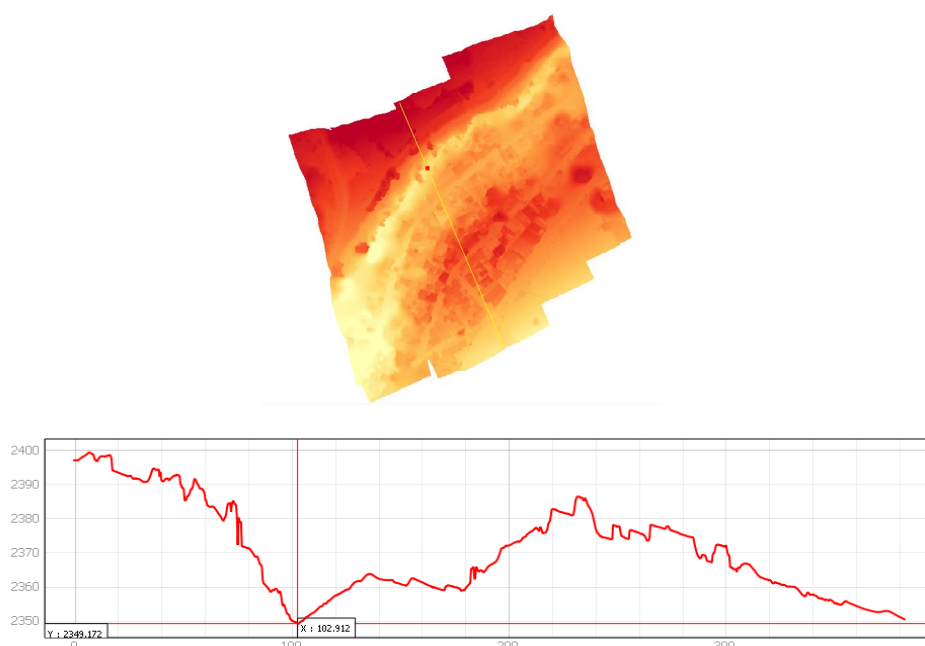


Figura 6. Zona de estudio, modelo digital de elevación (sur a norte) y perfil (izquierda a derecha) relacional, con QGIS. Fuente: Autor, 2020

El modelo *Raster* obtenido con el *software* Agisoft Photoscan se trasladó a ArcGIS para la creación de las curvas de nivel a cada 5 metros, el cual es utilizado para posteriormente generar el modelo con la interpolación mediante una triangulación de red irregular o TIN (*triangulation of the irregular network*) y generar el modelo preventivo ante un posible deslizamiento de tierra.

Así mismo, en el *software* ArcGIS se obtiene un ortomosaico con apoyo de fotointerpretación generada con Agisoft Photoscan, diferenciándose la zona de posible deslizamiento de tierra (ver Figura 7).

