

Capítulo 8

Cuantificación de recursos naturales pétreos a partir de métodos aerofotogramétricos y análisis en sistemas de información geográfica

*Román Edén Parra-Galaviz
Manuel de Jesús Pérez-Valdez
Ciro de la Concepción Díaz-Hernández*

Introducción

En la actualidad, es imprescindible hablar acerca de la educación ambiental como punto de partida para la preservación y conservación de los espacios y/o recursos naturales (Chirinos et al., 2017), con el objetivo de lograr una mejor planificación del desarrollo sostenible, el cual se concibe según (Barbera et al., 2019) como un proceso continuo orientado al logro de metas o propósitos comunes, establecidos mediante el diálogo y la comunicación entre los actores de una organización, comunidad, etc., para alcanzar una mejor calidad de vida.

Por lo anterior, es de suma importancia buscar la relación y el trabajo coordinado entre investigadores de distintas universidades públicas, cuya finalidad esté orientada no únicamente en la solución de problemáticas locales, sino que a través de la implementación de diferentes metodologías, se aporte en buena medida a la agenda 2030 y los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS).

En la última década se ha implementado el uso de drones y barredores laser como LIDAR (Light Detetion and Ranging), para cartografiar parte de la superficie terrestre de manera eficiente (Parra et al., 2018), sin dejar de lado el uso de aeronaves tripuladas, por lo que, en la actualidad se desarrollan numerosos y diversos estudios de sostenibilidad y medioambiente que se basan en la interpretación de fotografías aéreas, tanto satelitales como desde drones y aviones tripulados, las cuales se han convertido en un recurso esencial en el ámbito de la Cartografía y los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Estas imágenes aéreas no solo permiten la observación y el análisis, sino que también son la base para la formulación de hipótesis, la creación de modelos y la generación de productos que brindan una representación precisa de los fenómenos estudiados. A esta ciencia se le conoce como Fotogrametría, la cual se define como el conjunto de métodos y procedimientos mediante los cuales podemos deducir de la fotografía de un objeto, la forma y dimensiones del mismo (Schenk, 2002; Lerma, 2002; Santamaría y Sanz, 2011), en donde cada imagen se modela idealmente como una proyección central (Remondino y Fraser, 2006).

De esta forma, se posibilita la generación de información espacial y la topografía en dos o tres dimensiones a partir de las características y elementos visibles en dos o más imágenes (Westoby et al., 2012) so that data acquisition is often passed on to specialist third party organisations. The high costs of

data collection are, for many applications in the earth sciences, exacerbated by the remoteness and inaccessibility of many field sites, rendering cheaper, more portable surveying platforms (i.e. terrestrial laser scanning or GPS que juntamente con los paquetes de software como Arc3D, Photosynth/Bundler, AutoDesk PhotoFly y Agisoft Photoscan (Agisoft Metashape, en su versión reciente), permiten la reconstrucción de escenas y modelos (Dellepiane et al., 2013; De Reu et al., 2014; Koutsoudis et al., 2014).

Sobre este tema, en México, la Dirección General de Geografía (DGG) ha realizado la captura de aproximadamente 700,000 aerofotografías, desde aeronaves tripuladas con cámaras fotogramétricas, que abarcan todo el territorio nacional, para la creación de cartografía topográfica de diferentes escalas, además de su uso en ciertos proyectos especiales que incluyen el cubrimiento de islas y la realización de tomas para necesidades concretas como situaciones de desastre o proyectos específicos de fotointerpretación de recursos naturales (INEGI, 2000).

En este sentido, el presente capítulo aborda una metodología de tipo experimental con enfoque cuantitativo para inferir en los volúmenes de excavación de recursos naturales pétreos a partir de técnicas de fotogrametría digital y análisis SIG.

En la propuesta, se plantea la toma de fotografías aéreas con cámaras digitales no fotogramétricas (convencionales) en el rango visible, desde aeronaves tripuladas, y el uso de software tanto en el procesamiento digital de imágenes como en el análisis de los modelos obtenidos, con el objetivo de proponer un método cuantitativo que sirva como instrumento de medición y, además, ilustre e invite al lector a conocer el soporte teórico del que dependen modernas tecnologías de estudios geoespaciales, como Drones y LIDAR, adentrándose en el antecedente de la fotogrametría clásica y su formulación elemental.

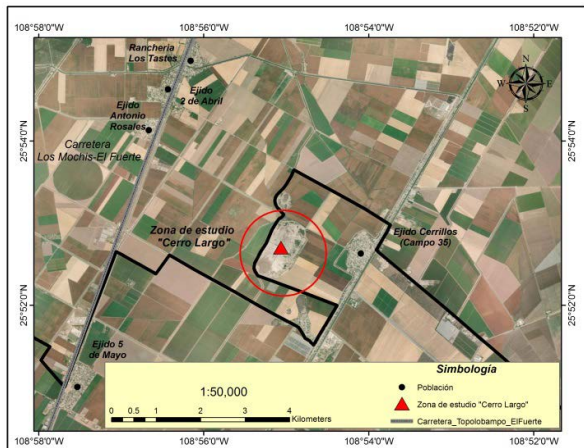
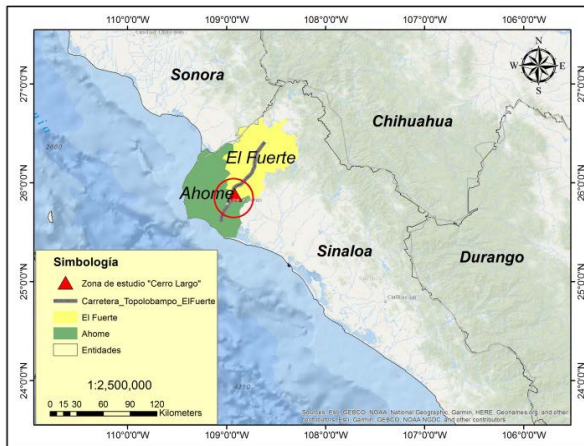
Materiales y métodos

2.1 Zona de estudio

La investigación se realizó en el banco de material pétreo denominado “Cerro Largo”, ubicado a 8 kilómetros al Noreste de la ciudad de Los Mochis, Sinaloa, en las coordenadas Latitud Norte 25°52'26.91” y Longitud Oeste 108°55'4.24”, entre los límites de los municipios de Ahome y El Fuerte, del mismo estado, con una superficie aproximada de 300 hectareas (figura 1).

Esta zona está siendo explotada por empresas particulares para fines de la construcción y se ha observado un acelerado ritmo de explotación desde febrero del 2016 a la fecha (2023), debido a la demanda de material pétreo en diferentes obras ingenieriles en ambos municipios colindantes, principalmente.

Figura 1. Zona de estudio: banco de materiales pétreos “Cerro Largo”.



Fuente: Elaboración propia.

2.2 Metodología

La reconstrucción de objetos en el espacio como taludes o afloramientos es posible mediante herramientas fotogramétricas a partir de algoritmos computacionales y técnicas denominadas estructuras obtenidas de movimiento (SFM), que permiten obtener Modelos Digitales de Elevación (MDE), mosaicos georeferenciados tridimensionales, entre otros (Vasuki, et al., 2014), y son precisamente este tipo de insumos los que permiten realizar un análisis minucioso de los elementos cartografiados.

En este sentido, Parra et al., (2021) mencionan que los SIG tienen la capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales y que estos modelos pueden utilizarse para la simulación de los efectos que un proceso de la naturaleza o una acción antrópica origina sobre un determinado escenario en una época específica, realizando proyecciones, a través de un análisis multitemporal de la información geográfica generada.

La metodología utilizada en esta investigación es de tipo experimental con enfoque cuantitativo, y consiste en la generación y validación de insumos geoespaciales de diferentes épocas (multitemporales) del banco de materiales pétreos “Cerro Largo” (como ortofotografías y modelos digitales de elevación de alta resolución), para el monitoreo de la extracción volumétrica de materiales a partir del procesamiento digital de imágenes aéreas tomadas desde aeronaves tripuladas y su análisis en SIG.

