

Creación, visualización e impresión 3D de colecciones *online* de modelos educativos tridimensionales con tecnologías de bajo coste. Caso práctico del patrimonio fósil marino de Canarias

Creation, Visualization and 3D Printing of Online Collections of Three Dimensional Educative Models with Low-Cost Technologies. Practical Case of Canarian Marine Fossil Heritage

Jose Luis Saorín ¹, Jorge de la Torre-Cantero ¹, Cecile Meier ², Damari Melián Díaz ³, Carolina Ruiz Castillo ⁴, Alejandro Bonnet de León ³

¹ Dpto. de Técnicas y Proyectos en Ingeniería y Arquitectura, Universidad de La Laguna, España. {jlsaorin, jcantero}@ull.edu.es

² Facultad de Educación, Universidad de La Laguna, España. cecile.eme@hotmail.com

³ Facultad de Educación, Universidad de La Laguna, España. {damarimd, alu0100394672}@gmail.com

⁴ Dpto. de Biología Animal, Edafología y Geología, Universidad de La Laguna, España. ccr Ruiz@ull.edu.es

Resumen

El uso de objetos tangibles (maquetas, réplicas de obras artísticas, fósiles...) en entornos educativos se suele utilizar para mejorar el proceso de aprendizaje. Cuando el conocimiento se difunde a través de entornos virtuales, a veces, se pierde el valor de estos objetos tangibles. Las nuevas tecnologías de bajo coste permiten solventar este problema, permitiendo a los profesores incluir en sus aulas virtuales el acceso y manipulación de objetos tridimensionales. En este artículo se describe el proceso de creación y divulgación de un contenido educativo tridimensional e interactivo para aprendizaje en un entorno virtual. Como caso práctico se ha trabajado sobre el patrimonio fósil marino canario. Los fósiles se usan como material tangible en la enseñanza de paleontología, sin embargo, no están disponibles para el trabajo fuera del aula. En el trabajo descrito en este artículo, se han digitalizado en 3D una selección de 18 fósiles. Los archivos obtenidos están a disposición de los alumnos en un entorno *online*, permitiendo su descarga, visualización e interacción en dispositivos móviles multitáctiles. Además, si el alumno lo prefiere, puede imprimirlos en 3D. Para finalizar, se ha realizado una experiencia con 70 alumnos universitarios que, después de acceder al repositorio *online* creado, han contestado a un cuestionario para valorar los materiales diseñados.

Palabras Clave

Educación; Modelos Tridimensionales Digitales; Entornos Virtuales; Impresión 3D; Patrimonio Fósil.

Abstract

In many educational settings, the use of tangible objects is used to enhance learning (models, replicas of art works, fossils...). When knowledge is disseminated through virtual environments, sometimes, the value of these tangible objects is lost. The new low-cost technologies allow solving this problem, enabling teachers to include in their virtual classroom the access and manipulation of three-dimensional objects. This article describes the process of creation and dissemination of a three-dimensional, interactive educational content for learning in a virtual environment. As a practical study, we have worked on the Canary marine fossil heritage. The fossils are used as tangible material in paleontology teaching, however they are not available for work outside the classroom. For this work, it has been digitized in 3D a selection of 18 fossils. 3D files obtained are available to students in an online environment, allowing download, multi-touch display and interaction on mobile devices. In addition, if the student prefers, they can print them using a 3D printer. Finally, there has been an experience with 70 university students who, after accessing to the online files, responded to a questionnaire to assess the made materials.

Keywords

Education; Three-dimensional Digital Models; Virtual Environment; 3D Printing; Fossil Heritage.

Recepción: 03-04-2016

Revisión: 10-08-2016

Aceptación: 06-09-2016

Publicación: 30/09/2016

1. Introducción

1.1. Recursos tridimensionales tangibles

Existen muchos entornos educativos que utilizan elementos tridimensionales para el aprendizaje de los contenidos. Los objetos tangibles se usan de manera habitual en ingeniería y arquitectura (maquetas), en geografía (mapas con relieve), para el dibujo técnico y las vistas normalizadas (piezas técnicas), en estudios artísticos (réplicas de obras escultóricas), para conocer órganos naturales en clases de anatomía, etc.

En diversos estudios se ha demostrado que se aprende un contenido más rápido mediante la manipulación de objetos tangibles (Andrade Lotero, et al., 2012). En pedagogía se tiene muy en cuenta el aprendizaje a través de objetos reales o tangibles, aunque en la mayoría de los casos los estudios están centrados en edades tempranas (Piaget, 1991; Uttal, 2003). Se consideran los manipulativos físicos esenciales para el aprendizaje entre los 6 y 8 años de edad, ya que, permitiendo la manipulación del material de aprendizaje, se facilita la formación de un concepto abstracto (Andrade Lotero, et al., 2011).

Por lo tanto, si los objetos tangibles son importantes en educación, los entornos virtuales de aprendizaje no pueden ser ajenos a este fenómeno y deberán ofrecer una solución digital que sea accesible, tanto en coste como en dificultad, a la mayoría de los profesionales de la educación (de la Torre Cantero, Martín-Dorta, Saorín, Carbonell, & Contero, 2013).

1.2. Recurso digitales 3D en educación

Las nuevas tecnologías permiten convertir los modelos físicos o reales en modelos 3D digitales. El aprendizaje con elementos 3D digitales se puede entender desde diversos enfoques. Por un lado, el uso de películas 3D, donde los videos muestran los elementos de estudio en tres dimensiones, bien a través de una pantalla normal o mediante gafas o cascos de visión 3D, donde se procura mejorar el entendimiento de los contenidos. Se ha demostrado que utilizar video 3D reduce el tiempo y mejora el aprendizaje de los conceptos (Bamford, 2011). Esta técnica, carece de una interacción o manipulación de los elementos de forma directa por parte del alumno.

Por otro lado, están los llamados entornos virtuales de aprendizaje tridimensionales (EVA 3D), donde se utiliza la tecnología para crear un entorno virtual 3D interactivo que facilita el aprendizaje. Pueden ser

juegos en 3D, simulaciones o mundos virtuales con fines educativos (Dalgarno & Lee, 2010). Second Life es actualmente el EVA 3D más maduro y popular que se utiliza en la educación (Warburton, 2009). En estos medios, la manipulación de objetos tridimensionales se hace a través de un avatar en un mundo virtual.

Por último, y en lo que se centra este artículo, es la digitalización tridimensional de elementos tangibles para su manipulación en visualizadores 3D a través dispositivos multitáctiles (tabletas digitales y *smartphones*). Los visualizadores 3D, en estos equipos, permiten interactuar de forma intuitiva con los modelos tridimensionales, aproximándose a la manera de manejar el objeto real (Yi-Chen, Hung-Lin, & Wei-Han, 2011; de la Torre Cantero, Saorín, Martín, & Contero, 2012). Este sistema da acceso a un aprendizaje ubicuo en dispositivos móviles que proporciona al alumno la posibilidad de realizar actividades educativas en cualquier lugar (Zapata-Ros, 2012). La digitalización tridimensional permite la descarga y visualización de los elementos 3D por parte de los usuarios en cualquier tableta digital o *smartphone* de forma inmediata, aunque también se pueden visualizar en un ordenador. Sin embargo, en un ordenador normalmente no se maneja el archivo directamente con los dedos, sino a través de un dispositivo exterior como puede ser un ratón. Además, estos modelos pueden ser impresos en 3D, creando réplicas físicas (Saorín Pérez, Meier, De la Torre-Cantero, Melián Díaz, & Drago-Díaz Alemán, 2015).

