

FOTOGRAMETRÍA UAS DE LA DEGRADACIÓN ANTRÓPICA DE SUELO DE LA NANOCUENCA 9 LA MESA, ACAXOCHITLÁN, HIDALGO, MÉXICO

UAS PHOTOGRAMMETRY OF HUMAN-INDUCED SOIL DEGRADATION IN THE NANO-BASIN 9 LA MESA, ACAXOCHITLÁN, HIDALGO, MEXICO

Martínez-Torres, I.L.¹; Ojeda-Trejo, E.^{1*}; Martínez-Menes, M.R.¹; Cajuste-Bontemps, L.¹

¹Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo, Texcoco, Estado de México. C. P. 56230.

*Autor de correspondencia: enriqueot@colpos.mx

RESUMEN

A diferencia de la fotogrametría tradicional, la técnica de fotogrametría a través de sistemas aéreos no tripulados (UAS), permite la generación rápida de información y su procesamiento. Debido a que en México una parte importante de la superficie presenta relieve irregular, la tecnología UAS cobra importancia para la cuantificación rápida y eficiente de zonas degradadas. En este trabajo se generó el ortomosaico y Modelo Digital de Superficie (MDS) con el objetivo de zonificar los tipos de degradación de suelo causada por el hombre modificada para la nanocuenca 9 La Mesa, Acaxochitlán perteneciente a la subcuenca del Río San Marcos (RH27Cb) a través de fotogrametría UAS. Se encontró que la mayor superficie con degradación se ubica en uso de suelo agrícola y pastizal. También se comprobó que es posible definir con mayor detalle zonas con degradación, así como identificar procesos de cambio de uso de suelo a través de fotointerpretación de ortomosaicos georreferenciados.

Palabras clave: Erosión hídrica, fotointerpretación, sistemas aéreos no tripulados, dron, nanocuenca.

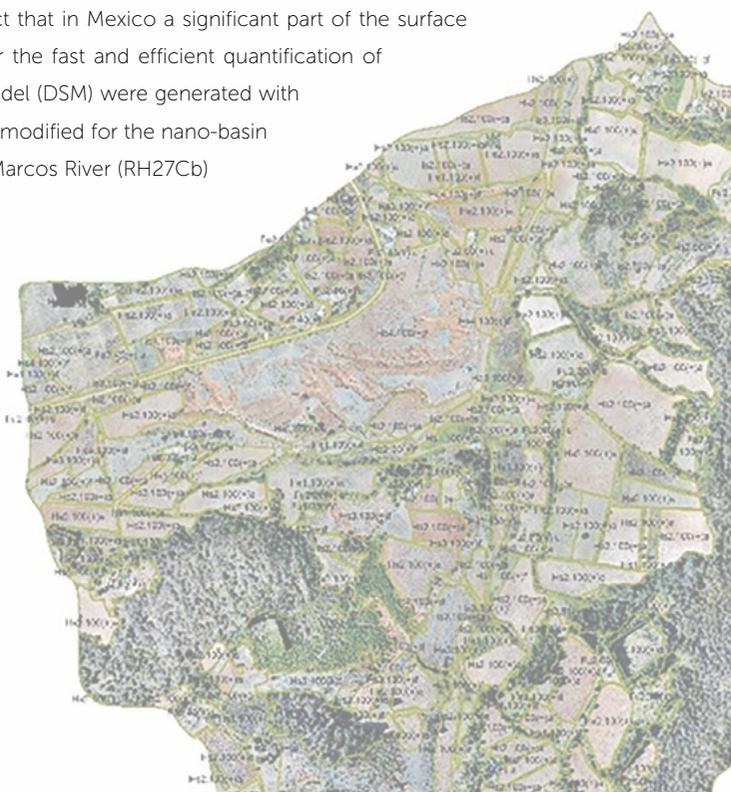
ABSTRACT

Unlike traditional photogrammetry, the technique of photogrammetry through unmanned aerial systems (UAS) allows the fast generation of information and its processing. Due to the fact that in Mexico a significant part of the surface presents irregular relief, the UAS technology becomes important for the fast and efficient quantification of degraded areas. In this study the orthomosaic and Digital Surface Model (DSM) were generated with the objective of zoning the types of human-induced soil degradation modified for the nano-basin 9 La Mesa, Acaxochitlán, which belongs to the sub-basin of the San Marcos River (RH27Cb) through UAS photogrammetry. It was found that the largest surface area with degradation is located in agricultural and grassland land use. It was also found that it is possible to define areas with degradation in greater detail, as well as to identify processes of land use change through photointerpretation of georeferenced orthomosaics.

