



CARTAS AL EDITOR

Potencialidades de los modelos 3D interactivos para la publicación de investigaciones morfométricas

Potential of interactive 3D models in morphometric research papers

**Dennis Denis Ávila y
Alejandro J. Gómez-García**

Facultad de Biología, Universidad
de La Habana.

* Autor para correspondencia:

dda@fbio.uh.cu

En 1993, en la revista *Trends in Ecology and Evolution*, Rohlf y Marcus publicaron un artículo llamando la atención a la revolución que se avizoraba en las técnicas analíticas relacionadas con el estudio cuantitativo de las formas biológicas. Sus predicciones fueron totalmente certeras y en las últimas décadas, se ha dado una expansión explosiva en el campo de los métodos morfométricos. En las primeras etapas de la morfometría, los métodos basados en distancias lineales habían predominado y los análisis de las estructuras morfológicas se desarrollaban por comparaciones univariadas o multivariadas, pero las nociones de forma y tamaño se tendían a confundir regularmente (Rohlf y Bookstein, 1987; Lestrel, 2000). Kendall (1977) definió la forma como toda aquella información geométrica que queda cuando se eliminan los efectos de la ubicación, escala y rotación de los objetos. A partir de sus estudios clásicos un extenso adelanto se ha producido en la teoría matemática de las formas y han aparecido numerosas herramientas morfométricas para el análisis de coordenadas de puntos clave previamente registradas y de contornos, lo cual se ha agrupado bajo el nombre de Morfometría geométrica. Los métodos basados en puntos clave han sido el centro de esta rama, ya que a partir de ellos las inferencias sobre las formas y dimensiones están claramente establecidas y la base matemática ha sido consolidada.

Sin embargo, una parte significativa de los estudios han tomado los datos a partir de fotografías, que representan proyecciones bidimensionales de estructuras muchas veces tridimensionales, con la excepción de las hojas y las alas de insectos que son inherentemente planas. Esto puede conducir a posibles distorsiones y a una pérdida sustancial de información morfológica (Tatsuta *et al.*, 2018). Los avances recientes en la fotogrametría, los escáneres 3D y la micro tomografía computarizada de rayos X de alta precisión (Micro-CT) y el aumento de las capacidades de cómputo han permitido la toma de información tridimensional directamente, tanto de la morfología externa como interna (Wipfler *et al.*, 2016) y muchos de los métodos analíticos para datos 2D son extrapolables a una tercera dimensión. Aunque el número de trabajos es aún muy inferior a los que dependen de fotografías, estudios de morfometría 3D se han desarrollado

Recibido: 2019-05-19

Aceptado: 2019-06-10

en numerosos campos como la paleobiología, antropología, ornitología, etc. (ej. Araujo *et al.*, 2017; Bribiesca-Contreras y Sellers 2017; Dou *et al.*, 2017).

Sin embargo, aún hay una limitación de los estudios morfométricos en 3D que no se ha tratado directamente y que radica en la dificultad para comunicar esta información en los artículos publicados, entre los cuales aún predomina el estilo tradicional, en el cual las figuras o láminas continúan siendo representaciones planas, consistentes con formatos imprimibles. El formato más extendido para los artículos es el *Portable Document Format* o PDF de Adobe (*Adobe Systems Incorporated*, 2014), estándar para el intercambio de documentos electrónicos albergado bajo la norma ISO 32000-1:2008 (*International Organization for Standardization*, 2008). Este soporta contenido multimedia pero que no es explotado a cabalidad en la divulgación científica. Las sugerencias para el empleo de contenidos 3D en los PDF han aparecido varias veces en el contexto científico, principalmente en los campos biomédicos (Danz y Katsaros, 2011; Ziegler *et al.*, 2011, Barnes *et al.*, 2013), en química (Vasilyev, 2010), antropología y biología (Ruthensteiner y Heß, 2008).

A pesar de esto, el uso real en la comunicación científica es muy limitado y posiblemente una de las inhibiciones radique en el desconocimiento de sus potencialidades (Newe, 2014). En el presente artículo se busca comunicar las potencialidades del empleo de contenidos 3D interactivos incluso en los formatos actuales de publicación en PDF, a través de ejemplos de aplicaciones potenciales, discutiendo sus ventajas y desventajas.

