

Geomorfometría y cálculo de erosión hídrica en diferentes litologías a través de fotogrametría digital con drones

Geomorphometry and water erosion rates in different lithologies through digital photogrammetry with drones

Gonzalo Fernández de Castro Martínez,* Lorenzo Vázquez Selem,** José Luis Palacio Prieto,** Armando Peralta Higuera*** y Arturo García Romero**

Recibido: 25/08/2017. Aprobado: 13/12/2017. Publicado en línea (e-print): 18/06/2018.

Resumen. En esta investigación se pone a prueba la fotogrametría digital con drones cuyos objetivos son conocer el modelado erosivo del paisaje a través de análisis geomorfométricos a gran detalle y cuantificar tasas de erosión en volumen ($m^3/\text{área}$) y masa ($t/\text{área}$) en diferentes litologías. Para ello se estudiaron la longitud, el área de captación y la disección vertical de los escurrimientos de tres tipos contrastantes de rocas sobre una misma ladera en el valle de Yanhuitlán, Oaxaca: arcillas lacustres, cenizas volcánicas litificadas y lavas andesíticas. A partir de la hipótesis de que el tipo de erosión en rocas depende del tipo litológico, los resultados muestran una mayor incisión en las arcillas, mayores áreas de captación en las cenizas volcánicas y escurrimientos de menor tamaño en la andesita, la roca más resistente. Del mismo modo, se obtuvieron resultados de pérdida de volumen en el periodo de lluvias (mayo-octubre) de 2016, los cuales están asociados a los valores que muestran los parámetros geomorfométricos en cada formación litológica. Este trabajo compara la manera en que la erosión hídrica modela diferentes formaciones litológicas bajo condiciones similares y la forma en que la fotogrametría digital de alta resolución, a partir de fotografía aérea tomada con drones, es una herramienta válida para calcular tasas de erosión.

Objetivos. Los objetivos de este trabajo son analizar la manera en que la erosión modela diferentes litologías y calcular la tasa de erosión en volumen ($m^3/\text{área}$) y masa ($t/\text{área}$) en tres litologías diferentes en el valle de Yanhuitlán, Oaxaca. Para ello se levantó un modelo digital del terreno de alta resolución (10 cm) de una ladera de 200 m de longitud con similares condiciones de pendiente, orientación, clima y cubierta vegetal, sobre la cual se analizó la morfometría del terreno y la tasa de erosión en volumen, así como la masa antes y después de las lluvias. Las tres litologías son las siguientes.

- 1) Formación Yanhuitán: capas arcillo-limosas con poca consolidación de origen y la menor dureza categoría 1 (USDA, 2012). Tipo de erosión: cárcavas.
- 2) Toba Llano de Lobos: tobas riódacíticas y andesíticas con intercalaciones de calizas en una matriz arenosa con una dureza categoría 3 (USDA, 2012). Tipo de erosión: laminar.
- 3) Andesita Yucudaac: derrames lávicos andesíticos con alto grado de intemperismo a través de sus fisuras con dureza categoría 5 (USDA, 2012). Tipo de erosión: surcos.

* Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Copilco, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. Email: gonfermar@comunidad.unam.mx

** Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Copilco, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. Email: lselem@igg.unam.mx, palacio@unam.mx

*** Laboratorio de Análisis Espacial. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Copilco, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. Email: aperalta@igg.unam.mx, agronero@igg.unam.mx

Material es y métodos

- 1) Levantamiento fotogramétrico con dron de un Modelo Digital de Superficie (MDS) de alta resolución (10 cm).
- 2) Análisis hídrico superficial del MDS en formato shape con la herramienta Watershed en Global Mapper 16, tanto de los escurrimientos como de su área de captación, los cuales fueron analizados por litología en parcelas de 50 x 50 m establecidas en zonas sin vegetación.
- 3) En el software ArcGIS 10.2 se analizaron cuatro parámetros morfométricos: longitud de los escurrimientos o cauces, área de captación de los escurrimientos, disección vertical y densidad de disección, así como los órdenes de drenaje que se forman por litología.
- 4) Cálculo de pérdida de erosión en volumen y masa a través de la sobreposición de modelos en dos fechas: 16 de mayo de 2016 y 25 de septiembre de 2016, con una precipitación de 532 mm.

Resultados

- 1) Las arcillas de la formación Yanhuitlán son el material más deleznable (erosionable), por su escasa consolidación, con mayores índices de densidad de disección y disección vertical. Por ello también tiene el mayor número de cuencas de captación de mínimo tamaño. Se diferencia ampliamente de las demás litologías por

una tasa de pérdida de volumen entre 380-492 m³/ha y masa de 532-689 t/ha.

- 2) La toba es la que mayor superficie de captación genera para los escurrimientos y menor densidad de disección. Su tasa de erosión en volumen se sitúa entre 100-128m³/ha y 110-141 t/ha.
- 3) La andesita, la roca más dura, tiene la menor disección vertical, con una tasa de erosión en volumen de 37.48-48 m³/ha y en masa de 92-118 t/ha/año.

Si se extrapolan estos datos al periodo anual con base en el total de lluvia en 2016 (699 mm), resultan tasas de 701-898 t/ha/año para la formación Yanhuitlán, 143.4-183.9 t/ha/año para la toba y 128.4-164.6 t/ha/año para la andesita.

Conclusiones. Con levantamientos multitemporales por medio de fotogrametría digital con drones es posible cuantificar la erosión real (no estimada) en volumen y masa de una unidad litológica, así como analizar la dinámica geomorfométrica de la erosión. Por tanto, este método contribuye a estudios de erosión en cuencas más integrales, precisos y realistas, que incluyen el análisis de la evolución de laderas, válido para estudios de análisis de riesgo.

Palabras clave: Geomorfometría, erosión, fotogrametría, drones, modelado del paisaje.

Abstract. This study tests drone-assisted digital photogrammetry aimed at determining the erosive modeling of the landscape through detailed geomorphometric analysis and quantify erosion rates in volume (m³/area) and mass (ton/area) in different lithologies. To this end, we studied runoff length, catchment area, and vertical profile of three contrasting rock types on the same hillside in the valley of Yanhuitlán (Oaxaca): lacustrine clays, lithified volcanic ash, and andesitic lavas. Based on the assumption that the type of erosion in rocks depends on the lithologic type, our results show a larger incision in clays, larger catchment areas in volcanic ashes, and smaller runoff in andesites -- the most resistant type of the rocks studied. Likewise, the loss of volume in the rainy season (May to October) of 2016 are associated with the magnitude of the geomorphometric parameters in each lithological formation. This work compares how erosion models different lithological formations under similar conditions, and how high-resolution digital photogrammetry from drone-assisted aerial photography is a valid tool for calculating erosion rates.

Objectives The objectives of this study are to analyze how erosion models different lithologies, and to calculate the erosion rate in volume (m³/area) and mass (ton/area) in three different lithologies in the valley of Yanhuitlán (Oaxaca). To this end, a high-resolution (10 cm) digital terrain model was constructed of a 200-m long hillside showing homogeneous features in terms of length, slope, orientation, climate, and vegetation cover, on which we analyzed the

morphometry of the terrain and the erosion rate (volume and mass) before and after rains. The three lithologies are the following.

- 1) Yanhuitan Formation: poorly consolidated clayey-silty layers with the lowest hardness, category 1 (USDA, 2012). Erosion type: ravines
- 2) Llano de Lobos Tuff: Riodacitic and andesitic tuffs interbedded with limestone in a sandy matrix; hardness category 3 (USDA, 2012). Erosion type: laminar
- 3) Yucudaac Andesite: Andesitic lava spills with a high degree of weathering through its cracks; hardness category 5 (USDA, 2012). Erosion type: gullies.

Materials and Methods

- 1) Photogrammetric survey with a high-resolution (10 cm) Digital Surface Model (DSM) drone (DSM).
- 2) Surface water analysis of the DSM in shape format with the WATERSHED tool in GLOBALMAPPER 16, both of runoff and the respective catchment area; these were analyzed by lithology in 50x50-m plots placed in areas with no vegetation.
- 3) Four morphometric parameters were analyzed In the software ARCGIS 10.2: runoff or channel length, runoff catchment area, vertical dissection and dissection density, as well as the ranks of drainage formed by lithology.
- 4) Calculation of loss of soil by erosion, in volume and mass, through the overlapping of the models in two

dates: 16 May 2016 and 25 September 2016, with a precipitation of 532 mm.

