

## EJECUCIÓN DE ESCULTURAS MEDIANTE PETRIFICACIÓN, USANDO MOLDES IMPRESOS EN 3D COMO RECEPTORES DE AGUAS CARBONATADAS

Cecile Meier,  
Universidad de La Laguna, departamento de Bellas Artes; cemeier@ull.edu.es<sup>1</sup>  
Francisco Viña,  
Universidad de La Laguna, departamento de Bellas Artes; franvi@ull.edu.es<sup>2</sup>  
Maria Isabel Sanchez Bonilla,  
Universidad de La Laguna, departamento de Bellas Artes; sbonilla@ull.edu.es<sup>3</sup>

### RESUMEN

Los depósitos líticos carbonatados, asociados a la extracción/ conducción/ suministro de aguas subterráneas se acumulan en tuberías colmatadas y toneladas de fragmentos pétreos que se depositan en las canalizaciones deben ser retirados continuamente, sin que hasta ahora se les haya dado utilidad. Esta investigación trabaja con la posibilidad de aprovechar las deposiciones pétreas para crear esculturas por moldeo dentro de las tuberías. Se trata de introducir moldes de diversos materiales y funcionamientos en las canalizaciones y dejar que las aguas carbonatadas fluyan durante meses por las piezas. De esta manera se rellenan los huecos de los moldes creando las esculturas. Los moldes que se pueden petrificar en aguas carbonatadas de fuentes naturales pueden ser de diversos materiales. Sin embargo en este trabajo en concreto se describe el uso de moldes impresos en 3D mediante el material PLA. Dichos moldes se pueden generar mediante diferentes técnicas como el escaneo 3D o el modelado mediante programas digitales. Además pueden ser de diferentes tipos, tanto moldes cerrados de una sola pieza, cerrado pero de varias piezas para facilitar su desmoldeo o para reproducción múltiple, así como abiertos.

**PALABRAS CLAVE:** Escultura - moldes 3D – impresión 3D - deposiciones pétreas - canalizaciones

### ABSTRACT

The lithic carbonate deposits associated with the extraction / conduction / supply of groundwater accumulate in clogged pipes and tons of stone fragments that are deposited in the pipes must be removed continuously, but so far they have not been useful. This research is working on the possibility of using stone deposits to create sculptures by moulding inside the pipes. The idea is to introduce moulds of various materials and functions into the pipes and let the carbonated water flow for months through the pieces. In this way, the holes in the moulds are filled, creating the sculptures. The moulds that can be petrified in carbonated water from natural sources can be of different materials. However, in this specific work, the use of 3D printed moulds using the PLA material is described. These moulds can be generated using different techniques such as 3D scanning or modeling using digital programs. In addition they can be of different types, both closed moulds of a single piece, closed but of several pieces to facilitate their demoulding or for multiple reproduction, as well as open moulds.

**KEYWORDS:** Sculpture - 3D moulds - 3D printing - stone deposits - pipelines

---

1 Cecile Meier. Profesora Ayudante Doctor del Departamento de Bellas Artes y miembro del FabLab ULL, Facultad de Bellas Artes, Universidad de La Laguna.

2 Francisco Viña Rodríguez. Profesor Titular de Escultura del Departamento de Bellas Artes y Miembro del Grupo de Investigación Arte y Entorno. Creación, conservación, comunicación. Universidad de La Laguna.

3 Maria Isabel Sanchez Bonilla. Catedrática de Escultura del Departamento de Bellas Artes y miembro (Coordinadora) del Grupo de Investigación Arte y Entorno. Creación, conservación, comunicación. Universidad de La Laguna.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Aguas carbonatadas

