

Aplicación de fotogrametría digital para el registro de las huellas de dinosaurio de la Formación Cerro del Pueblo (Campaniano tardío), Coahuila, México

José L. Gudiño Maussán, Felisa J. Aguilar, René Hernández-Rivera

José L. Gudiño Maussán

jlgudiño35@gmail.com

Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, CDMX, 04510, México.

Felisa J. Aguilar

Centro INAH Coahuila, Instituto Nacional de Antropología e Historia. Morelos y Pavón Sur #244, Saltillo, Coahuila, 25000, México.

René Hernández-Rivera

Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria Coyoacán, CDMX, 04510, México.

RESUMEN

En la última década, las técnicas de modelado digital han demostrado ser de gran utilidad para el estudio y preservación de los fósiles, especialmente para las icnitas (huellas) que, por su extensión, importancia patrimonial, turística o estado de conservación, pueden resultar muy difíciles de recolectar o modelar por métodos tradicionales.

La Formación Cerro del Pueblo (FCdP) es una unidad geológica del Campaniano (72.5 Ma) ubicada al sureste de Coahuila, México, que destaca por la gran diversidad de organismos fósiles que conserva, principalmente yacimientos con icnitas de dinosaurio, que han sido poco estudiados y desafortunadamente se encuentran en peligro de destrucción debido a la erosión y las actividades humanas. El objetivo de este proyecto fue generar el registro digital de seis yacimientos con huellas de dinosaurio en la FCdP, para corroborar la efectividad de una nueva técnica de bajo costo e impacto nulo a los icnofósiles: Modelado por fotogrametría digital, mediante los programas de acceso libre VisualSFM, Meshlab, CloudCompare y ParaView. Para este propósito, se registraron las huellas de dinosaurio presentes en seis sitios discretos (yacimientos) en la FCdP. Se emplearon 10 cámaras fotográficas de calidad comercial (5 a 10 Mpx) para tomar fotografías de cada localidad. En los sitios con menor superficie y número de huellas (Cantera Rojas, 26 m² [4 huellas]; Depósito de la Luz, 37.5 m² [6]; La Rosa, 60 m² [9] y Las Águilas B, 70 m² [12]), se realizaron tomas individuales de las icnitas, así como una serie completa a lo largo del yacimiento. Los más grandes (Paso del Oso, 168 m² [107] y Las Águilas A, 340 m² [220]) se separaron en secciones para facilitar el registro fotográfico.

En total se tomaron 11840 fotografías, de las cuales se emplearon 4960 para generar 72 modelos tridimensionales de malla poligonal texturizados de las seis localidades.

Los modelos obtenidos para las localidades más pequeñas presentaron mejor calidad; hay que considerar su extensión más reducida, el registro individual de icnitas y la limpieza relativa de los estratos. Por otro lado, los más grandes perdieron definición al realizarse ajustes que permitieran que el tiempo de procesamiento y los tamaños de archivo fueran viables para los equipos de cómputo con los que se contó. Con este ejercicio, se obtuvieron parámetros de referencia para hacer más eficiente la toma de fotografías útiles para su procesamiento fotogramétrico y, de este modo, mejorar la calidad de los modelos digitales generados en el futuro.

Palabras clave: Icnitas de dinosaurio, Cretácico, técnicas de registro, modelado virtual.

ABSTRACT

In the last decade, digital modeling techniques have been shown to be very useful in the study of fossils and their preservation, especially with ichnites (footprints) that are very difficult to collect or model by traditional methods, due to deposit characteristics such as size, heritage, touristic importance and conservation status.

In Cerro del Pueblo Formation (FCdP), a geological unit of the late Campanian, located in the southeast Coahuila, Mexico, there is a great fossil diversity, mainly dinosaur ichnites, which unfortunately have been little studied and are in danger of destruction, due to the erosion and human activities. The goal of this project was testing the effectiveness of a new and low-cost technique with no impact for the ichnites. The technique consisted of modeling by digital photogrammetry through the open access software VisualSFM, Meshlab, CloudCompare and ParaView. For this purpose, the dinosaur tracks of six different sites (deposits) in FCdP were recorded. Ten commercial quality cameras (5 to 10 Mpx) were used to take photos at each site. At smaller sites with a fewer number of footprints (Cantera Rojas, 26 m² [4 tracks]; Depósito de la Luz, 37.5 m² [6]; La Rosa, 60 m² [9] and Las Águilas B, 70 m² [12]), individual shots of ichnites were taken. Also, a complete photo series throughout the deposit was taken. Larger sites (Paso del Oso, 168 m² [107] and Las Águilas A, 340 m² [220]) were divided into sections to simplify the photographic record.

In total, 11840 photographs were taken, 4960 were used to generate 72 three-dimensional textured polygonal mesh models for the six localities.

Models from smaller sites had better quality because of their reduced size, the large number of photos taken and good strata contrast. In contrast, models from bigger sites lost definition, especially after certain adjustments made to improve their computer processing. During this exercise, reference parameters were obtained, to increase the effectiveness in photography for photogrammetric processing. We hope in the future to improve the quality of digital models generated.

Keywords: Dinosaur tracks, Cretaceous, registry techniques, virtual modelling.

BOL. SOC. GEOL. MEX. 2018

VOL. 70 NO. 2

P. 307 – 324

<http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2018v70n2a3>

Manuscrito recibido: Marzo 27, 2017.

Manuscrito corregido: Junio 5, 2017.

Manuscrito aceptado: Agosto 08, 2017.

1. Introducción

Las marcas de pisadas (icnitas) de dinosaurio conforman los icnofósiles de vertebrados más abundantes a nivel mundial (Lockley, 1996; Marty, 2008). Estos rastros proporcionan información valiosa sobre el comportamiento, modo de vida y el tipo de ambiente en el que se desarrollaron estos organismos (Lockley, 1996). México no es la excepción y cuenta con diferentes yacimientos con este tipo de fósiles tanto en temporalidad como en extensión, sin embargo, los estudios de este tipo de evidencias han sido escasos y muchas de las localidades que los contienen están en riesgo de destrucción por erosión y actividades antropogénicas (Bravo-Cuevas y Rodríguez-de la Rosa, 2014). En las últimas dos décadas, varios grupos de investigadores alrededor del mundo han aprovechado las nuevas tecnologías de modelado digital en 3D aplicándolas al estudio de la icnología. Se inició con el empleo de escáner láser digital para modelar lajas con icnitas en laboratorio (Arakawa *et al.*, 2002), posteriormente se empleó una combinación de escáner LiDAR y fotogrametría aplicados directamente en los yacimientos (Breithaupt *et al.*, 2004; Matthews *et al.*, 2006; Bates *et al.*, 2008a, 2008b; Petti *et al.*, 2008; Adams *et al.*, 2010) y durante los últimos cinco años muchos estudios se han llevado a cabo mediante modelos de fotogrametría digital, cuya principal ventaja ante el empleo de un escáner es su bajo costo y facilidad de manejo en campo (Castanera *et al.*, 2013a, 2013b; Falkingham, 2012; Falkingham *et al.*, 2014; Mallison y Wings, 2014; Razzolini *et al.*, 2014; Lallensack *et al.*, 2015; Matthews *et al.*, 2016; Romilio *et al.*, 2017).

Con este proyecto se buscó generar el registro virtual de seis yacimientos con huellas de dinosaurio de manera que se corroborara la efectividad del modelado por fotogrametría digital, una técnica de bajo costo e impacto nulo sobre los icnofósiles, que permitiera generar un catálogo a modo de resguardo permanente del patrimonio paleontológico

de México y al mismo tiempo funcionara como una herramienta eficiente para facilitar su estudio.

2. Marco geológico

La Formación Cerro del Pueblo (FCdP) es una unidad geológica compleja que conforma la parte basal del Grupo Difunta (Figura 1). De acuerdo con Eberth *et al.* (2004), esta formación representa una unidad transicional que destaca por la gran diversidad de organismos fósiles que contiene, entre los que se incluyen plantas, protistas, invertebrados y vertebrados, organismos que vivieron en condiciones marinas, salobres y terrestres (Rivera-Sylva *et al.*, 2006; Gates *et al.*, 2007; Perrilliat *et al.*, 2008; Loewen *et al.*, 2010; Bravo-Cuevas y Rodríguez-de la Rosa, 2014). Eberth *et al.* (2004) ubicaron a la FCdP entre las magnetocronozonas 32n.3r-32n.2n, sugiriendo una edad absoluta máxima de 72.5 millones de años (Campaniano tardío).

Con base en los datos estratigráficos de las secciones de referencia suplementarias medidas por Eberth *et al.* (2004) en las zonas de Rincón Colorado y Las Águilas, se realizó un perfil global en el que se establece la posición relativa de los seis estratos fosilíferos estudiados en la FCdP (Figura 2). Todas las localidades están ubicadas dentro del territorio del Municipio de General Cepeda, formando parte de los ejidos Porvenir de Jalpa, La Rosa, Depósito de la Luz y Rincón Colorado (Figura 3).