Si bien la migración desde el formato impreso hacia el electrónico en las publicaciones científicas ya es un hecho innegable, potenciado por los valores añadidos de este nuevo formato, aún estas potencialidades no son regularmente explotadas a cabalidad. Las limitaciones de número de páginas, tamaño de las figuras y el uso del color han sido rápidamente sobrellevadas. Pero en la presentación de información morfométrica el empleo de fotografías tradicionales mantiene las limitantes de ocultar partes significativas de las formas biológicas que quedan ocultas por detrás del objeto, según la perspectiva de la fotografía. El empleo de varias fotos “soluciona” esta dificultad pero trae como desventaja

que la integración de la información de la forma real, debe hacerse en el cerebro del lector conllevando un esfuerzo de análisis mayor. Las fotografías también están limitadas en su resolución y la posibilidad de enfocarse en detalles de la fotografía es reducida (por su resolución fija).

La sustitución de las fotografías por modelos tridimensionales es una opción implementada en las versiones actuales de los programas de creación, edición y visualización de documentos PDF. Sin embargo, sus potencialidades reales para la comunicación científica en el campo de la morfología / morfometría no han sido aún bien comprendidas. A continuación, a través de varios ejemplos, se mostrarán algunas de estas potencialidades.

Potencialidad 1: Los modelos 3D permiten una visualización más cercana a la realidad de la forma biológica estudiada que las fotografías.

En la figura 1A, se muestran las fotografías del cráneo de un ejemplar de jutía carabalí (*Mysateles prehensilis*) utilizado para un estudio osteométrico, en las vistas tradicionalmente empleadas: vista frontal, lateral, ventral y superior. Tres fotografías se requieren, como mínimo, para dar la información total de la forma de esta estructura (asumiendo una simetría bilateral perfecta y que los lados derecho e izquierdo son iguales. Sin embargo, aún con todas las vistas, la información se presenta con una coplanaridad irreal: los puntos en cada vista aparecen como si estuviesen en un mismo plano o a un mismo nivel, y solo la comparación de su ubicación en todas las vistas permite –con un cálculo trigonométrico mental e instintivo- estimar las distancias entre ellos.

Las fotografías planas, como estas, no muestran indicación alguna de tridimensionalidad y como sustituto, en muchos casos, se emplea la llamada por algunos autores: visualización 2.5D (Tory y Möller, 2004). Esta es cuando se cambia el ángulo de proyección a uno diferente de los planos tradicionales, lo que mejora la percepción de tridimensionalidad (Fig. 1B). Sin embargo, esta nueva imagen, si bien aporta la sensación de estar en 3D, continúa siendo limitada, no permite la visualización de todas las áreas y el lector está limitado a la vista específica seleccionada por el autor. Además, el problema de la coplanaridad persiste. Esta