Keywords: Water erosion, photointerpretation, unmanned aerial systems, drone, nano-basin.

Agroproductividad: Vol. 11, Núm. 4, abril. 2018. pp: 136-142.

Recibido: marzo, 2018. **Aceptado:** abril, 2018.



INTRODUCCIÓN

En temas de degradación de suelos y manejo integral del agua, se han realizado estudios en temas como monitoreo de erosión costera por medio de un sistema de control remoto de aviones (Casella *et al.*, 2016); monitoreo de la erosión de suelo de barrancas y tierras baldías en 2D y 3D en Marruecos (D' Oleire-Oltmanns *et al.*, 2012); estudios que prueban el impacto negativo de las medidas de nivelación de terrenos en el desarrollo de cárcavas (Peter *et al.*, 2014); o para determinar contenido de humedad superficial del suelo de la zona de raíces a través de tecnología de detección remota con imágenes multiespectrales de alta resolución (Hassan-Esfahani *et al.*, 2017), o para cuantificar los cambios en el paisaje resultante de los procesos de erosión y deposición de una cuenca a partir de la evaluación de una serie temporal de modelos de elevación digital (Schneider *et al.*, 2012), entre otros.

Los sistemas aéreos no tripulados (UAS) o comúnmente llamados drones se han utilizado en diversos estudios ambientales y agrícolas, entre otras aplicaciones de la ciencia y desarrollo tecnológico. El desarrollo de aviones de bajo peso, que normalmente están equipados con sistema de posicionamiento global (GPS) y unidad de medición inercial (IMU), permite la planificación de vuelo organizada. Por tanto, el monitoreo autónomo y frecuente del área es factible (Eltner *et al.*, 2015).

La utilización de estas tecnologías ayuda al monitoreo, vigilancia y cartografía de suelos debido a la resolución espacial y temporal que pueden alcanzar. Por ejemplo, la derivación de los Modelos Digitales del Terreno de alta resolución de fotografías aéreas de pequeño formato se considera un método valioso para la cuantificación de erosión (Betts *et al.*, 2003). Quédraogo *et al.* (2014) fueron los primeros en utilizar UAS en estudios de suelos, y observaron una cuenca hidrográfica bajo uso agrícola con una resolución de 1 m² y compararon los resultados con los datos de la exploración láser terrestre; la foto-

grametría UAS representa oportunidades prometedoras para la recogida de datos topográficos de alta densidad, de resolución fina, teniendo en cuenta la variabilidad micro-topográfico. De ahí que los parámetros hidrológicos que se derivan de los DEM de alta resolución podría permitir el análisis de micro topografía a nivel de cuenca. En este estudio se realizó una fotointerpretación de las zonas de erosión como medio para determinar con precisión las zonas más degradadas en la nanocuenca 9 La Mesa, Acaxochitlán, subcuenca del Río San Marcos (RH27Cb) generando con imágenes de alta resolución del UAS el orto mosaico y Modelo Digital de Superficie (MDS). Con estos datos se llevó a cabo una clasificación de la degradación del suelo causada por el hombre.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

La zona de estudio contempla la nanocuenca 9 la cual se ubica en los municipios de Cuauhtepic de Hinojosa y Acaxochitlán, estado de Hidalgo. Esta zona se extiende de los 20° 03' 40.84" a 20° 04' 47.56" de latitud norte y de 98° 13' 00.43" a 98° 13' 57.29" longitud oeste, cubre una superficie de 216.24 hectáreas, y cuyos suelos predominantes son Luvisol Húmico con Andosol Dístico (75.6%) y Regosol Étrico con Leptosol Lítico (24.4%).