3. Métodos

3.1. LIMPIEZA Y REGISTRO FOTOGRÁFICO

Previo al inicio del registro fotográfico se realizó la limpieza de los yacimientos, que consistió en la remoción de los sedimentos actuales acumulados dentro de las icnitas; se utilizaron palas, cucharas

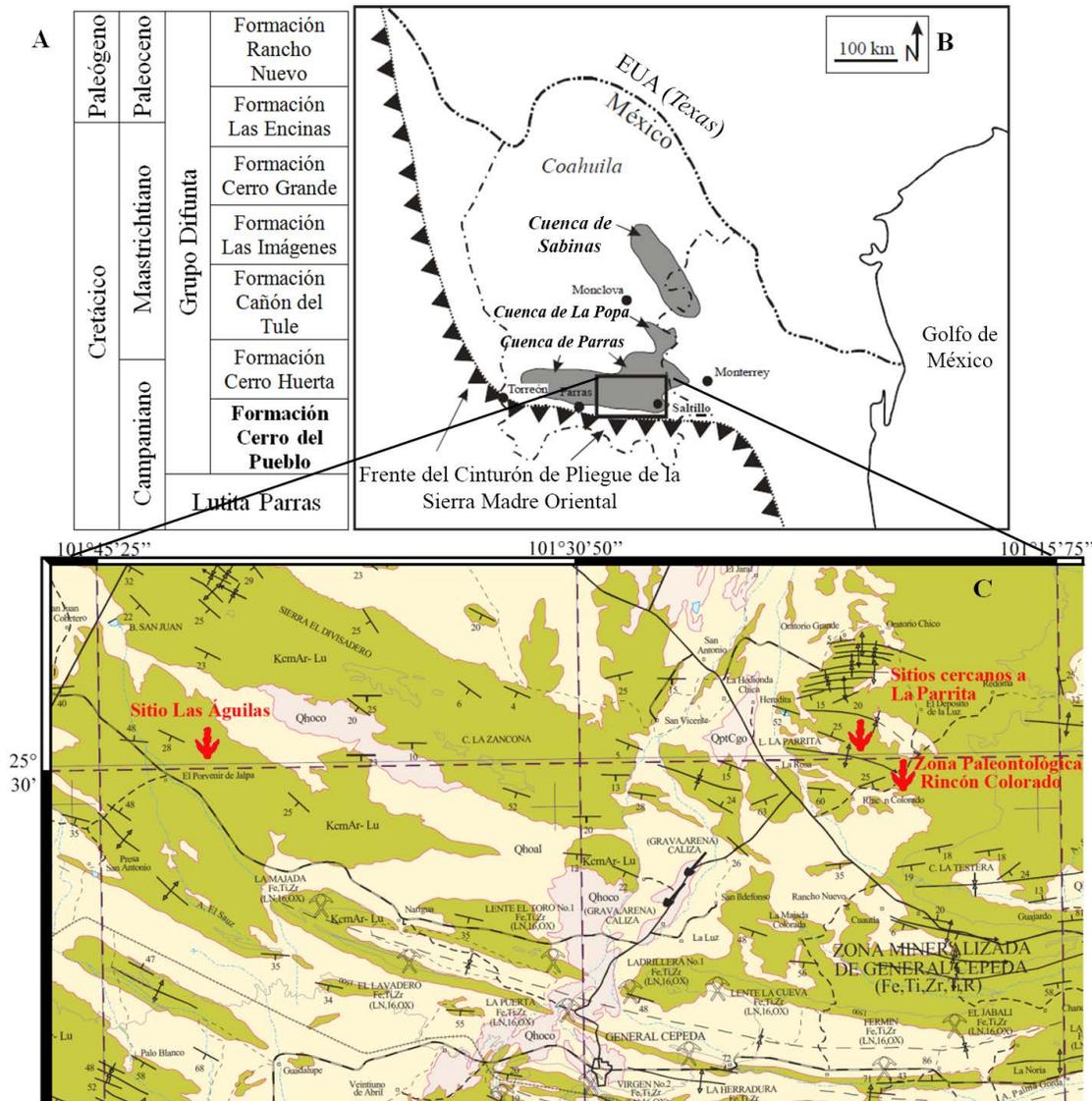


Figura 1 Ubicación de la FCDP en su contexto geológico, temporal y geográfico. A) Composición y edades relativas de las formaciones del Grupo Difunta. B) La FCDP como un depósito dentro de la Cuenca de Parras (modificado de Eberth *et al.*, 2004). C) Mapa geológico que muestra la distribución de yacimientos con huellas de dinosaurio de la FCDP (modificado de Santiago Carrasco *et al.*, 2008).

de jardinería, escobas, cepillos, brochas, palanganas, cubetas y bolsas de plástico. También se retiraron las hierbas dentro y alrededor de las huellas con tijeras de poda.

Las fotografías requieren características específicas para su procesamiento fotogramétrico. Para que una sección de la imagen quede representada en el modelo, se requiere que esté presente en tres fotografías como mínimo, y es necesario que las tomas

presenten traslape entre cada una (Falkingham, 2012).

No es necesario el uso de cámaras profesionales. En el presente estudio se emplearon cámaras de calidad comercial con resoluciones entre 5 y 10 Mp (Tabla 1). Para el procesamiento se prefiere la cantidad de fotografías sobre su calidad (alta resolución) (Falkingham, 2012). La fotogrametría es un método que no registra el tamaño real de los

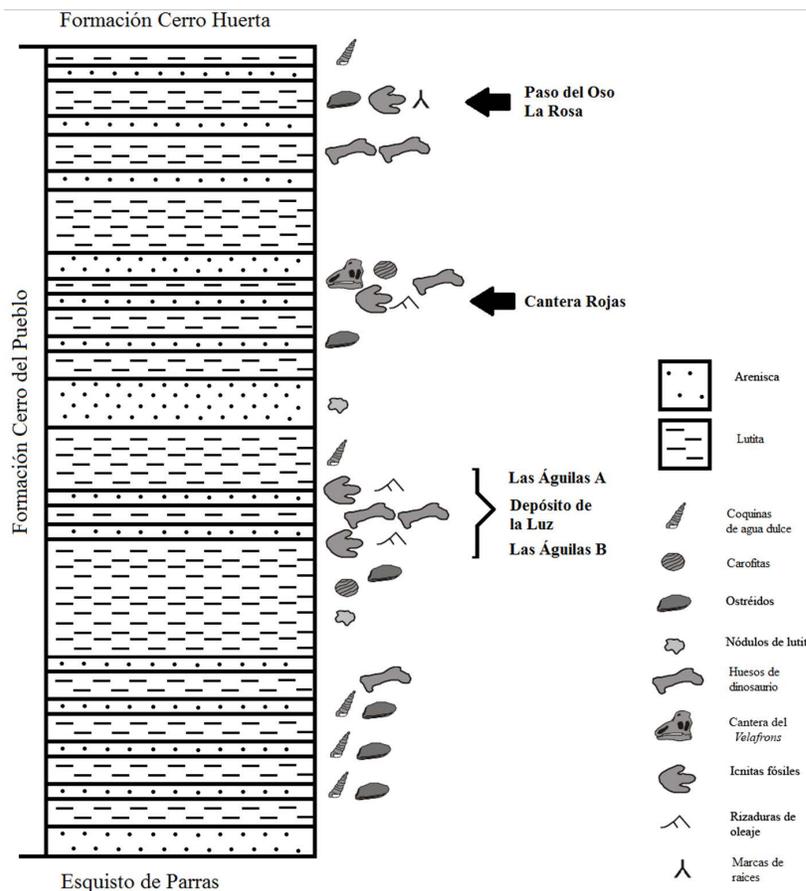


Figura 2 Esquema del perfil estratigráfico global de la FCdP, indicando los puntos de ubicación de los estratos estudiados dentro de la columna (modificado de Eberth *et al.*, 2004).

objetos modelados, por lo que resulta imperativo el empleo de una escala fija para cada huella o sector a registrar (Breithaupt *et al.*, 2004).

De acuerdo con Falkingham (2013), no hay un número fijo de fotografías para generar un buen modelo, ya que este criterio varía dependiendo de la complejidad del objeto; no obstante, Mallison y Wings (2014) indican que existe un punto en que al emplear demasiadas fotografías el modelo generado no mejora su calidad, pero sí ralentiza su tiempo de procesamiento. En los sitios con menor número de huellas (Depósito de la Luz, Las Águilas B, Rincón Colorado y La Rosa), se procedió a la toma de fotografías individuales de las icnitas, tomando entre 50 y 60 de cada una, así como una serie completa a lo largo de cada estrato. Para las icnitas individuales se incluyeron tomas desde varios ángulos y en distintas posiciones de

cámara para obtener mejor detalle (Figura 4).

Los yacimientos más grandes (Paso del Oso y Las Águilas A) se separaron en secciones para facilitar el registro fotográfico. En el sitio Las Águilas A se colocó una cuadrícula de 3x3 m y se tomaron series de entre 60 y 100 fotografías de cada cuadrante, incluyendo traslape con los bordes. En el yacimiento de Paso del Oso se colocaron marcas cada 3 metros a todo lo largo del sitio y se tomaron series de entre 60 y 100 fotografías de cada sector.

3.2. GENERACIÓN DE LOS MODELOS FOTOGRAMÉTRICOS

El registro fotográfico obtenido se procesó con dos programas para generar modelos virtuales tridimensionales por fotogrametría digital: VisualSFM y Meshlab. Para el procesamiento se empleó una