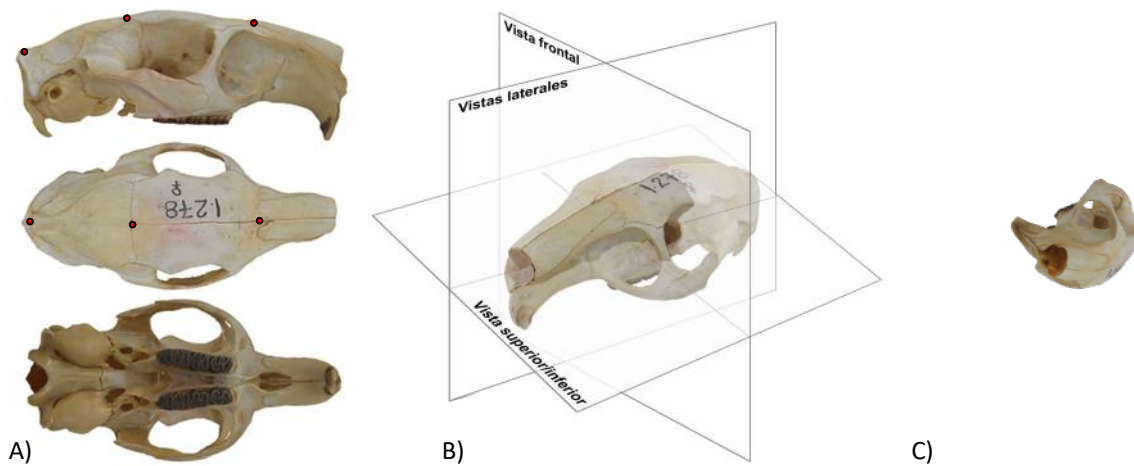


Figura 1. Cráneo de *Mysateles prehensilis* (Rodentia, Capromyidae) de la colección científica del Instituto de Ecología y Sistemática, de La Habana, Cuba, empleado en estudios osteométricos. Se muestran: A) las vistas lateral, dorsal y ventral con la ubicación de tres puntos clave a lo largo del eje longitudinal; B) representación en 2.5D (falsa tridimensionalidad) del cráneo y C) modelo 3D del mismo cráneo, obtenido por fotogrametría e insertado en este formato en el PDF. Su activación y manipulación es solo eficiente en un lector de *Adobe Acrobat* versión 8 o posterior. Para ver mejor sus detalles, seleccione la opción de Multimedia a pantalla completa (*Full screen multimedia*) del menú emergente sobre el modelo.

Figure 1. Skull of *Mysateles prehensilis* (Rodentia, Capromyidae) from the scientific collection of Ecology and Systematic Institute, Havana, Cuba, used in osteometric studies. It is shown: A) lateral, superior and inferior view with three landmarks along longitudinal axis. B) 2.5D images (false tridimensional picture) of the skull and C) 3D model of the same skull, obtained by photogrammetry and inserted in the same format inside the PDF. The activation and manipulation in only full efficiency using Adobe Acrobat reader version 8 or newer. To best view of details, select the option Full screen multimedia from emergent menu over the model.

visualización solo es una mejora desde el punto de vista estético ya que, en realidad, sigue teniendo las mismas limitaciones que las vistas clásicas.

En la figura 1C, aparece el mismo cráneo, pero esta vez ha sido insertado como modelo 3D, obtenido por Gómez-García (2019) mediante fotogrametría (empleando una secuencia de fotografías de varios ángulos). Este modelo permite que el lector, empleando el puntero de la computadora, lo gire y rote a voluntad. La posibilidad de ir rápidamente a las perspectivas tradicionales, o cualquier otra perspectiva que fuera de interés para el autor, se ha garantizado con la inserción de “Vistas” predeterminadas en el menú desplegable de la barra emergente de herramientas 3D. Esta visualización permite además un *zoom* controlable por el lector, con lo cual se pueden observar detalles de la superficie del modelo que a la distancia predeterminada pueden no ser evidentes (por ejemplo, el agujero del nervio auditivo). La posibilidad de interactuar con la representación, no

solo hace más completa la comunicación de la información sino que puede despertar la curiosidad del lector, desencadenar exploraciones mucho más detalladas (Ruthensteiner y Heß, 2008) y facilitar la memorización. En un pequeño experimento informal realizado con estudiantes, estos permanecieron mucho más tiempo observando y manipulando el modelo 3D que analizando una fotografía estática.

Potencialidad 2: Los modelos 3D insertados en PDF, además de poder mostrar gráficamente mediciones morfológicas, al estar calibrados, permiten al lector la toma de otras medidas adicionales que le puedan interesar.

En el modelo de la figura 1C, en la vista “Medidas”, se muestran varias medidas tomadas por el autor sobre el cráneo, según el interés específico del estudio realizado. Pero, si el lector se interesa por otras dimensiones que no fueron tomadas por el autor,

puede hacerlo seleccionando la herramienta “Mediciones 3D” de la barra de herramientas emergentes. Luego de optar entre distancias lineales, distancias perpendiculares, distancias radiales y ángulos simplemente debe marcar sobre el modelo los puntos extremos de su interés y recibirá los valores de las dimensiones solicitadas. Esta posibilidad amplía enormemente las capacidades de información de las representaciones morfométricas en los artículos, más allá incluso de lo previsto por los autores.

Potencialidad 3: Los modelos 3D insertados permiten mostrar cortes o secciones del objeto para analizar los contornos transversales o incluso las estructuras interiores en el caso de los modelos obtenidos por CT-Scan.