Levantamiento fotogramétrico

Para la realización del levantamiento fotogramétrico se ubicaron puntos de control terrestre con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de precisión, la cual se realizó con el GPS Promark 3 con la modalidad de medición estático con post-proceso, cuyo rastreo de satélites es de 14 canales independientes, código L1 y rastreo satelital WASS/EGNOS. Se colocaron 10 puntos de control terrestre

para ser utilizados en los softwares con el fin de georreferenciar las fotografías aéreas (Cuadro 1).

Se trazaron las rutas de vuelo mediante la aplicación Pix 4Dcapture versión 3.7.1, se elaboró el proyecto tipo malla de misión (Grid Mission), para mapas 2D, con 13 misiones para

Cuadro 1. Datos de puntos de control terrestre tomados en la Nanocuenca 9 La Mesa, Acaxochitlán, Hidalgo.

Número	X	Y	Z	Tipo
1	580776.97	2219921.3	2465.927	Fijo
2	580845.34	2220197.3	2446.997	movil
3	581215.08	2220215.2	2393.699	movil
4	581525.1	2220050.2	2465.071	movil
5	581355.8	2219722	2447.114	movil
6	581313.47	2219491.7	2439.723	movil
7	580404.75	2219708.5	2456.82	movil
8	580338.52	2219810.3	2484.906	movil
9	580698.74	2219096	2508.354	movil
10	581254.19	2219187.3	2463.334	movil

cubrir la zona de estudio, cada una a una altura de vuelo de 100 m, sobreposición entre líneas de vuelo de 75%, velocidad vertical de 5 m s^{-1} y velocidad horizontal de 9 m s^{-1} .

Para la adquisición de fotografías aéreas se utilizó un dron modelo Phantom 4 Pro de la marca DJI, el cual cuenta con un sistema de posicionamiento por satélite GPS/GLONASS, rótula de estabilización en 3 ejes (movimiento horizontal, vertical y rotación), un sistema de detección de obstáculos (0.2-7.0 m), portó una cámara con sensor 1" CMOS con una lente con campo de visión (FOV) 84° 8.8 mm (equivalente al formato 35 mm), el formato de las imágenes fue JPEG. Los vuelos se realizaron el día 21 de marzo de 2017 bajo condiciones atmosféricas adecuadas, esto es cielo despejado (sin nubosidad), velocidad de viento de 5.55 m s^{-1} (resistencia del dron a velocidad del viento máxima 10 m s^{-1}) y dentro del intervalo de temperatura de funcionamiento (0 a 40°C) (Cuadro 2).

Generación de ortomosaico y modelo digital de superficie

Las fotografías áreas se procesaron con el software Pix4Dmapper Pro para generar el ortomosaico georreferenciado y modelo digital de superficie. El procedimiento fue: 1) Crear un nuevo proyecto, cargar fotografías, definir propiedades de imágenes (geolocalización y orientación) y de la cámara; 2) Definir plantilla de opciones de procesamiento (Mapas 3D); 3) Realizar proceso inicial: definir resolución de MDS y ortomosaico; 4) Introducir puntos de control terrestre (GCP) y reoptimizar; 5) Crear nube de puntos: definir escala de la imagen, densidad de puntos, número mínimo de emparejamiento, resolución de la

mallla 3D con textura; 6) Ejecutar la clasificación de la nube de punto en terreno/objetos (Beta); y 7) Generar Modelo Digital de Superficie y ortomosaico.

De igual manera se realizó el procesamiento en el software Agisoft PhotoScan versión 1.2.6 para generar ortomosaico y modelo digital de superficie. El procedimiento fue: 1) Añadir fotografías al programa; 2) Orientar fotografías, alineación máxima y pre-emparejamiento: referencia (puntos de apoyo); 3) Crear nube de puntos densa, con filtración de mapas de profundidad: medio y agresivo; 4) Crear malla, bajo relieve/terreno, nube de puntos densa y resolución alta; 5) Agregar puntos de control, renombrar puntos e importar tabla (.CVS), calibrar mosaico y nube de puntos; 6) Definir sistema de coordenadas; 7) Optimizar; 8) Crear nube de puntos densa, con filtración de mapas de profundidad: media y agresivo; y 9) Clasificar nube de puntos densa.