Desde hace unos seis años, en el seno del Grupo de Investigación *Arte y Entorno. Creación, conservación, comunicación* de la Universidad de La Laguna, venimos analizando y experimentando con las rocas carbonatadas depositadas por el agua de las galerías<sup>4</sup>. En un primer momento se usaron estas “piedras del agua” únicamente para obras talladas; con el tiempo, al entender mejor el origen y los procesos de depósito, se pusieron en marcha estudios conducentes a analizar las posibilidades que podían ofrecer estas rocas, provenientes de aguas altamente mineralizadas, tanto en labra como en procesos de petrificación sobre fibras o deposición sobre moldes. Hito significativo en este sentido fue el Trabajo Fin de Master realizado en 2015 por Francisco Bernardo Cordeiro *Aplicación del Proceso de petrificación calcárea al diseño de souvenir*<sup>5</sup>, cuya dirección en lo relativo a diseño de souvenir correspondió al profesor de Diseño Alfredo Rivero, en tanto que el asesoramiento sobre materiales y procesos de petrificación lo tuteló la profesora de Escultura M<sup>a</sup> Isabel Sánchez; dicho trabajo nos dio el conocimiento sistemático de evolución de la petrificación sobre diversos soportes, que se sumergieron durante 21 días en la canalización que recoge las aguas de las galerías “Tierra del Trigo”<sup>6</sup> y “El Cubo”<sup>7</sup>, ambas pertenecientes a la misma comunidad de propietarios, ubicadas en el municipio de Los Silos, en la zona nor-oeste de Tenerife; animados por los resultados de petrificación, evidentes ya en algunas fibras al cabo de una semana y en todos los elementos al cabo de las tres semanas de seguimiento, se llevó a cabo una primera experiencia de petrificación sobre molde realizado con impresora 3D. El molde quedó suspendido sobre la corriente y, mediante tubería, se hizo pasar el agua a través del mismo durante algo más de tres meses, para propiciar la petrificación interior. Con el método descrito fue posible obtener una pequeña obra –objeto souvenir- que, a pesar de las dificultades (grueso irregular de la pared calcárea, acumulación de arena en la parte baja, etc.) demostró fehacientemente la posibilidad de obtener obras mediante dicho método (Fig. 1 y 2).

---

<sup>4</sup> En Canarias, al no disponerse de sugerencias naturales de agua suficientes para cubrir las necesidades, desde hace más de un siglo se vienen perforando “galerías” (minas casi horizontales) y pozos, como medio para acceder a las aguas subterráneas. En el caso de Tenerife, aproximadamente el 85% de las necesidades hídricas se cubren con aguas subterráneas obtenidas principalmente mediante galerías.

<sup>5</sup> Se encuentra accesible en:

[https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/7160/TFM\\_FRANC\\_CORDEIRO\\_MIDST\\_.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/7160/TFM_FRANC_CORDEIRO_MIDST_.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

<sup>6</sup> Datos básicos de ubicación y química del agua. Galería Tierra del Trigo: ubicación: X – 323168, Y - 3137106, Z – 575; Caudal (2017)= 16,7 L/sg. Analítica (6/2/2018): Conductividad =1.410(μS/cm), PH = 8,2; Carbonato no consta; Bicarbonato = 754,08 (mg/L), Cloruro = 52,8 (mg/L), Sodio =147,89(mg/L), Nitrito = 13,64(mg/L), Fluor = 0,21(mg/L). [Datos ofrecidos por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife <https://ciatf.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8d42d177780043e89d9824cee2166995>, fecha de la consulta 16 de septiembre de 2019].

<sup>7</sup> Datos básicos de ubicación y química del agua. Galería El Cubo: ubicación: X – 323974, Y - 3136445, Z – - 810; Caudal (2015)= 25,7 L/sg. Analítica (6/2/2018): Conductividad =1.620(μS/cm), PH = 8,5; Carbonato no consta; Bicarbonato = 888,31 (mg/L), Cloruro = 37,23 (mg/L), Sodio =281,29 (mg/L), Nitrito = 8,68 (mg/L), Fluor = 0,53 (mg/L). [Datos ofrecidos por el CIATF: enlace y fechas citados con anterioridad]