Para ello, se utilizaron los siguientes equipos y softwares: Aeronave tripulada Aerotrek A240, cámara digital Hasselblad 39 Mpixel con lente de 35 mm, plataforma portacámara, antenas GPS de doble frecuencia, Software Fotogramétrico Digital (SFD) *Agisoft Metashape*, el programa para dibujo avanzado *AutoCad* y el programa para sistema de información Geográfica ArcGIS.

Con la finalidad de profundizar en la propuesta metodológica, la investigación se dividió en las siguientes fases: a) Cálculo de parámetros de vuelo, b) Señalización y medición de los puntos de control fotogramétricos, c) Vuelo fotogramétrico, d) Procesamiento Digital de Imágenes, e) Análisis en SIG.

2.2.1 Cálculo de parámetros de vuelo

El cálculo de los parámetros de vuelo en una misión fotogramétrica es un tema que suele presentarse al estudiar la fotogrametría. En la actualidad, los drones por ejemplo, realizan esta tarea de forma automatizada, relacionando las características del sensor de la cámara fotográfica, altura de vuelo, velocidad de

desplazamiento, traslapes entre fotografías, etc. Sin embargo, se hace relevante en esta investigación, ya que se plantea el uso de aeronaves tripuladas no automatizadas, profundizar en el uso e interpretación de la formulación elemental (Parra et al., 2022; Pérez et al., 2021; Santamaría y Sanz, 2011):

$$H = f * m \quad ; \quad m = H/f \quad (1)$$

Donde H es la altura de vuelo, f es la distancia focal de la cámara fotográfica y m es la escala de la imagen o bien la resolución espacial en cámaras digitales.

$$b = \frac{(L_x)(100-p)}{100} \quad (2)$$

Aquí, se calculó la base de fotografiado b que indica la cantidad de píxeles entre las coordenadas centrales de dos fotografías consecutivas, en función de la longitud en píxeles del eje X en la matriz de la cámara (L_x) y el porcentaje de recubrimiento o traslape longitudinal p .

$$B = \frac{(L_x)(100-p)}{100} * m \quad ; \quad B = b * m \quad (3)$$

Con la expresión anterior, se determinó la base de fotografiado B que caracteriza la distancia o cantidad de metros entre los centros de dos fotografías consecutivas.

$$A = \frac{(L_y)(100-q)}{100} * m \quad (4)$$

Siendo A la separación o distancia en metros entre líneas de vuelo, L_y es la longitud en píxeles del eje Y en la matriz de la cámara y q el porcentaje de recubrimiento o traslape transversal.

$$I = \frac{3.6 B}{V} \quad (5)$$

Aquí, I es el intervalo de tiempo en segundos entre dos disparos consecutivos de la cámara, V es la velocidad de la aeronave, mientras que 3.6 es la constante de conversión entre Km/h y m/s .

A partir de esta formulación y las características de la Cámara Hasselblad de 39 Mpix con lente de 35 mm, considerando las alturas 1000, 700 y 500 metros, respecto al objeto de estudio, se confeccionaron los proyectos de levantamientos aéreos (líneas de vuelo o rutas de navegación de la aeronave). El cálculo de los parámetros para cada proyecto se muestra en la tabla 1.

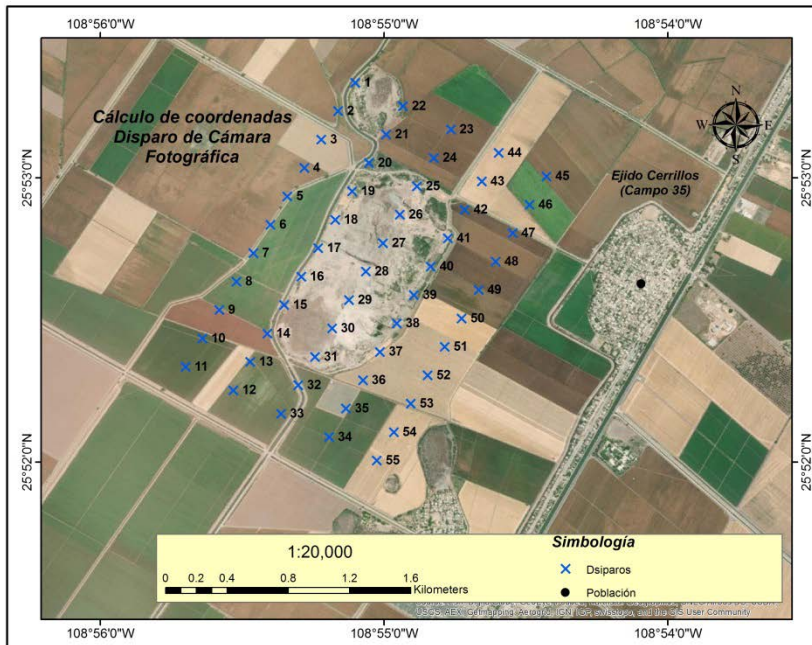
Tabla 1. Cálculo de parámetros de vuelo.

Parámetros	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3
f Distancia focal (pix)	5,158.386	5158.386	5158.386
Longitud en del eje X en la matriz (pix)	7,212	7212	7212
Longitud en del eje Y en la matriz (pix)	5,412	5412	5412
p Traslape longitudinal (%)	70	70	70
q Traslape transversal (%)	40	40	40
V Velocidad de la aeronave (km/h)	100	100	100
H Altura de vuelo (m)	1,000	700	500
m Escala de la imagen o Resolución espacial (m)	0.194	0.136	0.097
b Base fotográfica (pix)	2,163.6	2163.6	2,163.6
B Base fotográfica (m)	420	295	210
A Separación entre líneas de vuelo (m)	630	442	315
I Intervalo de tiempo entre dos disparos consecutivos (s)	15.1	10.6	7.6

Fuente: Elaboración propia.

Retomando los parámetros calculados en el proyecto 3 (para ejemplificar), se determinaron las coordenadas de los disparos de la cámara durante la navegación sobre las líneas de vuelo. En total, para el cubrimiento total de la zona estudiada, se trazaron 5 líneas de vuelo con 11 disparos (fotografías) en cada una de ellas, dando un total de 55 imágenes para cubrir la zona de estudio (figura 2).

Figura 2. Proyección de líneas de vuelo y disparos de la cámara fotográfica.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Señalización y medición de los puntos de control fotogramétricos

Para poder realizar un procesamiento de imágenes aéreas, es de vital importancia la colocación y medición de puntos de control fotogramétricos (PCF), que son puntos del terreno claramente identificados en la fotografía, de los cuales se conocen las coordenadas precisas (Agüera et al., 2017) y permiten unir todas las fotografías en un solo bloque para una perspectiva integral del lugar estudiado. Estos se clasifican en Puntos de apoyo terrestre (GCP) y Puntos de validación (CCP), los primeros garantizan una geometría robusta para el

modelo, mientras que los CCP proporcionan una evaluación independiente de la precisión (James et al., 2020).

En el área de “Cerro Largo”, se colocaron un total de 15 PCF, de los cuales 10 fueron para el procesamiento de las imágenes y los otros 5 para la validación del modelo (10 como GCP y 5 como CCP). Las mediciones de sus coordenadas (tabla 2) se efectuaron con un GPS doble frecuencia (figura 3) en método RTK (Real Time Kinematic).

Tabla 2. Coordenadas de los PCF.

Coordenadas UTM zona 12 N WGS84			
PCF	X	Y	Z
1	709286.102	2864576.316	22.184
2	708229.066	2862839.432	20.147
3	708665.120	2863737.932	41.360
4	708105.906	2864188.470	20.626
5	708898.256	2863510.596	21.729
6	709130.054	2864299.690	21.952
7	708860.701	2864271.661	49.523
8	708366.765	2863306.259	46.061
9	708219.947	2863218.749	21.636
10	708158.834	2863573.149	23.247
11	708553.441	2864483.411	22.293
12	708771.040	2864850.697	21.031
13	707921.084	2863875.289	20.820
14	709494.062	2864879.220	21.579
15	709735.164	2863984.629	21.355

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Mediciones GPS de los puntos de control fotogramétricos.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.3 Vuelo fotogramétrico

Se realizaron cuatro vuelos fotogramétricos comparativos; los primeros dos en octubre y diciembre de 2015 respectivamente, el tercero en septiembre del 2016 y el último en noviembre de 2023. La elección de épocas de muestreo se determinó para realizar el análisis de extracción multitemporal a corto, mediano y largo plazo en la dinámica de explotación del banco de materiales pétreos.