Esta manera de trabajar puede ser reproducida por cualquier profesor con un mínimo de conocimientos informáticos, utilizando tecnologías accesibles y de bajo coste. Para ilustrar el proceso de creación de estos recursos 3D digitales, en este artículo se va a utilizar como caso práctico, el patrimonio fósil de Canarias. El estudio de la paleontología es un caso muy interesante, ya que los fósiles son escasos y a veces delicados, por lo que su manipulación suele quedar restringida al aula de prácticas. Los formatos que tradicionalmente se usan en la enseñanza y divulgación de la Paleontología son los libros con ilustraciones (Eldredge & Gould, 1991), las fichas de reconocimiento bioestratigráfico de fósiles como las de Meléndez (1983), las guías de fósiles (Gómez-Alba, 1988), exposiciones, rutas de museos y colecciones paleontológicas (Buscalioni, 2007). Sin embargo, a partir del año 2000, las técnicas de escaneado, digitalización y realización de modelos y réplicas en 3D procedentes de otras disciplinas (medicina, Arquitectura, arte, etc.), se han ido incorporando de forma significativa al mundo de la Paleontología, primero a su ámbito científico, y en menor medida al educativo y divulgativo (Rahman, et al., 2012). En especial, los modelos digitales de fósiles adquieren mucha relevancia porque son muy eficaces para comunicar visualmente conceptos complejos o técnicos convirtiéndose en un recurso educativo transversal (Bates, et al. 2009; Reynolds, 2010). El resultado de aplicar técnicas no destructivas (tomografía computerizada, escaneado láser o sincrotrón, etc.) al estudio del registro fósil ha generado una gran cantidad de fósiles virtuales en tres dimensiones dando lugar, en el año 2011, a la propuesta de la rama científica denominada Paleontología Virtual, y es responsable de que los animales y plantas extintos “cobren vida” (Lukender 2012).

Por lo tanto, si bien es cierto que existe la posibilidad de disponer de fósiles digitales para educación, la mayoría de las técnicas empleadas hasta ahora (tomografía computerizada, etc.) siguen implicando un proceso caro y difícil, por lo que queda restringida su utilización a grandes entidades (museos, universidades...) que ponen a disposición del mundo una selección de su material paleontológico. Debido a esto, en la mayoría de los casos, en las aulas virtuales de colegios o universidades no existen réplicas tridimensionales de fósiles de carácter local.

Para la realización de este estudio, se ha seleccionado un conjunto de fósiles representativos de los depósitos marinos de Canarias, vistos en las prácticas docentes de los alumnos de Grado de Biología de la Universidad de la Laguna. Estos fósiles se han escaneado, creando los modelos 3D, incorporándolas a un entorno *online*, permitiendo su posterior descarga, para visualizar los modelos 3D en tabletas digitales, *smatphones* o también ordenadores y su impresión tridimensional (Figura 1). Todo este proceso se ha realizado con tecnologías de bajo coste, de libre acceso y de fácil uso. Una vez creados los materiales digitales, se han mostrado a los alumnos y se ha encuestado sobre el interés y utilidad de los mismos.

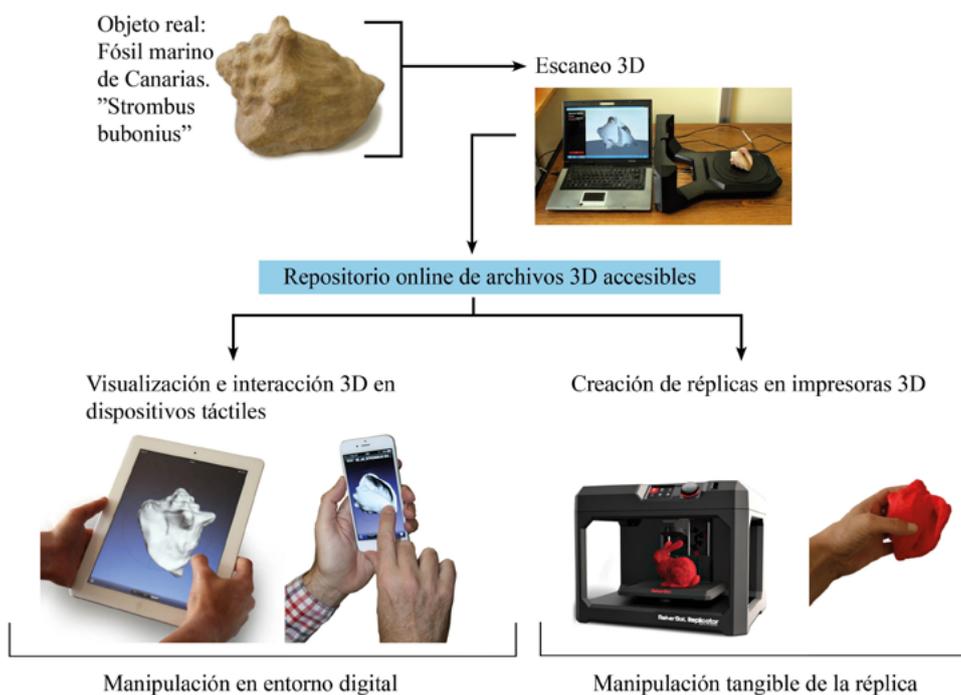


Figura 1. Esquema de creación y divulgación de los modelos tridimensionales de fósiles digitales realizados en este trabajo de la enseñanza y divulgación de la Paleontología.

2. Antecedentes del uso de modelos 3D y réplicas en Paleontología

El uso de fósiles originales en Paleontología no siempre es posible. Los fósiles pueden ser escasos, no accesibles o delicados, por ello es habitual utilizar una réplica física de los mismos que facilita de manera considerable el trabajo a los investigadores o museos (Arribas, 2004). Una réplica es una reproducción del original de un objeto, con la máxima exactitud posible, pudiendo ser de distinto material y diferente escala (Gorbea, 1988).