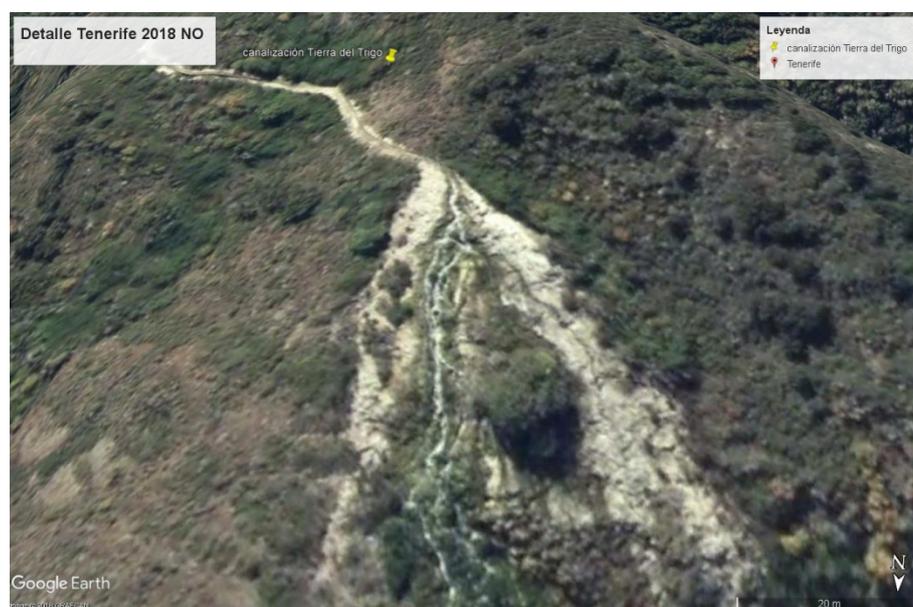
Figura 1 y 2: Molde 3D realizado por Franc Cordeiro. Tras pasar por su interior, durante tres meses y 15 días, el agua del canal ubicado en Tierra del Trigo, se formó una petrificación lo suficientemente fuerte como para permitir extraer el objeto-souvenir mediante eliminación mecánica del molde.



3



4



5



6



7

Figs. 3 a 5: Comparativa entre las imágenes de 2008 y 2018 que ofrece Google Eart respecto de canal ubicado en Tierra del Trigo-Los Silos-Tenerife. Resulta muy evidente la evolución de la petrificación carbonática en la ladera de la montaña. El agua se recoge abajo para uso en riego de plataneras, cultivo muy sensible a la alta conductividad. Figs. 6 y 7. Detalles tomados en la mencionada ubicación. Fotografías: Archivo G.I. Arte y Entorno.

En aquellos años -2015 a 2017- no se disponía de la posibilidad de actuar en el interior de las instalaciones de ninguna Comunidad de Aguas, por lo que, experiencias posteriores en las que se instalaron moldes en lugares de acceso libre de diversas canalizaciones, aunque permitieron ver una buena evolución inicial en las petrificaciones, resultaron finalmente infructuosas debido a robos o destrozos de los elementos antes de que concluyesen los procesos de petrificación. Esta dificultad ya se ha solventado mediante la colaboración con la Comunidad de Propietarios de la Galería El Rebosadero<sup>8</sup>.



Fig.8: Canal de mampostería (Galería el Rebosadero-Arico-Tenerife). Fig. 9: Detalle de petrificaciones formadas en la zona interna de una tapa del canal. Figura 10: Escombrera acumulada junto al canal. Fig. 11: Detalle de residuos líticos de la escombrera.

La galería El Rebosadero, donde estamos ya instalando cubetas para colocación de moldes, en la zona exterior de la bocamina, en un espacio de acceso controlado, es una de las obras de captación de aguas subterráneas más idóneas para nuestros propósitos, por diversos motivos:

<sup>8</sup> Datos básicos de ubicación y química del agua. Galería El Rebosadero: ubicación: X- 353309, Y - 3121214, Z - 820; Caudal (2016)= 19,82 L/sg. Analítica (20/2/2018): Conductividad =1.880( $\mu$ S/cm), PH = 8,3; Carbonato = 5,7; Bicarbonato = 1.284,7 (mg/L), Cloruro =12,8 (mg/L), Sodio =239 (mg/L), Nitrato = 8,2 (mg/L), Fluor = 0,38 (mg/L). [Datos ofrecidos por el CIATF: enlace y fechas citados con anterioridad].