Las imágenes fueron tomadas con una cámara Hasselblad 39 Mpíxel, usando una lente de 35 mm, adaptada en una plataforma móvil (Figura 4a) sobre una aeronave ultraligera Aerotrek-A240 (figura 4b) con altitudes de 1000, 500, 700 y 500 metros, de acuerdo con el periodo de muestreo, retomando los valores de los parámetros de vuelo calculados en la tabla 1.

Se utilizó un disparador manual, navegando sobre las líneas de vuelo con sistema de posicionamiento global sincronizado con el sistema de navegación del avión (figura 5).

Figura 4. Toma de fotografías aéreas: (a) Cámara Hasselblad 39 Mpix.; (b) Aeronave Aerotrek A-240.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Sistema de Navegación de la aeronave.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.4 Procesamiento digital de imágenes

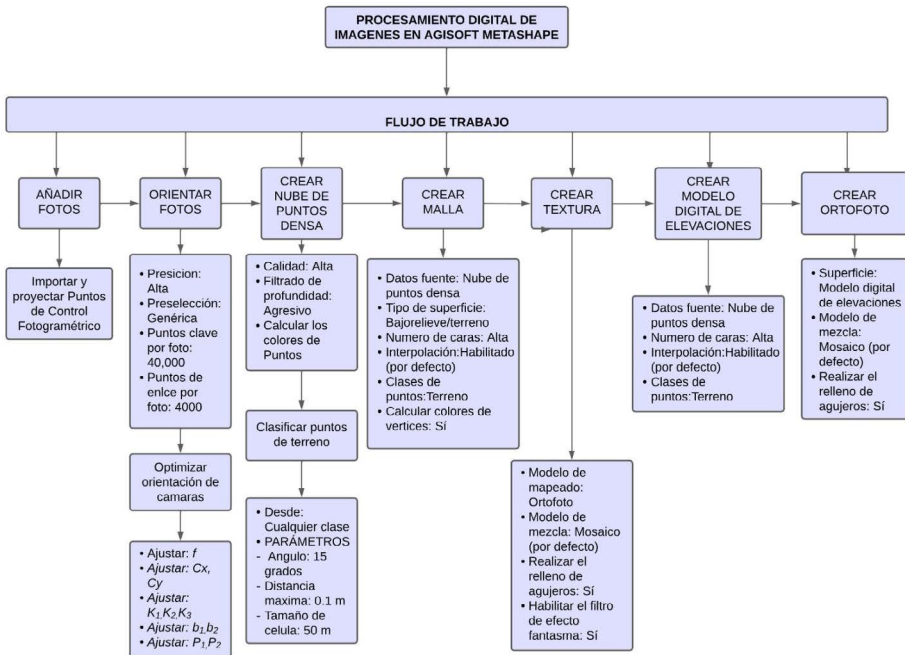
El Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) se llevó a cabo en el software fotogramétrico *Agisoft Metashape* (anteriormente *Photoscan*). Para Peinado et al., (2014), este es un programa de fácil manejo, rápido y una herramienta

muy potente, tiene una gran velocidad de cálculo, y corrige automáticamente los errores de las deformaciones fotográficas y distorsiones del objetivo, ya que como lo mencionan Koutsoudis et al., (2014); Fernández et al., (2015), está basado en la adquisición de grandes densidades de puntos a partir de la correlación y utiliza procedimientos aplicados en el campo de la visión computacional y gráficos, como SfM (Structure from Motion) y MVS (Multi View Stereo), con los que se obtiene automáticamente un modelo 3D a partir de múltiples imágenes convergentes (Colica et al., 2021; Gonçalves & Henriques, 2015; Kyriakaki et al., 2014) with a daily average upload of 300 million photos. These photos, apart from documenting personal lives, often relate to experiences in well-known places of cultural interest, throughout several periods of time. Thus from the viewpoint of Cultural Heritage professionals, they constitute valuable and freely available digital cultural content. Advances in the fields of Photogrammetry and Computer Vision have led to significant breakthroughs such as the Structure from Motion algorithm which creates 3D models of objects using their 2D photographs. The existence of powerful and affordable computational machinery enables the reconstruction not only of single structures such as artefacts, but also of entire cities. This paper presents an overview of our methodology for producing cost-effective 4D – i.e. in space and time – models of Cultural Heritage structures such as monuments and artefacts from 2D data (pictures, video).

Las comparaciones entre softwares disponibles comercialmente, han señalado que Agisoft Metashape proporciona mayores tasas de alineación de imágenes, una resolución ortomosaica más fina y distancias de muestreo de suelo mejoradas (Fraser y Congalton, 2018; Przybilla et al., 2019), destacándolo como un paquete de software particularmente común utilizado para la producción de conjuntos de datos 3D a través de IBM (Hill et al., 2014; Jones y Church, 2020; Magnani et al., 2020; Verhoeven, 2011).

Además, tiene la ventaja de que la cámara fotográfica no necesita una calibración previa, por lo que nos brinda la posibilidad de usar cámaras digitales convencionales. Dicho esto y considerando las ventajas ofrecidas, el procedimiento empleado en esta investigación, para el procesamiento digital de imágenes, se basa en el flujo de trabajo Agisoft Metashape (esquema 1).

Esquema 1. Procesamiento digital de imágenes en Agisoft Metashape.

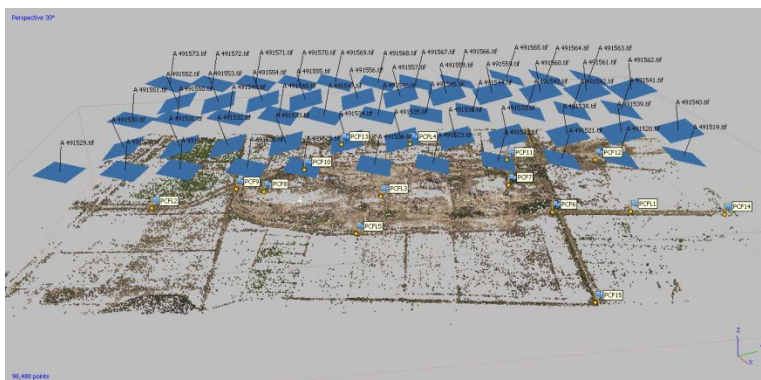


Fuente: Elaboración propia.

La primera etapa consistió en agregar tanto las imágenes de cada vuelo (en proyectos independientes) como las coordenadas de los PCF, marcando y midiendo cada uno de ellos en las imágenes proyectadas, declarando el sistema de coordenadas a emplear (UTM zona 12N WGS84).

Después, se realizó la orientación de las imágenes: la orientación interna, que describe la geometría particular de cada una de las fotografías y permite relacionar las coordenadas foto (mm) con las coordenadas imagen (píxel), la orientación relativa que permite determinar la disposición angular relativa y el desplazamiento de posición entre fotografías consecutivas al momento en que fueron tomadas y la orientación absoluta (a partir de PCF) para corregir las distorsiones geométricas (figura 6). Se efectuó una automatización al proceso de orientación, ajustándose los parámetros principales de la cámara fotográfica (autocalibración).

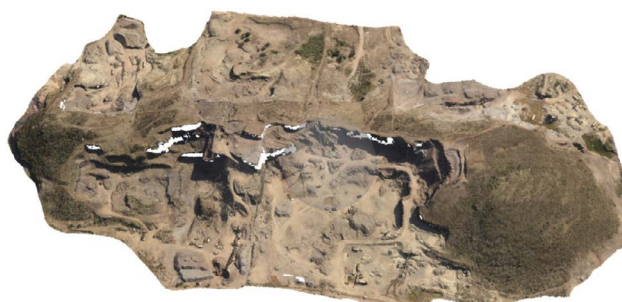
Figura 6. Orientación de Imágenes con PCF.