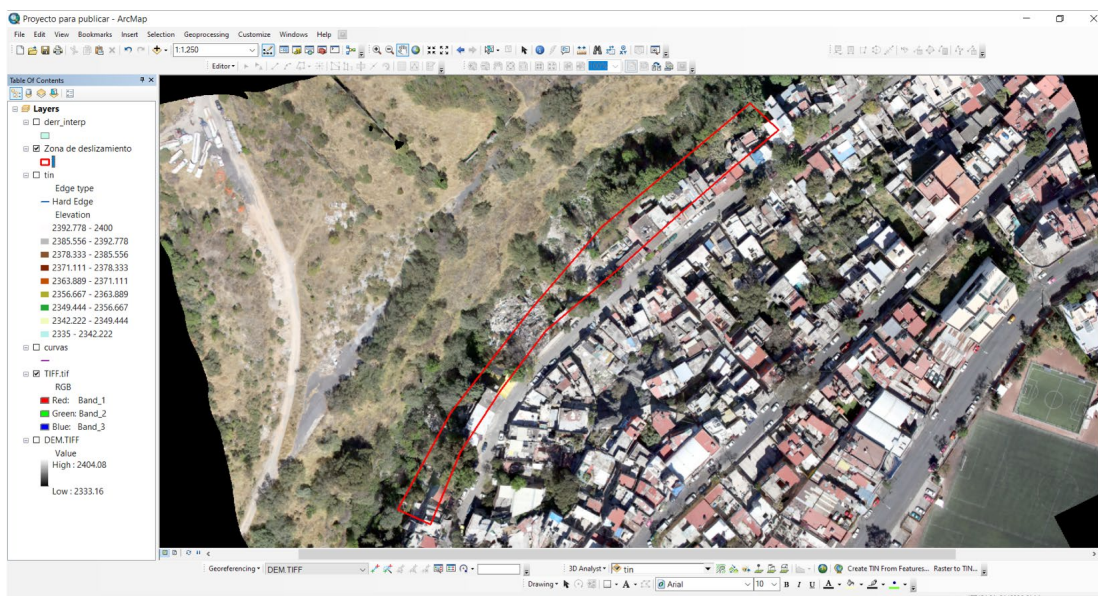


Figura 7. Impresión de pantalla, zona de estudio con posible deslizamiento de tierra

Fuente: Autor, 2020

Seguidamente, se generó la triangulación de red irregular, con base en las curvas de nivel obtenidas en el terreno y la zona de estudio (ver Figura 8).

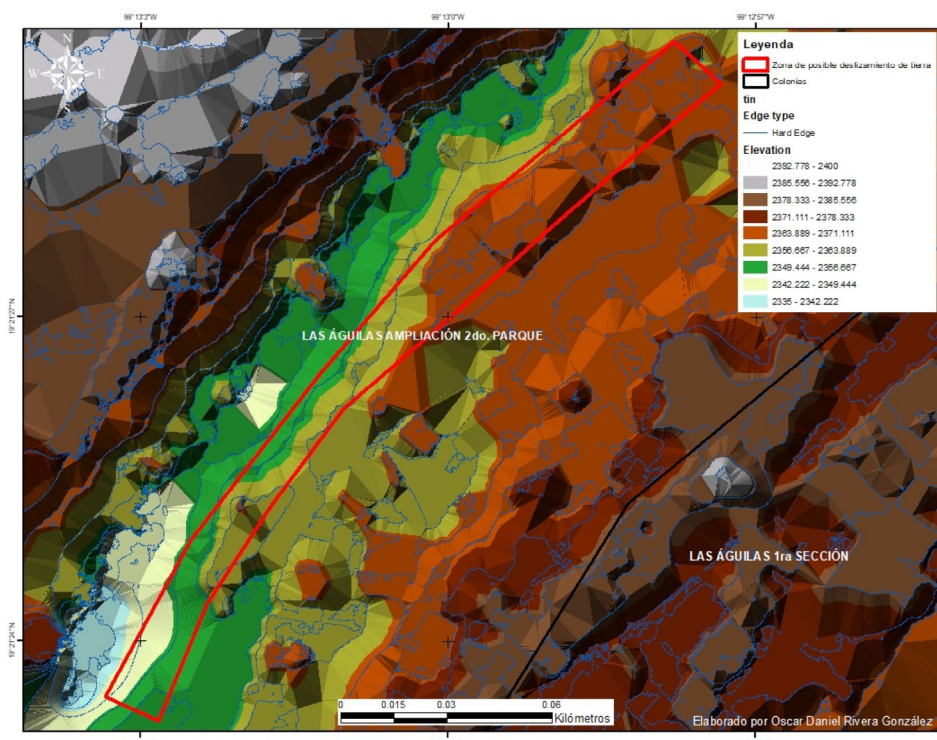


Figura 8. Triangulación irregular con base en curvas de nivel

Fuente: Autor, 2020

Posteriormente, se interpoló el *shape* o capa de la posible zona de derrumbe con la triangulación de red irregular, misma que se le resta a la zona de curvas de nivel obtenida a nivel general que es toda el área observable, obteniendo una nueva triangulación de red irregular que es la que en teoría se removió o existió un posible deslizamiento de tierra. En este punto se recomienda al lector observar el cambio de la geomorfología de la zona de estudio en la Figura 8 al contrastarla con la Figura 9.