El arte de moldear y replicar especímenes fósiles forma parte de la metodología de investigación paleontológica (Converse, 1984; Baeza, et al., 2013; Roubach, et al., 2014). Las réplicas en tres dimensiones en Paleontología se conocen desde el siglo XVIII, y el uso del modelado en 3D con ayuda de los ordenadores se aplica de forma continuada desde la década de 1980, y se ha hecho cada vez más patente a partir de la última década del siglo XX, especialmente aplicado a los vertebrados e incofósiles, aunque son raros en otros tipos de fósiles, incluidos los invertebrados (Dardon, et al., 2010). Los modelos y reproducciones 3D, aparte de incluir los datos paleobiológicos para reconstruir las partes internas de los especímenes de animales extintos como los dinosaurios (Cruzado-Caballero, et al., 2015), son parte esencial en las exposiciones paleontológicas virtuales y de las colecciones de referencia, ya que permiten el almacenaje de una enorme cantidad de colecciones sin consumir mucho espacio físico, y evitan la manipulación directa y excesiva de las muestras en el laboratorio. También se usan para hacer reproducciones con fines museísticos (Falkingham, 2012), para estudiar sitios naturales de difícil acceso (Cayla, 2014), para la digitalización de yacimientos, como el caso de las icnitas de dinosaurios de Galve (Royo Torres, Mampel, & Alcalá, 2013), y en la gestión del patrimonio paleontológico como parte del geoturismo (Mallison, 2011; Gonzalez-Delgado, y otros, 2015). En el ámbito de la divulgación de la ciencia o en el educativo también son muy útiles los modelos 3D, permitiendo producir materiales didácticos que mejoran el aprendizaje en general (Bates, et al., 2009), y para los alumnos con deficiencias visuales, en particular, pues les permite tener acceso a fósiles que solo se pueden ver con lupa o en el microscopio (Teshima, 2010), ya que los modelos 3D se pueden ampliar y replicar a diferentes escalas.

3. Tecnologías de bajo coste para la creación de modelos 3D y réplicas del registro fósil

Tradicionalmente, para la creación de réplicas de fósiles, se confecciona un molde que reproduce los detalles de dicha pieza lo más fielmente posible. Sin embargo, un molde tiene una durabilidad limitada

y necesita de un proceso manual de limpieza de la figura. El descubrimiento de nuevos materiales como la silicona “rubber” para moldear revolucionó las técnicas de moldeo en Paleontología (Prieur, 2004) ofreciendo una alta fidelidad de las reproducciones al capturar detalles delicados (Figura 2). Las técnicas tradicionales de obtener réplicas representan una manera de trabajar costosa y lenta, además, en muchos casos no es posible el uso de moldes por la fragilidad del objeto que se ha de reproducir. Adicionalmente, estos moldes, al no ser digitales, no pueden ser implementados en entornos virtuales de aprendizaje.



Figura 2. Molde de silicona para la realización de una réplica con métodos tradicionales de un ejemplar del género *Strombus* usado en prácticas del área de Paleontología.

Debido a estas dificultades, desde hace años se intenta mejorar este procedimiento mediante la incorporación de tecnologías digitales que sean útiles para crear modelos 3D computacionales (Dardon, et al., 2010; Sutton, et al., 2013), más eficientes en términos de tiempo y coste y fáciles de modificar y actualizar (Bates, et al., 2009). En una primera fase las tecnologías aplicadas para conseguir modelos 3D de fósiles procedían del mundo de la topografía y estaban basadas en aplicaciones orientadas a la creación de modelos digitales del terreno (MDT). Existen diferentes técnicas topográficas para generar los puntos de la malla 3D del territorio; puede hacerse mediante aparatos tradicionales de topografía, mediante fotografías (fotogrametría) o mediante escáner láser (Gonizzi Barsanti, Remondino, & Visintini, 2012). El uso de estas nuevas tecnologías aplicadas al registro fósil, simplificó mucho el proceso de creación de réplicas, aunque el coste siempre ha sido muy alto. Al mismo tiempo hay que tener en cuenta que se necesitaba una formación adecuada para poder llevar a cabo las copias con estos métodos, y además se requería de tecnologías poco accesibles (Lerma, Cabrelles, & Seguí, 2011).

Sin embargo, la aparición de tecnologías de bajo coste permite pensar en la generación de modelos

3D digitales de fósiles en los propios centros educativos (Leakey & Dzambazova, 2013). Hoy en día existen programas de restitución fotográfica que aprovechan el procesado en la nube y que son gratuitos (123D Catch, Autodesk Recap...), por otro lado han aparecido escáneres 3D que permiten capturar la superficie tridimensional del fósil con un precio cada vez menor (Winkelbach, et al., 2006). En el año 2012 Martin Friess (Friess, 2012) detalla los diferentes rangos de precios de escáneres tridimensionales aplicados a la Paleontología, y considera en la categoría de bajo coste aquellos que tienen un precio menor de 5000 dólares; entre los que nombra, aparecen el escáner láser modelo David 3D y el modelo Nextengine ampliamente utilizados (Lukeneder & Lukeneder, 2011). Ambos modelos se mueven en el entorno de los 2500 euros, un precio bajo que en los últimos años se ha reducido considerablemente.

La aparición de periféricos de videojuegos que tienen posibilidad de detectar el espacio en 3D ha permitido crear escáneres tridimensionales de muy bajo coste, aunque de resoluciones no tan buenas como los profesionales. Un ejemplo claro es la Kinect de Microsoft con el programa Skanect, que permite crear un escáner 3D por menos de 500 euros. Otro ejemplo es el escáner Structure Sensor, que, junto con un iPad, permite disponer de uno de estos dispositivos por menos de 1000 euros. Una tercera alternativa son escáneres láser de plato giratorio (Figura 3) que se ajusta muy bien a los fósiles de tamaño medio (20 - 200 mm), y que escanea la superficie del objeto con resoluciones intermedias. Estos equipos pueden encontrarse en la gama de los 250 a los 1000 euros. La aparición de estos nuevos modelos de muy bajo coste permite pensar en la creación de modelos tridimensionales de fósiles en pequeños museos o en entornos educativos, donde la escasez de presupuesto es una gran limitación.

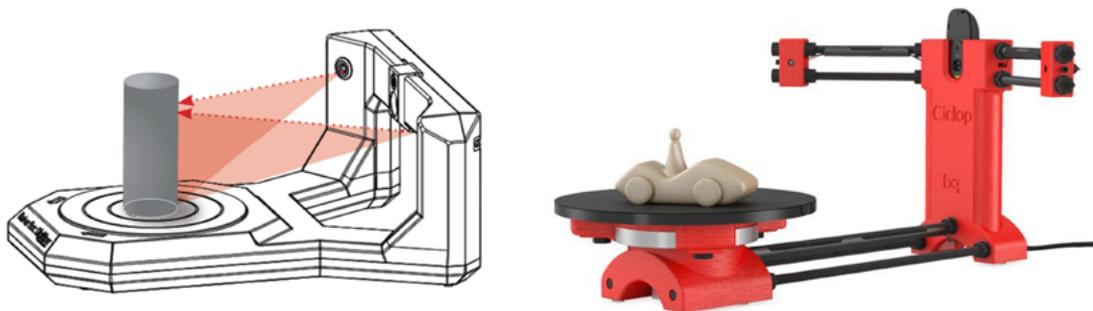


Figura 3. Izqda.: Esquema de funcionamiento del escáner láser MakerBot de plato giratorio de bajo coste. Drcha.: escáner 3D de bajo coste BQ. Una vez obtenido un modelo tridimensional digital, generalmente hay que editarlo antes de proceder a su impresión. Existen muchos programas de edición digital (3DStudio, ZBrush, AutoCad, MudBox, Maya, etc.) que permiten modificar dichos modelos. En algunos proyectos de documentación de patrimonio (Pomaska, 2013) se están utilizando estas tecnologías. Es importante indicar que, aunque algunos de estos programas son de carácter profesional y por tanto de pago, existen otros que se ofrecen de manera gratuita, como por ejemplo Autodesk Meshmixer.