- Disponemos de datos sobre evolución del agua, tomados de la base de datos del CIATF en sucesivas consultas, que nos muestran evolución progresiva de la mineralización entre 24.02.2016 y 20.02.2018: la conductividad aumenta 110( $\mu$ S/cm), el PH pasa de 8,1 a 8,3; el bicarbonato aumenta 40,9 (mg/L), el cloruro aumenta 0,4 (mg/L), el sodio aumenta 26 (mg/L), nitrato y fluor se mantienen en el mismo nivel.
- Hemos tenido acceso además un informe realizado en 2014 por el laboratorio de Canarias Explosivos, que compara la química del agua en la bocamina (carbonato: 0, bicarbonato: 1,82, sodio: 10,01, Potasio: 1,11, Magnesio: 8,35), en una tanquilla ubicada a aproximadamente un Km. de la misma (carbonato: 0,50, bicarbonato: 0,81, sodio: 10,04, Potasio: 1,10, Magnesio: 8,37) y en el punto de entrega al canal intermedio, ubicado a unos 2 km. de la bocamina (carbonato: 0,65, bicarbonato: 0,54, sodio: 10,03, Potasio: 1,10, Magnesio: 8,39). En dicho informe se especifica que, en base a estos datos, el depósito de líticos debe ser de unas 44 Tm/año entre bocamina y entrega, es decir, unos 20 kg. por metro lineal y año.
- Sabemos que la temperatura del agua en esta galería es prácticamente constante: 31°C en bocamina. Posiblemente esta temperatura relativamente alta es una de las razones por las que la piedra formada en sus canalizaciones resulta de mayor compacidad y por tanto adecuada a nuestros propósitos de obtener petrificaciones que permitan pulimento superficial.
- Dispone de acceso para vehículos tipo turismo hasta la bocamina/zona en que nos facilitan las instalaciones para petrificación.

Tenemos así, tras el acuerdo con el Rebosadero, la posibilidad real de trabajar en un espacio exterior de acceso controlado, en el que nos ceden voluntariamente el uso de la corriente de agua necesaria, que devolveremos al canal tras pasar por los moldes/cubetas de petrificación. Es el momento, por tanto de un desarrollo sistemático de moldes de diversa tipología, que nos permitirán estudios comparativos de idoneidad. Para ello, se ha llevado a cabo un ingente trabajo de diseño, captación mediante escáner, transformaciones creativas, e impresión 3D, en el que se hacen aportaciones significativas, que se describirán en el epígrafe siguiente.

Por otro lado, para propiciar la mejora de las aguas de consumo, se están implementando en Tenerife procesos de desmineralización sistemática, en los que se ha optado mayoritariamente por las técnicas de ósmosis inversa, destacando por su capacidad de tratamientos las EDAS de La Guancha, de Icod y de Aripe-Guía de Isora, con fases de producción sucesivas. A modo de ejemplo anotar que se han previsto que la EDAS de Aripe, en la cuarta fases, el tratamiento de 11.400 m<sup>3</sup> al día, lo que supone una producción de 1.710 m<sup>3</sup> de salmuera<sup>9</sup> diarios, es decir 624,150 m<sup>3</sup> al año de un líquido-desecho que tiene la siguiente composición química: Ca 359; Mg 567; K 435; Na 1820; CO<sub>3</sub> 0,0; HCO<sub>3</sub> 7246; SO<sub>4</sub> 1575; Cl 223; NO<sub>3</sub> 19,2; PO<sub>4</sub> 8,5; Al 0,02; F 24,6 (datos facilitados por el Consejo Insular de Aguas, analítica realizada en 2018). Lógicamente esta salmuera debe ofrecer resultados pretificadores muy altos. Aunque todavía no se han realizado trabajos experimentales in situ, ya tenemos establecido el contacto y solicitada financiación para un proyecto multidisciplinar que incluye el estudio y experimentación con salmueras. Entre los moldes que se están preparando hay una batería dedicada a experimentar con la salmuera como materia prima de petrificación.