Fuente: Elaboración propia.

El segundo paso fue generar la nube de puntos densa basada en la imagen estimada. *Metashape* calcula la información de profundidad para cada una de las imágenes y posteriormente se combina una sola nube de puntos (figura 7). Se obtuvo una nube densa con un total de 5'079,440 puntos, lo que equivale aproximadamente a 1 punto por cada 0.5 m² en la zona fotografiada. Se utilizó la herramienta de clasificación de puntos de terreno, con el algoritmo automatizado, para detectar los puntos característicos fijados sobre el material pétreo.

Figura 7. Nube de puntos densa.

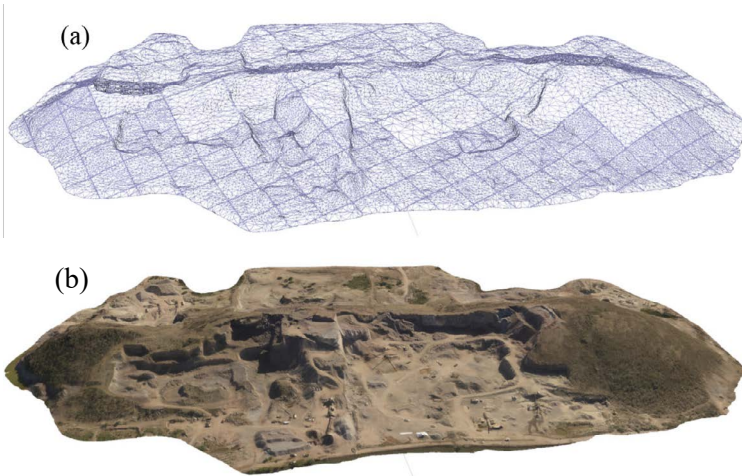


Fuente: Elaboración propia.

El tercer paso consistió en la construcción de red de triángulos irregulares o malla de triángulos 3D (figura 8a) a partir de la interpolación de los puntos en la nube densa, en la que se aplicó la textura en base al mosaico de imágenes

y el relleno de agujeros. Posteriormente se creó el MDT (Modelo Digital de Terreno) que consideró únicamente los puntos característicos del terreno natural, discriminado vegetación o cualquier objeto identificado como punto no perteneciente a esta categoría (figura 8b).

Figura 8. Modelos digitales de elevación: (a) Malla de triangulación 3D; (b) Modelo digital de terreno.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.5 Análisis en SIG

En palabras de Olaya (2020), el SIG es un sistema de información diseñado para trabajar con datos referenciados mediante coordenadas espaciales o geográficas, o bien, es tanto un sistema de base de datos con capacidades específica para datos georeferenciados, como un conjunto de operaciones para trabajar con esos datos.

Por ello, la utilidad principal de un SIG radica en su capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales y en la utilización de esos modelos en la simulación de los efectos que un proceso de la naturaleza o una acción antrópica origina sobre un determinado escenario en una época específica, pudiendo comparar efectos con otras épocas o proyectar consecuencias.

En la actualidad los modelos constituyen un medio para lograr la representación del relieve muy versátil y funcional, ya que a partir del mismo no solo

se puede conocer la conformación o morfología del terreno sino también los elementos de origen antrópico y la vegetación presente en el mismo.

Para realizar el análisis comparativo entre volúmenes de material extraído en las diferentes épocas de “Cerro Largo”, de los 4 modelos raster generados en la investigación, se utilizó ArcGIS 10.8, un “software” de Sistema de Información Geográfica diseñado por la empresa californiana Environmental Systems Research Institute (ESRI) para trabajar a nivel multiusuario.

Resultados y discusión

3.1 Precisión y validación del procesamiento digital de imágenes

Se determinó la precisión del PDI mediante el estimador RMSE (Error Medio Cuadrático) de la posición de los GCP a partir de las correlaciones que estos guardan al interior del modelo (tabla 3). Por otra parte, la validación o confiabilidad en las mediciones se realizó mediante la comparativa del modelo orientado respecto a la posición espacial de los CCP y su proyección en las imágenes correspondientes (tabla 4).

$$RMSE (Ex) = \sqrt{\sum (Ex_i - \overline{Ex})^2 / n} \quad (6)$$

$$RMSE (Ey) = \sqrt{\sum (Ey_i - \overline{Ey})^2 / n} \quad (7)$$

$$RMSE (Exy) = \sqrt{RMSE (Ex)^2 + RMSE (Ey)^2} \quad (8)$$

$$RMSE (Ez) = \sqrt{\sum (Ez_i - \overline{Ez})^2 / n} \quad (9)$$

En las fórmulas anteriores, $RMSE (Ex)$, $RMSE (Ey)$ y $RMSE (Ez)$ representan los errores medios cuadráticos para las coordenadas X, Y, Z respectivamente. $RMSE (Exy)$ es el error medio cuadrático del modelo en el sistema cartesiano xy, mientras que Ex_i , Ey_i y Ez_i son los errores de correlación de los puntos de control al interior del mismo, los cuales se comparan con los respectivos errores promedios (\overline{Ex} , \overline{Ey} , \overline{Ez}).

Tabla 3. RMSE de los GCP al interior del modelo.

Nombre	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Imagen (pix)
GCP 1	-4.913	12.839	-16.605	0.540 (4)
GCP 2	0.369	-0.477	-0.303	0.328 (3)
GCP 3	-3.876	8.926	-1.553	0.503 (4)
GCP 4	0.019	0.019	0.002	0.325 (3)
GCP 5	-0.684	-2.663	0.980	0.321 (5)
GCP 6	0.046	-0.835	0.021	0.395 (7)
GCP 7	3.471	0.712	8.795	0.554 (5)
GCP 8	2.239	5.382	20.248	0.484 (3)
GCP 9	-0.658	-1.404	-0.314	0.153 (6)
GCP 10	4.294	-0.310	-0.460	0.354 (3)
RMSE	2.751	5.330	8.757	0.409

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. RMSE de los CCP de validación en la precisión del modelo.

Nombre	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Imagen (pix)
CCP 11	-1.595	-0.186	0.327	0.269 (7)
CCP 12	43.797	13.232	16.505	1.119 (4)
CCP 13	-0.042	-0.096	-0.113	0.130 (3)
CCP 14	0.666	-0.258	-0.506	0.035 (2)
CCP 15	1.044	0.549	-0.492	0.153 (3)
RMSE	19.6074	5.92482	7.38984	0.545

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que el *RMSE* (E_{xy}) calculado a partir de los puntos de validación CCP es de 21.7 cm, mientras que el *RMSE* (E_z) fue de 7.3 cm, suficiente precisión para considerar que los insumos obtenidos (en este caso de los MDT) tiene un alto grado de confiabilidad y se asemejan a las obtenidas con métodos de la topografía moderna (estaciones totales y sistemas GPS).

3.2 Insumos obtenidos: modelos digitales de terreno

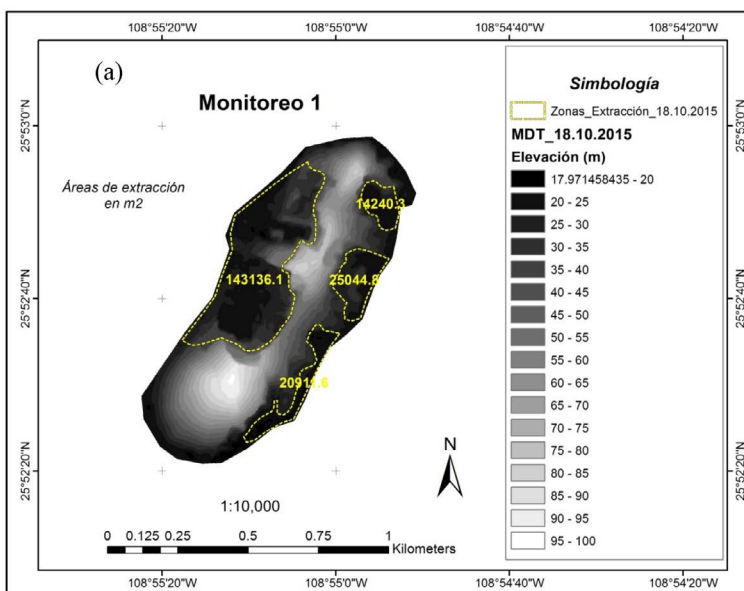
Se obtuvieron 4 MDT, de buena precisión, sobre el banco de materiales pétreos “Cerro Largo”, uno para cada monitoreo, clasificados por la altura, fecha de vuelo y sus respectivos parámetros geométricos; tamaño del raster y resolución espacial (tabla 5). Los modelos multitemporales fueron exportados de *Agisoft Metashape*, mediante el formato Raster “GEO TIFF”, para ser analizados en *ArcGis* y determinar las zonas de extracción de material (figura 9a, 9b, 9c y 9d).