Una vez terminado el proceso de digitalización 3D del objeto, se puede realizar la reproducción física de la réplica. Una de las tecnologías que posibilitan la fabricación de las réplicas es la impresión 3D, sin embargo, uno de los grandes factores que ha limitado el uso de esta tecnología en las aulas ha sido su precio. Hasta el año 2005, una máquina de impresión 3D tenía un precio superior a 20.000 dólares, por lo que solo los grandes centros se la podían permitir (Coates, Hager, Johnson, & Stevens, 2009, April).

En el año 2001, en el Media Lab del MIT se crea el proyecto FabLab en colaboración con el Centre for Bits and Atoms (CBA) con el objeto de difundir las tecnologías de fabricación digital. Desde entonces el movimiento fablab se ha globalizado, ayudando a popularizar las tecnologías de fabricación 3D de bajo coste (Troxler & Wolf, 2010). En 2005, surge el proyecto RepRap en la Universidad de Bath (Reino Unido) con el objetivo de abaratar los costes de la impresión 3D. Esta iniciativa dio lugar a la popularización de dichas máquinas, ya que los precios de las impresoras se redujeron hasta estar en torno a los 1000 dólares. A partir de ese momento, las impresoras de bajo coste se han popularizado y ha surgido una industria alrededor de ellas. La aparición de esta nueva gama de impresoras permite a los centros educativos disponer de ellas y utilizarlas en su docencia. Por lo tanto, una vez superada la barrera del precio, es necesario disponer de metodologías y recursos docentes que nos permitan sacar partido de esta tecnología en los entornos educativos (Canessa, Fonda, & Zennaro, 2013).

3.1. Colecciones online de objetos 3D

Otra manera de divulgar contenido 3D o información educativa es crear un repositorio en un entorno virtual. La idea de disponer de acceso *online* a elementos multimedia como pueden ser fotos, videos u objetos 3D, ha ido evolucionando a lo largo de los últimos años. Los repositorios de ficheros siempre han existido, pero han pertenecido a instituciones y no han sido de acceso sencillo para el público en general. La existencia de entornos web gratuitos, que permiten visualizar, descargar y compartir fotos o vídeos entre diferentes usuarios aparecen alrededor del año 2000 (como por ejemplo *Flickr*). Actualmente existen múltiples servicios de repositorios web de fotos como por ejemplo Picasa, Pinterest, Instagram, OpenPhoto... En el año 2005 se crea el servicio web YouTube, uno de los primeros repositorios de videos dirigido al usuario particular. Actualmente es una de las páginas más visitadas de internet y la más utilizada en la categoría de videos. Tanto los servicios de imágenes como los de video han incorporado en los últimos años la posibilidad de visualizar sus contenidos desde dispositivos móviles.

A pesar del desarrollo que han tenido los repositorios web gratuitos, la incorporación de objetos 3D no ha tenido el mismo desarrollo que las fotos o los videos. Sin embargo, desde el año 2006 se está produciendo una lenta transformación que en los últimos años se está consolidando. Los repositorios

3D se han popularizado conforme la tecnología que permite crear modelos 3D se ha simplificado y abaratado. En el año 2006, la aplicación SketchUp permitió, mediante su versión gratuita, que cualquier persona, tuviera o no conocimientos técnicos, fuera capaz de crear modelos 3D. Hoy en día, SketchUp es una aplicación utilizada en todo el mundo por más de 50 millones de usuarios. Para favorecer el intercambio de modelos 3D entre distintas personas SketchUp creó en el año 2006 uno de los primeros repositorios de modelos tridimensionales gratuitos de gran alcance. Su repositorio, denominado "3D Warehouse", almacena cientos de miles de objetos en 3D (<https://3dwarehouse.sketchup.com>) y su único problema es que el formato en el que guarda los archivos no es un formato neutro, sino que se almacenan en formato SKP, el propio de la aplicación SketchUp. Aunque no son los modelos habituales, en su interior podemos encontrar modelos 3D de fósiles.

A finales de 2008, la empresa Makerbot, fabricante de impresoras 3D, creó una galería 3D de descarga y subida de archivos gratuita (www.thingiverse.com) con la idea de popularizar el uso de las impresoras 3D. Los formatos de intercambio son el STL y el OBJ, dos formatos que se han convertido en el estándar para el mundo de la fabricación digital en 3D. En este repositorio se encuentra, entre otras muchas cosas, un apartado especial con contenido educativo y también réplicas digitales de fósiles con la posibilidad de imprimirlas, realizando una reproducción física con cualquier impresora 3D.

En Francia en el año 2012, Cedric Pinson y Alban Denoye crearon la página web Sketchfab.com, que se denomina a sí misma como "el lugar donde deben estar los ficheros 3D" (Figura 4). Esta página, no solo almacena los ficheros 3D para poder compartirlos, sino que permite su visualización dinámica en 360°. Dicha página está diseñada para ser visualizada tanto en ordenadores como en dispositivos móviles. Además, permite que cualquier persona coloque *online* sus ficheros de modelos 3D con el objetivo de enseñarlos y compartirlos bajo licencia creative commons. En ella podemos encontrar múltiples fósiles en 3D con posibilidad de visualización y descarga gratuita.