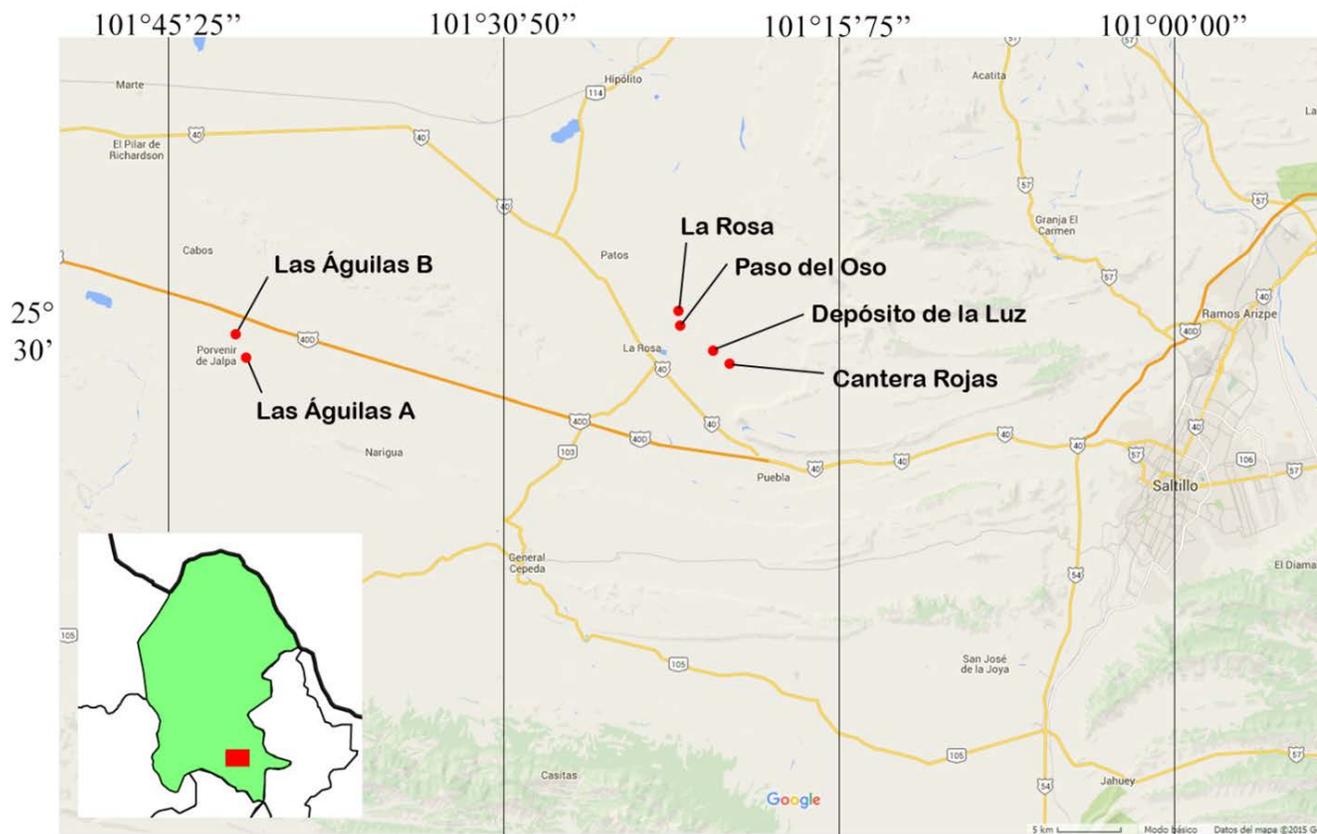


Figura 3 Ubicación de las localidades con icnitas de dinosaurio de la FCDP, estudiadas en el presente trabajo (modificado de Google Maps, 2015).

computadora de escritorio marca Dell Alienware modelo X51 con microprocesador Intel Core i5 (2 GHz), tarjeta de video NVIDIA GTX 745 y 16 GB de memoria RAM.

Se empleó el programa VisualSFM por ser un software de acceso libre capaz de generar “nubes de puntos” a partir de fotografías, a partir del método “estructura desde movimiento” (Wu, 2007, 2011). Se cargaron el conjunto de fotografías de la icnita o estrato a reconstruir (Figura 5A) en el programa y este se encargó de comparar cada fotografía con las demás, encontrando puntos en común para generar un mapa vectorial; a este proceso se le denomina *sifting* por las siglas SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) del algoritmo que utiliza. Después de obtener los puntos en común, el programa reconstruyó un mapa tridimensional con las coordenadas de cada uno formando una “nube de puntos dispersa” (Figura 5B).

Al emplear el algoritmo CVMS (Clustering Views for Multi-view Stereo) para escalar los puntos, el programa formó conjuntos (clusters) y obtuvo la posición relativa de la cámara en cada fotografía, lo que generó una “nube de puntos densa”. Dependiendo de la complejidad del modelo, esta “nube” puede contener varios millones de vértices (puntos individuales).

Al finalizar, VisualSFM generó los modelos en archivos con extensión .ply (*polygon file format*), formato estándar de escáneres para modelado tridimensional. El archivo resultante es manipulable (permite realizar rotación, desplazamiento, alineación a un plano) y da una representación satisfactoria del objeto base (Figura 6).

Meshlab (Cignoni *et al.*, 2008) es un sistema de procesamiento y edición de modelos de malla poligonal (*polygon mesh*). Con este software de acceso libre se convirtieron las nubes densas de puntos

Tabla 1. Relación de los modelos de las cámaras empleadas, así como las dimensiones y tamaños de archivo de las fotografías tomadas durante el registro.

Marca	Modelo	Dimensión de imagen	Tamaño de archivo
Sony	Cybershot DSC-W610	3648x2736	3 – 4 Mb
Sony	Cybershot DSC-W320	4320x3240	4 – 5 Mb
Nikon	COOLPIX S2700	4608x3456	3 – 4 Mb
Samsung	VLUU PL65	4000x3000	3 – 4 Mb
Canon	EOS REBEL T2i	3456x2304	2.5 – 3 Mb
Nikon	D3100	4608x3072	6 – 8 Mb
Samsung	ES9	2592x1944	1.75 – 2.5 Mb
Fujifilm	FinePix S1600	2816x2112	3 – 4 Mb
Nikon	COOLPIX AW100	4000x3000	1.5 – 3 Mb
Canon	PowerShot A2200	3072x2304	2.5 – 3 Mb

generadas en VisualSFM en un sólido poligonal por un proceso llamado *meshing*. Para realizar este proceso se aplicó el algoritmo de Reconstrucción de Superficie de Poisson (con valores de profundidad de árbol octal de entre 9 y 13, y de divisor de solucionador entre 7 y 8) y los modelos poligonales se texturizaron con las fotografías originales para obtener modelos de alta definición (texturas de 2048 bits).

El último paso del proceso involucró escalar cada objeto a sus dimensiones reales para facilitar la posterior toma de datos merísticos. Como se mencionó con anterioridad, para ello es imprescindible haber colocado una escala de referencia junto al objeto de estudio durante el registro fotográfico (Figura 7).

Para la edición y preparación de imágenes se utilizaron filtros y sombreadores (*shaders*) nativos del Meshlab, así como los programas de acceso libre CloudCompare (CloudCompare, 2015) y ParaView (Henderson, 2015). El primero permitió alinear los modelos con respecto a un plano; el segundo se utilizó para generar mapas de contorno por curvas de nivel y aplicar filtros de color por profundidad (Figura 8).

Los modelos generados en formato .ply ocuparon 5.71 GB y se grabaron tres copias en disco DVD de doble densidad. Dichos medios digitales fueron entregados a la Colección Nacional de Paleontología de la UNAM, al Centro INAH

Coahuila y JLGM conservó el último para poder generar más copias en el futuro. Con estos modelos se busca tener un medio de almacenamiento permanente del estado actual de los yacimientos, con fines de preservación patrimonial y como punto de referencia para estudios futuros.

4. Resultados

En total se tomaron 11840 fotografías durante todo el desarrollo de la fase de campo, incluyendo tomas de los trabajos de limpieza, documentación de los niveles estratigráficos adyacentes a los de las icnitas, fotografías de externas del proceso de registro fotográfico y las tomas para uso fotogramétrico propiamente dicho. De estas últimas, tras descartar las fotografías demasiado borrosas o desenfocadas, se seleccionaron 4960 como adecuadas para su procesamiento. La primera parte, que incluyó la generación de nubes densas de puntos empleando VisualSFM, tomó entre 500 y 600 horas. Se requirieron alrededor de 350 horas adicionales para la aplicación de algoritmos que permitieran obtener los 72 modelos tridimensionales de malla poligonal texturizados de las seis localidades utilizando Meshlab (Tabla 2).

Las particularidades de cada localidad se detallan a continuación:

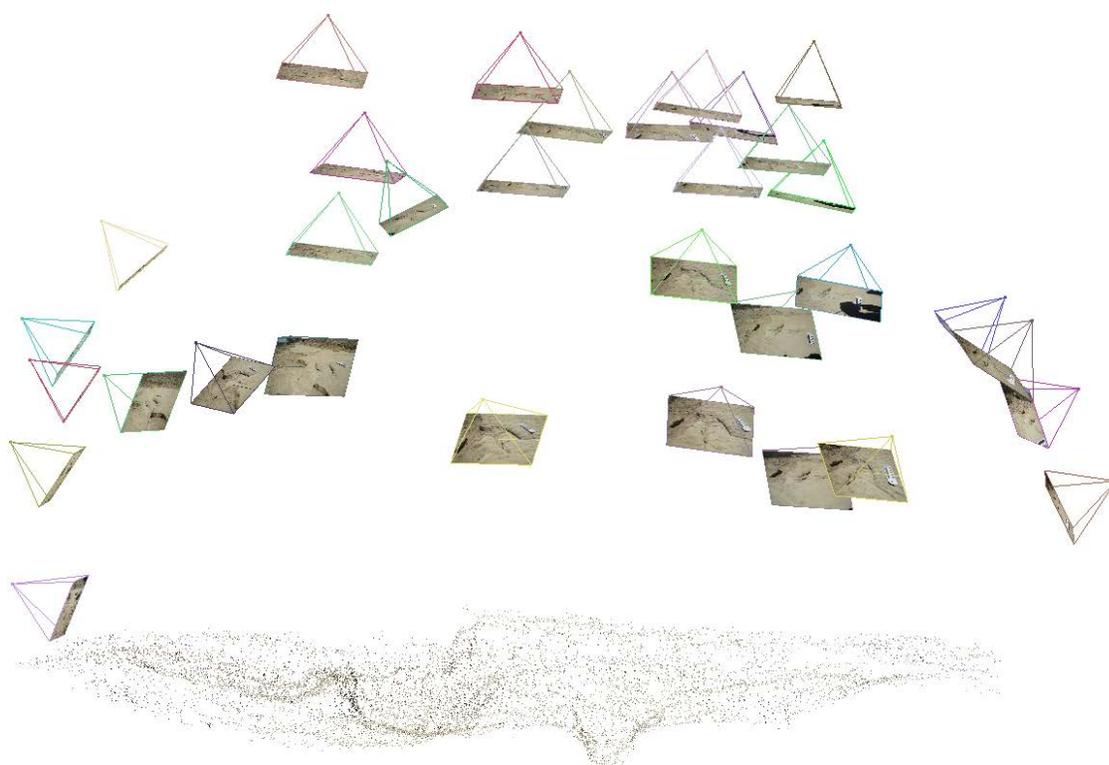


Figura 4 Modelo de una nube dispersa que muestra las diferentes posiciones y perspectivas de la cámara en las tomas fotográficas.