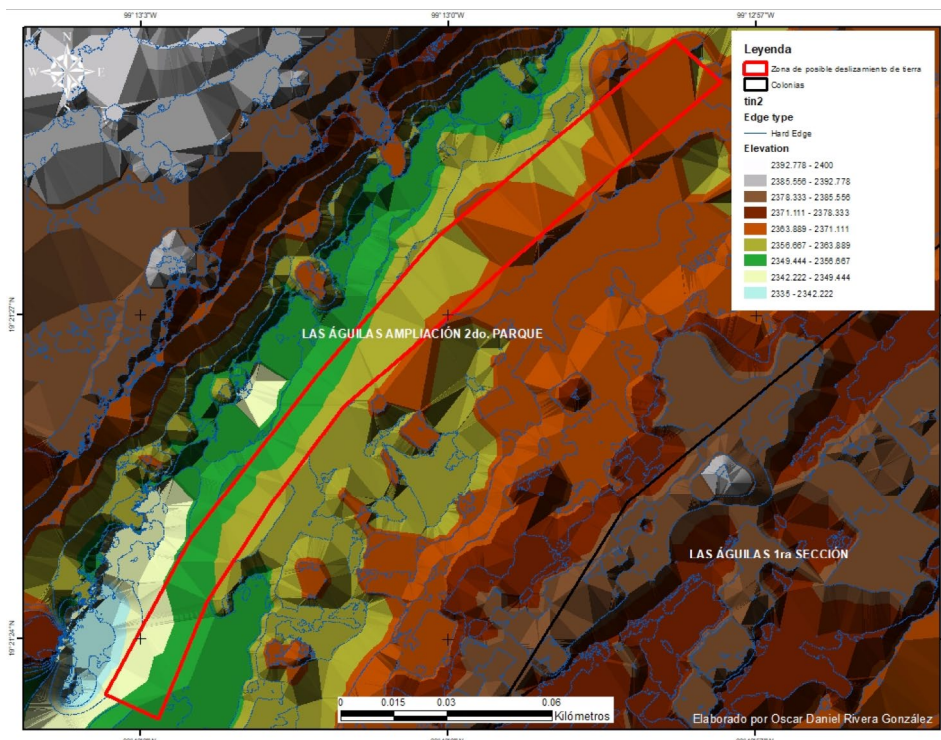


Figura 9. Triangulación irregular con base en curvas de nivel con afectación de inestabilidad de laderas
Fuente: Autor, 2020

Complementando la explicación anterior, se obtiene la diferencia de superficie al restar el total de la nueva triangulación de red irregular (en la cual existe deslizamiento de tierra) a la anterior triangulación de red irregular (la que no tiene deslizamiento de tierra), utilizando el *software* Surface Volume, la cual tiene como resultado un volumen de 4874.75 m³ (diferencia de volumen entre Figura 8 y Figura 9), misma que tiene un área inicial de 3810.23 m² y el posible lugar donde caerán los m³ de tierra con base en la geomorfología y topografía (ver Figura 10).



Figura 10. Resultado de la posible zona donde se presentará un deslizamiento de tierra
Fuente: Autor, 2020

Finalmente, se puede constatar y demostrar, con base en este modelo preventivo, en los resultados obtenidos con los SIG y puntos de control, así como el trabajo empírico, los siguientes hallazgos: El área inicial de zona de estudio sin afectaciones, incluyendo viviendas y área de riesgos es de 3810.23 m² (ver Figura 7 y 8). En un sentido urbano y real se verían afectadas 25 viviendas (de 90 a 100 personas), no obstante, no existiría afectaciones en viviendas en las partes bajas a la zona de estudio (ver Figura 9 y 10), mientras que el volumen total de afectación de deslizamiento de tierra sería de 4874.75 m³.

DISCUSIÓN

La metodología y sus resultados presentados se realizaron tomando en cuenta los asentamientos humanos informales en zonas marginadas donde la geomorfología se muestra demasiada accidentada, tomando en cuenta de igual manera la edafología, hidrología, topografía, zonas minadas, trabajo de campo y entrevistas con habitantes.