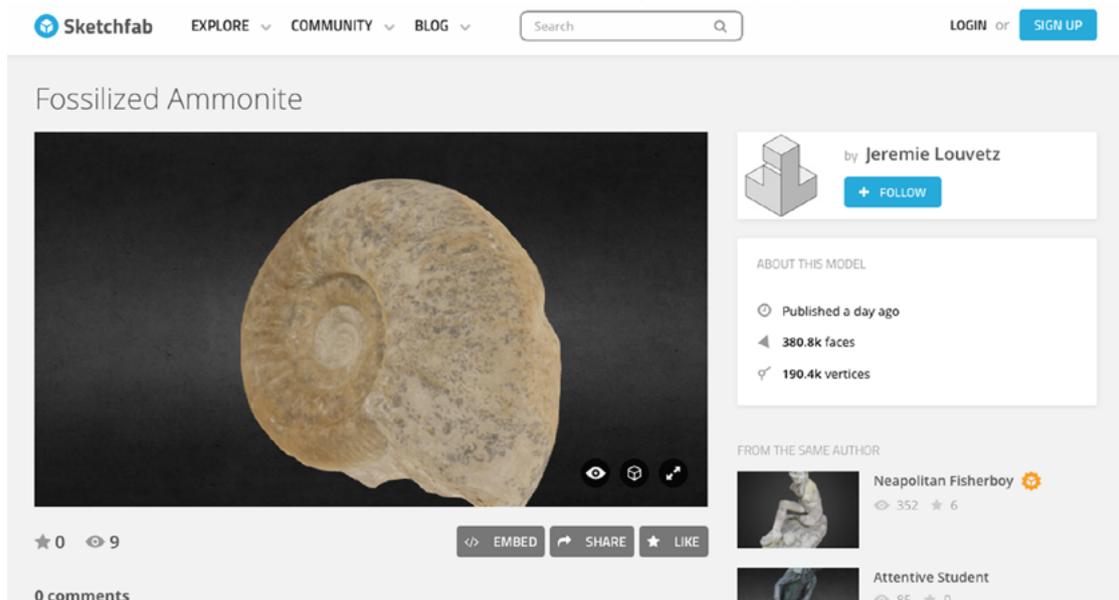


Figura 4. Modelo 3D de un ammonite, descargable en SketchFab. (Imagen de la web: <http://www.SketchFab.com/>).

Aparte de los repositorios oficiales o privados de gran alcance, existe una posibilidad para poner a disposición de todos los usuarios una colección de objetos 3D de una manera fácil y gratuita. Desde la aparición de aplicaciones como Dropbox, Drive o Box, cualquier persona puede disponer de un entorno virtual que le permita compartir sus ficheros con el resto del mundo de una manera sencilla y económica. Aunque no es un repositorio propiamente dicho, es una opción que merece la pena tener en cuenta, puesto que permite controlar el contenido en carpetas que se añade de una manera muy intuitiva (se pueden añadir directamente en el explorador del ordenador) y además se pueden agrupar objetos multimedia de diferentes formatos, no solo el objeto 3D, sino también información complementaria como puede ser libros, ejercicios u otros ficheros digitales asociados al objeto, de tal manera que se agrupe toda la información significativa sobre un objeto o una colección de los mismos.

En el ámbito de la Paleontología existen muchos repositorios *online* en un entorno web gratuito con el objetivo de promover el acceso a las colecciones y albergar los múltiples materiales de fósiles 3D que se generan en la investigación; así por ejemplo nace “MorphoSource” (<http://www.morphosource.org/>) de la Universidad de Duke (USA); otras bases de datos, también están dirigidas a alumnos y profesores universitarios y no universitarios, y al público en general, además de los investigadores. Es el caso de la denominada “GB/3D Type Fossils Online database” (<http://www.3d-fossils.ac.uk/>), donde el material está disponible bajo una licencia no comercial Creative Commons; “UMORF 3D Interface” un repositorio de fósiles en 3D de la Universidad de Michigan cuyo objetivo era ofrecer un sistema que fuera útil para los investigadores, pero que también fuera adecuado para los alumnos de 12 años y para cualquier persona con interés en los fósiles; para ello crearon el visor “UMORF”, una aplicación JavaScript que permite visualizar los modelos 3D en un navegador estándar que soporte WebGL, como las versiones recientes de Google Chrome, Mozilla Firefox y Microsoft Internet Explorer e incluso en dispositivos móviles Android. También existen bases de datos con vocación para la educación, como la creada por Benton (2014) para geociencia.

4. Materiales y métodos

La metodología seguida para la creación de modelos y réplicas de fósiles en 3D con tecnologías de bajo coste para la enseñanza y divulgación en Paleontología se expone a continuación.

4.1. Selección de los fósiles

Para este estudio hemos seleccionado un total de 18 fósiles marinos característicos de Canarias de

la colección de prácticas del Área de Paleontología del Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología de la Sección de Biología de la Universidad de la Laguna.

4.2. Tecnologías empleadas

Las técnicas usadas en este trabajo han sido elegidas por su bajo coste y su facilidad de uso, pero que permiten realizar productos de calidad para su uso en la enseñanza y divulgación de la ciencia paleontológica. Para la digitalización de los fósiles se ha aplicado el escáner láser Makerbot Digitizer (Figura 5A) porque parece más adecuado al tamaño y forma de los fósiles marinos seleccionados, en comparación con otros métodos de bajo coste basados en restitución fotográfica. Este escáner permite obtener archivos tridimensionales digitales de objetos de un diámetro máximo de 20 cm y de una altura máxima de 20,3 cm y mínimo de 2 cm. Dispone de un plato giratorio que permite obtener un fichero 3D digital en aproximadamente 10 minutos y con precisiones de 0,5 cm. El uso de este dispositivo está pensado para personas sin experiencia, por lo que el proceso es prácticamente automático y genera directamente los ficheros STL que podrán ser utilizados en otras aplicaciones.

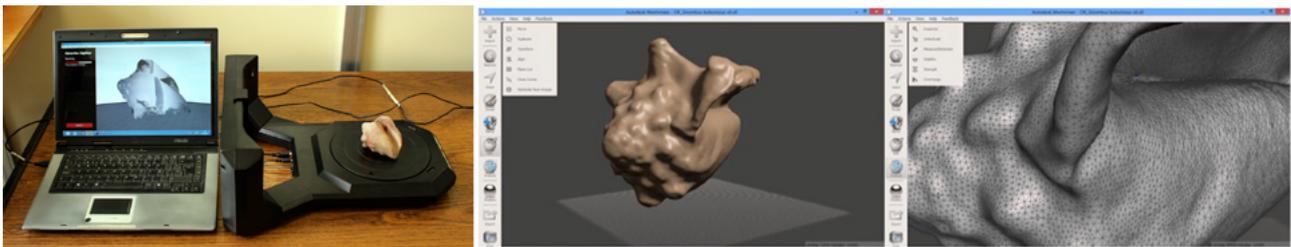


Figura 5. Proceso de creación del modelo 3d del fósil zonador del Cuaternario *Strombus bubonius* con tecnología de bajo coste. A. Escáner Makerbot Digitizer. B. Edición en el programa gratuito Meshmixer del modelo 3D escaneado. C. Detalle de la maya 3D.

Una vez finalizado el escaneado de los fósiles, los ficheros digitales se han tratado con el editor de mallas tridimensionales Meshmixer (Figura 5B y C). Esta aplicación es una herramienta para mezclar, esculpir, pintar, limpiar y reparar grandes mallas 3D, se ha usado para corregir pequeños errores, así como eliminar los accesorios utilizados para situar el fósil (palillos, plastilina, etc.) en el plato de escaneo. El objetivo de este programa gratuito es facilitar el proceso de edición de un modelo 3D a personas no profesionales del modelado 3D, es un medio simplificado para editar modelos tridimensionales (Schmidt & Ratto, 2013).

