

INTRODUCCIÓN A LA PALEONTOLOGÍA VIRTUAL

Técnicas de digitalización aplicadas
en paleontología y ciencias afines

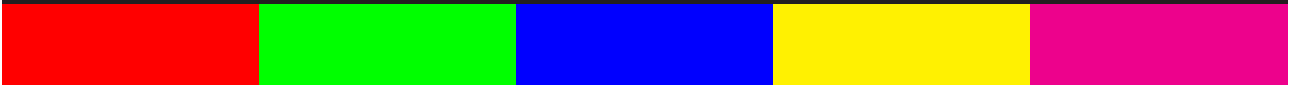
Daniel A. Morón-Alfonso

Asociación Paleontológica Argentina

INTRODUCCIÓN A LA PALEONTOLOGÍA VIRTUAL

Técnicas de digitalización aplicadas
en paleontología y ciencias afines

Daniel A. Morón-Alfonso



Asociación Paleontológica Argentina



Publicaciones

**Introducción a la Paleontología Virtual:
técnicas de digitalización aplicadas en
paleontología y ciencias afines**

Autor:

Daniel A. Morón-Alfonso

Ilustraciones y arte de tapa:

Daniel A. Morón-Alfonso

Comité Editorial APA:

Mónica Buono

Leonardo Salgado

Juliana Sterli

Claudia Tambussi

Revisores externos

Ariana Paulina Carabajal

Agustin Ruella

Diseño y maquetación

Paula Benedetto

Morón Alfonso, Daniel A.

Introducción a la paleontología virtual : técnicas de digitalización aplicadas en paleontología y ciencias afines / Daniel A Morón Alfonso; Editado por Daniel A Morón Alfonso. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Asociación Paleontológica Argentina, 2025.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-48261-7-6

1. Paleontología. 2. Imagen Digital. 3. Tomografía. I. Morón Alfonso, Daniel A, ed. II. Título.
CDD 560

© Asociación Paleontológica Argentina, 2025.
Maipú 645, 1er piso, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
Web: www.apaleontologica.org.ar
APA Libros: <https://apaleontologica.publisher.org.ar/index.php/apa>
Obra registrada en la Dirección Nacional del Derecho de Autor.
Hecho el depósito que marca la Ley 11.723.
Impreso en la Argentina.
Printed in Argentina.

DOI: 10.5710/APA.10.09.2025.006

Primera edición

Biografía del autor



Daniel Andrés Morón-Alfonso es paleontólogo y artista 3D, especializado en paleontología de invertebrados y paleontología virtual. Sus investigaciones se han enfocado en la aplicación de técnicas digitales al estudio de los amonoides, iniciando con el uso de métodos tomográficos, tema de su tesis de licenciatura, y gracias al cual obtuvo en 2018 el título de Licenciado en Paleontología en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (Argentina). Posteriormente, exploró el potencial de integrar metodologías complementarias a la tomografía, incorporando el modelado 3D y diversas técnicas de digitalización 2D y 3D, como la fotogrametría, el escaneo 3D y la estéreo-fotometría. Estas herramientas le han permitido describir nuevas estructuras en los amonoides y abordar aspectos más avanzados de su paleobiología, como la hidrostática y la hidrodinámica de la conchilla, mediante análisis complejos que incluyen la dinámica computacional de fluidos y el modelado estadístico. Los resultados de estas investigaciones han sido publicados en distintos trabajos y lo condujeron a obtener el título de Doctor en Ciencias Geológicas en la misma institución en el año 2024.

En este libro se recopilan muchas de sus observaciones, resultado tanto de su labor como investigador como de su experiencia en la creación de reconstrucciones 3D con fines didácticos y de divulgación. Si bien su aplicación inicial se ha orientado al estudio de los amonoides, las metodologías aquí presentadas pueden extenderse a una amplia diversidad de taxones.