Fotointerpretación y digitalización de zonas erosionadas

Para la fotointerpretación de zonas erosionadas se utilizó el ortomosaico georreferenciado generado por el software Pix 4Dmapper Pro, y se cargó al software Arc Gis 10.3 para su visualización y digitalización. Lo primero fue delimitar el uso de suelo, posteriormente para cada unidad se determinó el tipo de degradación de suelo causada por el hombre (SEMARNAT-COLPOS, 2012) mediante fotointerpretación del ortomosaico y apoyado en la información de recorridos de campo. La tasa de degradación tiene la siguiente estructura (cada elemento ejemplifica un parámetro):

$$Qd\ 2.50(+)\ a$$

Dónde: Q=tipo de degradación, d=subtipo, 2=grado, 50=porcentaje, (+)=tasa, a=causa

El tipo de degradación de suelo se determinó con base en el uso de suelo omitiendo el levantamiento fisiográfico, esto debido a la escala, dado que cada unidad de uso de suelo representa el 100% de determinado tipo de degradación, en la estructura de la fórmula de degradación el apartado

Cuadro 2. Variables climáticas de la estación Acaxochitlán, Hidalgo del día 21 de marzo de 2017.

Indicador	Valor
Precipitación (mm)	0
Temperatura máxima ($^\circ\text{C}$)	19.5
Temperatura mínima ($^\circ\text{C}$)	9.6
Temperatura media ($^\circ\text{C}$)	14.87
Velocidad del viento máxima (km h^{-1})	0.2
Dirección de velocidad del viento máxima (grados azimut)	348.1 (N)
Velocidad del viento (km h^{-1})	0.03
Dirección del viento (grados azimut)	43.00 (SE)
Radiación Global (w/m^2)	458.09
Humedad relativa (%)	36.44

Fuente: Red de estaciones climáticas Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. INIFAP, 2017.

correspondiente a porcentaje se colocó "000". Para el resto de la fórmula se utilizaron los parámetros establecidos (Cuadro 3 y Cuadro 4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se generaron dos ortomosaico con los softwares Pix 4Dmapper Pro y Agisoft PhotoScan encontrándose di-

ferencias en resolución, lo cual fue notario visualmente. La calidad del producto generado con el software Pix 4D resultó ser de mejor calidad que Agisoft al aumentar el zoom de la imagen en el software Arc Gis 10.3, lo que facilitó digitalización de usos de suelo y tipos de degradación, por lo que se trabajó con este último producto generado.

Cuadro 3. Grado de clasificación de degradación de suelo causada por el hombre.

Grado	Nombre	Descripción	Grado	Nombre	Descripción
1	Ligero	Presentan alguna reducción apenas perceptible en su productividad	3	Fuerte	Se requieren grandes trabajos de ingeniería para su restauración
2	Moderado	Con una marcada en su productividad	4	Extremo	Terrenos irrecuperables

Cuadro 4. Parámetros de clasificación de degradación de suelo causada por el hombre.

Tipo		Causa	
H	Erosión hídrica	a	Actividades agrícolas
E	Erosión eólica	f	Deforestación
Q	Degradación química	e	Sobreexplotación de la vegetación para consumo
F	Degradación física	g	Sobrepastoreo
Grado		i	Actividades industriales
1	Ligero	u	urbanización
2	Moderado	Tasa	
3	Fuerte	+	Activa
4	Extremo	0	Sin cambios
0 - 100%	Extensión de la degradación	-	Recuperación
Subtipo		Otros tipos	
Hs	Pérdida de suelo superficial	Terrenos estables	
Hc	Deformación del terreno (lineal o movimientos en masa)	SN	Natural
Ha	Efectos fuera de sitio	SH	Por el hombre (áreas reforestadas, terrazas etc.)
Es	Pérdida de suelo superficial		
Ed	Deformación del terreno		
Et	Efectos fuera de sitio		
Qd	Declinación de la fertilidad		
Qp	Polución	Terrenos sin uso	
Qs	Salinización/alcalinización	Nud	Desiertos
Qa	Acidificación	NUm	Regiones áridas montañosas
Qe	Eutroficación		
Fc	Compactación		
Fe	Encostramientos	NUr	Afloramientos rocosos
Fa	Anegamientos		
Fu	Pérdida de la función productiva		
Fh	Hundimiento de suelos	NUc	Dunas costeras
Fd	Disponibilidad de agua	NUz	Planicies salinas