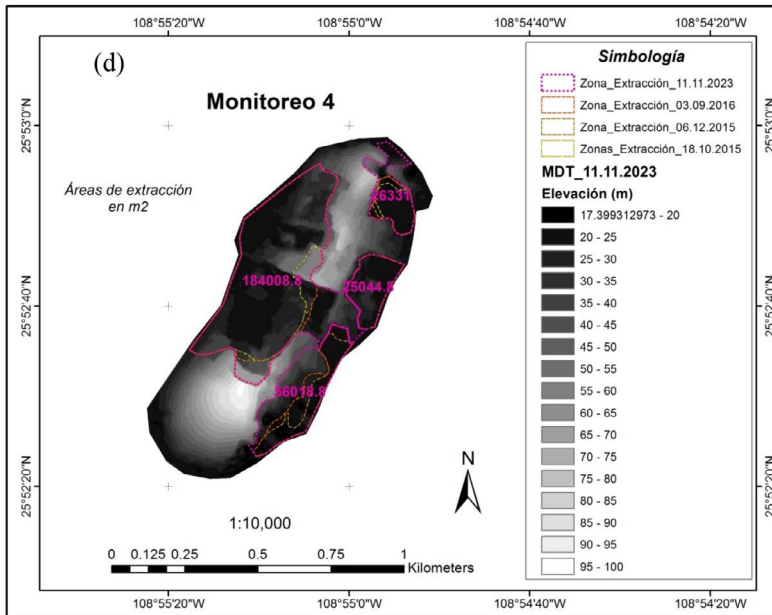
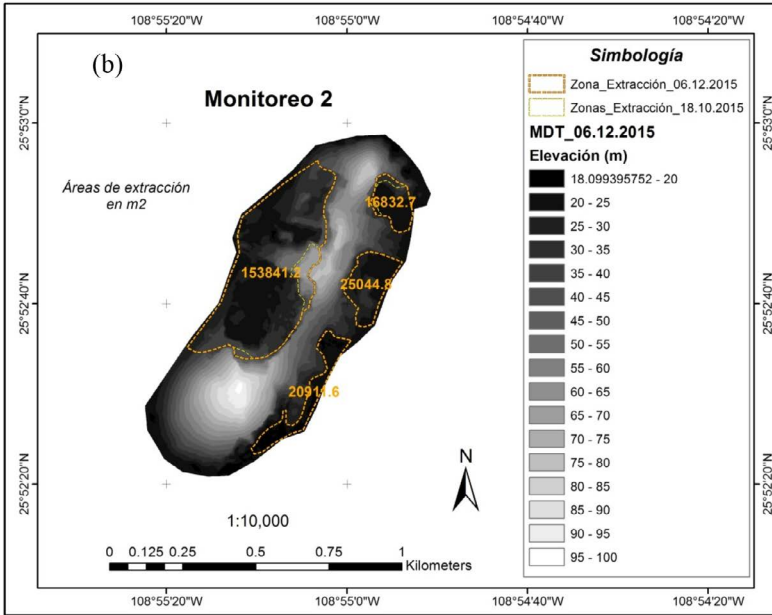
Tabla 5. Parámetros geométricos de los MDT.

Monitoreo #	Altura de vuelo (m)	Fecha (dd/mm/aaaa)	Tamaño del Raster (pix)	Resolución espacial (cm/pix)
1	1,000	18/10/2015	1,114*1,504	72
2	500	06/12/2015	2,239*3,021	38
3	700	03/09/2016	1,561*2,107	55
4	500	11/11/2023	4,061*5,481	21

Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. MDT multitemporales: (a) Monitoreo 1, MDT_18/10/2015; (b) Monitoreo 2, MDT_06/12/2015; (c) Monitoreo 3, MDT_03/09/2016; (d) Monitoreo 4, MDT_11/11/2023.





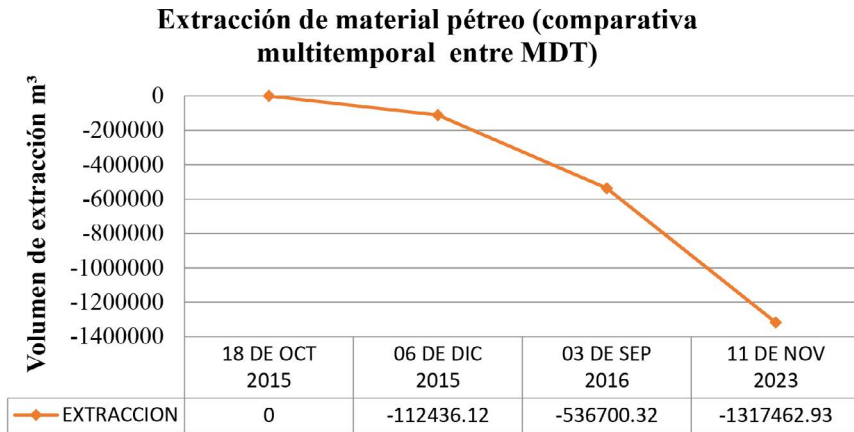
En este software SIG, se realizaron operaciones de análisis de superficies mediante las extensiones *3D analyst*, *Network analyst* y *Spatial analyst*, específicamente con la herramienta *area and volumen*, para obtener los datos volumétricos del objeto de estudio en las cuatro épocas de monitoreo. La separación elegida entre estratos o cortes altitudinales del terreno fue de cinco metros, lo que permitió realizar un análisis detallado de los parámetros geométricos de cada MDT (tabla 6) e inferir en las pérdidas de material de acuerdo a los diferentes periodos (gráfica 1).

Tabla 6. Parámetros geométricos de los MDT.

Elevación del MDT (m)	Volumen de material pétreo (m ³)			
	MDT_18/10/2015	MDT_06/12/2015	MDT_03/09/2016	MDT_11/11/2023
95	466.15	267.05	238.18	233.07
90	14,793.53	13,056.02	12,548.93	12,524.26
85	53,719.36	52,683.84	49,081.36	48,925.27
80	129,688.77	120,989.22	118,583.88	113,144.42
75	273,240.25	242,152.6	226,749.22	211,148.96
70	496,255.11	441,797.21	396,727.7	356,601.48
65	807,734.68	742,354.27	673,861.57	590,475.65
60	1,222,253.86	1,154,836.68	1,064,132.4	925,468.24
55	1,754,755.09	1,688,904.95	1,578,544.47	1,378,524.33
50	2,421,839.55	2,351,081.21	2,212,873.48	1,945,198.34
45	3,231,173.79	3,149,040.92	2,978,935.13	2,618,265.17
40	4,178,883.73	4,087,041.38	3,885,097.58	3,418,546.69
35	5,294,737.07	51,960,55.16	4,951,988.43	4,378,977.14
30	6,645,339.54	6,540,250.33	6,231,659.27	5,557,740.03
25	8,367,082.93	8,245,350.4	7,884,383.38	7,109,771.49
20	10,665,095.99	10,552,659.87	10,128,395.67	9,347,633.06

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 1. Volumen de extracción de material pétreo.