*Dedicado a mi abuelo, Hernando Alfonso Castillo,
cuyo legado académico en matemáticas y computación
inspiró, desde muy temprano, mi interés
por los temas que aborda este libro*

Agradecimientos

A mi familia, amigos y compañeros, por su constante apoyo a lo largo de estos años. A la Dra. Marcela Cichowolski, mi directora doctoral y principal promotora de muchas de las técnicas exploradas para la realización de este libro. Al Dr. Hoffmann, por sus valiosos aportes y consejos, así como algunos de los materiales empleado en este trabajo. A las curadoras de las instituciones que facilitaron el acceso a material y permitieron la realización de numerosos procedimientos aquí citados: la Dra. Cecilia Rodríguez Amenábar, del Instituto Antártico Argentino; Lic. Marian Tanuz, curadora de la colección paleontológica de la FCEN de la Universidad de Buenos Aires; y la Dra. Claudia del Río, del Museo Argentino de Ciencias Naturales “Bernardino Rivadavia”. También agradezco a las técnicas y técnicos de la Clínica La Sagrada Familia, la Facultad de Odontología de la UBA, y de las empresas Fundición Aliente y Advanced Machine Systems S.A., por proporcionar los equipos e instalaciones y propiciar el desarrollo de las técnicas tomográficas aplicadas a investigación científica. Finalmente, al CONICET (Argentina) por su apoyo económico durante mi doctorado, y a MINCIENCIAS (Colombia) por el financiamiento aportado para la realización de diversos estudios y la adquisición de los equipos necesarios para desarrollar las técnicas digitales aquí mencionadas.

Índice



Prólogo del autor.....	1
Prólogo.....	2
Introducción.....	3
Referencias:.....	4
Capítulo 1 – Imágenes digitales	
Imágenes ráster	5
Histograma de una imagen.....	8
Imágenes y gráficos vectoriales.....	10
Compresión y formatos	11
Conversión de imágenes	13
Contraste	13
Programas de procesamiento de imágenes	15
Interfaz gráfica.....	16
Arquitectura modular	19
Computación paralela.....	20
Versionado.....	21
Referencias.....	21
Capítulo 2 – Modelado virtual	
Modelos 3D en paleontología.....	25
Entornos de trabajo	26
Objetos básicos de modelado virtual.....	28
Transformaciones.....	32
Modelado virtual	35
Esculpido digital.....	37
Operaciones booleanas.....	38
Modificadores	40
Subdivisión de superficies (Subdivision Surface).....	41

Modificador de repetición (Array).....	41
Espejo (Mirror)	42
Solidificar (Solidify)	43
Estructura de alambre.....	43
Mapeo de UVs y texturado	45
Iluminación.....	46
Rigging	47
Animaciones y simulaciones	47
Renderización	48
Extracción de datos y mediciones	48
Mediciones en modelos 3D.....	49
Extracción de datos de la topología	49
Aplicaciones.....	51
Mecánica computacional	52
Impresión 3D	53
Referencias.....	56

Capítulo 3 – Técnicas tomográficas

Introducción	61
Técnicas tomográficas destructivas.....	62
Técnicas tomográficas no-destructivas	63
Tomografía óptica.....	63
Tomografía de neutrones	64
Tomografía de rayos X.....	65
Pasos iniciales de un análisis tomográfico	68
Composición de las muestras y atenuación.....	69
Morfología del objeto de estudio.....	71
Región de interés.....	72
Preparación de la muestra	74
Configuración de parámetros de análisis.....	75
Calidad de los tomogramas	75
Parámetros de adquisición	77
Reconstrucción y registro.....	78
Parámetros de reconstrucción	80
Visualización de volúmenes	82
Edición de volúmenes.....	85

Extracción de subvolúmenes.....	85
Transformaciones lineales.....	87
Filtros.....	88
Nodos de visualización.....	88
Marcadores y elementos accesorios.....	88
Segmentación.....	92
Mapas de etiquetas binarias.....	92
Superficies.....	93
Contornos planos y cintas.....	94
Métodos de segmentación.....	94
Renderizado de volumen.....	98
Exportando datos tomográficos.....	99
Confiabilidad de las observaciones.....	100
Referencias.....	102