Results

- 1) Clays from the Yanhuítlán formation are the most friable (erosion prone) material due to their poor consolidation, with higher dissection density and vertical dissection rates. For this reason, it also has the largest number of catchments of minimum size. It differs broadly from all other lithologies, with a volume loss rate of 380-492 m³/ha and a mass loss rate of 532-689 ton/ha.
- 2) The tuff shows the largest runoff catchment area and the lowest dissection density. Its erosion rate ranges between 100-128m³/ha and 110-141 ton/ha.
- 3) Andesite -- the hardest rock -- has the lowest vertical dissection, with an erosion rate of 37.48-48 m³/ha and 92-118 ton/ha/year.

INTRODUCCIÓN

La erosión de suelos en México, calculada con el método Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Universal Soil Loss Equation [USLE]) (Wischmeier y Smith, 1960), varía entre 492 y 1296 t/ha/año (Maass, 1998). La clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés) para el USLE reúne las tasas superiores a 250 t/ha/año en un mismo rango como el valor máximo (erosión extrema), y de este modo se han registrado en los trabajos realizados en México. El mapa nacional de erosión potencial de México (Montes *et al.*, 2011) establece más de 64% del territorio mexicano en este rango. Pablo (2014) calcula tasas de erosión con el método USLE en esta misma cuenca, con valores medios para cada atributo, propuestos por diferentes autores, para México, que establecen sobre la formación Yanhuítlán los valores máximos de erosión (superiores a 250 t/ha/año).

La erosión es un proceso sumamente complejo de analizar y ha sido estudiada (principalmente en suelos) con diferentes metodologías y modelos desde la década de 1950 hasta hoy, como la USLE (Wischmeier y Smith, 1960), el Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Sys-

The extrapolation of these data to obtain annual data based on total precipitation in 2016 (699 mm) yields rates of 701-898 ton/ha/year for the Yanhuítlán formation, 143.4-183.9 t/ha/year for tuff, and 128.4-164.6 t/ha/year for andesite.

Conclusions Multi-temporal surveys by digital photogrammetry with drones allow the quantification actual (not estimated) erosion of a lithological unit, in volume and mass, and the analysis of the geomorfometric dynamics of erosion. Therefore, this method contributes to conduct more comprehensive, accurate and realistic studies on erosion, including the analysis of the evolution of hillsides, which are valid for risk analysis.

Key words: Geomorphometry, erosion, photogrammetry, drones, landscape modeling

tems - CREAMS- (Knisel, 1980) o el Water erosion Prediction Project -WEPP- (Nearing *et al.*, 1989) aplicados principalmente en terrenos agrícolas para analizar la erosión laminar y en surcos; no obstante, éstos no se pueden aplicar sobre superficies sin suelo. El caso de la erosión en cárcavas tampoco presenta modelos matemáticos de estimación y tiene que medirse mediante la utilización de métodos directos sobre el terreno. En México, los primeros trabajos de estudios de erosión acelerada en cárcavas con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), como herramienta de cartografía digital, se realizaron en los años noventa (Bocco, 1991, Palacio y Vázquez, 1990). Es también en estos años cuando se llevó a cabo el primer trabajo de fotogrametría digital para análisis de erosión en cárcavas en dos dimensiones con el uso de un globo de helio, como vehículo aéreo no tripulado (*Unmanned Aerial Vehicle* [UAV]), equipado con una cámara para evaluar la dinámica regresiva de cárcavas en varias fechas, con lo cual se obtuvieron resultados satisfactorios (Palacio, 1990).

La erosión hídrica de una formación litológica depende de factores exógenos (clima y cubierta vegetal) y factores endógenos (densidad aparente, permeabilidad-saturación, dureza, pendiente). El agente externo fundamental es la precipitación, la cual tiene una fuerza erosiva diferencial según su intensidad y duración (Palacio y Vázquez 1990); los factores internos proporcionan la erodabilidad de cada formación. Uno de los intereses de esta in-

vestigación es mostrar cómo la fotogrametría digital puede resolver el problema del cálculo de erosión en zonas carentes de suelo, donde la USLE no se puede aplicar. Esto es de suma importancia para los estudios de erosión en esta zona de cárcavas, ya que es la que aporta mayores tasas de sedimentos.

La fotogrametría digital ha avanzado mucho desde entonces, tanto en *software* como en *hardware*, en obtención, procesamiento y producción de productos derivados de la fotografía digital, como los Modelos Digitales de Superficie (MDS) de alta resolución, pero, sin duda, el uso de drones para este fin ha supuesto toda una revolución, no sólo porque hace posible la adquisición ilimitada de fotografía aérea en tiempo y forma a bajo costo, sino también el desarrollo de la tercera dimensión en los MDS, lo que permite cálculos de volumen en los análisis del terreno (Stöcker, Eltner y Karrasch, 2015; Gómez-Gutierrez *et al.*, 2014; Frankl *et al.*, 2015; Eltner, 2013). Estos MDS de alta resolución se producen a partir de nubes de puntos con información XYZ generada por los *softwares* fotogramétricos. Dichas nubes de puntos se obtienen a partir de estereoscopia con las fotos aéreas, a diferencia de las que se generan con Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging (Lidar) a través de láser. Ambas tecnologías tienen sus limitaciones a la hora de trabajar en zonas con vegetación. Si bien el láser ofrece mejores resultados al atravesar el follaje, ninguno de los dos ofrece un resultado satisfactorio para nuestro objetivo por la falta de densidad en las nubes de puntos bajo el follaje, por ello este trabajo se realiza en zonas sin vegetación. La ventaja de la fotogrametría digital de alta resolución con respecto a Lidar en el resto de superficies es el menor costo económico en la obtención de datos.

El uso de drones para estos fines es algo relativamente nuevo. Las primeras imágenes aéreas de vehículos no tripulados con radiocontrol para fines científicos fueron tomadas en 1979 (Przybilla y Wester-Ebbinghaus, 1979), pero no será hasta el siglo XXI cuando se desarrollen los que hoy conocemos como drones y comiencen los primeros trabajos científicos. En 2004 se publicaron los tres primeros artículos relacionados con mapeo fotogramétrico con drones en el *ISPRS Journal of*

Photogrammetry and Remote Sensing, y en 2008 empezó a ser tendencia con 21 artículos (Remondino *et al.*, 2011). A partir de este año se amplió el uso de drones para múltiples fines científicos. La aplicación para estudios de geomorfometría y erosión fue creada a comienzos de la segunda década de este siglo (Eltner *et al.*, 2016).

SFM (STRUCTURE FOR MOTION)

La fotogrametría clásica se basa en el principio de estereoscopia a través de imágenes aéreas con más de 60% de sobreposición, con el que se generan modelos digitales del terreno. No obstante, para poder establecer estudios de cambio superficial multitemporal, los métodos fotogramétricos tradicionales requerían muchos ajustes técnicos de orientación de las imágenes, tanto en la toma como en el procesamiento de datos, los cuales no llegan a ofrecer precisión y confianza en los resultados (Eltner, 2016; Stöcker *et al.*, 2015). La técnica Structure for Motion (SfM) (Ullman, 1979) permite solventar estos ajustes de orientación de manera automatizada y confiable en los actuales *softwares* fotogramétricos. Con el desarrollo tecnológico de los drones, el geoposicionamiento de cada fotografía ya es automático, no sólo en coordenadas XYZ, sino también en $\omega \phi \kappa$ (valores de rotación del eje del aparato que pueden afectar cada fotografía), lo que asegura la correcta geometría de los modelos por medio de los puntos coincidentes en las fotos. El SfM permite, por tanto, posicionar un modelo sobre otro con el conocimiento de que la geometría de ambos ya ha sido rectificadas por el *software* fotogramétrico. El uso de dicha técnica es de vital importancia en esta investigación porque elimina el error geométrico en los modelos 3D.

OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo son analizar la manera en que la erosión modela diferentes litologías y calcular la tasa de pérdida en volumen ($m^3/area$) y masa ($t/area$) en tres litologías diferentes en el valle de Yanhuitlán, Oaxaca. Para ello se levantó

un modelo digital del terreno de alta resolución (10 cm) de una ladera con 200 m de longitud con similares condiciones de pendiente, orientación, clima y cubierta vegetal, sobre la cual se analizó la morfometría del terreno antes y después de las lluvias, con lo que se pudieron calcular, al mismo tiempo, los cambios en volumen y la masa perdida.

ÁREA DE ESTUDIO

Para poner a prueba los métodos planteados en esta investigación, se eligió un sector del valle de Yanhuitlán, situado en la Mixteca Alta, una región geográficamente diversa en el oeste de Oaxaca y áreas de los estados vecinos de Puebla y Guerrero, al sureste de México. Esta es una zona de contacto

entre la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre Oriental, con una topografía de montañas medias y amplios valles con laderas fuertemente erosionadas (Palacio *et al.*, 2016). No obstante, la erosión no sigue patrones similares en estas laderas, con diferencias en profundidad de disección, densidad de disección y patrón de la red de escurrimientos, lo que produce un modelado erosivo diferente en cada formación litológica. Debido a estos contrastes y a la intensa dinámica geomorfológica, este escenario es ideal para los objetivos de esta investigación.