En la figura 2A, aparece el modelo de un cactus (*Melocactus* sp.), también obtenido por fotogrametría (por lo tanto, solo contiene la información de la superficie del cuerpo). Esta especie se caracteriza por las profundas costillas a su alrededor que son visibles al girar el objeto. Sin embargo, la forma precisa, distribución y variaciones de las costillas se observa mejor en secciones transversales. La opción de realizar fotografías de

cortes en físico conlleva al sacrificio del ejemplar o rotura del objeto. Sin embargo, sobre el modelo 3D insertado en el PDF los autores pueden activar las opciones de Secciones transversales (*Cross section*) y establecer los planos de interés y el lector, a voluntad, puede moverse entre estas seleccionado las vistas de cortes predeterminados o fijando otras de su interés. En la figura, al seleccionar las vistas: Sección basal, sección media y sección superior se pueden visualizar las diferencias en las formas y profundidades de las costillas de esta planta a distintas alturas del cuerpo.

En la figura 2B, se muestra un modelo de un cráneo de una serpiente (*Ophidia*, Reptilia) obtenido mediante un CT-Scan, y colocado con licencia de re-uso en el portal *Sketchfab*. Esta novedosa tecnología reconstruye la forma del objeto a partir de cortes transversales muy finos obtenidos por tomografía con rayos X lo que permite visualizar también las partes internas de las estructuras. En este caso, la herramienta de secciones transversales no solo muestra la forma del contorno externo, sino también las estructuras internas con lo cual se pueden visualizar elementos que no se observan desde el exterior, sin necesidad de la destrucción física de los objetos. Si en la figura se selecciona la vista nombrada “cavidades” podrá observar un corte del

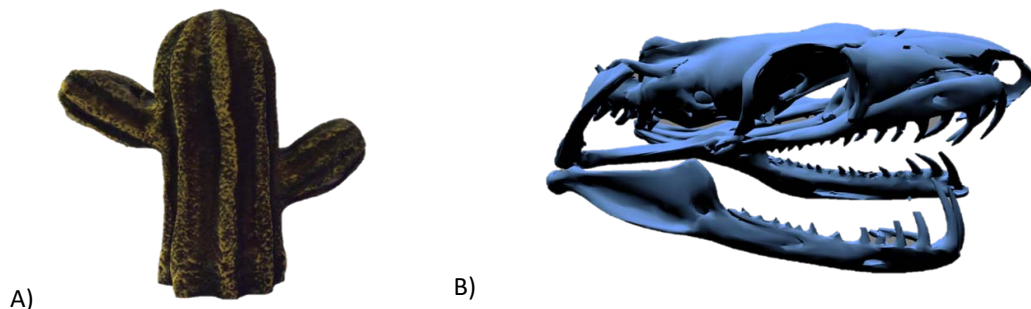


Figura 2. Modelos 3D de un cactus (A) (obtenido por fotogrametría) y de un cráneo de serpiente (B) (descargado del sitio *Sketchfab.com*) obtenido con un CT-Scan. Se muestran en el menú de vistas las secciones transversales en distintas ubicaciones de los objetos que evidencian, en el caso de la planta, la disposición y altura de las costillas y en el caso del cráneo estructuras internas, no visibles desde el exterior. (La resolución ha sido llevada al mínimo con el propósito de su visualización en el PDF manteniendo al mínimo el peso del fichero).

Figure 2. 3D model of a specimen of a cactus (A) (obtained by photogrammetry) and model of a serpent skull (B) (downloaded from *Sketchfab.com*) obtained with a CT-Scan. In the view option of the menu several cross sections appear at different heights, showing transversal outlines featuring disposition and height of ribs in the plant and internal structures hidden from external views in the skull. (Model resolution has been downscaling at minimum for visualization only keeping light the size of the PDF file).

hueso mandibular donde se aprecian las cavidades internas del hueso. Aunque estas vistas son predeterminadas por el autor en función de los elementos que quiere enfatizar, los planos de corte pueden ser cambiados o movidos a voluntad, con las opciones del programa (alineamiento: planos X, Y o Z; *offset*: desplazamiento a lo largo del plano seleccionado y *tilt* 1 y 2: rotaciones en sentidos vertical y horizontal). En la vista predeterminada "Cavidad encefálica" se puede ver la forma interna de esta estructura, a pesar de que no es apreciable desde el exterior. En consecuencia a su mayor contenido de información, estos modelos tienden a ser mucho más pesados, en términos del tamaño del fichero, y la velocidad de su apertura y manejo se relacionará directamente con las capacidades de la computadora en la cual se abran.