Fuente: Elaboración propia.

Considerando el monitoreo 1 como punto de partida para el cálculo de pérdida de volumen pétreo se determinó que, del día 18 de octubre de 2015 al 6 de diciembre del mismo año existe una pérdida de 1 % en un lapso de tiempo corto (un mes y medio).

Si comparamos el monitoreo 1 contra el 3 (del 18 de octubre de 2015 al 3 de septiembre de 2016) se calculó una pérdida del 5 % en un lapso de tiempo medio de 1 año. Por último, entre el primer monitoreo y actual (11 de noviembre de 2023) se calcula una extracción del 12.4 % en el lapso de tiempo largo, de ocho años.

Se observa que en los ocho años de monitoreo de la dinámica de explotación, el primer ciclo (del 2015-2016) mostró un acelerado ritmo de extracción de más de medio millón de metros cúbicos, en gran parte por las nuevas construcciones de fraccionamientos del sur de la ciudad de Los Mochis y las remodelaciones del puente a desnivel “El trébol” ubicado en la carretera México 15 con entronque en la misma ciudad.

Consideramos que el tiempo de pandemia 2020-2022, periodo crítico, ayudó en gran parte en la disminución de la dinámica observada en los estudios realizados a corto y mediano plazo. Sin embargo, en la actualidad, sigue siendo objeto de explotación.

Conclusiones

Se destacan algunas ventajas importantes de los vuelos fotogramétricos como: la panorámica de conjunto ofrecida por las imágenes al momento de realizar un análisis integral de los recursos naturales, la calidad técnica en la obtención de resultados, la notoria reducción de tiempos y el alto nivel de detalle en las características de las zonas de estudio.

Los RMSE obtenidos en el procesamiento digital de imágenes, (Exy) y (Ez), calculados a partir de los puntos de validación CCP fueron de 21.7 y 7.3 cm respectivamente, que indican una precisión elevada en la generación de Modelos Digitales analizados para la cuantificación volumétrica. Además, se obtuvieron resoluciones espaciales entre 21 y 72 cm/pix, lo que confirma la importancia de los productos obtenidos, ya que estas resoluciones no se encuentran disponibles para usuarios SIG de forma gratuita.

Actualmente, la metodología presentada en la investigación está siendo utilizada por parte de profesores, investigadores, estudiantes de licenciatura y posgrado, en diferentes proyectos de investigación a nivel regional y estatal que requieren de análisis espacial, por ejemplo: para estudios de mapeos de gran cobertura como es el caso de la actualización cartográfica en la ciudad de Los Mochis y Guasave en Sinaloa, en cálculos de volumen de vegetación del cerro de la memoria, estudios para delimitación de zonas federales, generación de insumos de alta resolución para el estudio de inundaciones, análisis de afectación en comunidades rurales por avenidas máximas de agua del Río Fuerte, entre otras.

Los resultados expuestos en la presente investigación, evidencian que, al pasar de los años, la fotogrametría clásica no deja de ser una herramienta factible en la captura de información geoespacial y en este caso permitió de manera rápida, precisa y a un bajo costo, inferir en la dinámica de explotación de materiales pétreos. Por todo esto, podemos concluir que la metodología empleada, en cuanto a la combinación de la aerofotogrametría y el uso de software automatizados tanto para el procesamiento de imágenes como el análisis SIG, ofrece buenos resultados al momento de cuantificar recursos naturales.

En investigaciones futuras se pretende analizar la metodología empleada mediante el uso de Vehículos aéreos no tripulados (drones), donde se analizarán cálculos automatizados, sensores, software para la ejecución de planes de vuelo, entre otras características, ya que consideramos relevante experimentar, validar y exponer diferentes alternativas de métodos cuantitativos para recursos naturales.

Por último, los autores, invitan a estudiantes y profesores de áreas afines (en el uso y manejo de tecnologías geoespaciales), así como a nuevos convenios con cuerpos académicos, a realizar proyectos colaborativos mediante el uso de esta herramienta metodológica (se pone a disposición para trabajo interdisciplinario) en la solución de problemas, principalmente en el área de sostenibilidad y medioambiente, que impacten positivamente en los Objetivos del desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Referencias

- Agüera, F., Carvajal, F., & Martínez, P. (2017). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 98, 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>
- Barbera, N., Chirinos, Y., & Posada, M. (2019). La planificación del desarrollo sostenible desde los sistemas complejos adaptativos en Colombia. In Y. Chirinos, A. Ramírez, N. Barbera, & D. Rojas (Eds.), *Tendencias en la investigación universitaria. Una visión desde Latinoamérica. Volumen V* (pp. 24–42). Fondo Editorial Universitario Servando Garcés de la Universidad Politécnica Territorial de Falcón Alonso Gamero / Alianza de Investigadores Internacionales S.A.S.
- Chirinos, Y., González, C., Meriño, V., & Martínez, C. (2017). La educación ambiental en el proyecto educativo integral comunitaria: una reflexión desde la participación en comunidades escolares. In Y. Chirinos, A. García, E. Rodríguez, C. Pérez, & L. Camejo (Eds.), *Tendencias en la investigación universitaria. Una visión desde Latinoamérica. Volumen I* (pp. 3–31). Fondo Editorial Universitario Servando Garcés de la Universidad Politécnica Territorial de Falcón Alonso Gamero / Alianza de Investigadores Internacionales S.A.S.
- Colica, E., D'Amico, S., Iannucci, R., Martino, S., Gauci, A., Galone, L., Galea, P., & Paciello, A. (2021). Using unmanned aerial vehicle photogrammetry for digital geological surveys: case study of Selmun promontory, northern of Malta. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), 551. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09846-6>
- De Reu, J., De Smedt, P., Herremans, D., Van Meirvenne, M., Laloo, P., & De Clercq, W. (2014). On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice. *Journal of Archaeological Science*, 41, 251–262. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.08.020>

- Dellepiane, M., Dell'Unto, N., Callieri, M., Lindgren, S., & Scopigno, R. (2013). Archeological excavation monitoring using dense stereo matching techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 14(3), 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.01.011>
- Fernández, J., González, D., Rodríguez, P., & Mancera, J. (2015). Image-Based Modelling from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry: An Effective, Low-Cost Tool for Archaeological Applications. *Archaeometry*, 57(1), 128–145. <https://doi.org/10.1111/arcm.12078>
- Fraser, B., & Congalton, R. (2018). Issues in Unmanned Aerial Systems (UAS) Data Collection of Complex Forest Environments. *Remote Sensing*, 10(6), 908. <https://doi.org/10.3390/rs10060908>
- Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>
- Hill, A., Rowan, Y., & Kersel, M. (2014). Mapping with Aerial Photographs: Recording the Past, the Present, and the Invisible at Marj Rabba, Israel. *Near Eastern Archaeology*, 77(3), 182–186. <https://doi.org/10.5615/nea-reastarch.77.3.0182>
- INEGI. (2000). *Sistema Nacional de Fotografía aérea (SINFA)* (Issue 1). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- James, M., Antoniazza, G., Robson, S., & Lane, S. (2020). Mitigating systematic error in topographic models for geomorphic change detection: accuracy, precision and considerations beyond off nadir imagery. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(10), 2251–2271. <https://doi.org/10.1002/esp.4878>
- Jones, C. A., & Church, E. (2020). Photogrammetry is for everyone: Structure-from-motion software user experiences in archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 30, 102261. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102261>
- Koutsoudis, A., Vidmar, B., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., & Chamzas, C. (2014). Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage*, 15(1), 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.12.003>
- Kyriakaki, G., Doulamis, A., Doulamis, N., Ioannides, M., Makantasis, K., Protopapadakis, E., Hadjiprocopis, A., Wenzel, K., Fritsch, D., Klein, M., & Weinlinger, G. (2014). 4D Reconstruction of Tangible Cultural Heritage Objects from Web-Retrieved Images. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3(2), 431–451. <https://doi.org/10.1260/2047-4970.3.2.431>
- Lerma, J. (2002). *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. Universidad Politécnica de Valencia.