Es un propósito que se plantea además en el lugar y momento adecuados. La existencia de aguas petrificantes puede constarse en muchos lugares del planeta y en todas las islas del Archipiélago Canario<sup>10</sup>, pero Tenerife es sin lugar a dudas el entorno que se encuentra en el momento evolutivo más adecuado para un proyecto de este tipo.

---

<sup>9</sup> Durante el proceso de ósmosis inversa se concentran los minerales en un 15% aproximadamente del agua tratada, a este residuo le llamamos salmuera de rechazo

<sup>10</sup> En cada isla con diversa incidencia: en Fuerteventura y Lanzarote, la extracción de aguas subterráneas es ya residual (se surten básicamente de agua de mar desalada). En Gran Canaria siguen activas galerías, algunas de ellas con altas petrificaciones, cuyas aguas se usan principalmente para cultivos y abastos de

Es el momento adecuado ya que, ante este panorama y evolución progresiva de la capacidad petrificadora de las aguas subterráneas alumbradas mediante galerías/minas, los dueños y gestores del agua vienen implementando diversas “mejoras”, algunas de tipo natural, como la de derriscar el agua por la montaña que se ha ilustrado en las Figs. 3 a 5, y otras “soluciones” que, aunque evidencian menos impacto ambiental, son a nuestro juicio menos respetuosas con la sostenibilidad y con la economía circular, como por ejemplo: el uso de polifosfatos para evitar las calcificaciones en las conducciones, que ha empezado a difundirse desde principios de 2019, tal vez sin saber muy bien los detalles y consecuencias. En nuestro grupo de investigación estamos convencidos de que los problemas de residuos no se deben “esconder bajo la alfombra” ni solucionar con medios poco naturales, en ese convencimiento, seguimos investigando para ofrecer procesos testados que permitan un beneficio económico y puedan competir ventajosamente así con esas otras alternativas. Planteamos usar como materia prima (para fabricación de cal) los residuos de menor calidad y compacidad y, estamos trabajando para poner a punto procesos de aprovechamiento, mediante moldes y madreformas, de los depósitos calcáreos de mayor solidez y calidad pétreo, aspecto en el que tiene especial relevancia el diseño 3D y la aplicación de moldes impresos que centra el resto de la aportación.

## 1.2. Nuevas tecnologías

En este trabajo se introducen las nuevas tecnologías, como el escaneo, modelado e impresión 3D para crear esculturas por moldeo mediante las deposiciones pétreas en las tuberías de la isla de Tenerife.

La tecnología de la impresión 3D se empezó a utilizar en los años setenta, pero uno de los grandes factores limitantes del uso de esta tecnología ha sido el precio. En el año 2000 una máquina de prototipado rápido tenía un precio que oscilaba entre 10.000 y 100.000 dólares por lo que sólo los grandes centros podían permitirse el lujo de tener una (Viki, y otros, 2014). Sin embargo, en el año 2005 se crea el proyecto RepRap con el objetivo de abaratar los costes asociados a la impresión 3D. Esta iniciativa dio lugar a la popularización de dichas máquinas, ya que los costes asociados a fabricar una de ellas eran del orden de los 1000 dólares. Uno de los fundadores del proyecto RepRap, Zach Smith, fundó en 2009 la empresa MakerBot cuyo objetivo era vender kits de impresoras 3D para que todo el mundo pudiera montarse su propia impresora por menos de 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 la mayoría de los centros universitarios disponer de una de ellas. Además ha permitido incorporar estas máquinas en diversos ámbitos como por ejemplo el de la escultura.