Estos tres ejemplos muestran solo algunas de las amplias posibilidades del empleo de modelos 3D en los artículos de morfometría. El formato PDF permite otras opciones que reducen las limitaciones de las imágenes bidimensionales, como animaciones y videos de los objetos rotando 360 grados, pero en estos casos la interactividad se reduce a *play - pause - stop* (excepto para algunas otras opciones de *QuickTime*) y tienen la restricción de que requieren para su ejecución de terceras partes que aseguren la compatibilidad (*players* y *codecs*) y que deben estar instalados en la computadora, además de que su tamaño suele ser muy grande. Las modernas versiones de PDF contienen todos los recursos necesarios para la reproducción de modelos 3D sin necesidad de recursos externos.

El empleo de modelos anatómicos tridimensionales también ha ido ganando fuerza en otros campos como la biomedicina y la educación especializada. En la práctica médica moderna, muchas técnicas producen y manejan datos 3D de forma acelerada: la microscopía de escaneo laser confocal (CLSM), la microscopía fotónica, las tomografías computarizadas, de resonancia magnética (MRT/ IMRT) o de emisión positrónica (PET), son utilizadas regularmente en los centros modernos como técnicas diagnósticas o exploratorias e investigativas. Sin embargo, sus visualizaciones en las publicaciones científicas, no han evolucionado a la misma velocidad, y la gran mayoría de los soportes modernos (impresiones en papel, páginas web, pantallas digitales) solo brindan las proyecciones

bidimensionales, lo que resulta en pérdida de información. Algunas revistas incluso promueven que los autores inserten contenidos 3D en los artículos (Maunsell, 2010).

La educación especializada también se ha beneficiado con el aumento en la accesibilidad y disminución del costo en los métodos de digitalización en impresión (McMenamin *et al.*, 2014, Jang *et al.*, 2015, Hackmann *et al.*, 2019). Históricamente, en la enseñanza se ha dependido de las imágenes y fotografías impresas en libros o láminas, pero varios autores ya han demostrado la relativamente baja eficiencia de estos métodos frente a otras alternativas digitales (Khalil *et al.*, 2005; Nicholson *et al.*, 2006). La posibilidad de insertar y manipular directamente estos modelos en los PDF facilita la generación de materiales educativos más eficientes.

Aunque en la presente comunicación se hace énfasis en aplicaciones morfológicas, las ciencias biomoleculares también se pueden beneficiar de la introducción de estos formatos en los PDF de las publicaciones. En la figura 3, se muestra como ejemplo, un modelo 3D interactivo del citocromo b (descargado de <http://www.rcsb.org/>). La modelación tridimensional de moléculas complejas es ya parte cotidiana de las investigaciones en bioinformática, ya



Figura 3. Modelo de la estructura tridimensional de la molécula del Citocromo b (descargado del sitio *Sketchfab.com*), como ejemplo de otros modelos 3D potencialmente divulgables embebidos en los PDF de los artículos de ciencias biológicas.

Figure 3. Model of the tridimensional structure of Cytochrome b molecule (downloaded from *Sketchfab.com*), as example of other types of 3D models potentially used embedded in PDF files of papers in biological sciences.

que la estructura espacial es crucial para desarrollar una comprensión detallada de muchas de las funciones de las proteínas que aparecen en la naturaleza (Haas *et al.*, 2013). Muchos repositorios online almacenan y publican estos modelos (ej.: *RCSB Protein Data Bank*: <http://www.rcsb.org/>).

Pero no solo en ciencias de la vida se ha mostrado el impacto potencial de estos métodos: la digitalización y modelado 3D de la herencia cultural con técnicas de fotogrametría pueden producir muestras completas, detalladas y realísticas de obras de arte o arquitectónicas, que pueden ser usadas en investigaciones, reconstrucciones digitales, exposiciones y para almacenamiento (ej.: Tucci *et al.*, 2017). Payne *et al.* (2015) demuestran su uso en una nueva generación de museos virtuales en los que, más allá de las colecciones de fotos y visitas interactivas en *QuickTime*, los visitantes *online* pueden seleccionar y descargar más de 500 artefactos antropológicos nativoamericanos de la colección del museo Hampson y manipularlos digitalmente.