Estos modelos se han incorporado a un repositorio *online* consistente en la creación de una base de datos en la nube con Google Drive, metodología que tiene la ventaja de que no depende de páginas web, y simplifica el proceso de creación del repositorio. También permite asociar a los modelos 3D otros materiales educativos complementarios como pueden ser ejercicios, libros multimedia, etc. La ventaja que tiene este sistema de reposición con respecto a otros es su gran accesibilidad, facilidad de divulgación y bajo coste. Una vez que accedemos a la información *online*, para visualizar el modelo 3D obtenido de cada pieza fósil, podemos utilizar alguno de los visualizadores gratuitos disponibles

para tabletas digitales y también *smatphones* u ordenadores. Dichos visualizadores nos permiten manipular el objeto para verlo desde todos sus ángulos, así como realizar zoom del mismo para centrarnos en algún detalle concreto. En la figura 6 se puede ver un ejemplo utilizando la aplicación MeshLab o Graphite.



Figura 6: Manipulación de los modelos 3D digitales creados en este trabajo en tableta digital y Smartphone utilizando el visualizador 3D gratuito Meshlab.

Además de visualizar y manipular en la pantalla los modelos 3D, una vez que disponemos de los ficheros STL de los fósiles, podemos realizar una réplica física de los mismos en una impresora 3D. Para ello se ha generado el fichero G-code (.x3g) con el programa gratuito MakerWare, que incorpora todas las opciones necesarias para visualizar, rotar, escalar y mover los diseños que pueden ser utilizados en las impresoras de la empresa MakerBot, entre ellas la Replicator 2 utilizadas en este trabajo. MakerBot Replicator 2 tiene un coste aproximado de 1.500 euros e imprime modelos con medidas de hasta 240 x 140 x 150 mm. La impresora trabaja con PLA (ácido poliláctico), un termoplástico biodegradable, ligero y fácil de utilizar para impresión 3D. Se dispone de diferentes colores de PLA, así como de filamentos que incorporan diferentes materiales como puede ser madera. Dichos filamentos permiten un acabado diferente sin tanto aspecto plástico, que se ajusta muy bien a las réplicas de los fósiles marinos de este trabajo.

5. Recursos educativos digitales realizados

5.1. Colección *online* de los modelos 3D

La colección de modelos 3D de los fósiles trabajados en este artículo está disponible en un entorno virtual en la siguiente dirección web: <https://goo.gl/ulC5zj>. Se trata de una carpeta *online* (Google

Drive) creada a partir de una dirección Gmail (Figura 7). Permite a cualquier persona que disponga del enlace descargar la selección de fósiles y visualizarlo en dispositivos táctiles u ordenadores e imprimir unas réplicas en 3D.

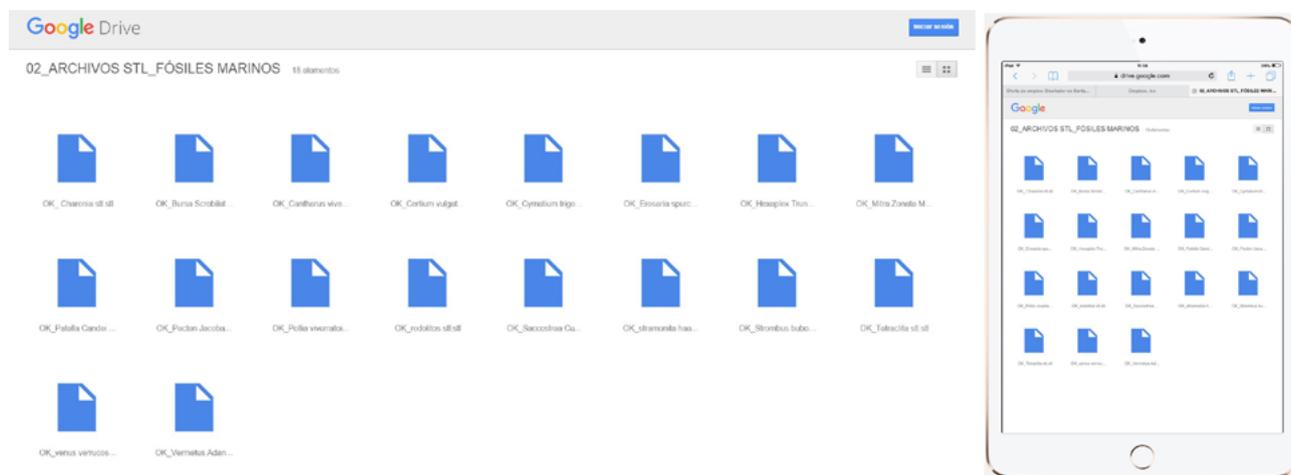


Figura 7. Repositorio online: <https://goo.gl/ulC5zj>

5.2. Creación de réplicas en una impresora 3D

Las réplicas del patrimonio fósil marino fueron creadas con un filamento de impresión, PLA Wood fill, contiene polvo de madera y da un aspecto muy parecido al color de los fósiles. A través del escaneo y la impresión 3D se pierden algunos detalles de las reproducciones, pero esta información se completa mediante las fotografías. Para la presentación y divulgación se ha creado una réplica de cada fósil y se han situado en una caja, normalmente usadas en la enseñanza, junto con fotografías y el nombre completo (Figura 8). Todos los fósiles sirven para su manipulación y comprensión, con la ventaja de que su composición es plástica, por lo que no se rompen si se caen al suelo y son fácilmente reemplazables. En la misma caja se incluye un código QR que lleva a la carpeta *online* con los archivos de los fósiles, esto permite acceder de manera directa a los ficheros a través de un dispositivo móvil.

Con objeto de que este trabajo pueda ser útil a centros de enseñanza y particulares que quieran conseguir colecciones tangibles de fósiles, se ha estimado el coste de realización de la réplica de una concha del fósil *Strombus bubonius* en la impresora MakerBot Replicator 2. Si no se dispone de una impresora 3D existe la alternativa de utilizar servicios de impresión externos *online* o locales. El precio de la reproducción de los modelos 3D en estos servicios varía según el número y tamaño de los fósiles y los materiales de impresión utilizados.

El modelo 3D del fósil *Strombus bubonius*, que tiene unas dimensiones de 94 mm x 74 mm x 72 mm, tarda alrededor de tres horas en la impresora MakerBot Replicator 2 para crear una réplica de tamaño real. El coste del material empleado (39,47 gramos de PLA) en la impresora propia sería alrededor

de 1,8 euros. Normalmente el precio de las réplicas cuando se utiliza una impresora 3D depende principalmente del material y del volumen. Por ello es importante tener en cuenta que el resultado económico final variará mucho dependiendo de los tamaños de las réplicas que queramos hacer, independiente del tamaño del fósil original.

Para crear las 18 réplicas de la caja que se muestra en este artículo (figura 8) se necesitan aproximadamente 20 horas de impresión. En total se gastan unos 340 gramos de filamento, que cuesta unos 6,80 euros de PLA normal y 22,60 euros en filamento Wood fill.

Si no se dispone de una impresora propia también se puede usar un servicio de impresión *online* o externos, como por ejemplo Shapeways, Sculpteo o i.materialise. Existen multitud de materiales disponibles en cada una de las plataformas. El precio de impresión varía mucho dependiendo del material, la cantidad, el tamaño y los costes de envío. El precio de impresión en estos servicios varía entre 4 y 50 Euros por cada fósil del tamaño señalado (Saorín Pérez, Meier, De la Torre-Cantero, Melián Díaz, & Drago-Díaz Alemán, 2015).