---

medianías, mientras que las zonas más cercanas a la costa, donde se ubican los principales núcleos turísticos, se abastecen con agua de mar desalada. La Palma es la única isla del archipiélago en la que el equilibrio hídrico se viene manteniendo y, por tanto, la mineralización de las aguas es en general estable, aunque en la zona sur, debido al volcanismo residual, están altamente bicarbonatadas. En El Hierro, el contenido en carbonatos y bicarbonatos es muy elevado en la mitad Oeste (volcanismo de la cabecera de El Golfo), con menor incidencia en el resto de la isla. En La Gomera las captaciones más frecuentes son los pozos, hay no obstante 5 galerías activas, cuatro de ellas avisan peligrosidad por “gases”, lo que alerta sobre posible saturación en CO<sub>2</sub> y por tanto posible capacidad petrificadora. Nuestro proyecto<sup>10</sup> se centra, por ahora, en Tenerife, donde hay perforadas más de mil galerías (unas 400 activas) y todavía se sigue perforando cuando bajan los caudales, lo que hace que a veces se llegue a acuíferos fósiles o zonas de volcanismo residual, de altísima mineralización. Un ejemplo extremo en este sentido ocurrió en la Galería Salto del Guanche, en Santiago del Teide, cuando hace aproximadamente 10 años se llegó a un nuevo acuífero que volvió el agua absolutamente inservible. Datos básicos de ubicación y química del agua. Galería Salto del Guanche: ubicación: X- 321824, Y- 3130169, Z-773; Caudal (2010)= 5,10 L/sg. Analítica (2010?): Conductividad =5.200(µS/cm), PH = 8,2; Carbonato = no consta; Bicarbonato = 3.589,2 (mg/L), Cloruro =108 (mg/L), Sodio =751 (mg/L), Nitrato = 1,2 (mg/L), Fluor = 0,5 (mg/L). [Datos ofrecidos por el CIATF: enlace y fechas citados con anterioridad].

El modelado 3D, hace algunos años, eran tecnologías reservadas para expertos en la materia y requerían un largo y costoso aprendizaje, además se precisaba un equipo técnico avanzado y el precio de los programas era muy elevado y sólo accesible para grandes centros, empresas o universidades (del Caño, de la Cruz, & Solano, 2007). Sin embargo en el año 2002 Blender fue de los primeros programas en distribuirse totalmente gratuito y accesible a todo el mundo (Roosendaal, 2019). Así mismo los ordenadores comunes ya tenían suficiente rendimiento para poder trabajar con programas 3D en ellos. En el año 2006 se hizo popular el programa Sketchup gracias a su distribución gratuita por la empresa Google (Bethany, 2019). Sketchup es un programa de libre acceso, multiplataforma (PC y Mac) y de descarga gratuita que nos ofrece la posibilidad de introducirnos en el Modelado 3D con pocos conocimientos y en muy poco tiempo. Dispone de una interfaz amigable, con un reducido número de órdenes intuitivas unido a una sencillez de manejo que propicia un rápido aprendizaje. Otras empresas que desarrollan software de modelado tridimensional están empezando a desarrollar programas con esta nueva manera de entender el modelado 3D. Actualmente existen diversos programas gratuitos y de fácil uso como por ejemplo Fusion, Meshmixer, tinkercad, etc.

Otras tecnologías como los escáneres 3D han experimentado el mismo abaratamiento y facilidad de uso que los programas. Inicialmente, las tecnologías empleadas para conseguir modelos 3D del natural, procedían del mundo de la topografía y estaban basadas en aplicaciones orientadas a la creación de modelos digitales del terreno (MDT). Estas tecnologías se servían de técnicas topográficas para generar los puntos de la malla 3D del territorio; mediante aparatos tradicionales de topografía, a partir de fotografías (fotogrametría) o mediante escáner láser (Gonizzi Barsanti, Remondino, & Visintini, 2012). El uso de estos nuevos métodos, permitió la creación de modelos 3D sin necesidad de expertos en modelado 3D, aunque su coste era muy alto y su uso requería conocimientos avanzados. Sin embargo, en los últimos años y con la aparición de tecnologías de bajo coste, ha sido posible la generación de modelos 3D digitales a bajo coste y de manera sencilla (Leakey & Dzambazov, 2013; Camba, Bonnet de León, de la Torre-Cantero, Saorin, & Contero, 2016).