Se encontró error en ambos ortomosaicos generados, gracias al Software Pix 4Dmapper Pro donde al procesar la nube de puntos de las 4996 fotografías obtenidas de los vuelos 88 fotografías no fueron geo posicionadas (cámaras no calibradas) por lo que el software extrapoló información automáticamente para generar el modelo digital de superficie y para el ortomosaico no generó información en esta zona. Estas fotografías correspondieron a zonas boscosas por lo que se perdió información georreferenciada en campo y el correcto emparejamiento de imágenes. Lo anterior se intentó corregir con calibración manual, lo que implicó realizar el emparejamiento con imágenes vecinas, por medio de la ubicación de puntos de georreferencia en imágenes contiguas, lo que resultó imposible debido a que correspondían a zonas boscosas (fotografías relativamente homogéneas). Debido a que el objetivo del proyecto fue tener como unidad de estudio los usos de suelo, el problema de georreferencia y pérdida de información en un solo tipo de uso (bosque) no fue relevante.

El uso de suelo predominante en la microcuenca fue agrícola (32.7%), seguido del forestal con bosque de pino y encino (31.3%). Este primer uso de suelo es el que presenta mayor fragmentación y dispersión con 165 polígonos del total de la nanocuenca (318 unidades). Por otra parte, se observaron transiciones de cambio de uso de suelo y vegetación de pastizal a otro tipo de uso de suelo (5.5%), sobre todo para uso forestal (4.8% para reforestación) (Cuadro 5 y Figura 1).

El tipo de degradación de suelo causada por el hombre se interpretó de manera distinta, para lo cual no se consideró el porcentaje de degradación (superficie del polígono), sino el uso de suelo del mismo, con lo que se obtuvo: degradación física por pérdida de la función productiva (Fu1) en zonas de vegetación secundaria, con grado ligero (1), moderado (2) y fuerte (3), donde las cau-

sas fueron deforestación y urbanización (f, u respectivamente); erosión hídrica con efectos fuera de sitio (Ha) (2.35 ha) en pastizal; erosión hídrica con deformación del terreno (Hc) (2.51 ha); erosión hídrica con pérdida de suelo superficial (Hs1) (6.51 ha) en terrenos con pastizal y pastizal – agrícola con grado ligero, que presentan una reducción apenas perceptible en su productividad; erosión hídrica con pérdida de suelo superficial (Hs2) que presenta las mismas características a excepción de que el grado de afectación es moderado con una marcada reducción en su productividad (79.75 ha), donde la causa principal es debido a actividades agrícolas (a) con uso agrícola en mayor proporción, en este mismo tipo (Hs3); erosión hídrica con pérdida de suelo superficial con grado fuerte, con zonas que requieren grandes trabajos de ingeniería para su restauración y mismo tipo de degradación pero con grado extremo (Hs4) que consiste en terrenos irrecuperables (11.37 ha); finalmente terrenos estables con vegetación natural (SN) (67.58 ha) y terrenos estables por el hombre esto es zonas reforestadas (SH) (0.13 ha) (Cuadro 6).