El clima de la cuenca de Yanhuitlán es templado subhúmedo (Cw1), de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (2004) para México, con una temperatura media anual de 15 °C y una precipitación media anual de 633 mm (según datos de la Estación Climatológica

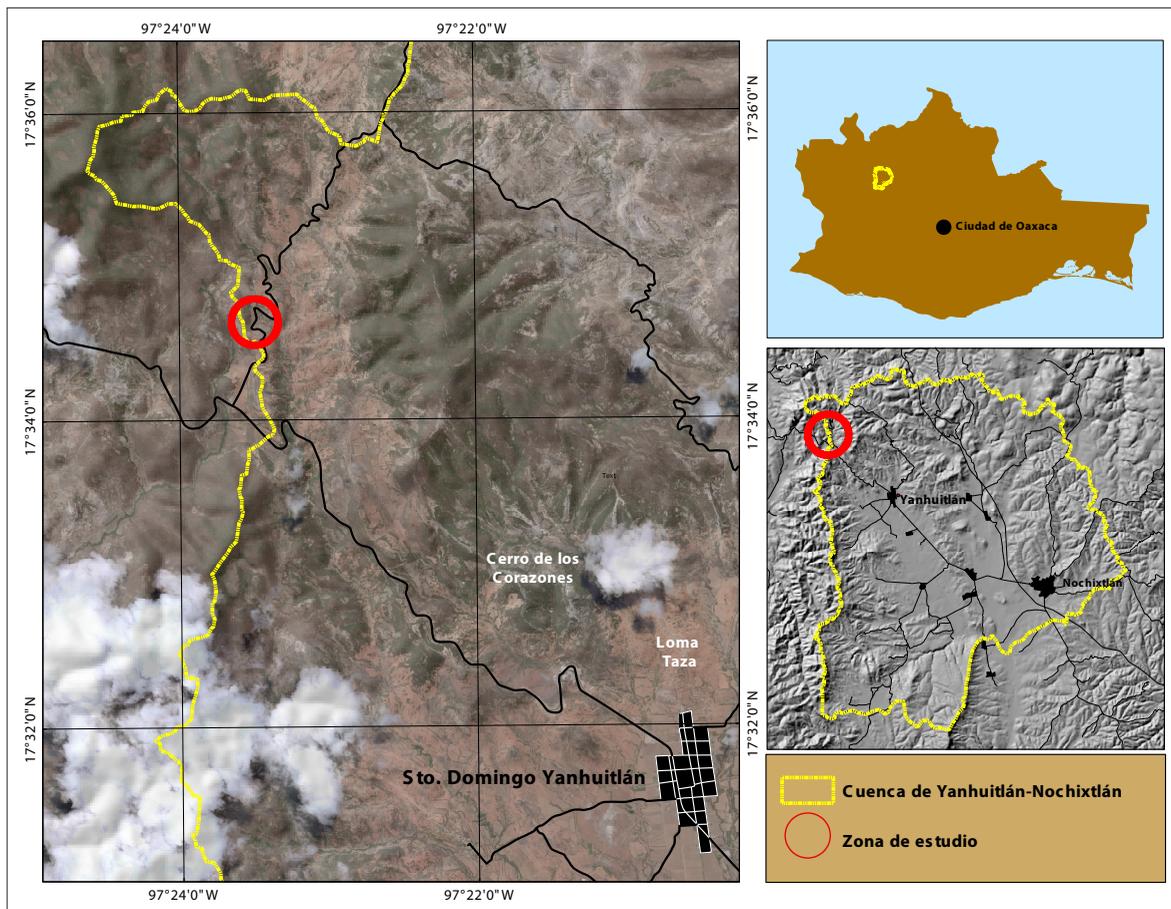


Figura 1. Localización del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias [INIFAP] en Santo Domingo Yanhuitlán), con lluvias concentradas en verano y un periodo de canícula marcado de julio a agosto. La vegetación es, en su mayor parte, secundaria, debido al sobrepastoreo y/o al cambio de uso del suelo por agricultura y ganadería. Predomina el chaparral y el pastizal inducido con algunos relictos de bosque de táscate en la parte baja e intermedia de la cuenca y bosque de encino-pino perturbado en las partes altas de la cuenca con algunos relictos primarios. No obstante, este intenso uso ha causado la pérdida total de suelo y vegetación en muchas zonas de la cuenca, donde hoy día se produce una intensa erosión de la roca madre, objeto de este estudio.

La geología del valle de Yanhuitlán comprende principalmente tres litologías de diferente naturaleza, cuyas edades están comprendidas entre el

Eoceno y el Cuaternario (Figura 2). Por orden de antigüedad son las siguientes.

- 1) La formación Yanhuitlán es una sucesión de finas capas rítmicas arcillo-limosas. Los sedimentos fueron depositados en ambientes lacustres durante el Eoceno, cuya edad estimada es de 40.5 ± 1.7 Ma (Martiny *et al.*, 2000) con base en fechamientos de las intrusiones magmáticas de la formación Yanhuitlán. Es la formación litológica que se espera más deleznable, debido a su escasa consolidación de origen. El tipo de erosión de esta formación es en cárcavas. El test de dureza (USDA, 2012) practicado en campo reportó categoría 1 (0.60-1.25 MPa); puede romperse con el dedo.
- 2) La toba Llano de Lobos cubre la formación Yanhuitlán. Está conformada por secuencias de tobas riódacíticas y andesíticas con intercalaciones de calizas en una matriz arenosa. Su

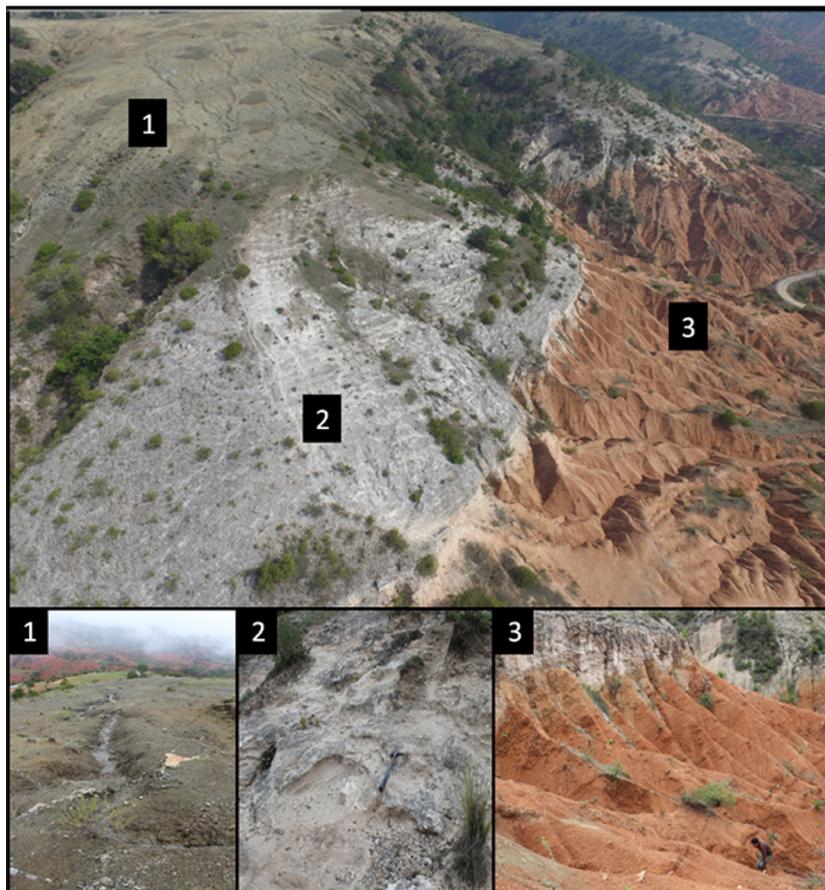


Figura 2. Formaciones litológicas dominantes en la cuenca de Yanhuitlán: andesita Yucudaac (1), toba Llano de Lobos (2) y formación Yanhuitlán (3). Elaboración propia Fuente: Gonzalo Fernández de Castro Martínez.

edad se estima entre 40.5 ± 1.7 Ma y 28.9 ± 0.6 Ma, por relaciones estratigráficas (Santamaría-Díaz *et al.*, 2008). El tipo de erosión de esta formación es laminar, con una dureza categoría 3 (5-12.5 MPa); los fragmentos pueden ser rotos con la mano (USDA, 2012).