Capítulo 4 – Técnicas de digitalización

Métodos de adquisición.....	109
Escaneado láser.....	111
Escaneado de luz estructurada.....	115
Fotogrametría.....	116
Técnicas estéreo-fotométricas.....	119
Flujo de trabajo de una digitalización 3D.....	122
Preparación de la muestra.....	122
Configuración de programa y parámetros de digitalización.....	124
Proceso de digitalización en escáneres 3D.....	125
Proceso de digitalización en fotogrametría.....	126
Edición de nube de puntos.....	130
Mallado.....	131
Texturizado.....	132
Flujo de trabajo de Reflectancia Transmitida en Imágenes (RTI).....	134
Preparación de la muestra.....	135
Calibración de la cámara y adquisición de fotos.....	137
Procesamiento de las imágenes.....	137
Visualización y exportación de resultados.....	140
Comentarios finales y perspectivas a futuro.....	142
Referencias.....	143

Capítulo 5 – Recomendaciones prácticas

¿Qué metodología debo usar?	149
¿Qué conceptos debería profundizar?	150
Programación: ¿es realmente necesaria para la paleontología virtual?.....	151
Reflexiones finales.....	152
Referencias.....	153
Glosario de términos y conceptos	155

Prólogo del autor

Un caminante sigue un sendero por el bosque cuando se detiene a observar con una lupa un tronco muerto en la hojarasca. En él se aprecia una topografía muy compleja definida por las grietas en el leño. Estas aberturas son habitadas por pequeños musgos, líquenes y hongos. A los alrededores se observan los movimientos de pequeñas criaturas que recorren su superficie: arañas saltadoras, hormigas cortadoras, chinches, escarabajos e incluso algunos caracoles. El observador se plantea entonces una idea: “cada uno de estos organismos presenta una complejidad interna igual de asombrosa a la de este leño, desde los aspectos fisiológicos de sus órganos hasta las interacciones hormonales entre sus células. Así que, si quisiéramos capturar toda la información relativa a este pequeño escenario, necesitaríamos una memoria con una capacidad exorbitante, probablemente inexistente en el mundo moderno”. Además, reflexiona para sí mismo, “este escenario está limitado únicamente a lo que puedo observar, restringido por mis capacidades y limitaciones”.

Esta situación hipotética es análoga a los procedimientos utilizados en paleontología virtual, donde, a partir de distintas técnicas (similares a la lupa del relato), podemos estudiar con mayor detalle algunos aspectos de una riqueza natural infinitamente compleja. También resalta otro aspecto relevante, y es que estas metodologías generalmente producen modelos incompletos y con un cierto grado de error asociado. Por ello, para interpretar apropiadamente los resultados de estos métodos, siempre será necesario contar tanto con comparaciones directas del material original como con el criterio bien fundamentado del investigador.

En este libro explicaré algunos conceptos básicos de distintos campos de estudio, tanto teóricos como prácticos, que nos ayudarán a comprender tanto las capacidades como las limitaciones de las técnicas de estudio digital disponibles para material fósil en el subcampo de la Paleontología Virtual. Introduciré conceptos comunes entre los programas de trabajo y explicaré algunos flujos de trabajo, usados principalmente para estudios paleontológicos, aunque también aplicables a otras ciencias biológicas. El objetivo de este libro no es convertir al lector en un experto en cada una de las metodologías, sino proporcionarle las bases necesarias para elegir y comenzar a desarrollar las herramientas más útiles para sus futuros proyectos.





Prólogo

Empezar a incursionar en el uso de una nueva técnica o herramienta —como en este caso, las relacionadas con la digitalización y la obtención de modelos tridimensionales virtuales de los fósiles— puede resultar atractivo, moderno e innovador, pero también puede llegar a ser avasallador. Sobre todo cuando, en general, no hay publicaciones técnicas fáciles de conseguir o en nuestro propio idioma, y hay pocos colegas familiarizados con estas metodologías a quienes podamos consultar.

Las nuevas tecnologías relacionadas con lo que se conoce como *paleontología virtual* —la obtención de imágenes y el modelado en 3D— llegaron para quedarse y han revolucionado varias ramas de la paleontología, como es el caso particular de la paleoneurología, la biomecánica o el análisis de elementos finitos. Los productos finales ofrecen una gran variedad de usos académicos, educativos y de divulgación, estos últimos ligados al gran atractivo visual de las creaciones virtuales entre el público general.