Figura 8. Caja de estudio con las réplicas de los fósiles hechas en la impresora 3D.

5.3. Opinión de los alumnos sobre los materiales tridimensionales creados

El conjunto de preguntas de nuestro trabajo persigue captar la opinión que tienen los 70 alumnos universitarios de primer curso sobre el repositorio *online* con los modelos 3D creados, su uso potencial, y si lo ven como un complemento para su aprendizaje y formación. Los valores medios de las declaraciones planteadas (Tabla 2) superan el 4 en todos los ítems, con un rango entre 4,20

(puntuación mínima) y 4,51 (puntuación máxima). El promedio de alumnos encuestados que disponen de un *smartphone* con conexión a Internet es del 90%, mientras que el 45,71% tienen tableta digital. Un 59% de los alumnos pudieron acceder, sin ayuda, al repositorio *online* con su dispositivo electrónico (teléfono o tableta).

Cuestión	Media(Desv. Típica)
El aprendizaje con medios digitales interactivos es un buen complemento junto a los materiales tradicionales.	4,51 (0,75)
Los modelos 3D de patrimonio fósil, visualizados en un dispositivo móvil son un buen complemento para la formación	4,20 (0,73)
Disponer de modelos 3D interactivos en mi <i>Smartphone</i> o tableta me permite mejorar / profundizar mi aprendizaje en casa.	4,29 (0,78)
Me parece útil poder disponer de un repositorio <i>online</i> de los fósiles descargables.	4,21 (0,75)
	Total: N=70

Tabla 2. Opinión de los alumnos sobre el material creado.

6. Conclusiones

Es posible crear objetos tridimensionales digitales a partir de objetos reales, utilizando tecnologías accesibles, gratuitas o de bajo coste. Con estas tecnologías, cualquier profesor con un mínimo de formación puede digitalizar su material docente tridimensional.

Por otro lado, una vez creados los modelos 3D digitales, se pueden poner a disposición de los usuarios mediante repositorios *online*, sin necesidad de conocimientos expertos, tanto utilizando discos duros virtuales personales, como utilizando plataformas webs gratuitas. De esta manera, los profesores pueden incluir en sus entornos virtuales de aprendizaje enlaces a colecciones de objetos tridimensionales digitales.

Dicho material digital es, por lo tanto, accesible desde dispositivos móviles multitáctiles posibilitando su visualización, manipulación de una manera ubicua y gratuita. Por otro lado, se pueden conseguir réplicas físicas de los objetos 3D mediante impresión 3D de bajo coste. De esta manera se soluciona la problemática de acceso de ciertos objetos tangibles.

De los cuestionarios realizados a lo largo de este trabajo se concluye que:

-
- Los alumnos consideran un recurso útil el disponer de un repositorio *online* con todos los fósiles en 3D (4,21 sobre 5).
 - El aprendizaje con medios digitales interactivos es considerado un buen complemento por los alumnos (4,51 sobre 5).
 - Los alumnos consideran el material tridimensional un buen complemento para su formación y aprendizaje. También piensan que disponer del patrimonio fósil en su Smartphone puede mejorar su aprendizaje y les permite profundizar en casa (4,29 sobre 5).

Como futuro trabajo se planea realizar un estudio experimental con grupos diferenciados y testear la validez de los modelos impresos en 3D en comparación con los fósiles reales.

Posteriormente se pretende realizar un libro multimedia interactivo que incluya todos los modelos tridimensionales escaneados, así como fotografías, videos, texto y ejercicios para generar un único objeto de aprendizaje digital que facilite el acceso de los estudiantes a todo el material.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de innovación educativa "Creación de Objetos de Aprendizaje Tridimensionales para la Docencia del Registro Fósil, del área de Paleontología de la ULL".

8. Referencias

Andrade Lotero, L., Espitia Gómez, C., Huertas Franco, E., Aldana Ahumada, D., & Bacca Pachón, P. (2012). Tocar o Mirar: Comparación de Procesos Cognitivos en el Aprendizaje con o sin Manipulación Física. *Psicología Educativa*, 29-40.

Andrade Lotero, L., Cobo Charry, M., Díaz Díaz, L., Flórez Pineda, A., Garavito Muñoz, C., González Doblado, D., ... Villarraga Acero, G. (2011). Manipulables físicos para la formación de conceptos artificiales en niños de 6 a 8 años de edad. *Itinerario Educativo*, 57, 157-183.

Arribas, A. B. (2004). Nuevos registros paleontológicos de grandes mamíferos en la Cuenca de Guadix-Baza (Granada), aportaciones del proyecto Fonelas al conocimiento sobre las Faunas continentales del Plioceno-Pleistoceno europeo. *Boletín Geológico y Minero*, 567-582.

Baeza, E., Gutiérrez-Marco, J. C., & Rábano, I. (2013). Obtención de grandes réplicas de elementos singulares del patrimonio geológico del Parque Nacional de Cabañeros (Castilla-La Mancha).

Patrimonio geológico, un recurso para el desarrollo. Cuadernos del Museo Geominero, 15, 573-582.

Bamford, A. (2011). *The 3D in education white paper.*

Bates, K. T., Falkingham, P. L., Hodgetts, D., Farlow, J. O., Breithaupt, B. H., O'Brien, M., Neffra Matthews, N.; Sellers, W. I. & Manning, P. L. (2009). Digital imaging and public engagement in palaeontology. *Geology Today, 25(4)*, 134-139. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2451.2009.00714.x>

Benton, J. (2014). The "magic" al growth of an online gigapan repository for geoscience education. In 2014 GSA Annual Meeting in Vancouver, British Columbia.

Buscalioni, Á. D. (2007). *Rutas por museos y colecciones de paleontología: Navarra, Cataluña y Comunidad Valenciana* (Vol. 4). IGME.

Canessa, E., Fonda, C., & Zennaro, M. (2013). *Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development*. Trieste, Italy: ICTP.

Cayla, N. (2014). An Overview of New Technologies Applied to the Management of Geoheritage. *Geoheritage, 6(2)*, 91-102. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12371-014-0113-0>

Coates, C., Hager, P., Johnson, W., & Stevens, N. (2009, April). Employing rapid prototyping in a first-year engineering graphics course. In *Proceedings of 2009 ASEE southeast section conference*. Marietta, USA.