- 3) La andesita Yucudaac, de origen volcánico, sobreyace discordantemente en la toba Llano de Lobos y tiene una edad estimada inferior a 28.9 ± 0.6 Ma (Ferrusquía-Villafranca, 1976). Se trata de una serie de derrames lávicos andesíticos de color gris oscuro o negro, con un alto grado de intemperismo a través de sus fisuras. El tipo de erosión de esta formación es en surcos o regueros, con una dureza categoría 5 Hard Rock (50-100 MPa); se necesitan varios golpes para romper y puede ser rayada con una aguja (USDA, 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Levantamiento fotogramétrico con dron

- 1) Con un dron Phantom 3 se realizó un vuelo fotogramétrico tipo POI (*Point of Interest*), que consiste en elegir un punto central sobre el cual volar, con una altura y radio determi-

nados, para realizar fotografías aéreas oblicuas con una sobreposición suficiente para poder generar la nube de puntos a partir de estereoscopia.

En este caso se realizaron dos vuelos similares a 120 m de altura y 150 m de radio del punto central, con lo que se obtuvo un total de 68 fotos con más de 60% de sobreposición (Figura 3).

- 2) Una vez realizado el trabajo en campo, se procedió a la descarga e inclusión de las imágenes al *software* fotogramétrico Pix4D. Éste reconoce los datos técnicos de la cámara que soporta el dron, tanto la geolocalización de cada foto como las variaciones en $\omega \phi \kappa$ producidas por el movimiento de la aeronave, que vienen incluidas en los metadatos de las fotos. Con este *software* se obtuvo la nube de puntos en formato LAS (Lidar) a partir de la estereoscopia digital obtenida de los diferentes ángulos de visión de un mismo punto en cada fotografía aérea.
- 3) Una vez obtenida la nube de puntos en formato, LAS se incluyó en el *software* Global Mapper 16, con el que se generaron los MDS en formato *raster* a resolución de 10 cm/pixel. Estos MDS se generan a través de la triangulación de estos puntos con el método de triangulación de

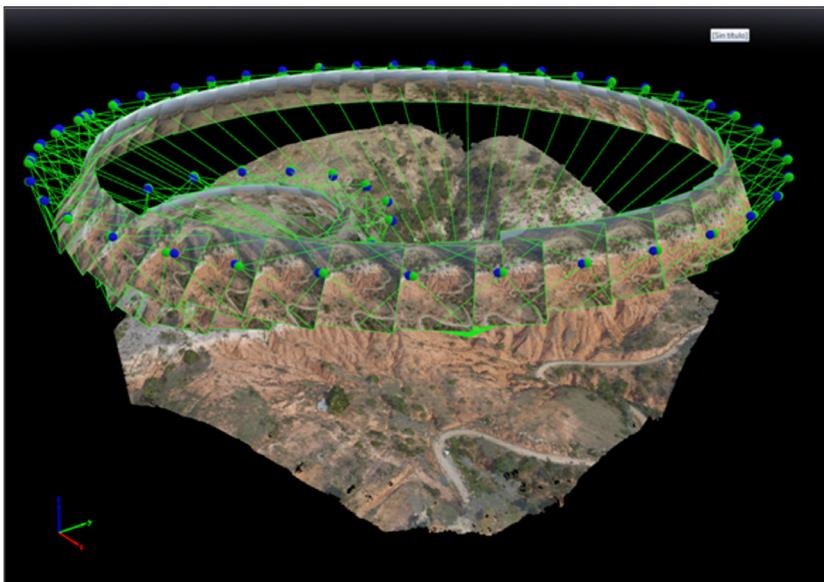


Figura 3. Vuelo tipo POI. Fuente: elaboración propia.

- redes irregulares (TIN, por sus siglas en inglés), donde se elige la opción minimum digital surface que toma el valor mínimo de los puntos en la nube.
- 4) Al MDS se le generó un análisis hídrico superficial en formato *shape* con la herramienta Watershed en Global Mapper 16, tanto de los escurrimientos como de su área de captación, los cuales fueron analizados por litología en parcelas de 50 x 50 m establecidas en zonas sin vegetación (Figura 4).
 - 5) Posteriormente se incluyeron las coberturas de escorrentía superficial en el *software* ArcGIS 10.2, con el que se analizaron diversos parámetros morfométricos: longitud de los escurrimientos o cauces, área de captación de los escurrimientos, disección vertical y densidad de disección, así como los órdenes de drenaje que se forman por litología. Los cálculos de estos parámetros se realizaron por parcelas de 50 x 50 m y por m².

Dureza y densidad de las rocas

La dureza de las rocas fue determinada en campo con la metodología y terminología del United States Department of Agriculture (USDA, 2012) en referencia al comportamiento por el golpeo de un martillo geológico. Los valores están referidos en megapascales (MPa).

Se determinó la densidad aparente de las rocas con objeto de cuantificar la masa real que se pierde

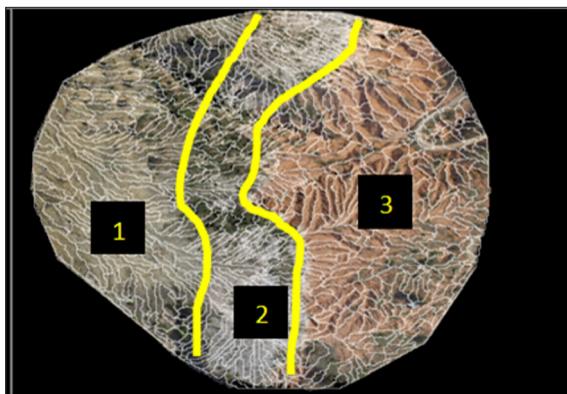


Figura 4. Escurrimientos, áreas de captación y zonas de muestreo: andesita (1), toba (2) y arcillas (3). Fuente: elaboración propia.

por erosión con base en el volumen calculado. Se aplicaron dos métodos diferentes de laboratorio según la dureza de cada tipo litológico. En el caso de rocas blandas, se introdujo un cilindro metálico de 100 cm³ de volumen directamente en la superficie, luego se secó el material extraído en un horno a 100° durante 24 horas y se obtuvo su masa en seco; la densidad se determinó a partir de la masa seca y el volumen del cilindro. En el caso de la andesita, al no ser posible introducir el cilindro por su dureza, se calculó mediante la inmersión en agua de una muestra seca de roca previamente recubierta con barniz para evitar la saturación de los poros, observando el volumen desplazado por la roca al introducirla en una probeta milimetrada.

La literatura presenta valores de densidad de este tipo de rocas entre 2.07-2.49 g/cm³ para las andesitas, 1-1.3 g/cm³ para las tobas y 0.8-1.6 g/cm³ para las arcillas redepositadas (*mudstones*) (Paniukov, 1981; USDA, 2012).

Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE en inglés)

Los valores para la USLE fueron calculados con la metodología de Wischmeier y Smith (1960). Los valores de erodabilidad fueron estimados en campo mediante la descripción de perfiles de suelo y calculados en una supuesta ladera de 50 m (igual a las de las parcelas estudiadas en cárcavas). Se realizaron cálculos con pendiente de 10° y de 20° en cultivo de maíz con arado en primavera y surcos transversales a la pendiente (como se practica en la zona) y un valor R de erosividad de la lluvia basado en un total anual de 633 mm y calculado con base en el Índice Modificado de Fournier (IFM) (Velasco y Cortés, 2009).

Pérdida de material por erosión

El cálculo de erosión por litología se realizó con la comparación de los MDS de dos fechas (antes y después del periodo de lluvias) para determinar el volumen de material que se pierde por cada litología, las cuales fueron el 16 de mayo y el 26 de septiembre de 2016. La precipitación medida en estas fechas fue de 523 mm (Estación Climatológica del INIFAP en Santo Domingo Yanhuitlán).

Para poder comparar ambos MDS, se geoposi-

cionaron exactamente sobre puntos de control terrestres tomados con GPS de alta precisión en zonas donde no pueden ser modificados por la erosión en estos lapsos de tiempo, como estructuras viales, construcciones, etcétera (Figura 5). Se establecieron tres Puntos de Control Terrestre (GCP, por sus siglas en inglés) y se calculó el error diferencial con la estación geodésica más cercana, en este caso, la de Nochixtlán, a 29 km, para geolocalizarlos también con precisión en el espacio (geoposición absoluta).