En este contexto, y a pesar de los avances tecnológicos, muchos paleontólogos y paleontólogas tardan en adoptar estas metodologías, ya sea por no tener equipamiento especializado a disposición o por no contar con información mínima acerca de cómo efectivizar los recursos disponibles para lograr un resultado que cumpla con los estándares mínimos de publicación o exhibición. Las necesidades, de hecho, son muy diversas: algunos necesitan analizar la morfología superficial, y otros ver o extraer virtualmente las estructuras internas. Podemos usar fotografías o tomogramas, pero la variabilidad de métodos y los inconvenientes que se pueden encontrar en el camino son casi tan grandes como la variedad de preguntas que despiertan los fósiles que intentamos estudiar. Se me vienen a la mente las primeras preguntas que yo misma me hice en su momento: ¿Es muy pequeña mi muestra para un tomógrafo hospitalario? ¿Qué programas me permiten visualizar tomografías computadas? ¿Se puede modificar la resolución de una imagen? ¿Cuántas fotos necesito para hacer un modelo con fotogrametría? ¿Puedo imprimir mi modelo 3D?

Este libro vino a allanar el camino.

A través de una escritura amena y fácil de seguir, el autor nos va llevando de la mano por los intrincados caminos de la *paleontología virtual*, explicando de forma clara y concisa, en los distintos capítulos, los conceptos, terminologías y parámetros que deberíamos tener en cuenta al momento de aplicar técnicas de digitalización como parte de nuestros estudios.

¿Qué más puedo decir? Como especialista en el análisis de tomografías computadas de fósiles, formada prácticamente de manera autodidacta hace veinte años, ¡ojalá hubiera tenido a mano un libro así para incursionar en este apasionante mundo virtual!

Ariana Paulina Carabajal

Introducción

La **Paleontología Virtual** fue definida formalmente por Sutton *et al.* (2014, 2016) como el estudio de fósiles a partir de representaciones digitales interactivas. De modo tal, que se generan análogos virtuales del material que permiten realizar estudios en detalle, ya sea de su estructura interna (a partir de las diversas técnicas tomográficas) o de su superficie (e.g., escaneo 3D, fotogrametría). No obstante, esta definición no contempla las reconstrucciones idealizadas del material (o modelos virtuales) creadas a partir del modelado 3D, ni aborda una rama independiente dentro del estudio de superficies basada en estéreo-fotometría (Woodham, 1980; Hammer *et al.*, 2002; Hammer & Spocova, 2013; Ponchio *et al.*, 2018; Min *et al.*, 2021); las cuales comprenden numerosas técnicas que poseen un gran potencial para estudios paleontológicos (e.g., Jäger *et al.*, 2018; Schädel *et al.*, 2022; Morón-Alfonso *et al.*, 2023; Won & Kong, 2023). A pesar de que Sutton *et al.* (2014) no incluyen estas últimas técnicas en su trabajo original, como veremos, estas suelen emplear principios similares a otras de las metodologías discutidas y, en muchos casos, permiten complementar los modelos creados a partir de otros métodos.

Por otra parte, diversas herramientas de modelado 3D también posibilitan la experimentación para estudiar distintos aspectos del material, ya sea a partir de simulaciones, la reconstrucción de secciones faltantes del fósil, y contempla todas las modificaciones necesarias para realizar impresiones 3D de calidad (e.g., Gutarra *et al.*, 2019; Peterman *et al.*, 2019; Morón-Alfonso *et al.*, 2020; Cunningham, 2021). Por lo tanto, el verdadero potencial de la Paleontología Virtual sólo puede ser explorado en profundidad considerando estas metodologías complementarias. En los capítulos siguientes, veremos que existen terminologías y procedimientos comunes entre las distintas técnicas que facilitarán la comprensión e interpretación de cada una, simplificando procesos complejos que muchas veces resultan confusos si no existe un contexto teórico previo.