4.1. LAS ÁGUILAS A

Ubicada a 2.6 km al este del poblado de Porvenir de Jalpa, esta fue la localidad estudiada más extensa con 340 m² y con mayor número de icnitas (220). Se emplearon 2792 fotografías para procesar esta localidad y debido a su extensión, se decidió registrarla mediante cuadrantes de 3 por 3 metros. La resolución obtenida en cada cuadrante es suficiente para mostrar la forma y contornos de las icnitas, pero a mayores acercamientos se pierden detalles, puesto que no pudieron hacerse tomas individuales para cada huella. Se intentó generar un modelo completo del yacimiento procesando todas las fotografías a la vez, pero no fue posible conservar la resolución completa debido a falta de memoria de video al intentar procesar el modelo poligonal, por lo que se empleó CloudCompare para generar un modelo texturizado de baja resolución (Figura 9).

4.2. LAS ÁGUILAS B

Se encuentra a 1.2 km al noroeste del yacimiento de las Águilas A, muy cerca del Cerro La Angostura. Comprende un estrato de arenisca que aflora con inclinación de 28° y conserva un rastro individual de siete huellas de pie y lo que parece ser cinco huellas de mano. Un modelo con alto grado de detalle se generó a partir de 277 fotografías, incluyendo tomas de cada icnita de forma individual (Figura 10).

4.3. PASO DEL OSO

El yacimiento se localiza a 4.12 km al noreste de la cabecera del Ejido La Rosa. Las icnitas de esta localidad (alrededor de 107) se encontraban pobremente conservadas en un estrato de arenisca y lutitas, con gran densidad de fósiles de ostréidos embebidos, aflorado en el lecho de un arroyo seco. El modelo completo generado a partir de 1281

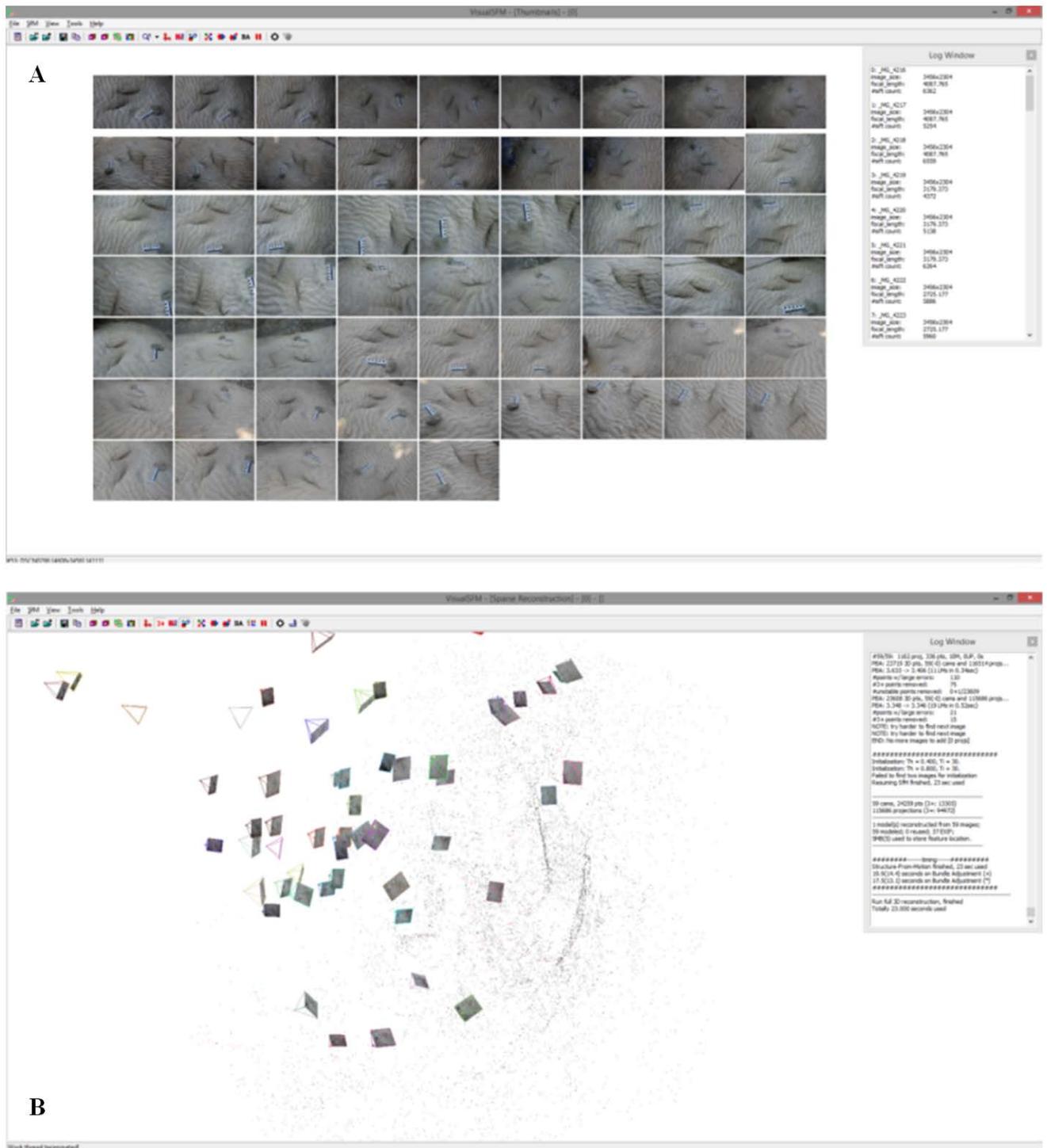


Figura 5 Ventana principal del programa VisualSFM. A) Durante la carga del conjunto de fotografías. B) Mostrando la nube de puntos dispersa.

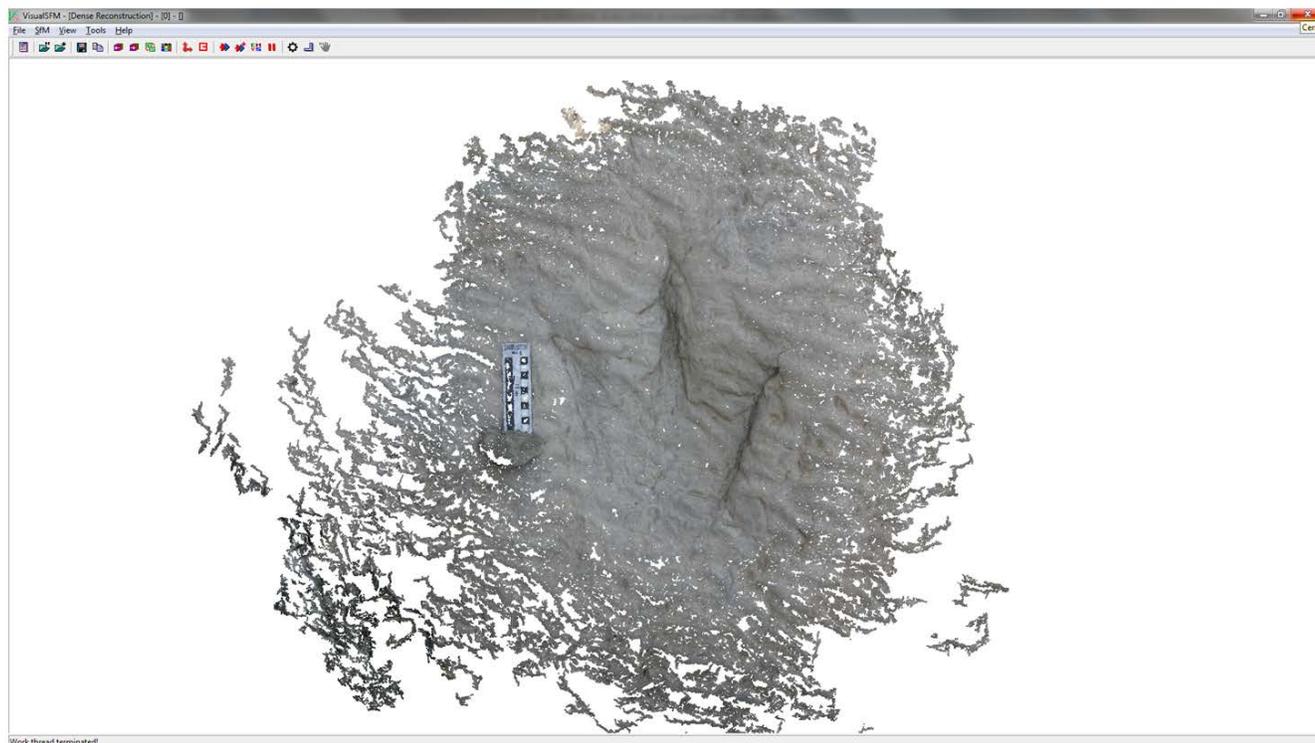


Figura 6 Reconstrucción de nube de puntos densa, visualizada en VisualSFM.

fotografías resultó ser el de menor calidad de todos los realizados (Figura 11).

4.4. LA ROSA

Esta se ubica a 0.35 km al norte de Paso del Oso. Esta localidad incluye nueve icnitas pobremente conservadas que se ubican en el lecho de un arroyo seco de características muy similares al anterior. El yacimiento se modeló con 271 fotografías; la calidad de su reconstrucción fue la menos satisfactoria de las localidades pequeñas, principalmente por las condiciones del sustrato. Fue necesario aplicar un filtro de curvas de nivel al modelo terminado para ayudar a visualizar las icnitas (Figura 12).

4.5. DEPOSITO DE LA LUZ

Está ubicada a 2 km al noroeste de la Zona Paleontológica de Rincón Colorado (ZPRC) y está representada por un afloramiento de arenisca de 12.5 m de longitud por 3 m (37.5 m²) de anchura

que preserva marcadas rizaduras de oleaje junto con el rastro individual compuesto por seis huellas. Cada icnita se procesó individualmente y el modelo conjunto del yacimiento, para el que se emplearon 214 tomas, resultó muy satisfactorio (Figura 13).

4.6. CANTERA ROJAS

Es el yacimiento más pequeño, se encuentra dentro de la ZPRC y cuenta con cuatro icnitas aisladas en un delgado estrato de arenisca que tiene un área de 26 m². Los modelos generados de las icnitas individuales, especialmente las más grandes (al centro del yacimiento) presentaron muy buena calidad y detalles finos: se pueden apreciar las marcas de las garras, así como el contorno y la profundidad completa de cada huella (Figura 14). Sin embargo, el modelo en conjunto del yacimiento resultó carecer de la resolución lograda en otras localidades como Depósito de la Luz y Las Águilas B.