La comparación de MDS de las dos fechas se realizó con álgebra de mapas en un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.2). La ecuación 1 consistió en restar el modelo del día 25 de septiembre al del 16 de mayo, de manera que se generó un nuevo MDS que mostró cambios en la

altura (Z) con valores negativos en las zonas donde se produjo la erosión.

$$\text{Ecuación 1: } MDS \text{ CAMBIO} = MDS1 (25sep) - MDS2 (16mayo)$$

Al conocer el tamaño de pixel ($10 \times 10 \text{ cm} = 100 \text{ cm}^2$) podemos establecer el cambio en volumen por pixel al sumarle la diferencia en Z (resultado de la ecuación 1). Para ello se multiplicó por 100 el MDS CAMBIO (ecuación 2), y se obtuvo el volumen de cambio en cm^3 (antes de realizar esta operación, se pasó la información de MDS CAMBIO de metros a centímetros).

$$\text{Ecuación 2: } MDS \text{ CAMBIO} \times 100 = MDS \text{ VOLUMEN}$$

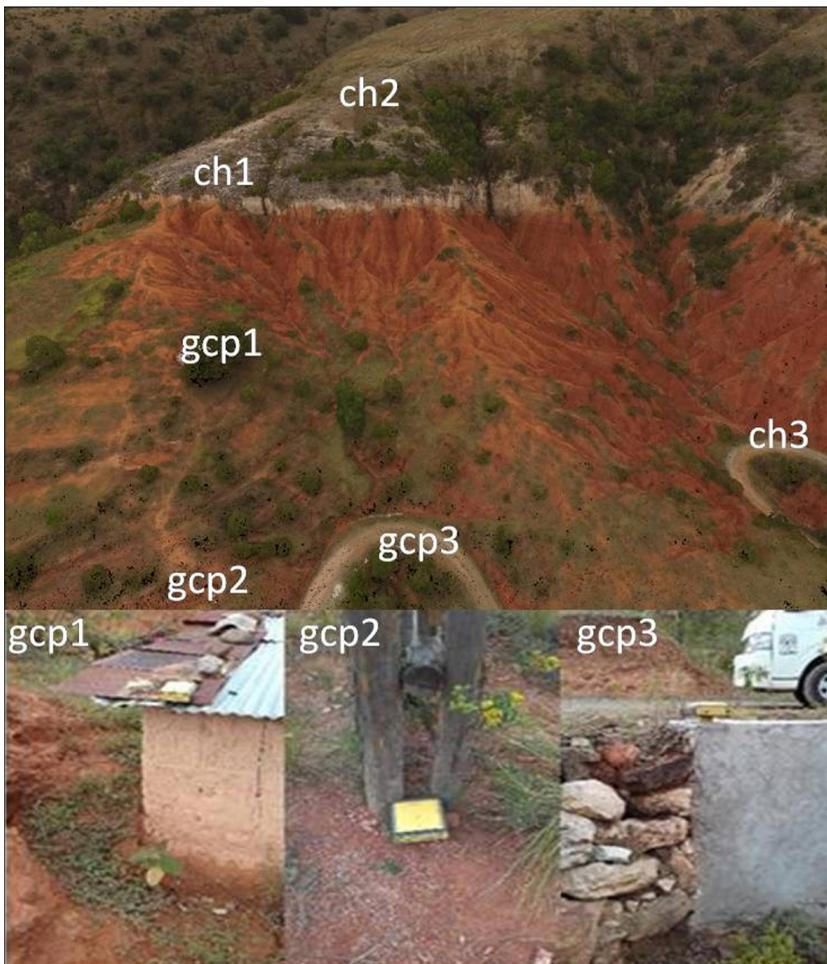


Figura 5. Puntos de control y verificación de los modelos. Fuente: elaboración propia.

De esta manera, al sumar el valor de todos los píxeles con valor negativo en el MDS VOLUMEN, obtenemos la pérdida de suelo en volumen de cada unidad litológica en un área de 2500 m². Con este dato pudimos calcular tasas de erosión en m³/m² y m³/ha. Las parcelas tienen una pendiente de 20%, orientación SE y una precipitación de 532 mm. Una vez calculada la pérdida en volumen, se puede determinar la pérdida de erosión en masa de cada formación superficial mediante la fórmula expresada en la ecuación 3.

Ecuación 3: $Masa = Densidad\ aparente * Volumen$

Cálculo de error entre modelos

Para calcular el error en las mediciones, se establecieron seis puntos de revisión en zonas de “no cambio”: tres puntos usados para el corrección de los modelos (*gcp1*, *gcp2* y *gcp3*) y tres independientes en las zonas circundantes al modelo (*chp1*, *chp2* y *chp3*) para calcular el error en la geometría y posición de los modelos en Z, ya que X y Y quedan resueltas en el *software* con los puntos GCP a través del geoposicionamiento de cada fotografía. La distribución de los puntos dependió de la ubicación de estructuras fijas (construcciones de mampostería), y se persiguió siempre la mejor relación geométrica por triangulación (Figura 5). El error, por tanto, se calculó con la diferencia en el valor Z de estos seis puntos, de efectivo carácter fijo, entre el MDS1 y el MDS2.

El error en Z entre modelos es debido a las diferencias geométricas en la triangulación de las nubes de puntos, ya que al extraer la información altimétrica de los modelos con los puntos GPS, se obtiene el valor que genera la triangulación en ese

punto, que no coincide exactamente sobre el punto GPS. Los errores de estos puntos oscilan entre 1 y 5 cm (Tabla 1), por tanto, se tomará el valor máximo de error altimétrico (5 cm) para calcular el error máximo en volumen. Para disminuir el error es necesario realizar un vuelo más próximo al área de interés que elimine estas variaciones espaciales en la nube de puntos de manera que la triangulación sea más suavizada (Tabla 1).

RESULTADOS

Morfometría

La longitud de los escurrimientos y su área de captación indica la forma en que se modela una superficie. La disección vertical muestra qué tan profundo se erosiona, y la densidad de disección, cuántos escurrimientos se forman en un área dada. Algunos de estos parámetros tienen relación entre sí, por ejemplo: a mayor área de captación, menor tamaño de escurrimientos. A mayor longitud de escurrimientos, menores órdenes de drenaje.

Los resultados obtenidos de las mediciones de los parámetros morfométricos de densidad de disección, disección vertical, longitud de escurrimiento y su área de captación, muestran resultados diferenciales en cada litología por los siguientes atributos: dureza, densidad aparente y consolidación (Tabla 2).

Área de captación de los escurrimientos

El área de captación (microcuenca) de cada cauce es mayor en la toba, con una media de 1.24 m², seguida de la andesita, con 1.10 m², y la formación Yanhuitlán, con 1.01 m², este último debido a la baja consistencia del material que se desprende

Tabla 1. Error entre MDS1 y MDS2.

PUNTO	LONGITUD	LATITUD	ALTURA MDS1	ALTURA MDS2	ERROR (mds2-mds1)
ch1	17.580	-97.391	2471.287	2471.276	-0.011
ch2	17.580	-97.392	2486.790	2486.758	-0.032
ch3	17.581	-97.391	2413.255	2413.244	-0.011
GCP1	17.580	-97.391	2454.489	2454.434	-0.055
GCP2	17.580	-97.390	2441.897	2441.881	-0.016
GCP3	17.581	-97.390	2434.385	2434.339	-0.046

Tabla 2. Parámetros morfométricos por litología.

Parámetros morfométricos (50 m ²)	Andesita	Toba	Formación Yanhuitlán
Áreas de captación			
Nº microcuencas de drenaje	2065	1813	2254
Área máxima de drenaje (m ²)	8.06	9.36	6
Área media de drenaje (m ²)	1.10	1.24	1.01
Escurrimientos			
Nº escurrimientos	2266	1939	2499
Longitud máxima de escurrimiento	8.46	12.15	6.90
Longitud media de escurrimiento	1.10	1.44	1.08
Disección vertical (m/m ²)			
Máxima	1.96	2.29	3.04
Media	0.33	0.44	0.86
Densidad de disección			
Escurrimientos (50 m ²)	2413	2091	2652
Escurrimientos/m ²	0.9652	0.8364	1.0608
Longitud máxima/m ²	3.90	3.60	5.01
Longitud media	1.10	1.23	1.25

Tabla 2. Parámetros morfométricos por litología.

lateralmente por las paredes de las cárcavas, lo cual favorece más la disección vertical. Es por ello que en la formación Yanhuitlán es donde existen más cuencas de captación (2254 microcuencas/2500 m²), debido a su menor tamaño, frente a 2065 de la toba y 1813 de la andesita.

Longitud y patrones de los escurrimientos

La longitud de los escurrimientos indica la capacidad de infiltración de la formación litológica: cuanto más elongadas, menor infiltración. La toba tiene una expresión en el paisaje más elongada, con una longitud media de 1.44 m; la andesita y

la formación Yanhuitlán tienen valores similares de 1.10 m y 1.08 m respectivamente, lo cual coincide con los datos de los parámetros areales. Los patrones de los escurrimientos reflejan una mayor concentración en las arcillas (dentrítico), erosión laminar en la toba (patrones paralelos) y patrón de erosión de trellis en la andesita, con escurrimientos pequeños y enrejados (Figura 6).