Un aspecto destacado por Sutton *et al.* (2014) es que las metodologías empleadas en Paleontología Virtual suelen asumirse como muy intrincadas, especialmente en ámbitos académicos donde su aplicación no es muy habitual. Razón por la cual, hasta la fecha de publicación de su trabajo, aún no se habían adoptado de manera muy extendida. Esta percepción, aunque sigue siendo válida en muchos casos, está siendo progresivamente rebatida en años recientes, ya que muchos autores han integrado estas metodologías en sus métodos regulares, especialmente en el estudio de algunos grupos que requieren la evaluación de sus estructuras internas, principalmente de macrofósiles, pero también para microfósiles y trazas (e.g., Wang *et al.*, 2019; Charbonnier & Forel, 2021; Herrera *et al.*, 2023; Merella *et al.*, 2023; Collevatti *et al.*, 2024). No obstante, es innegable que se requiere un conocimiento técnico considerable en diversos campos para comprender y aplicar todas las herramientas disponibles en los programas de trabajo en profundidad. Esto se debe a que incursionar en la Paleontología Virtual implica adentrarse en fundamentos que, aunque interconectados entre sí, se alejan frecuentemente de los temas de estudio más comunes en las ramas biológicas y geológicas,

abarcando campos tan diversos como la radiología, la programación y la fotografía. Adicionalmente, al emplear estas metodologías a menudo nos encontramos con términos que pueden no estar definidos con claridad (siendo usados coloquialmente dependiendo del área de trabajo) o que se utilizan exclusivamente en contextos muy especializados. Mi invitación a la audiencia es a acompañarme en la tarea de desentrañar y clarificar este entramado de terminologías y conceptos, con el objetivo de obtener una comprensión más profunda de estos campos y de cómo interactúan dinámicamente, permitiéndonos reconstruir e interpretar el pasado como nunca antes se había hecho.