Existen, sin embargo, tres mayores dificultades para la generalización de esta herramienta en la comunicación científica, tanto desde la parte de los autores como de los editores de las revistas y de los propios lectores. Las fuentes de obtención de los modelos son la principal limitación para los autores, por desconocimiento y por el hecho de que los escáneres 3D y más aún, los CT-Scan, aún tienen precios prohibitivos para muchos. Sin embargo, los métodos de fotogrametría –que se basan en la obtención de la posición de un objeto en el espacio o su reconstrucción 3D a partir de la intersección de varias fotografías desde distintos ángulos y cálculos trigonométricos– están al alcance de todos, aunque por supuesto se limitan a la superficie externa de los cuerpos. Nguyen *et al.* (2014) presentaron un prototipo de sistema fotogramétrico para adquirir modelos 3D de colores naturales de insectos, de tamaños tan pequeños como 3 mm a 30 mm de longitud, y demostraron su valor para potenciar la descripción de nuevas especies y holotipos, reduciendo la necesidad de manipular los especímenes originales. Estos autores comentaron que este nuevo formato abre nuevas oportunidades para la investigación, educación, arte, entretenimiento, estudios de biodiversidad y control de bioseguridad.

Numerosos programas asequibles y amigables para la generación y manejo de contenidos 3D, con valor para ser incluidos en publicaciones, se han desarrollado, tanto comerciales como *Bundler* (Microsoft), *Photosynth*, *ImageModeler* (AutoDesk), *PhotoModeler* (Eos Systems), Arc3D o 3DMax, como programas libres (ej.: *MeshLab* <http://meshlab.sourceforge.net/>, Cignoni *et al.*, 2008, *MeVisLab*: Newe y Ganslandt, 2013; Barnes *et al.*, 2013).

La segunda de las limitaciones es por parte de los editores y maquetadores de las revistas científicas, y radica en el poco dominio que a veces pueden tener sobre los métodos para incluir los modelos 3D en los PDF de los artículos. Insertar el modelo no es simplemente copiar y pegar, ya que muchas de las opciones no se retienen: vistas, anotaciones, etc., y esto obliga a una cooperación más estrecha entre autores y maquetadores. También puede haber reticencia por el peso de los ficheros, si los modelos no están optimizados, que pudiera dificultar su movilidad en internet en sitios con bajas velocidades de transmisión de datos (subidas, descargas, adjuntos en correos electrónicos). Sin embargo, modelos relativamente precisos pueden reducirse a apenas varios megabytes, equivalentes a una fotografía de buena resolución, y las velocidades de transmisión por internet se están incrementando progresivamente. Finalmente, otro inconveniente potencial para las revistas podría ser la divergencia entre los formatos digitales e impresos, en cuanto a contenido de información, pero esta ya existe con las figuras a color que se imprimen en escala de grises, o con la información suplementaria que solo aparece *online*, y no resulta una limitante.

Finalmente, los propios lectores pueden estar limitados tanto por su desconocimiento de las herramientas de visualización de PDF con contenido 3D como por algunas limitaciones técnicas. Entre estas, se encuentra que las computadoras deben tener requerimientos mínimos y programas actualizados, o sea, esto obliga a emplear lectores que soporten este tipo de información. Los lectores gratuitos de *Adobe* (<http://get.adobe.com/reader/othersversions/>) son los únicos programas actualmente 100% compatibles con la visualización e interacción directa con modelos 3D insertados en los ficheros. Otros programas populares de PDF, como

Foxit Reader, *Sumatra PDF*, *Nitro PDF* y *PDF-XChange*, no manejan correctamente objetos 3D que son desplegados como imágenes estáticas. Los navegadores de internet *Mozilla Firefox* e *Internet Explorer* pueden visualizarlos con el *plug-in Adobe PDF*, pero en el caso de *Chrome*, que usa un interpretador interno (*Chrome PDF Viewer*) que no soporta contenido 3D, este debe ser desactivado para usar el *Adobe Acrobat Reader* y leer correctamente los modelos. McHenry y Bajcsy (2008) hicieron una revisión de los formatos, sus características y los visualizadores disponibles para modelos 3D, pero la disponibilidad de herramientas crece continuamente.