Disección vertical

La disección vertical de las formaciones superficiales en esta ladera responde a la dureza del material geológico y su estructura, cuanto más deleznable es el material, más incisión a través de sus canales de escorrentía. En este caso, la formación Yanhuitlán (arcillas poco consolidadas) es la más deleznable, tiene una profundidad media de disección de 0.86 m y llegan a producirse profundidades de hasta 3 m. La toba Llano de Lobos (cenizas litificadas) responde con una profundidad de escorrentía media de 0.44 m, mientras que la andesita yucudaac (ígnea extrusiva), la más dura, responde con una disección media de 0.33 m (Figura 7).

Densidad de disección y órdenes de drenaje

La densidad de disección se refiere a la longitud de cauces por unidad de área. Los resultados del parámetro a esta resolución no reflejan con tanta verosimilitud las diferencias que se aprecian visualmente en cada litología, dado que el detalle detecta cualquier diferencia centrimétrica en la superficie, por lo que se obtuvieron todos los escurrimientos que se pueden generar, esto homogeneiza los resultados. Para conseguir mayores diferencias en los valores y reflejarlas, es necesario disminuir la resolución.

No obstante, los datos siguen la lógica que se espera con las arcillas de la formación Yanhuitlán que presenten una mayor densidad de disección tanto en número de escurrimientos/m² (1.06) como por la suma de la longitud/m² (1.25 m/m²), seguida de la andesita (0.96 m/m²), por su mayor susceptibilidad de meteorización, y por la toba, con 0.83 m/m².

Los órdenes de drenaje aportan resultados más interesantes que refuerzan las diferencias en los tipos de escurrimientos. El porcentaje en tipo

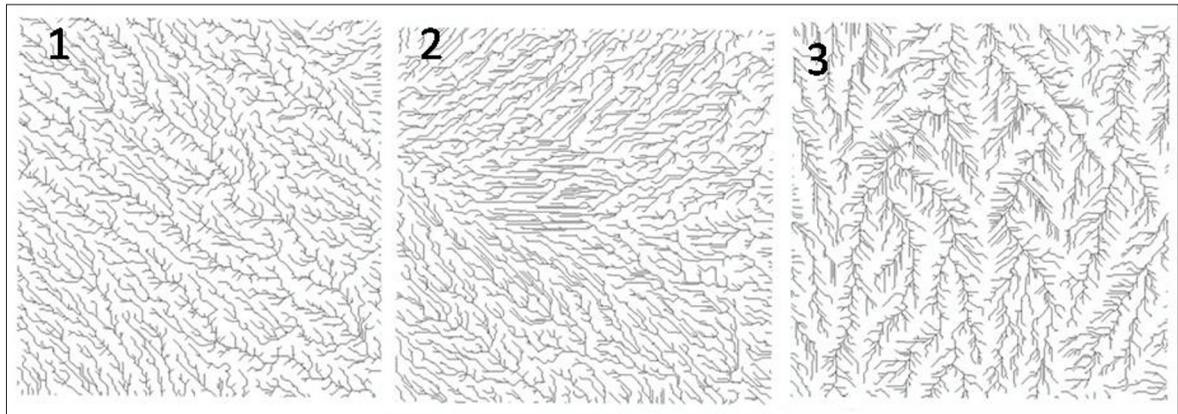


Figura 6. Patrones de drenaje: trellis en andesita (1), paralelos en la toba (2) y dentrítico en arcillas (3). Fuente: elaboración propia.

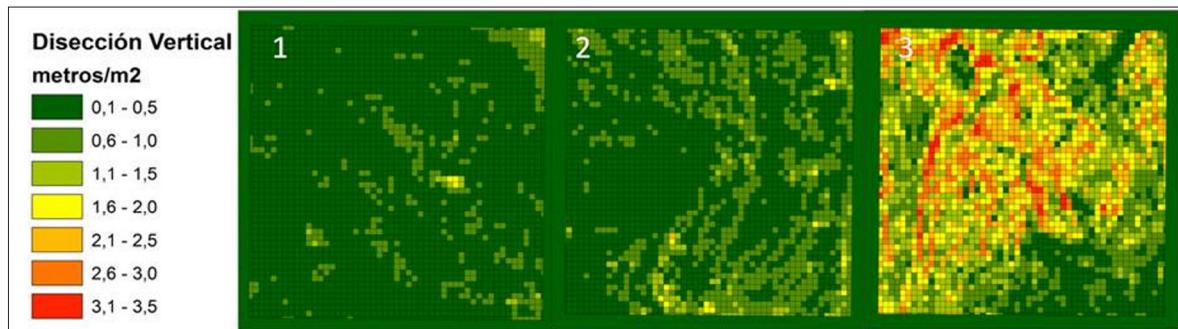


Figura 7. Mapa de disección vertical por litología: andesita (1), toba (2) y arcillas (3). Fuente: elaboración propia.

de orden de escurrimiento por litología confiere mayores escurrimientos de primer orden en la toba, más escurrimientos de segundo orden en la andesita y más de tercer orden en la formación Yanhuítlán. Este dato refuerza la información del tipo de modelado que sufre cada litología, donde una mayor cantidad de drenaje de primer orden representa un tipo de erosión más laminar en la toba y mayor concentración de escurrimientos de tercer orden en la formación Yanhuítlán, donde se encuentran las cárcavas y la red de drenaje está más ramificada (Tabla 3).

Pérdida de suelo por erosión en volumen y masa

En 2016, la Estación Climatológica de Yanhuítlán registró un total de precipitación de 696 mm, que fue superior al promedio histórico anual de 633 mm (Uniatmos, 2013). La precipitación registrada

en la temporada de lluvias (mayo-septiembre) fue de 532 mm (84% del total registrado en el año). Las tasas de erosión efectivamente medidas fueron las correspondientes a la precipitación entre el 16 de mayo y el 25 de septiembre de 2016. En la Figura 8 podemos apreciar visualmente el cambio en valores de Z dentro de cada parcela, con gradación de tonos rojizos donde se han perdido sedimentos y gradación de tonos verdes donde se han ganado; en amarillo aparece la zona donde no se han registrado cambios de erosión ni sedimentación.

Los píxeles con erosión coinciden con los de mayor disección vertical de los parámetros morfométricos. La mayoría de píxeles con valores negativos por erosión se encuentran entre 0 y 3 cm de altura (Figura 8), la suma de estos píxeles negativos multiplicada por el área del píxel arrojó el volumen de material erosionado. Éste presenta

Tabla 3. Órdenes de drenaje por litología.

Órdenes de drenaje (%)	Primer orden	Segundo orden	Tercer orden
Andesita	60.8	28.9	10.3
Toba	68.7	26.5	4.7
Formación Yanhuitlán	60	25.8	14.2

diferencias importantes por litología.

Los resultados se presentan en rangos de valores, que representan la medición en la diferencia volumétrica de los modelos (dato mayor); el dato menor es el resultado de restarle el error máximo

(5 cm). Al resultado de cambio entre modelos (MDS cambio) se le restará en cada pixel el error máximo, lo cual implica generar en este intervalo valores que no representen error alguno. Por parcela de análisis en el periodo de lluvias (16 de mayo al 25 septiembre de 2016), los valores de pérdida estuvieron entre 95-123 m³/2500 m² en la formación Yanhuitlán, 25-32 m³/2500 m² en la toba y 9-12 m³/2500 m² en la andesita. Esto, traducido a tasa de erosión por m², equivale a 0.038-0.0492 m³/m², 0.010-0.013 m³/m² y 0.004-0.005 m³/m². Si lo calculamos en tasa por hectárea, representa una pérdida entre 380-492, 100-128 y 37.48-48 m³/ha, respectivamente, con una precipitación de 532 mm. Si se interpolan estos