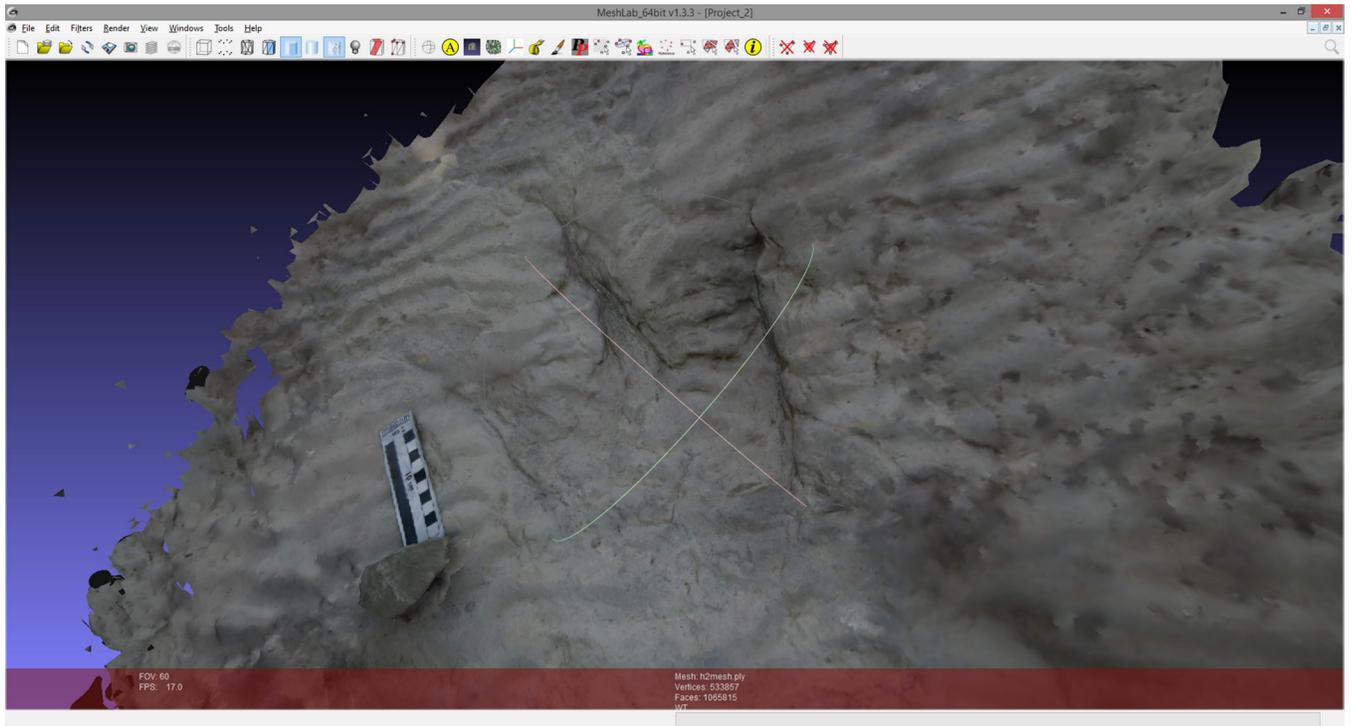


Figura 7 Modelo tridimensional sólido a partir de un *mesh* texturizado empleando Meshlab.

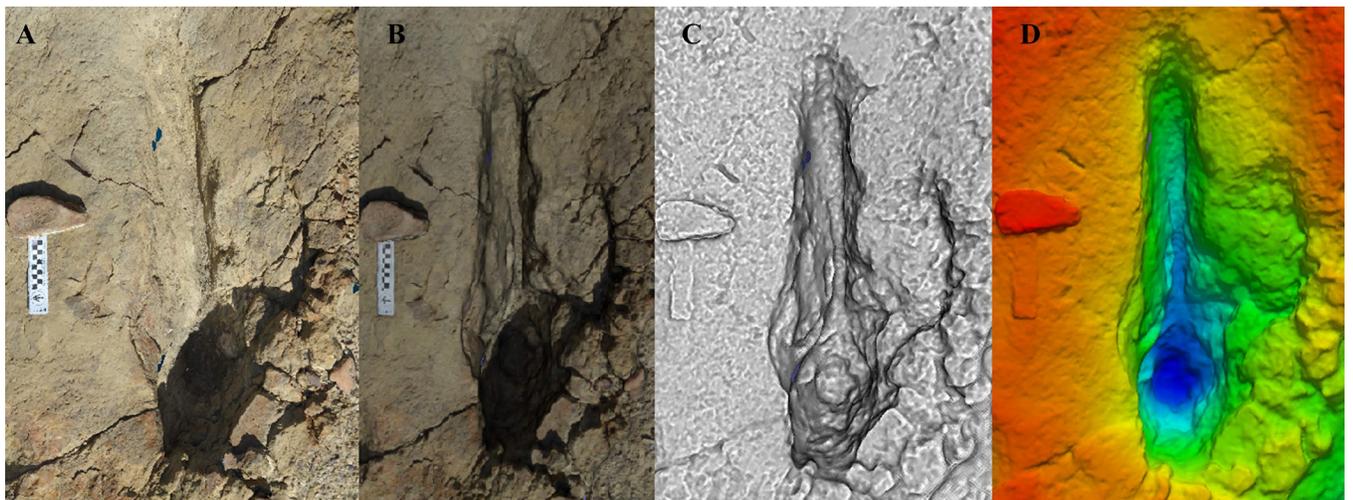


Figura 8 Selección de filtros que facilitan apreciar la forma de las icnitas. A) Sin filtro (calidad fotográfica). B) Filtro de iluminación natural (Meshlab). C) *Shader Phong* (Meshlab). D) Filtro de color por profundidad (Paraview).

5. Discusión

Los modelos obtenidos para las localidades de Las Águilas B, Depósito de la Luz y Cantera Rojas presentaron la mejor calidad; hay que considerar

también factores como el reducido tamaño de los yacimientos, que al contener menor número de icnitas facilitó su registro individual.

En el caso de La Rosa se observa una reducción notable en la calidad del detalle de sus modelos, que deriva en principio del estado de preservación

Tabla 2. Correspondencia del número de modelos fotogramétricos generados de acuerdo a la cantidad de fotografías por yacimiento, su área y el número de icnitas presentes en cada uno

Localidad	# de fotografías	Área (m ²)	# de icnitas	# de modelos
Las Águilas A	2792	340	220	44
Las Águilas B	277	70	12	8
Paso del Oso	1281	168	107	1
La Rosa	271	60	9	9
Depósito de la Luz	214	37.5	6	7
Cantera Rojas	125	26	4	3

del yacimiento. Aunado a esto, la presencia de arbustos, maleza y fragmentos rodados de roca generaron un exceso de elementos no deseados durante el modelado, lo que dificultó la generación de un modelo de alta definición.

Al emplear la división sectorial en Las Águilas A, se sacrificó detalle en las icnitas individuales en pro de abarcar una mayor área durante el registro fotográfico, lo que resultó en un modelo con menos detalles en acercamientos mayores, pero más práctico en su generación y manipulación.

Finalmente, los modelos con la menor fidelidad fueron los que se generaron a partir del mayor número de fotografías para mapear las áreas más extensas: Paso del Oso y Las Águilas A.

El modelo de Paso del Oso se procesó a partir de 1281 fotografías que se tomaron de corrido en el yacimiento. Debido a las inclemencias del tiempo, no se consiguió segmentar su área de 168 m² de forma similar a como se realizó en Las Águilas A, lo que dio como resultado un modelo satisfactorio a nivel visual de 10 metros, pero que dejó mucho que desear en los detalles finos al realizarse un acercamiento mayor.

El intento de procesar las 2792 fotografías que conformaron los 43 sectores del sitio Las Águilas A en un modelo único demostró ser más desgastante de lo que se había previsto: con siete días de procesamiento continuo para realizar el *sifting* y generar la nube de puntos dispersa y otros tres para obtener una nube de puntos densa que pesó 1.87 GB, el procesamiento normal en Meshlab se truncó por falta de memoria de video para aplicar el algoritmo de reconstrucción de superficie de Poisson. Con el algoritmo de *meshing* presente en

CloudCompare, se pudo generar el modelo de malla poligonal texturizado, pero no sin antes reducir la calidad del modelo a 40 MB para hacerlo manipulable, lo que hizo que prácticamente todo el detalle se perdiera y sólo se pudiera emplear para referenciar la posición de los modelos de los sectores individuales.

Con la experiencia obtenida durante la realización del presente proyecto, podemos sugerir algunos lineamientos generales que ayudarán a otros investigadores que intenten la técnica de fotogrametría digital a obtener modelos tridimensionales satisfactorios: se requieren yacimientos con el menor número de elementos intrusivos posibles (cantos rodados, maleza, cambio en las sombras); se recomienda obtener entre 10 y 20 tomas fotográficas empleando buenos puntos de referencia para facilitar el solapamiento de las imágenes en la generación de las nubes de puntos. Las fotografías funcionan mejor si se toman desde distintos ángulos y con diferentes acercamientos, siempre lo menos borrosas posible. Aunque en el presente estudio se utilizaron programas de acceso libre, existe software comercial (por ejemplo, Agisoft PhotoScan) que presenta mayor número de opciones, una interfaz más amigable con el usuario, mejor optimización en el proceso de modelado, y puede resultar muy conveniente si se puede costear la licencia.