La metodología Degradación de Suelo Causada por el Hombre utiliza

como base las unidades de tierra (sistema terrestre) definidas por el levantamiento fisiográfico (Ortiz y Cuauhtlan, 1978), las cuales no siempre corresponden con el uso de suelo. Si bien el método fue diseñado para abarcar grandes zonas a pequeñas escalas (SEMARNAT – CP, 2002), con un análisis de lo general a lo particular, se ve limitado al trabajar en zonas pequeñas a escala grande, donde observar las transiciones de uso es fundamental para conocer la dinámica tendencial del territorio en términos de degradación de suelo. Finalmente ubicar el tipo de degradación de manera precisa permite plantear prácticas de manejo u obras adecuadas al uso de suelo o bien en situaciones de interés proponer el cambio de uso de suelo de acuerdo a la aptitud del mismo.

Cuadro 5. Uso de suelo y vegetación de la nanocuenca 9 La Mesa, Acaxochitlán, Hidalgo.

Uso de suelo y vegetación	Superficie	
	ha	%
Agrícola	70.73	32.7
Agrícola - pastizal	2.16	1.0
Agrícola - vegetación secundaria	0.36	0.2
Bosque pino - encino	67.58	31.3
Bosque (reforestación)	0.13	0.1
Cárcava	13.74	6.4
Pastizal	20.27	9.4
Pastizal - agrícola	0.36	0.2
Pastizal - reforestación	10.44	4.8
Pastizal - Urbano	0.45	0.2
Pastizal - vegetación secundaria	0.66	0.3
Urbano	9.56	4.4
Vegetación secundaria	2.53	1.2
Otro (caminos y linderos)	17.20	8.0
Total	216.24	100.0

Cuadro 6 Tipo de degradación de suelo causada por el hombre de la nanocuenca 9 La Mesa, Acaxochitlán, Hidalgo.

Tipo de degradación		Superficie (ha)	Tipo de vegetación o uso de suelo
Clave	Descripción		
Fu1.000(+) f	Degradación física por pérdida de la función productiva con grado ligero, tasa activa causada por deforestación	0.29	Vegetación secundaria
Fu2.000(+) u	Degradación física por pérdida de la función productiva con grado moderado, tasa activa por causa de urbanización	9.57	Urbano
Fu2.000(+) f	Degradación física por pérdida de la función productiva con grado moderado, tasa activa por causada por deforestación	2.11	Vegetación secundaria
Fu3.000(+) f	Degradación física por pérdida de la función productiva con grado fuerte, tasa activa, causado por deforestación	0.14	Vegetación secundaria
Ha2.000(+) f	Erosión hídrica con efectos fuera de sitio con grado moderado, tasa activa, causada por deforestación	0.41	Pastizal
Ha3.000(+) f	Erosión hídrica con efectos fuera de sitio con grado moderado, tasa activa, causada por deforestación	1.95	Pastizal
Hc4.000(+) f	Erosión hídrica con deformación del terreno con grado extremo, tasa activa, causada por deforestación	2.51	Cárcava
Hs1.000(+) a	Erosión hídrica con deformación del terreno con grado ligero, tasa activa, causada por actividades agrícolas	2.38	Pastizal - agrícola
Hs1.000(+) f	Erosión hídrica con deformación del terreno con grado ligero, tasa activa, causada por deforestación	4.13	Pastizal
Hs2.000(+) a	Erosión hídrica con deformación del terreno con grado moderado, tasa activa, causada por actividades agrícolas	72.03	Agrícola
Hs2.000(+) u	Erosión hídrica con deformación del terreno con grado moderado, tasa activa, causada por urbanización	0.45	Pastizal - urbano
Hs2.000(+) f	Erosión hídrica con deformación del terreno con grado moderado, tasa activa, causada por deforestación	7.27	Pastizal, pastizal - reforestación y pastizal - vegetación secundaria
Hs3.000(+) a	Erosión hídrica con deformación del terreno con grado fuerte, tasa activa, causada por actividades agrícolas	1.96	Agrícola, Agrícola - pastizal
Hs3.000(+) f	Erosión hídrica con deformación del terreno con grado fuerte, tasa activa, causada por deforestación	14.74	Pastizal, Pastizal - reforestación
Hs4.000(+) f	Erosión hídrica con deformación del terreno con grado extremo, tasa activa, causada por deforestación	11.37	Pastizal, cárcava
SH	Terreno estable por reforestación	0.13	Reforestación
SN	Terreno estable por vegetación natural	67.59	Bosque pino - encino
		17.21	Otro (caminos y linderos)
Total		216.24	



Figura 1. Ortofoto y resultados de uso de suelo (izquierda) y degradación de suelo (derecha) de la nanocuenca 9 La Mesa, Acaxochitlán, Hidalgo.