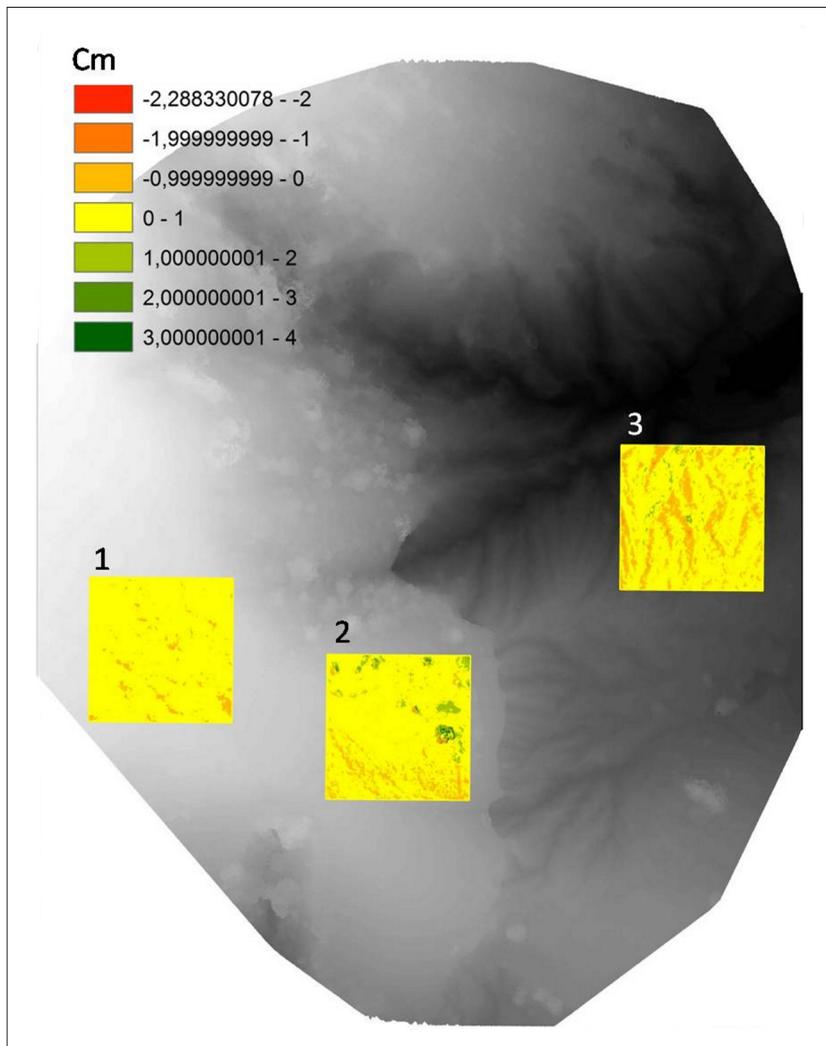


Figura 8. Dinámica de sedimentos y tasa de erosión por pixel: andesita (1), toba (2) y arcillas (3). Fuente: elaboración propia.

datos con la tasa anual de precipitación de 696 mm, en 2016 quedan en 500-641 m³/ha en la formación Yanhuitlán, 130-167 m³/ha en la toba Llano de Lobos y 52-67 m³/ha en la andesita (Tabla 4).

Para calcular la pérdida en valores de masa, toneladas/hectárea (t/ha), se aplicaron los valores de densidad aparente superficial de cada litología al resultado obtenido del volumen, según la fórmula de cálculo de masa. Las densidades que obtuvimos en campo y laboratorio fueron las siguientes:

$$\begin{aligned} AY &= 2.45 \text{ g/cm}^3 \\ TLL &= 1.10 \text{ g/cm}^3 \\ YAN &= 1.40 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

Por tanto, los resultados de pérdida de suelo en masa en el periodo medido resultan en 532-689 t/ha en la formación Yanhuitlán, 110-141 t/ha en la toba Llano de Lobos y 92-118 t/ha/año en la andesita yucudaac. Las tasas anuales de producción de sedimento son de 701-898 t/ha/año, 143-183 t/ha/año y 128-164 t/ha/año, respectivamente.

La Figura 9 muestra gráficamente las diferencias marcadas por litología.

Discusión: cálculo de erosión en suelo y zonas carentes de suelo

Los datos de erosión en este trabajo fueron calculados en zonas donde la cubierta edáfica se ha perdido debido a la intensa erosión, por lo cual los valores calculados sólo se podrían extrapolar en zonas similares. Los modelos de predicción de la erosión, como la USLE, sólo pueden ser aplicados en laderas sujetas a erosión pluvial y laminar. El método aquí empleado representa un complemento ideal para ajustar los cálculos de producción de sedimentos en cuencas en las zonas carentes de suelo, las cuales representan altos porcentajes.

El caso más relevante en el establecimiento de esta diferenciación de tasas de erosión por zonas es la formación Yanhuitlán, donde se generan las cárcavas cuando el suelo desaparece. Si observamos los valores de erosión de la formación Yanhuitlán en zonas cultivadas, con datos tomados en campo

Tabla 4. Comparativa de erosión en volumen y masa por litología.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS (50X50m) 10 cm resolución	Andesita	Toba	F. Yanhuitlán Yanhuitlán
Áreas (microcuencas) m²			
Nº microcuencas de drenaje	2065	1813	2254
Área máxima de drenaje	8.06	9.36	6
Área media de drenaje	1.10	1.24	1.01
Lineal (m)			
Nº escurrimientos	2266	1939	2499
Longitud máxima de escurrimiento	8.46	12.15	6.90
Longitud media de escurrimiento	1.10	1.44	1.08
Disección vertical (m/m²)			
Máxima	1.96	2.29	3.04
Media	0.33	0.44	0.86
Densidad de disección (escurrimientos/m²)			
líneas drenaje	2413	2091	2652
líneas de drenaje/m ²	0,9652	0,8364	1,0608
longitud máxima/m ²	3.90	3.60	5.01
longitud media	1.10	1.23	1.25

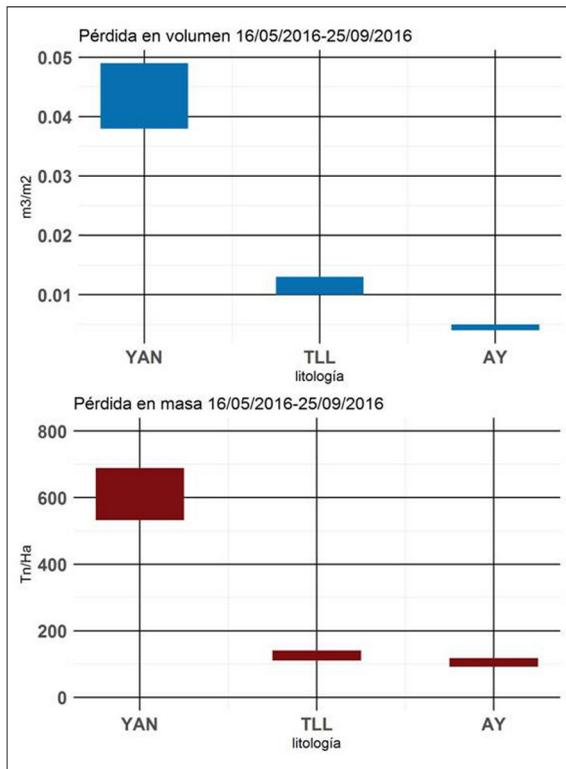


Figura 9. Gráfica comparativa de erosión en volumen y masa por litología. Fuente: elaboración propia.

y los resultados de pérdida de suelo sobre cárcavas calculados con fotogrametría digital, los valores medidos en cárcavas superan sustancialmente (485 a 637 t/ha/año) a los obtenidos en la USLE para campos cultivados (Tabla 5). Esto implica que las tasas de erosión calculadas en esta litología en zonas

Tabla 5. Tasas de erosión en la formación Yanhuitlán calculadas por medio de la USLE (Wischmeier, 1960) para campos cultivados con maíz y por medio de fotogrametría digital con drones para zonas con cárcavas. Elaboración Propia.

EROSION EN FORMACIÓN YANHUITLÁN	Tn/Ha
Cultivado con maíz y arado horizontal (USLE) Pend=10°	138.2
Cultivado con maíz y arado horizontal (USLE) Pend=20°	485.4
Cárcavas (DRON) Pend=20°	637.3-819.3

de cárcavas casi pueden llegar a duplicarse.

$$USLE = R \times K \times LS \times C \times P$$

Donde:

R: lluvia: 633 mm = 226.7

K: erodabilidad: 0.52

LS: pendiente y longitud de pendiente 15.27

C: tipo de cultivo/manejo: maíz (0.40) x arado en primavera (0.90) = 0.40 x 0.90 = 0.36

P: Prácticas de conservación de suelo: en contra a la pendiente (0.75).

CONCLUSIONES

Las imágenes aéreas de alta resolución obtenidas desde drones o UAV y la fotogrametría digital son herramientas útiles para el análisis morfológico del relieve a gran detalle y su uso se puede extender a muchos campos de la investigación, entre ellos, el modelado del paisaje a través de la erosión.