Se decidió utilizar el formato de archivo .ply durante todo el proceso debido a que a) es el tipo de archivo obtenido a partir de VisualSFM al generar la nube densa de puntos; b) funciona al inicio del procesamiento de Meshlab; c) es un formato estándar en los programas de modelado

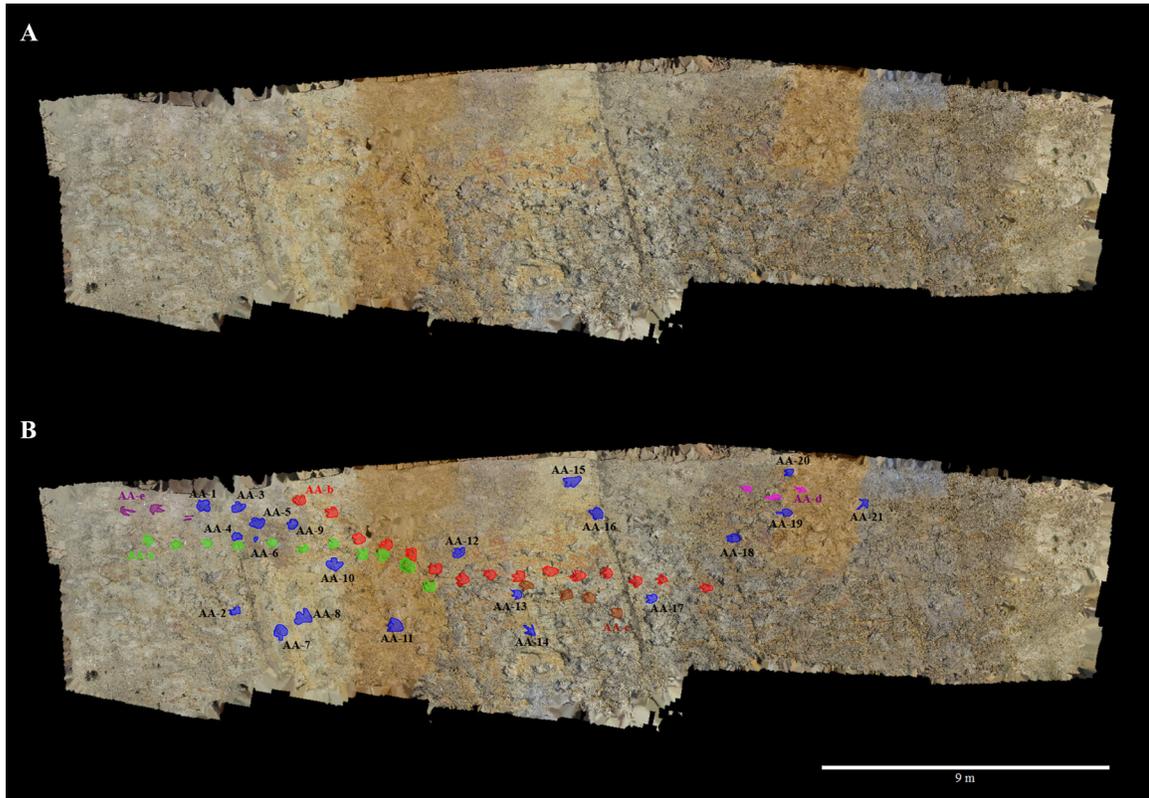


Figura 9 Modelo digital del Sitio Las Águilas A (CloudCompare). A) Modelo sin modificar. B) Se marcaron con color los rastros individuales identificables.

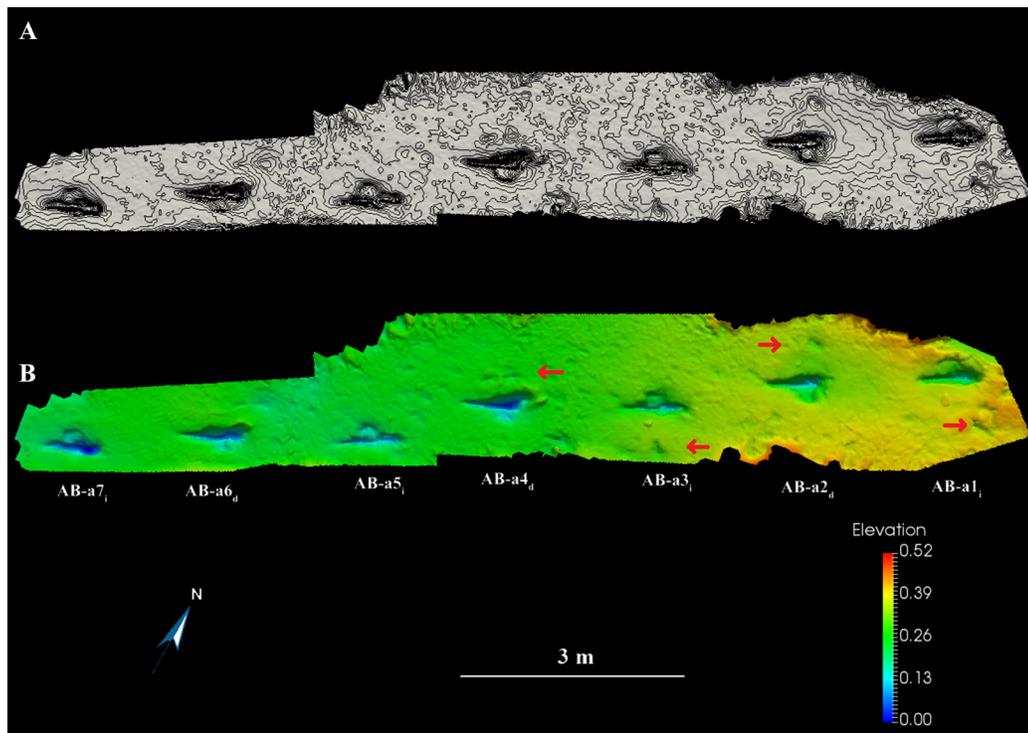


Figura 10 Modelo digital del Sitio Las Águilas B (Paraview). A) Modelo texturizado combinado con filtro de curvas de nivel. B) Mismo modelo con filtro de color por profundidad para resaltar las icnitas (las flechas rojas indican las impresiones de mano).

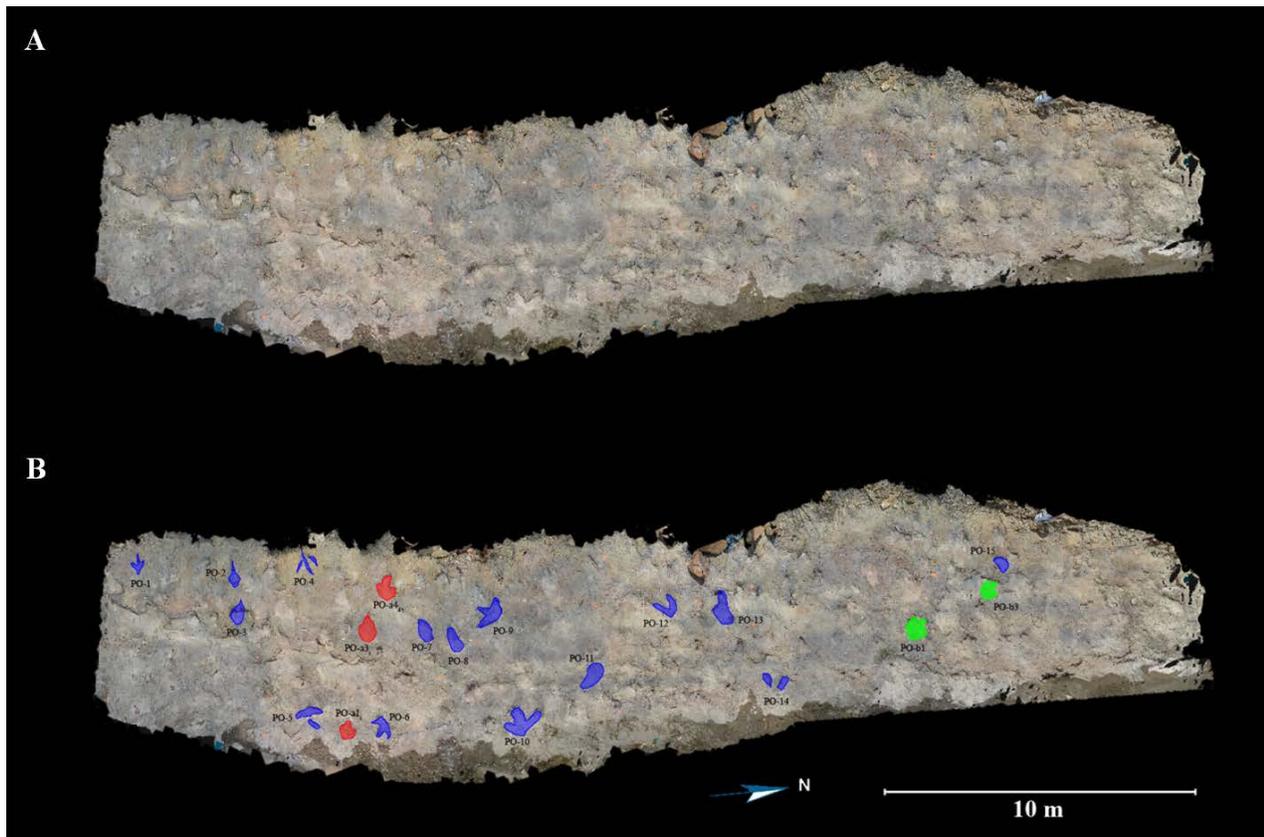


Figura 11 Modelo digital de Paso del Oso (Meshlab). A) Modelo sin modificar. B) Se marcaron con color las icnitas mejor conservadas.