CONCLUSIONES

La metodología de degradación de suelo causada por el hombre permite de manera rápida hacer una valoración sobre las condiciones de degradación de un determinado ecosistema, uso de suelo o vegetación, lo que se traduce en la obtención de información de calidad para realizar toma de decisiones sobre que prácticas u obras realizar en determinado sitio. Por otra parte, la obtención de imágenes georreferenciadas con dron para realizar esta valoración de degradación con la metodología permitió la obtención de información rápida y detallada sobre todo a zonas de difícil acceso y prácticamente a toda la microcuenca en un lapso de tiempo máximo de 4 a 5 horas (tiempo de vuelo incluido en traslado a sitios). En esta investigación el trabajo de campo fue de un día (horas luz), que abarcó la toma de puntos de control con GPS de precisión y el vuelo con dron, aunque la digitalización de información fue la etapa más tardada del proceso (debido al detalle de trabajo). Si bien el uso del dron solo trata de una herramienta tecnológica para acelerar y facilitar el trabajo, su manejo permite el monitoreo continuo de la zona de estudio.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo para la realización de estudios de maestría y a IGA Ingeniería Geoespacial Aplicada S.A. de C.V. por facilitar el uso del Vehículo Aéreo No Tripulado y equipo para el procesamiento de información.

LITERATURA CITADA

- Betts H.D, Trustrum N.A., De Rose RC. 2003. Geomorphic changes in a complex gully system measured from sequential digital elevation models, and implications for management. *Earth Surf. Proc. Land.* 28: 1043-1058.
- Casella E., Rovere A., Pedrocini A., Stark C.P., Casella M., Ferrarl M., Firpo M. 2016. Drones as tools for monitoring beach topography changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean). *Geo-Mar. Lett.* 36: 152-163.
- D´Oleire-Oltmanns S., Marzloff I., Peter K.D., Ries J.B. 2012. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. *Remote Sens.* 4: 3390-3416.
- Eltner A., Schneider D. 2015. Analysis of Different Methods for 3D Reconstruction of Natural Surfaces from Parallel-Axes UAV Images. *Photogram. Rec.* 30: 279-299.
- Hassan-Esfahani L., Torres-Rua A., Jensen A., Mckee, M. 2017. Spatil Root Zone Soil Water Content Estimation in Agriculture Visual, NIR, and Thermal Imagery. *Irrig. Drain.* 66: 273-288.
- INIFAP. 2017. Red de estaciones climáticas. Datos diarios de Estación Acaxochitlán. Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Disponible en línea: <http://clima.inifap.gob.mx/Inmysr/Estaciones>
- Peter K.D., d'Oleire – Oltmanns S., Ries J.B., Marzloff I., Hssaine A.A. 2014. Soil erosion in gully catchments affected by land-levelling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data. *CATENA.* 113: 24-40.
- Schneider A., Gerke H.H., Maurer T., Seifert S., Nenov R., Hüttl R.F. 2012. Evaluation of remotely-sensed DEMs and modification base on plausibility rules and initial sediment budgets of an artificially – created catchment. *Earth Surf. Proc. Land.* 37: 708-725.
- SEMARNAT-Colegio de Posgraduados. 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1: 250 000. Memoria Nacional, SEMARNAT-Colegio de Posgraduados.
- Ortiz S.A., Cuanalo C.E. 1978. Metodología del levantamiento fisiográfico. Un sistema de clasificación de tierras. Colegio de Posgraduados de Chapingo, México.
- Quédraogo M.M., Degré A., Debouche C., Lisein J. 2014. The evaluation of unmanned aerial System- based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. *Geomorphol.* 214: 339-355.