Converse Jr., H. H. (1984). *Handbook of paleo-preparation techniques.*

Cruzado-Caballero, P., Fortuny, J., Llácer, S., & Canudo, J. I. (2015). Paleoneuroanatomy of the European lambeosaurine dinosaur *Arenysaurus ardevoli*. *PeerJ, 3*, e802. doi: <http://dx.doi.org/10.7717/peerj.802>

Dalgarno, B., & Lee, M. (2010). What are the learning affordances of 3-D virtual environments? *British Journal of Educational Tecnology, 41*, 10-32. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8535.2009.01038.x>

Dardon, U., de Souza, R. S., Abranches, C. T. S., & Bergqvist, L. P. (2010). Modelagem 3D e suas aplicações na pesquisa paleontológica. *Gaea-Journal of Geoscience, 6(2)*, 76-89. doi: <http://dx.doi.org/10.4013/gaea.2010.62.04>

de la Torre Cantero, J., Martín-Dorta, N., Saorín, J. L., Carbonell, C., & Contero, M. (2013). Entorno de aprendizaje ubicuo con realidad aumentada y tabletas para estimular la comprensión del espacio tridimensional. *RED. Revista de Educación a Distancia(37)*.

de la Torre Cantero, J., Saorín, J., Martín, N., & Contero, M. (2012). Digital Tangible Interfaces as an alternative to Physical Models for use in a Virtual Learning Environment in Engineering. *Proceeding of International Conference on Engineering Education 2012*. Turku, Finland.

Eldredge, N., & Gould, S. J. (1991). *Fossils: the evolution and extinction of species* (pp. 4-30). Aurum Press.

Falkingham, P. L. (2012). Acquisition of high resolution three-dimensional models using free, open-source, photogrammetric software. *Palaeontologia Electronica*, 15(1), 15.

Friess, M. (2012). Scratching the Surface? The use of surface scanning in physical and paleoanthropology. *Journal of Anthropological Sciences*, 1-26.

Gómez-Alba, J. (1988). *Guía de Campo de los Fósiles de España y de Europa*. Omega.

Gonizzi Barsanti, S., Remondino, F., & Visintini, D. (2012). Photogrammetry and Laser Scanning for Archaeological Site 3D Modeling - Some Critical Issues. *Proceedings of the 2nd Workshop on The New Technologies for Aquileia*.

González-Delgado, J., Martínez-Graña, A., Civis, J., Sierro, F., Goy, J., Dabrio, C., ... Abad, M. (2015). Virtual 3D tour of the Neogene palaeontological heritage of Huelva (Guadalquivir Basin, Spain). *Environ Earth Sci*, 73, 4609-4618. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3747-y>

Gorbea, M. J. (1988). La utilidad de sustitutos y reproducciones en los Museos. *Boletín de la Anabad*, 177-186.

Leakey, L., & Dzambazova, T. (2013). Prehistoric Collections and 3D Printing for Education. In: Low-cost 3d printing for Science, Education and Sustainable Development.

Lerma, J., Cabrelles, M., & Seguí, A. (2011). Aplicación de la fotogrametría terrestre al levantamiento de alzados de edificios singulares. *Revista ph-Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 127-129.

Lukeneder, A. (2012). Computed 3D visualisation of an extinct cephalopod using computer tomographs. *Computers & Geosciences*, 45, 68-74. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.04.003>

Lukeneder, S. & Lukeneder, A. (2011). Methods in 3D Modelling of Triassic Ammonites from Turkey (Taurus, FWF P22109-B17). *Proceedings IAMG 2011 Salzburg* (2011), pp. 496-505

Mallison, H. (2011). Digitizing methods for palaeontology: applications, benefits and limitations. In *Computational paleontology* (pp. 7-43). Springer Berlin Heidelberg. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-16271-8_2

Meléndez, M. N. (1983). *El Cretácico de la región de Cañete-Rincón de Ademuz (provincias de Cuenca y Valencia)*. Departamento de Estratigrafía y Geología Histórica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense.

Pomaska, G. (2013). Monitoring the deterioration of stone at Mindener Museum's Lapidarium. *XXIV International CIPA Symposium SR3* (págs. XL-5/W2). doi: <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-5-w2-495-2013>

Piaget, J. (1991). *Seis estudios de psicología*. Barcelona: Labor S.A.

Prieur, A. (2004). Le moulage, une technique au service de la protection du patrimoine. *Workshop de l'UNESCO à Dhaka*, (pp. 19-27). Bangladesh.

Rahman, I., Adcock, K., & Garwood, R. (2012). Virtual Fossils: a New Resource for Science Communication. *Evo Edu Outreach*, 635-641. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12052-012-0458-2>

Reynolds, D. (2010). *School effectiveness*. A&C Black.

Roubach, S., Gomez de Soler, B., Campeny, G. V. and Morales, J. I., 2014. Preparation of a turtle fossil from the Pliocene site of Camp dels Ninots (Caldes de Malavella, Girona, Spain). *Journal of Paleontological Techniques*, 13, 38-49.

Royo Torres, R., Mampel, L., & Alcalá, L. (2013). Icnitas de dinosaurios del yacimiento San Cristóbal 3 de la Formación Camarillas en Galve (Teruel, España). *Geogaceta*, 5-8.

Saorín Pérez, J., Meier, C., De la Torre-Cantero, J., Melián Díaz, D., & Drago-Díaz Alemán, M. (2015). Creación de réplicas de patrimonio escultórico mediante reconstrucción 3D e impresoras 3D de bajo coste para uso en entornos educativos. *Arte, Individuo y Sociedad*, 427-444.

Schmidt, R., & Ratto, M. (2013). Design Tools for the Rest of Us: Maker Hardware Requires Maker Software. *Conference Proceedings: FAB at CHI Workshop*.

Sutton, M., Rahman, I., & Garwood, R. (2013). *Techniques for virtual palaeontology*. Oxford: John Wiley & Sons. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118591192>

Teshima, Y., Matsuoka, A., Fujiyoshi, M., Ikegami, Y., Kaneko, T., Oouchi, S., & Yamazawa, K. (2010). Enlarged skeleton models of plankton for tactile teaching. In *Computers Helping People with Special Needs* (pp. 523-526). Springer Berlin Heidelberg. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14100-3_78

Troxler, P., & Wolf, P. (2010). Bending the Rules. The Fab Lab Innovation Ecology. *11 International CInet Conference*. Zurich: Switzerland.

Uttal, D. H. (2003). On the relation between play and symbolic thought: The case of mathematics manipulatives. En D. H. Uttal, *Contemporary perspectives in early childhood* (pp. 97-114). USA: Information Age Publishing.

Warburton, S. (2009). Second Life in higher education: Assessing the potential for and the barriers to deploying virtual worlds in learning and teaching. *British Journal of Educational Technology*, 40, 414-426. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8535.2009.00952.x>

Winkelbach, S., Molkenstruck, S. & Wahl, F. M. (2006). Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach. - Proceedings of the DAGM, ser. LNCS, 4174: 718-728. doi: http://dx.doi.org/10.1007/11861898_72

Yi-Chen, C., Hung-Lin, C., & Wei-Han, H. &.-C. (2011). Use of Tangible and Augmented Reality Models in Engineering Graphics Courses. *Journal of Professional Issues in Engineering Education & Practice*, 137(4), 267-276. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000078](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000078)

Zapata-Ros, M. (2012). Calidad y entornos ubicuos de aprendizaje. *RED, Revista de Educación a Distancia*, 31.