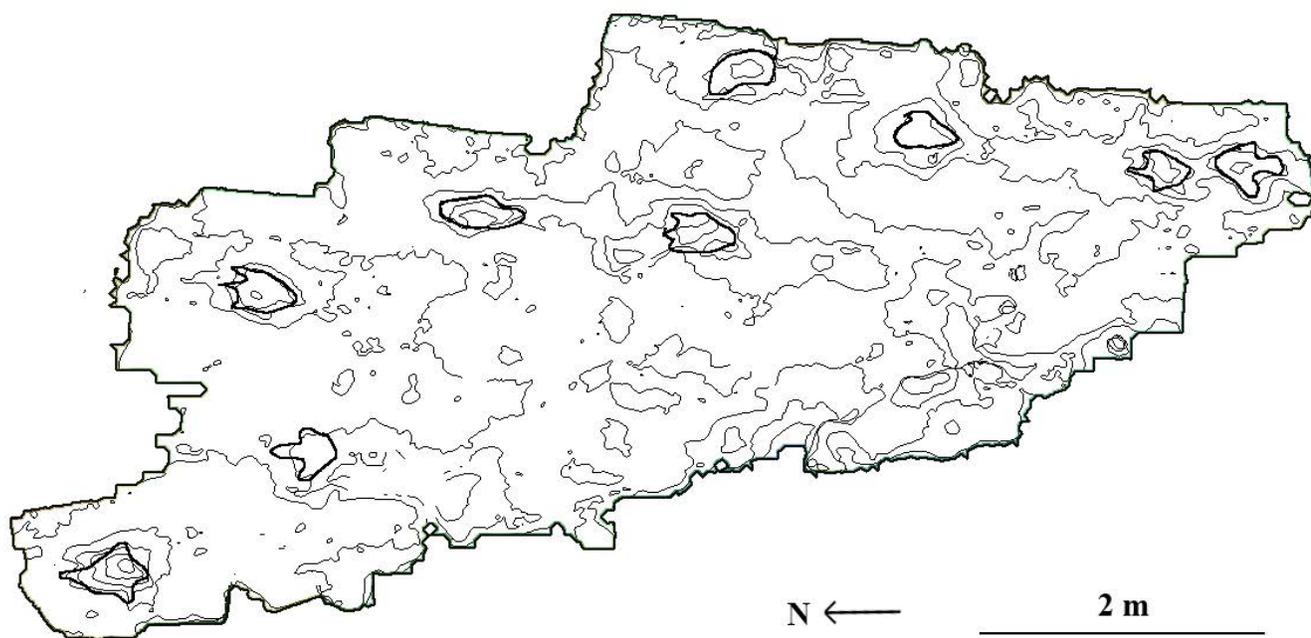


Figura 12 Modelo digital de La Rosa (Paraview). Se aplicó un filtro de curvas de nivel para distinguir mejor las huellas.

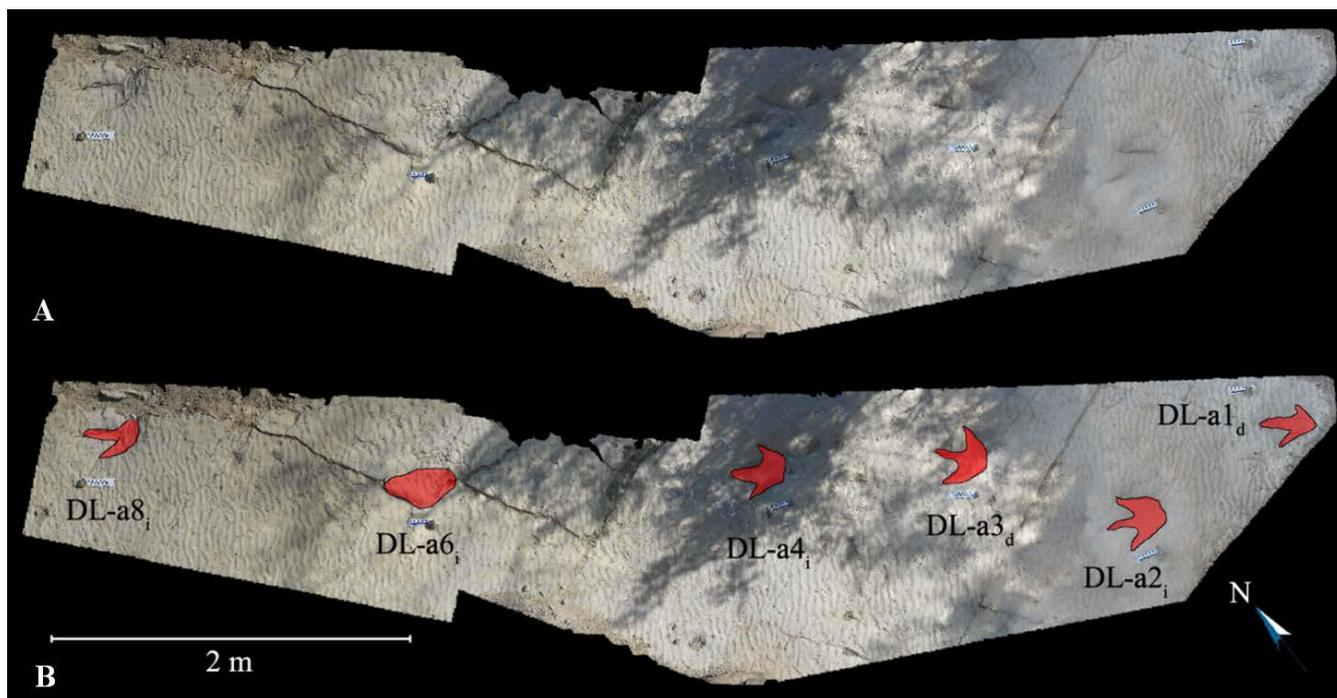


Figura 13 | Modelo digital de Depósito de la Luz (Meshlab). A) Modelo sin modificar. B) Se delinearon en color rojo las icnitas.

y escaneo y d) se puede exportar fácilmente a otros formatos comunes, como formato STL (.stl), objeto *Wavefront* (.obj), formato de archivo Collada (.dae) y varios más, lo que permite a los modelos obtenidos ser empleados para diversos fines: en la generación de mapas de terreno, animaciones e incluso manufactura aditiva (impresión 3D).

En cuanto al software necesario, detectamos que la velocidad del procesador tiene un efecto directo en la velocidad del proceso de *sifting* y la generación de la nube dispersa de puntos; el algoritmo CVMS consume toda la memoria RAM disponible para generar la nube densa de puntos y finalmente el proceso de *meshing* requiere de toda la memoria RAM y de la memoria de video de la que se pueda disponer, en ese orden; si se supera la capacidad de ambas memorias, el programa falla y la operación no se completa.

Con la reducción de tamaños y costos en las tecnologías de escaneo láser, resulta interesante que a futuro se realice un levantamiento de los yacimientos mediante este método, que permita generar

un referente de comparación y contraste con los resultados obtenidos en el presente proyecto.

6. Conclusiones

Se generaron 72 modelos para seis localidades con icnitas de dinosaurio en la FCdP. Los modelos generados para las localidades más pequeñas presentaron mejor calidad gracias a que su extensión era menor y por la toma individual de cada icnita. Por otro lado, los yacimientos más extensos perdieron definición al realizarse ajustes que permitieran que el tiempo de procesamiento y los tamaños de archivo fueran viables para el equipo de cómputo con el que se contó.

Con este ejercicio, se obtuvieron modelos de referencia para trabajos futuros, así como parámetros guía para facilitar y hacer más eficiente la toma de fotografías útiles para su procesamiento fotogramétrico y, de este modo, mejorar la calidad de los modelos digitales generados en el futuro.

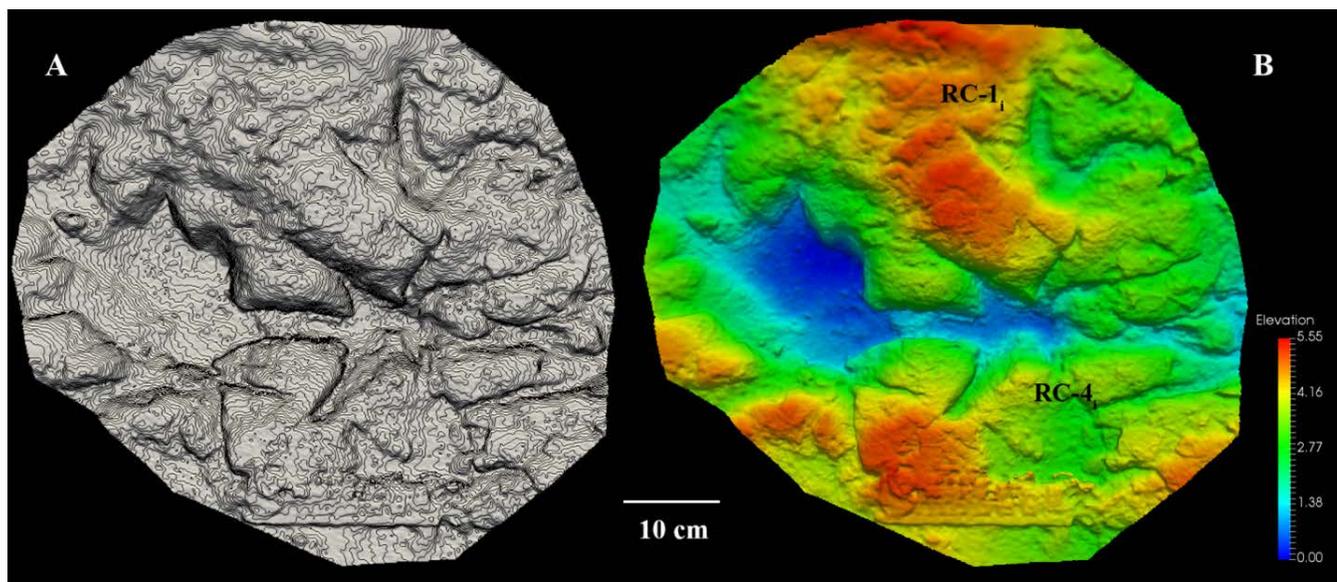


Figura 14 Modelo digital de las dos icnitas más grandes de la Cantera Rojas (Paraview). A) Modelo texturizado combinado con filtro de curvas de nivel. B) Mismo modelo con filtro de color por profundidad.

Agradecimientos

Le agradecemos al Centro INAH Coahuila por el apoyo logístico, en especial a José López Espinoza por su pasión por la Paleontología y su invaluable labor en la prospección de nuevas localidades.

A Ángel Ramírez, Ricardo Servín y Karina Ángeles, colaboradores del Laboratorio de Paleontología del Instituto de Geología, UNAM; a Carlos Montaña, Marisol Lara, Otoniel López y Casandra Mendoza, colaboradores de la sección de Paleontología del Centro INAH Coahuila; y a los pobladores del Ejido Porvenir de Jalpa, por su inestimable apoyo durante la fase de campo.