Los modelos 3D están siendo usados actualmente en muchos sitios web, a través de consultas *online* que solo permiten la visualización sin el valor añadido de las herramientas de cortes transversales y mediciones. También existen numerosos repositorios desde donde pueden ser visualizados o descargados (ej.: www.morphdbase.de; www.sketchfab.com). Los modelos 3D de los objetos biológicos, por supuesto, ignoran el contexto de las imágenes por lo que, posiblemente, no sean tan informativos como una fotografía para un estudio ecológico, donde aparece el hábitat de la especie, o para un estudio morfológico donde se desee transmitir las relaciones espaciales con otras estructuras externas. También, por supuesto, su valor desaparece si el artículo se imprime, pero esta es una tendencia que, afortunadamente para los bosques del planeta, tiende a disminuir.

Hace una década, Ruthensteiner y Heß (2008) proponían que era tiempo ya para intensificar el uso de modelos 3D interactivos en las revistas científicas de las ramas de la vida, pero no fueron escuchados. En la actualidad, el contexto es diferente y los modelos digitales tridimensionales ya forman parte cotidiana de la vida moderna. En la presente comunicación, se retoma su mensaje con la certidumbre de que, a pesar de sus posibles limitaciones, la generalización de este método puede traer una extensión significativa en las capacidades de comunicación científica de las figuras en los artículos de ciencias de la vida en formato digital.

LITERATURA CITADA

- Adobe Systems Incorporated. 2014. Adobe - PDF: The Global Standard For Trusted, Electronic Documents and Forms. Disponible en: <http://www.adobe.com/uk/pdf/> (consultado: 12 de junio de 2019).
- Araujo, R., V. Fernández, M.J. Polcyn *et al.* 2017. Aspects of gorgonopsian paleobiology and evolution: insights from the basicranium, occiput, osseous labyrinth, vasculature, and neuroanatomy. *PeerJ* 5, Article ID e3119. DOI: 10.7717/peerj.3119
- Barnes, D.G., M. Vidiassov, B. Ruthensteiner, C.J. Fluke, M. R. Quayle y C.R. McHenry. 2013. Embedding and Publishing Interactive, 3-Dimensional, Scientific Figures in Portable Document Format (PDF) Files. *PLoS ONE*, 8:e69446. DOI: 10.1371/journal.pone.0069446. PMID: 24086243
- Bribiesca-Contreras, F. y W. I. Sellers. 2017. Three-dimensional visualization of the internal anatomy of the sparrow hawk (*Accipiter nisus*) forelimb using contrast-enhanced microcomputed tomography. *PeerJ* 5, Article ID e3039. DOI: 10.7717/peerj.3039
- Cignoni, P.; M. Callieri, M. Corsini, M. Dellepiane, *et al.* 2008. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool, En: V. Scarano, R. De Chiara y U. Erra (Eds) *Eurographics Italian Chapter Conference*.
- Danz, J.C. y C. Katsaros. 2011. Three-dimensional portable document format: a simple way to present 3-dimensional data in an electronic publication. *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.* 140: 274 - 276. DOI: 10.1016/j.ajodo.2011.04.010. PMID: 21803267
- Dou, L., D.J. Li, T.T. Xu, Y. Tang y D. Yang. 2017. Root anatomy and canal morphology of mandibular first premolars in a Chinese population. *Scientific Reports* 7, Article ID 750. DOI: 10.1038/s41598-017-00871-9
- Gómez-García, A. J. 2019. Evaluación de métodos de morfometría geométrica bidimensional y tridimensional en la comparación de cráneos de cuatro especies de jufías cubanas (Rodentia, Capromyidae). Tesis de Diploma. Facultad de Biología, Universidad de La Habana, Cuba
- Haas, J.; S. Roth, K. Arnold, F. Kiefer, *et al.* 2013. The Protein Model Portal—a comprehensive resource for protein structure and model information. *Database*, Vol. 2013, Article ID bat031, DOI: 10.1093/database/bat031.
- Hackmann, C. H.; Dos Reis, L. D. A. y A. C. De Assis Neto. 2019. Digital Revolution in Veterinary Anatomy: Confection of Anatomical Models of Canine Stomach by Scanning and Three-Dimensional Printing (3D). *Int. J. Morphol.* 37(2): 486 - 490
- International Organization for Standardization (ISO). 2008. ISO 32000 -1:2008 Document management - Portable