- Magnani, M., Douglass, M., Schroder, W., Reeves, J., & Braun, D. R. (2020). The Digital Revolution to Come: Photogrammetry in Archaeological Practice. *American Antiquity*, 85(4), 737–760. <https://doi.org/10.1017/aaq.2020.59>
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. <https://pcsitna.navarra.es/archivo/Documents/Sistemas.de.Informacion.Geografica.pdf>
- Parra, R., Díaz, C., Medina, S., Torres, J., & Felix, R. (2018). Monitoreo en la dinámica de explotación de bancos de materiales pétreos a partir de levantamientos aerofotográficos tripulados. In J. Rodríguez, H. Piña, & E. Lara (Eds.), *Estudios de Desarrollo Sustentable* (pp. 39–72). Universidad Autónoma Indígena de México.
- Parra, R., Pérez, M., Díaz, C., & Rodríguez, M. (2022). Generación de ortofotografías de alta resolución en la ciudad de Guasave, sinaloa, a partir de vuelos tripulados y el usos de software automatizado para su procesamiento. In H. Ayala, A. Ramírez, & Y. Martínez (Eds.), *Tendencias actuales en las Ciencias de la Computación* (pp. 205–228). Universidad Autónoma Indígena de México/Astra Editorial.
- Parra, R., Pérez, M., Rodríguez, J., Piña, H., & Castro, C. (2021). Implementación de fotografías aéreas y sistemas de información geográfica para la determinación de áreas y volúmenes de corteza vegetal. In Y. Chirinos, A. Ramírez, R. Godínez, N. Barbera, & D. Rojas (Eds.), *Tendencias en la investigación universitaria. Una visión desde Latinoamérica. Volumen XIII* (pp. 66–85). Fondo Editorial Universitario Servando Garcés de la Universidad Politécnica Territorial de Falcón Alonso Gamero / Alianza de Investigadores Internacionales S.A.S. <https://doi.org/10.47212/tendencias2020vol.xiii.5>
- Peinado, Z., Fernández, A., & Hernández, L. (2014). Combinación de fotogrametría terrestre y aérea de bajo coste: el levantamiento tridimensional de la iglesia de San Miguel de Ágreda (Soria). *Virtual Archaeology Review*, 5(10), 51. <https://doi.org/10.4995/var.2014.4210>
- Pérez, M., Parra, R., Macías, R., Díaz, C., & Félix, R. (2021). Análisis geoespacial para la delimitación de la zona federal marítimo terrestre en áreas naturales protegidas, caso playa El Maviri, Sinaloa, México. *Ra Ximhai*, 405–424. <https://doi.org/10.35197/rx.17.03.2021.17.mp>
- Przybilla, H.-J., Lindstaedt, M., & Kersten, T. (2019). INVESTIGATIONS INTO THE QUALITY OF IMAGE-BASED POINT CLOUDS FROM UAV IMAGERY. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13(June), 539–545. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-539-2019>
- Remondino, F., & Fraser, C. (2006). Digital Camera Calibration Methods: Considerations and Assumptions. In *International Archives of Photogram-*

- metry* (Vol. 36, Issue 5, pp. 266–272). <http://www.mendeley.com/research/digital-camera-calibration-methods-12/>
- Santamaría, J., & Sanz, T. (2011). Fundamentos De Fotogrametría. *In Material didactico - Ingenierias 16*. Universidad de la Rioja.
- Schenk, T. (2002). Fotogrametría digital. Instituto Cartográfico de Catalunya.
- Verhoeven, G. (2011). Taking computer vision aloft – archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan. *Archaeological Prospection*, 18(1), 67–73. <https://doi.org/10.1002/arp.399>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Síntesis curriculares

Dr. Adalid Graciano Obeso

Profesor investigador de tiempo completo titular B del Tecnológico Nacional de México, Campus Guasave, doctor en Ciencias en Estudios para la Sostenibilidad y Medio Ambiente por la Universidad Autónoma Indígena de México. Forma parte del Cuerpo Académico en Formación ITESGUA-CA-1 del Tecnológico Nacional de México, miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos del estado de Sinaloa, pertenece a la Red Estatal de Divulgadores de la Ciencia y la Tecnología en Sinaloa, así como a la Red de Promotores ODS y a la Red Iberoamericana de Academias de Investigación A.C. Sus líneas de investigación son Tecnologías Emergentes e Innovación Agroalimentaria y Sistemas de Producción Agrícola Sustentable. Contacto: 6873668606, adalid.go@guasave.tecnm.mx

Dr. Gilberto Bojórquez Delgado

Profesor investigador de tiempo completo Titular B del Tecnológico Nacional de México, Campus Guasave, ingeniero Electrónico del Instituto Tecnológico de Los Mochis, obtuvo su Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Chihuahua y su doctorado en Ciencias por la Universidad Autónoma Indígena de México. Como miembro del Sistema Nacional de Investigadores de Conacyt Nivel II, se especializa en tecnologías avanzadas para sistemas agroindustriales, con énfasis en IoT, Inteligencia Artificial y Big Data. Su trabajo se enfoca en promover la autosuficiencia tecnológica y el desarrollo regional sostenible, con numerosas publicaciones y proyectos de investigación aplicada. Contacto: 6871026729, gilberto.bd@guasave.tecnm.mx

Dr. Lennin Enrique Amador Castro

Doctor en Ciencias en Estudios para la Sostenibilidad y Medio Ambiente por la Universidad Autónoma Indígena de México. Maestro en Ciencias en Electrónica con orientación en Telecomunicaciones por el Centro de Investigación Científica y de Estudios Superior de Ensenada e ingeniero en Electrónica por el Tecnológico Nacional de México/ IT de Los Mochis. Investigador integrante del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos (SSIT). Actualmente

pertenece al Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras (SNII) como candidato a investigador. Correo electrónico: lennin.ac@mochis.tecnm.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6773-711X>

Dr. Jesús Ramón Rodríguez Apodaca

Doctor en Ciencias por la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, Campus Tijuana. Maestro en Ciencias en Química por el Centro de Graduados e Investigación en Química del Instituto Tecnológico de Tijuana, Campus Otay e ingeniero Químico por el Instituto Tecnológico de Los Mochis. Investigador integrante del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos (SSIT). Actualmente Profesor-Investigador de la Universidad Autónoma Indígena de México (UAIM). Cuenta con Reconocimiento a Perfil Deseable del Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP). Integrante del Cuerpo Académico Biodiversidad y Estrategias Comunitarias de Desarrollo Sostenible UAIM-CA-13. Miembro de la Red Temática Nacional Patrimonio Biocultural del CONAHCyT e integrante del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras Nivel I. Correo electrónico: jramon@uaim.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2679-8594>

Esther Graciela Lizárraga Mata

Maestra en Administración de Negocios de la Universidad TecMilenio y licenciada en Contaduría por el Tecnológico Nacional de México/ IT de Los Mochis. Docente del departamento de Ciencias Económico Administrativas de la Universidad Autónoma de Occidente. Correo electrónico: esther.lizarraga@uadeo.mx ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3673-781X>

Dr. Juan Héctor Alzate Espinoza

Profesor investigador de tiempo completo del Tecnológico Nacional de México, Campus Guasave, doctor en Administración por el Centro Universitario de Ciencias e Investigación Líder del Cuerpo Académico en Formación ITESGUA-CA-4 del Tecnológico Nacional de México, miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos del estado de Sinaloa, pertenece a la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, así como al Colegio Mexicano de Ingenieros en Gestión Empresarial. Sus líneas de investigación son Desa-

rollo Regional Innovación tecnológica y Calidad, Y Diseño y optimización de productos y procesos. Contacto: 6681644473, juan.ae@guasave.tecnm.mx