A Ignacio Díaz Martínez y Diego Castanera por la revisión crítica del manuscrito original.

Finalmente le agradecemos al Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por proporcionar las instalaciones y el equipo con los que se llevó a cabo el procesamiento de los datos, así como por la beca #360846, concedida

a JLGM durante su estancia cursando sus estudios de maestría.

Los trabajos se realizaron con permiso del Consejo de Arqueología del INAH como parte del proyecto “Protección Técnica y Legal del Patrimonio Paleontológico en el estado de Coahuila” a cargo de FJA.

Referencias

- Adams, T.L., Strganac, C., Polcyn, M.J., Jacobs, L. L., 2010, High resolution three-dimensional laser-scanning of the type specimen of *Eubrontes(?) glenrosensis* Shuler, 1935, from the Comanchean (lower Cretaceous) of Texas: implications for digital archiving and preservation: *Palaeontologia Electronica*, 13(3), 1–11.
- Arakawa, Y., Azuma, Y., Kano, A., Tanijiri, T., Miyamoto, T., 2002, A new technique to illustrate and analyze dinosaur and bird footprints using 3-d digitizer, *Fukui: Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum*, 1, 7–18.

- Bates, K.T., Manning, P.L., Vila, B., Hodgetts, D., 2008a, Three-dimensional modelling and analysis of dinosaur trackways: *Palaentology*, 51(4), 999–1010.
- Bates, K.T., Rarity, F., Manning, P.L., Hodgetts, D., Vila, B., Oms, O., Galobart, Á., Gawthorpe, R. L., 2008b, High-resolution LiDAR and photogrammetric survey of the Fumanya dinosaur tracksites (Catalonia): Implications for the conservation and interpretation of geological heritage sites: *Journal of the Geological Society*, 165(1), 115–127.
- Bravo-Cuevas, V.M., Rodríguez-de la Rosa, R., 2014, A summary of the Mesozoic vertebrate tracks of Mexico, *en* Rivera-Sylva, H.E., Carpenter, K., Frey, E. (eds.), *Dinosaurs and other reptiles from the Mesozoic of Mexico*: Bloomington, Indiana University Press, 181–192.
- Breithaupt, B.H., Matthews, N.A., Noble, T.A., 2004, An integrated approach to three-dimensional data collection at dinosaur track sites in the Rocky Mountain West: *Ichnos*, 11 (1–2), 11–26.
- Castanera, D., Pascual, C., Razzolini, N.L., Vila, B., Barco, J.L., Canudo, J.I., 2013a, Discriminating between medium-sized Tridactyl Trackmakers: tracking Ornithopod tracks in the base of the Cretaceous (Berriasian, Spain): *PloS ONE*, 8(11), e81830, 1–20.
- Castanera, D., Vila, B., Razzolini, N. L., Falkingham, P. L., Canudo, J. I., Manning, P. L., Galobart, A., 2013b, Manus track preservation bias as a key factor for assessing trackmaker identity and quadrupedalism in basal ornithopods: *PloS ONE*, 8(1), e54177, 1–13.
- Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., Ranzuglia, G., 2008, Meshlab: an open-source mesh processing tool, *in* Scarano V., De Chiara, R., Erra U. (eds.) *Eurographics Italian Chapter Conference* The Eurographics Association, 129–136.
- CloudCompare, 2015, CloudCompare Ver. 2.6.1: Paris, EDF R&D, Telecom ParisTech [Software].
- Eberth, D.A., Delgado-de Jesús, C.R., Lerbekmo, J.F., Brinkman, D.B., Rodríguez-de la Rosa, R.A., Sampson, S.D., 2004, Cerro del Pueblo Fm (Difunta Group, Upper Cretaceous), Parras Basin, southern Coahuila, Mexico: reference sections, age, and correlation: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(3), 335–352.
- Falkingham, P.L., 2012, Acquisition of high resolution three-dimensional models using free, open-source, photogrammetric software: *Palaentologia Electronica*, 15(1), 1–15.
- Falkingham, P.L., 2013, Generating a photogrammetric model using VisualSFM, and post-processing with Meshlab (en línea), Liverpool: *disponible en* <https://www.academia.edu/3649828/Generating_a_Photogrammetric_model_using_VisualSFM_and_post-processing_with_Meshlab>, *consultado* 12 de marzo de 2016.
- Falkingham, P.L., Bates, K.T., Farlow, J.O., 2014, Historical photogrammetry: Bird's Paluxy River dinosaur chase sequence digitally reconstructed as it was prior to excavation 70 years ago: *PloS ONE*, 9(4), e93247.
- Gates, T.A., Sampson, S.D., Delgado de Jesus, C.R., Zanno, L.E., Eberth, D., Hernández-Rivera, R., Aguillón-Martínez, M.C., Kirkland, J.I., 2007, *Velafrons coahuilensis*, a new lambeosaurine hadrosaurid (Dinosauria: Ornithopoda) from the late Campanian Cerro del Pueblo Formation, Coahuila, Mexico: *Journal of Vertebrate Paleontology*, 27(4), 917–930.
- Google Maps, 2015, La Rosa, Coahuila de Zaragoza: Disponible en: <<https://www.google.com.mx/maps/place/La+Rosa,+Coah./@25.518361,-101.4067166,14z>>, *consultado* en 2015.

- Henderson, A., 2015, ParaView: A Parallel Visualization Application (en línea): Nueva York, Kitware Inc., *disponible en* <www.paraview.org>, *consultado* 15 de marzo de 2016. [Software].
- Lallensack, J.N., Sander, P.M., Knötschke, N., Wings, O., 2015, Dinosaur tracks from the Langenberg Quarry (Late Jurassic, Germany) reconstructed with historical photogrammetry: Evidence for large theropods soon after insular dwarfism: *Palaeontologia Electronica*, 18(31A), 1–34.
- Lockley, M.G., 1996, Siguiendo las huellas de los dinosaurios: Madrid, McGraw-Hill Interamericana, 307 p.
- Loewen, M.A., Sampson, S.D., Lund, E.K., Farke, A. A., Aguillón Martínez, M.C., De León, C.A., Rodríguez de la Rosa, R.A., Getty, M.A., Eberth, D.A., 2010, Horned dinosaurs (Ornithischia: Ceratopsidae) from the Upper Cretaceous (Campanian) Cerro del Pueblo Formation, Coahuila, Mexico, *en* Ryan, M.J., Chinnery-Allgeier, B.J., Eberth, D.A. (eds.), *New Perspectives on Horned Dinosaurs: The Royal Tyrrell Museum Ceratopsian Symposium*: Bloomington, Indiana University Press, 99–116.
- Mallison, H., Wings, O., 2014, Photogrammetry in paleontology – a practical guide: *Journal of Paleontological Techniques*, 12, 1–31.
- Marty, D., 2008, Sedimentology, taphonomy, and ichnology of Late Jurassic dinosaur tracks from the Jura carbonate platform (Chevenez–Combe Ronde tracksite, NW Switzerland): Insights into the tidal-flat palaeoenvironment and dinosaur diversity, locomotion, and palaeoecology: *GeoFocus*, 21, 1–278.
- Matthews, N.A., Noble, T.A., Breithaupt, B.H., 2006, The application of photogrammetry, remote sensing and geographic information system (GIS) to fossil resource management, *Albuquerque: New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin*, 34, 119–131.
- Matthews, N.A., Noble, T.A., Breithaupt, B.H., 2016, Close-range photogrammetry for 3-D ichnology: The basics of photogrammetric ichnology, *en* Falkingham, P., Marty, D., Richter, A. (eds.), *Dinosaur Tracks: The Next Steps*: Bloomington, Indiana University Press, 29–55.
- Perrilliat, M.D.C., Vega, F.J., Espinosa, B., Naranjo-García, E., 2008, Late Cretaceous and Paleogene Freshwater Gastropods from Northeastern Mexico: *Journal of Paleontology*, 82(2), 255–266.
- Petti, F.M., Avanzini, M., Belvedere, M., De Gasperi, M., Ferretti, P., Girardi, S., Remondino, F., Tomasoni, R., 2008, Digital 3D modelling of dinosaur footprints by photogrammetry and laser scanning techniques: integrated approach at the Coste dell'Anglone tracksite (Lower Jurassic, Southern Alps, Northern Italy), *Trento: Studi Trentini di Scienze Naturali: Acta Geologica*, 83, 303–315.
- Razzolini, N.L., Vila, B., Castanera, D., Falkingham, P.L., Barco, J. L., Canudo, J. I., Manning, P. L., Galobart, À., 2014, Intra-trackway morphological variations due to substrate consistency: The El Frontal dinosaur tracksite (Lower Cretaceous, Spain): *PloS ONE*, 9(4), 1–14.
- Rivera-Sylva, H.E., Rodríguez-De La Rosa, R., Ortiz-Mendieta, J.A., 2006, A Review of the Dinosaurian Record from Mexico, *en* Vega, F.J., Nyborg, T.G., Perrilliat, M. del C., Montellano-Ballesteros, M., Cevallos-Ferriz, S.R.S., Quiroz-Barroso, S.A. (eds.), *Studies on Mexican Paleontology, Topics in Geobiology*, 24, Netherlands, Springer, 233–248.
- Romilio, A., Hacker, J.M., Zlot, R., Poropat, G., Bosse, M., Salisbury, S.W., 2017, A multidisciplinary approach to digital mapping of dinosaurian tracksites in the Lower Cretaceous (Valanginian–Barremian) Broome Sandstone of the Dampier Peninsula, Western Australia: *PeerJ*, 5, e3013.

- Santiago Carrasco, B., Martínez Ramos, C.J., Sánchez Bermeo, G., Palacios García, R., Chiapa García, R., 2008, Carta Geológico-Minera, Monterrey G14-7, Nuevo León y Coahuila: Servicio Geológico Mexicano, escala: 1:250000.
- Wu, C., 2007, SiftGPU: A GPU implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT) (en línea): *disponible en* <<http://cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu>>, *consultado* 10 de febrero de 2016. [Software].
- Wu, C., 2011, VisualSFM: A Visual Structure from Motion System (en línea): *disponible en* <<http://ccwu.me/vsfm/>>, *consultado* 10 de febrero de 2016. [Software].