Referencias

- Charbonnier, S., & Forel, M.-B. (2021). Fossil Crustaceans in the Light of New Technologies. In *Natural History Collections in the Science of the 21st Century* (pp. 95-107).
- Collevatti, R. G., Castañeda, M., Silva-Caminha, S. A. F., & Jaramillo, C. (2024). Application of confocal laser microscopy for identification of modern and fossil pollen grains, an example in palm Mauritiinae. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 327, 105140. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2024.105140>
- Cunningham, J. A. (2021). The use of photogrammetric fossil models in palaeontology education. *Evolution (NY)*, 14(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s12052-020-00140-w>
- Gutarra, S., Moon, B. C., Rahman, I. A., Palmer, C., Lautenschlager, S., Brimacombe, A. J., & Benton, M. J. (2019). Effects of body plan evolution on the hydrodynamic drag and energy requirements of swimming in ichthyosaurs. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 286(1898), 20182786. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2786>
- Hammer, Ø., Bengtson, S., Malzbender, T., & Gelb, D. (2002). Imaging fossils using reflectance transformation and interactive manipulation of virtual light sources. *Palaeontologia Electronica*, 5, 1-9. http://palaeo-electronica.org/paleo/2002_1/fossil/issue1_02.htm
- Hammer, Ø., & Spocova, J. (2013). Virtual whitening of fossils using polynomial texture mapping. *Palaeontologia Electronica*, 16. <https://doi.org/10.26879/384>
- Herrera, F., Hotton, C. L., Smith, S. Y., Lopera, P. A., Neander, A. I., Wittry, J., ... D'Antonio, M. P. (2023). Investigating Mazon Creek fossil plants using computed tomography and microphotography. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1200976>
- Jäger, K., Tischlinger, H., Oleschinski, G., & Sander, P. (2018). Goldfuß was right: Soft-part preservation in the Late Jurassic pterosaur *Scaphognathus crassirostris* revealed by Reflectance Transformation Imaging (RTI) and UV light and the auspicious beginnings of paleo-art. *Palaeontologia Electronica*, 21, 1-20. <https://doi.org/10.26879/713>
- Merella, M., Farina, S., Scaglia, P., Caneve, G., Bernardini, G., Pieri, A., ... Bianucci, G. (2023). Structured-Light 3D Scanning as a Tool for Creating a Digital Collection of Modern and Fossil Cetacean Skeletons (Natural History Museum, University of Pisa). *Heritage*, 6(10), 6762-6776. <https://doi.org/10.3390/heritage6100353>
- Min, J., Jeong, S., Park, K., Choi, Y., Lee, D., Ahn, J., ... Ahn, S. (2021). Reflectance transformation imaging for documenting changes through treatment of Joseon dynasty coins. *Heritage Science*, 9(1), 105. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00584-3>
- Morón-Alfonso, D. A., Cichowolski, M., Hoffmann, R., & Rodríguez, M. (2023). Discovery of ammonoid jaw apparatus and associated features using Reflectance Transformation Imaging (RTI). *Publicación Electrónica de la Asociación Paleontológica Argentina (PE-APA)*, 23, 34-48. <https://doi.org/10.5710/PEAPA.28.12.2022.430>
- Morón-Alfonso, D. A., Peterman, D., J., Cichowolski, M., Hoffmann, R., & Lemans, R., E. . (2020). Virtual 3D modeling of the ammonoid conch to study its hydrostatic properties. *Acta Palaeontologica Polonica*, 65, 467-480. <https://doi.org/10.4202/app.00776.2020>
- Peterman, D., Ciampaglio, C., Shell, R., & Yacobucci, M. (2019). Mode of life and hydrostatic stability of orthoconic ectocochleate cephalopods: Hydrodynamic analyses of restoring moments from 3D printed, neutrally buoyant models. *Acta Palaeontologica Polonica*, 64, 441-460. <https://doi.org/10.4202/app.00595.2019>
- Ponchio, F., Corsini, M., & Scopigno, R. (2018). *A compact representation of relightable images for the web*.
- Schädel, M., Yavorskaya, M., & Beutel, R. (2022). The earliest beetle †*Coleopsis archaica* (Insecta: Coleoptera) – morphological re-evaluation using Reflectance Transformation Imaging (RTI) and phylogenetic assessment. *Arthropod Systematics & Phylogeny*, 80, 495-510.
- Sutton, M., Rahman, I., & Garwood, R. (2014). *Techniques for Virtual Palaeontology (1 ed.): New Analytical Methods in Earth and Environmental Science* (Vol. 1). London, UK: Wiley-Blackwell.
- Sutton, M., Rahman, I., & Garwood, R. (2016). Virtual Palaeontology: An Overview. *The Paleontological Society Papers*, 22, 1-20. <https://doi.org/10.1017/scs.2017.5>
- Wang, Y.-Y., Wang, X.-Q., Hu, B., & Luo, M. (2019). Tomographic reconstructions of crab burrows from deltaic tidal flat: Contribution to palaeoecology of decapod trace fossils in coastal settings. *Palaeoworld*, 28(4), 514-524. <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2019.04.003>
- Won, S., & Kong, D.-Y. (2023). Application of RTI to Improve Image Clarity of a Trace Fossil *Cochlichnus* Found from the Jinju and Haman Formations. *Economic and Environmental Geology*, 56(4), 397-408. <https://doi.org/10.9719/EEG.2023.56.4.397>
- Woodham, R. (1980). Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images. *Optical Engineering*, 19, 139-144. <https://doi.org/10.1117/12.7972479>

La paleontología virtual es un subcampo relativamente joven que surgió entre 2010 y 2015, impulsado principalmente por el desarrollo y la expansión de las técnicas tomográficas aplicadas a material fósil. Hoy, tras casi una década de avances, muchos de sus aspectos han evolucionado: se han consolidado conceptos, aparecido nuevos dispositivos y tecnologías, incorporado técnicas innovadoras, y el modelado 3D se ha introducido como parte integral de diversos flujos de trabajo. En este libro se ofrece una introducción y actualización de dichos conceptos y metodologías, abarcando desde los archivos más básicos obtenidos del material fósil (como son las imágenes digitales derivadas de fotografías), hasta la creación de modelos 3D basados en parámetros extraídos del mismo. También se trata la aplicación de técnicas tomográficas para estudiar las estructuras internas de los fósiles y la digitalización 2D y 3D para examinar en detalle su superficie, lo que permite generar réplicas que pueden ser exhibidas en museos o emplearse como reconstrucciones dinámicas en entornos de realidad virtual. En estas páginas nos adentraremos en un nuevo mundo digital para estudiar y revivir los increíbles organismos del pasado.