Dra. Grace Erandy Báez Hernández

Profesor investigador de tiempo completo titular B del Tecnológico Nacional de México, Campus Guasave, candidata a doctora en Ciencias en Desarrollo Sustentable de Recursos Naturales por la Universidad Autónoma Indígena de México. Líder del Cuerpo Académico en Formación ITESGUA-CA-1 del Tecnológico Nacional de México, miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos del estado de Sinaloa, pertenece a la Red Estatal de Divulgadores de la Ciencia y la Tecnología en Sinaloa, así como la Red Iberoamericana de Academias de Investigación A.C., y presidente de la Red de Investigación de Ergonomía del Noroeste. Sus líneas de investigación son: Desarrollo Regional Innovación tecnológica y Calidad, Y Diseño y optimización de productos y procesos. Contacto: 6681420529 grace.bh@guasave.tecnm.mx

Dr. Marco Arturo Arciniega Galaviz

Doctor en Desarrollo Sustentable de Recursos Naturales. Profesor de carrera de tiempo completo del Departamento Académico de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Occidente. Líneas de investigación: Prevención y control ambiental, Manejo sustentable de recursos biológicos. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8532-7130>. Correo electrónico: marco.arciniega@uadeo.mx, Celular: 6681463982

M. C. Jesús Bojórquez Delgado

Graduado en Sistemas Computacionales de la Universidad de Occidente, y de la maestría en Sistemas Computacionales y actualmente estudia un doctorado en la misma especialidad. Es docente en el Instituto Tecnológico Superior de Guasave. Además, es miembro del cuerpo académico Tecnologías estratégicas de vanguardia aplicadas para el desarrollo sustentable de sistemas agroindustriales de precisión. Sus áreas de interés se centran en sistemas inteligentes, contribuyendo al avance y la aplicación de estas tecnologías en el contexto agroindustrial. Contacto: Teléfono - 6871046387, Correo Electrónico – jesus.bd@guasave.tecnm.mx

Dr. Román Edén Parra Galaviz

Obtuvo su doctorado en Ciencias en Desarrollo Sustentable de Recursos Naturales por la Universidad Autónoma Indígena de México (UAIM) en 2018 y licenciatura en Ingeniería Geodésica por la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) en 2007. Profesor e investigador en la Facultad de Ingeniería Mochis de la UAS, miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel C en el área IX (Interdisciplinaria), y del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos (SSIT) con distinción honorífica. Colaborador del Cuerpo Académico UAS-CA-274 y en proyectos de investigación PROFAPI. Ha impartido clases y dirigido tesis a nivel de licenciatura y posgrado, con publicaciones en revistas indexadas y capítulos de libros, participación en congresos nacionales e internacionales en áreas de interés; Geodesia, Fotogrametría, Cartografía, SIG y Desarrollo Sostenible. Correo electrónico: roman.parra@uas.edu.mx, celular: 668-1246479, ORCID: 0000-0003-2679-8594

Manuel de Jesús Pérez Valdez

Profesor e investigador de tiempo completo titular B, en la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS). Doctorado en Ciencias Técnicas con especialidad en Fotogrametría, otorgado en el año 2016, por la Universidad Estatal de Geodesia y Cartografía de Moscú, Rusia (MIIGAiK). Licenciado en ingeniería geodésica por la Universidad Autónoma de Sinaloa en la Facultad de Ingeniería Mochis, desde el año 2003. Actividad docente como profesor de nivel licenciatura, maestría, en el área de la geodesia, fotogrametría, geomática y medioambiente. Participación como miembro del grupo de investigación: Cuerpo académico Geosistemas UAS-CA-274, en proyectos de investigación (PROFAPI), dentro las líneas de aplicación y Generación de Conocimiento: Geodesia y Geomática. Dirección de proyectos de tesis de nivel licenciatura en el área de Geodesia y la Fotogrametría. Perfil PROMEP, Secretaría de Educación Pública, Programa de Mejoramiento del Profesorado, 2022-2025. Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos (SSIT). e-mail: manuel.perez@uas.edu.mx, celular: 668-1202101, ORCID: 0000-0003-4919-489X

Dr. Ciro de la C. Díaz Hernández

Obtuvo su doctorado en Ciencias técnicas de Geodesia Aplicada en la Habana, Cuba y licenciatura en Ingeniería Geodésica por la Universidad Estatal de

Geodesia y Cartografía de Moscú, Rusia (MIGAiK). Profesor e investigador de la Facultad de Ingeniería Mochis de la UAS, líder del Cuerpo Académico UAS-CA-274 y en proyectos de investigación PROFAPI. Ha impartido clases y dirigido tesis a nivel de licenciatura y maestría, con publicaciones en revistas indexadas y capítulos de libros, participación en congresos nacionales e internacionales en áreas de interés; Geodesia, Fotogrametría, Cartografía, SIG. e-mail: cirodiaz@uas.edu.mx, celular: 668-1622872, ORCID: 0000-0001-5402-1438

Dra. Elvia Nereyda Rodríguez Saucedo

Doctora en Ciencias en Desarrollo Sustentable de los Recursos Naturales por la Universidad Autónoma Indígena de México. elviaro@uaim.edu.mx

Dra. Raquel Rodríguez Saucedo

Doctora en Ciencias en Desarrollo Sustentable de los Recursos Naturales por la Universidad Autónoma Indígena de México. raquelrguez@uaim.edu.mx

Dr. Adán Guillermo Ramírez García

Doctor en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México. Profesor Investigador Universidad Autónoma Chapingo. aguillermoramirezgarcia@gmail.com

Dr. Jesús Manuel Díaz Gaxiola

Profesor de tiempo completo titular C del Instituto Tecnológico de Los Mochis (TECNM) desde 1994, en la academia de Biología. Licenciatura en Biología con especialidad en Biología Acuática por el Instituto Tecnológico de Los Mochis. Doctor en Ciencias en Desarrollo Sustentable de Recursos Naturales por la UAIM. Jefe del laboratorio de Ecología y de proyectos de investigación del departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. Área de investigación de recursos naturales en zonas marinas y costeras. Correo electrónico: jesus.dg@mochis.tecnm.mx teléfono móvil: 6681633171

Jesús Octavio Escobedo Urquidez

Egresado de la carrera de licenciatura en Biología del Instituto Tecnológico de Los Mochis (TECNM). Correo electrónico: escobedo.octavio004@gmail.com. Teléfono móvil: 6684 649818

Dra. Claudia Selene Castro Estrada

Doctora en Ciencias en Desarrollo Sustentable de Recursos Naturales. Integrante del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos. Coordinadora General de Investigación y Posgrado en la Universidad Autónoma Indígena de México. Profesora-Investigadora de la Universidad Autónoma Indígena de México. Integrante del Sistema Nacional de Investigadores como Candidata. Teléfono: 6681690318. Correo electrónico: draclaudiacastro@uaim.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4461-9633>

Dra. Alma Lorena Quintero Romanillo

Licenciada en Biología por el Instituto Tecnológico de Los Mochis. Maestra y doctora en Ciencias en Desarrollo Sustentable de Recursos Naturales por la Universidad Autónoma Indígena de México. Profesora adscrita a la carrera de Ingeniería Forestal en la Universidad Autónoma Indígena de México. Integrante del Cuerpo Académico Biodiversidad y Estrategias Comunitarias de Desarrollo Sostenible UAIM-CA-13. Tel: 6681068621. Correo electrónico: lorenaquintero@uais.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4738-3024>

Métodos cuantitativos aplicados a recursos naturales, medioambiente y la sostenibilidad.

Se terminó de imprimir en marzo de 2024

en los talleres de **Astra Ediciones**

Av. Acueducto No. 829

Colonia Santa Margarita, C. P. 45140

Zapopan, Jalisco, México.

33 38 34 82 36

E-mail: edicion@astraeditorial.com.mx

www.astraeditorialshop.com

Impresión digital con interiores en papel bond 75g

El tiraje consta de 300 ejemplares.

En este libro se exponen de manera magistral y a través de escenarios reales, los beneficios del análisis cuantitativo, ya sea en el mar, la tierra o el aire, y de los recursos naturales que estos poseen y sus servicios ambientales que brindan, para realizar aprovechamientos sostenibles y generar conocimientos actuales y de un valor inestimable dado las afectaciones que hemos realizado como humanidad.

Dr. Jesús Manuel Díaz Gaxiola

ISBN: 978-84-10215-06-1