Los efectos de la diferente erodabilidad en las tres litologías de la cuenca estudiada producen modelados erosivos característicos en cada una, expresados en diferencias de densidad de disección, profundidad de disección, microcuencas de captación y longitudes de los escurrimientos, así como en las tasas de erosión. Esto puede apreciarse a simple vista en cárcavas en la formación Yanhuitlán, por su alto contenido de arcilla con alta desagregación, pequeños surcos producidos por el alto grado de intemperismo en la andesita yucudaac o erosión laminar en la toba Llano de Lobos, debido a su poca infiltración.

El detalle del levantamiento fotogramétrico con drones permite analizar el diferente modelado de la erosión en cada formación litológica.

- 1) Las arcillas de la formación Yanhuitlán son el material más deleznable (erosionable) por su escasa consolidación, con mayores índices de densidad de disección y disección vertical. Por ello también tiene el mayor número de cuencas de captación con mínimo tamaño.

- 2) La toba es la que mayor superficie de captación genera para los escurrimientos.
- 3) La andesita, al ser la roca más dura, tiene la menor disección vertical.
- 4) Con levantamientos multitemporales por medio de fotogrametría digital con drones es posible cuantificar la erosión real en volumen y masa de una unidad litológica y estimar tasas de erosión y producción de sedimentos en zonas carentes de suelo y/o sujetas a erosión en cárcavas.
- 5) Las arcillas de la formación Yanhuatlán se caracterizan como las de mayor pérdida de volumen y masa, con una gran diferencia respecto de las demás litologías. En el periodo analizado (mayo a septiembre de 2016) se determinó una tasa de erosión de 532-689 t/ha. Si se extrapola este dato a todo el año con base en el total de lluvia anual, entonces resulta una tasa de 701-898 t/ha/año.
- 6) La toba Llano de Lobos tuvo una tasa de pérdida entre 110-141 t/ha en el periodo analizado y una tasa anual estimada de 143-183 t/ha/año.
- 7) La andesita es la formación que menos pérdida de material tiene, con una tasa de pérdida entre 98-112 t/ha en el periodo analizado y una tasa anual estimada de 128-164 t/ha/año.

Este método resuelve el problema del cálculo de erosión en zonas carentes de suelo, donde los métodos de estimación no pueden determinarlo, sobre todo en zonas de cárcavas, que son las que mayores tasas de erosión generan. Por tanto, este método contribuye a estudios de erosión en cuencas más integrales, precisos y realistas, e incluye el análisis de la evolución de laderas, válido para estudios de análisis de riesgo.

De igual forma, se precisa mejorar la metodología de vuelo para obtener mejores resultados en la nube de puntos que permita minimizar el error de los MDS y así obtener tasas más precisas y no rangos.

REFERENCIAS

- Bocco, G. (1991). Gully Erosion: Processes and Models. *Progress in Physical Geography*, 15(4), 392-406.
- Eltner, A. (2013). Konzeption einer Methode zur quantitative Erfassung von boden erosion durch integrierte Aufnahme mit einer Mikrodrohne und einem terrestrischen Laserscanner. *DGPF Tagungsband*, 22, 1-9.
- Eltner, A. (2016). Photogrammetric Techniques for Across-Scale Soil Erosion Assessment. Developing Methods to Integrate Multi-Temporal High Resolution Topography Data at Field Plots. En *Dissertation zur Erlangung des Akademischen Grades Doktoringenieur*. Alemania: Technische Universität Dresden.
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F. y Abellán, A. (2016). Image-Based Surface Reconstruction in Geomorphometry-Merits, Limits and Developments. *Earth Surface Dynamics*, 4, 359-389.
- Ferrusquía-Villafranca, I. (1976). Estudios geológico-paleontológicos en la región de la Mixteca, parte 1: Geología del área Tamazulapan-Tepecolula-Yanhuatlán, Mixteca Alta, Estado de Oaxaca, México. *Boletín del Instituto de Geología*, 97, 160.
- Frankl, A., Stal, C., Abraha, A., Nyssen, J., Rieke-Zapp, D., De Wulf, A. y Poesen, J. (2015). Detailed Recording of Gully Morphology in 3D through Image-Based Modelling. *Catena*, 127, 92-101.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Montes, M., Alejandrina, L., Uribe, E. y García, E. (2011). *Mapa Nacional de Erosión Potencial. Tecnología y Ciencias del Agua* (vol. II, núm. 1). México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531972001>
- Gómez-Gutiérrez, A., Schnabel, S., Berenguer-Sempere, F., Lavado-Contador, F. y Rubio-Delgado, J. (2014). Using 3D Photoreconstruction Methods to Estimate Gully Headcut Erosion. *Catena*, 120, 91-101.
- Knisel, G. (1980). CREAMS; a Field Scale Model for Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. *Conservation Research Report*, 26.
- Maass, M. M. (1998). Erosión de suelos en México: una consecuencia de la transformación del hábitat y uno de los problemas más serios de degradación ambiental. En G. Toledo y M. Leal-Pérez (Eds.). *Destrucción del hábitat*. México: Programa Universitario de Medio Ambiente (PUMA), UNAM.
- Martiny, B., Martínez-Serrano, R. G., Morán-Zenteno, D. J., Macías-Romo, C. y Ayuso, R. A. (2000). Stratigraphy, Geochemistry and Tectonic Significance of the Oligocene Magmaticrocks of Western Oaxaca, Southern Mexico. *Tectonophysics*, 318, 71-98.
- Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J. y Finkner, S. C. (1989). A Process-Based Soil Erosion Model for

- USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. *Transaction of the ASAE*, 32(5), 1587-1593.
- Pablo, M. A. (2014). *Caracterización y diagnóstico biofísico para el ordenamiento ecológico territorial en la cuenca del río Grande, Oaxaca, usando percepción remota y sistemas de información geográfica*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras-Colegio de Geografía, UNAM, México.
- Palacio, J. L. (1990). Determinación de áreas de erosión potencial en cárcavas: un ejemplo en el centro de México. *Investigaciones geográficas*, 21, 45-55.
- Palacio, J. L. y Vázquez, L. (1990). Relative Importance of Modelling Processes in Badland Slopes. An Example in Central Mexico. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 34, 301-306.
- Palacio-Prieto, J. L., Rosado-González, E., Ramírez-Miguel, X., Oropeza-Orozco O., Cram-Heydrich, S., Ortiz-Pérez, M. A., Figueroa-Mah-Eng, M. y Fernández de Castro-Martínez, G. (2016). Erosion, Culture and Geoheritage; the Case of Santo Domingo Yanhuitlán, Oaxaca, México. *Geoheritage*. <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0175-2>
- Paniukov, P. (1981). *Geología aplicada a la ingeniería*. Moscú: Editorial MIR.
- Poessen, J., Ingelmo-Sánchez, F. y Mucher, H. (1990). Effects of Size and Incorporation of Synthetic Mulch on Runoff and Sediment Yield from Interrills in a Laboratory Study with Simulated Rainfall. *Soil and Tillage Research*, 21, 209-223.
- Przybilla, H.-J. y Wester-Ebbinghaus, W. (1979). *Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. Bildmessung und Luftbildwesen. Zeitschrift fuer Photogrammetrie und Fernerkundung*. Karlsruhe: Herbert Wichmann Verlag.
- Remondino F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M. y Sarazzi, D. (2011). UAV Photogrammetry for Mapping and 3d Modeling-Current Status and Future Perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38.
- Santamaría-Díaz, A., Alaniz-Álvarez, S. y Nieto-Samaniego, A. (2008). Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapam, sur de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(3), 494-516.
- Schlaepfer, C. (1976). Geología terciaria del área de Yanhuitlán-Nochixtlán. En *Excursión México-Oaxaca*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- Stöcker, C., Eltner, A. y Karrasch, P. (2015). Measuring Gullies by Synergetic Application of UAV and Close Range Photogrammetry. A Case Study from Andalusia, Spain. *Catena*, 132, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.004>
- Turner, D., Lucieer, A. y De Jong, S. (2015). Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 7(2), 1736-1757.
- Ullman, S. (1979). The Interpretation of Structure for Motion. *Proceeding of the Royal Society Biological Research Journal*, 203, 405-426.
- Uniatmos (2013). Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <http://www.atmosfera.unam.mx/>
- USDA (2012). Engineering Classification of Rock Materials. En *National Engineering Handbook* (pp. 4-11).
- Velasco, I. y Cortés, G. (2009). **Índice de Fournier** modificado y de concentración de la precipitación, como estimadores del factor de riesgo de la erosión, en Sinaloa, México. Soil Erosion and Desertification. Trabajo presentado en el Congreso Internacional sobre Desertificación, Murcia, España.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. (1960). A Universal Soil-Loss Equation to Guide Conservation Farm Planning. *Trans. Int. Congr. Soil Sci.*, 7th, 418-425.