- document format -- Part 1: PDF 1.7. Disponible en: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=51502 (consultado: 10 de junio de 2019).
- Jang, H. G.; M. S. Chung y D. S. Shin. 2015. Portable document format file containing the surface models to learn the stereoscopic shape of foot muscles. *Int. J. Morphol.* 33(4): 1287-1292
- Kendall, D. 1977. The diffusion of shape. *Advances in Applied Probability* 9: 89–96.
- Khalil, M. K.; T. E. Johnson y C. H. Lamar. 2005. Comparison of computer based and paper-based imagery strategies in learning anatomy. *Clin. Anat.*, 18(6): 457-64
- Lestrel, P.E. 2000. *Morphometrics for the life sciences*. Singapore: World Scientific Press.
- Maunsell J. 2010. Announcement Regarding Supplemental Material. *Journal of Neuroscience*, 30:10599-10600.
- McHenry, K. y P. Bajcsy. 2008. An Overview of 3D Data Content, File Formats and Viewers. Technical Report: isda08-002. Image Spatial Data Analysis Group National Center for Supercomputing Applications.
- McMenamin, P.; M. R. Quayle, C. R. McHenry y J. W. Adams. 2014. The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology. *Anat. Sci. Educ.* 7(6): 479-86.
- Newe, A. 2014. Towards an easy generation of scientific three-dimensional models for embedding into 3D PDF (Portable Document Format) files.
- Newe, A. y T. Ganslandt. 2013. Simplified Generation of Biomedical 3D Surface Model Data for Embedding Into 3D Portable Document Format (PDF) Files for Publication and Education. *PLoS ONE*, 8:e79004. DOI: 10.1371/journal.pone.0079004. PMID: 24260144.
- Nguyen, C. V.; D. R. Lovell, M. Adcock y J. La Salle. 2014. Capturing Natural-Colour 3D Models of Insects for Species Discovery and Diagnostics. *PLoS ONE* 9(4): e94346. doi:10.1371/journal.pone.0094346
- Nicholson, D. T.; C. Chalk, W. R. Funnell y S. J. Daniel. 2006. Can virtual reality improve anatomy education? A randomised controlled study of a computer-generated three-dimensional anatomical ear model. *Med.Educ.*, 40 (11): 1081-7.
- Payne, A.; K. Cole, K. Simon, C. Goodmaster y F. Limp. 2015. Designing the Next Generation Virtual Museum: Making 3D Artifacts Available for Viewing and Download. pp 292-297
- Rohlf, F. J. y F. L. Bookstein. 1987. A comment on shearing as a method for “size correction”. *Systematic Zool.* 36: 356–367.
- Rohlf, F.J. y L. F. Marcus. 1993. A revolution in morphometrics. *Trends Ecol. Evol.* 8: 129–132.
- Ruthensteiner, B. y M. Heß. 2008. Embedding 3D Models of Biological Specimens in PDF Publications. *Microsc. Res. Tech.*, 71:778-786. PMID: 18785246.
- Tatsuta, H.; K. H. Takahashi y Y. Sakamaki. 2018. Geometric morphometrics in entomology: Basics and applications. *Entomological Sci.* 21: 164–184
- Tory, M. y T. Moller. 2004. Human Factors in Visualization Research. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10:72-84. DOI: 10.1109/TVCG.2004.1260759. PMID: 15382699.
- Tucci, G.; V. Bonora, A. Conti y L. Fiorini. 2017. High-quality 3d models and their use in a cultural heritage conservation project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W5, 2017 26th International CIPA Symposium 2017, 28 August–01 September 2017, Ottawa, Canada*
- Vasilyev, V. 2010. Towards interactive 3D graphics in chemistry publications. *Theor Chem Acc*, 125:173-176. DOI: 10.1007/s00214-009-0636-7.
- Wipfler, B.; H. Pohl, M. I. Yavorskaya y R. G. Beutel. 2016. A review of methods for analyzing insect structures – the role of morphology in the age of phylogenomics. *Current Opinion in Insect Science* 18: 60–68.
- Ziegler, A.; D. Mietchen, C. Faber, W. von Hausen, *et al.* 2011. Effectively incorporating selected multimedia content into medical publications. *BMC Med*, 9:17. DOI: 10.1186/1741-7015-9-17. PMID: 21329532.