Es importante precisar algunas limitaciones de la metodología mostrada. Por ejemplo, el desarrollo del modelo computacional significa asumir un costo importante, el del dron y sus cámaras para fotogrametría, cuyo valor de compra puede oscilar alrededor de US\$2.000, o la renta de este alrededor de los US\$500. Sin embargo, la relación costo-beneficio es remuneradora, considerando que el grado de error de 5 a 8 metros es lo suficientemente preciso, novedoso y confiable para su costo. Aquí no se precisan los costos variables relacionados al personal y su capacitación, no obstante, estos costos se estiman menores que los que se requieren con métodos tradicionales. Otra limitación del estudio es que la propuesta metodológica para el desarrollo de un modelo preventivo no ha sido presentada a las autoridades locales o regionales, con el propósito de que éstas evalúen, bajo sus criterios y necesidades, la factibilidad de este nuevo método de trabajo para la evaluación de riesgos. Aunque esto no es un pre-requisito para considerar el valor de esta propuesta, el someter a prueba esta metodología en un proceso real de toma de decisiones e intervención, le daría mayor robustez y quizás se aprenderían nuevas lecciones.

En cualquier caso, el modelo resultante propone una forma eficiente que bien puede servir para apoyar acciones de mitigación del riesgo de deslizamiento en la zona. Tales acciones pueden incluir, o no, la reubicación de las familias con alto grado de vulnerabilidad, entre otras medidas. En el caso de reubicación u otras intervenciones en el área de estudio, es donde las diferentes secretarías del Estado, en cualquiera de sus niveles de gobierno, necesitan gestionar con mucha precisión la posible implementación de medidas considerando las zonas de riesgo detectadas, pero por sobre todo con una gestión social del riesgo, que considere la concientización de los pobladores sobre las posibles afectaciones que podrían sufrir sus viviendas al momento de un derrumbe.

Por ultimo, este modelo podría ser replicado en otras zonas de la CDMX en las cuales también se han presentado deslizamientos de tierra con víctimas fatales, mismas zonas que muestren características similares a la zona de estudio como lo son la edafología, hidrografía, geomorfología, geología, entre otras, inclusive podría ser replicable el modelo de prevención obtenido en otros lados de la República Mexicana y en otras partes del mundo.

AGRADECIMIENTOS

Cecilia San Agustín Cristóbal, Valeria Liliana González Gallegos, Oscar Pineda Duran y a Kristoff Pineda González.

REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, (41), 7-25. <http://ref.scielo.org/g9fg4z>
- Fariña, J. (2013). *Manual de Diseño Bioclimático Urbano*. Lisboa: Editorial Instituto Politécnico de Bragança.
- Gupta, S.K. & Shukla, D.P. (2018). Application of drone for landslide mapping, dimension estimation and its 3D reconstruction. *J Indian Soc Remote Sens*, (46), 903-914. <https://doi.org/10.1007/s12524-017-0727-1>
- Jacobs, J. (2011). *Muerte y Vida de las grandes ciudades*. Madrid: Editorial Capitán Swing.
- Oliver-Smith, A., Alcántara-Ayala, I., Burton, I. & Lavell, A. (2016). *Investigación Forense de Desastres (FORIN): Un marco conceptual y guía para la investigación*. Ciudad de México: Integrated Research on Disaster Risk (IRDR) & Instituto de Geografía, UNAM.

- Periódico Eje Central. (2017). Derrumbe de barranca daña primaria en A. Obregón.
Periódico Eje Central [periódico online]. Recuperado de: <https://www.ejecentral.com.mx/alerta-amarilla-3-delegaciones-preven-caida-de-granizo/>
- Periódico José Cárdenas. (2015). Álvaro Obregón: 976 puntos en riesgo de deslave. *Periódico José Cárdenas* [periódico online]. Recuperado de: <https://josecardenas.com/2015/05/alvaro-obregon-976-puntos-en-riesgo-de-deslave/>
- Ruiz, N. (2012). La definición y medición de la vulnerabilidad social. Un enfoque normativo. *Investigaciones Geográficas*, (77), 63-74. <http://ref.scielo.org/q3xyyr>
- Maskrey, A. (1993). *Los Desastres No son Naturales*. Puerto Limón, Costa Rica: La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.