Debido a la facilidad de uso de los programas de modelado 3D y al abaratamiento de las impresoras 3D y la disponibilidad de escáneres de bajo coste, es habitual disponer de estas tecnologías en entornos donde en un principio no se usaban como por ejemplo la escultura y la fabricación de moldes.

La finalidad del molde es servir de recipiente para convertir un material perecedero en uno duradero, además de poder replicar un mismo elemento numerosas veces. El molde consiste en un conjunto de elementos de diversos materiales (arena, arcilla, escayola, silicona, plastilina, metal,...) que delimitan una huella destinada a recibir una sustancia en estado líquido o pastoso que, después de solidificarse o endurecerse, adopta la forma de aquella huella y reproduce la parte vacía del molde (Morrall, Jimeno, & Molera, 1985). Tradicionalmente para obtener un molde, primero es necesario disponer de un modelo ya existente o uno previamente modelado, fabricado o construido. A continuación se recubre el modelo con un material que sirve de molde y se extrae el original para llenarlo con el material definitivo. Los moldes pueden ser de un solo uso (molde perdido) o de varios usos (molde para reproducción múltiple), dependiendo del material y de la división en piezas que se haga en función de la complejidad del modelo.

Los moldes son un proceso de creación que ha sido utilizado en diversos sectores, desde el arte hasta la producción industrial, gastronomía, joyería, odontología, criminología o paleontología entre otros. Los ejemplos más antiguos que constan son moldes de piedra que servían para fundir hachas o flechas en el neolítico (Sauras, 2003). También desde el 2400 a.C. los egipcios usaban moldes y mascarillas para reproducciones del rostro de un fallecido (Rich, 1914). En el campo industrial, desde que los hermanos Hyatt inventaron los moldes por inyección en 1872, se revolucionó manera de fabricar componentes plásticos (Goodship, 2004). Los tipos de moldes industriales pueden ser también por compresión, por transferencia, por soplado, por presión, etc.

En el arte, el uso y fabricación de moldes es una de las técnicas más extendidas y presentes en la mayoría de estudios de escultura y producción artística tradicionales. En las creaciones artísticas, a diferencia que en la industria, los moldes se suelen realizar a mano mediante un proceso largo y complejo (Barrie, 1992; Langland, 1999; Rich, 1914). En el campo artístico para la creación de moldes se han utilizado tradicionalmente arcilla, arena, escayola, etc., con la

aparición de nuevos materiales como la silicona flexible o el alginato se obtienen moldes reutilizables, de gran detalle, que ofrecen nuevas posibilidades y facilidad de reproducción múltiple. En la actualidad las tecnologías de fabricación digital como el escaneo, modelado e impresión 3D permiten la creación de moldes mediante herramientas informatizadas, con la ventaja de permitir múltiples impresiones.

## 2. ANTECEDENTES

En la industria, las tecnologías de modelado 3D, impresión 3D y fresado, se usan de manera generalizada en la fabricación de modelos, moldes y también para realizar un completo estudio del molde mediante simulaciones digitales complejas antes de llegar a la etapa de fabricación (Hakimian & Sulong, 2012). Se usan las tecnologías para el diseño y la fabricación de los moldes mediante maquinado a alta velocidad tipo CNC y, recientemente, se fabrican los moldes mediante impresión 3D (Noble, Walczak, & Dornfeld, 2014; Suárez Castrillón, Tafur Preciado, & Calderón Nieves, 2015). El proceso digital elimina la necesidad de crear primero un modelo base a mano ya que los modelos o moldes se realizan mediante herramientas de fabricación digital. Además los procesos informatizados ahorran tiempo, mejoran el detalle y la exactitud de los modelos aunque requieren herramientas industriales que pueden ser más costosos.

Empresas como Stratasys promocionan los Moldes impresos en 3D como La alternativa moderna frente al molde de aluminio (Zonder & Sella, 2013). Difunden la tecnología PolyJet, que es un método exclusivo de impresión 3D que ofrecen las impresoras de su empresa y que permite fabricar moldes de inyección internamente de forma fácil y rápida. El coste inicial de creación de un molde de PolyJet es relativamente bajo y rápido, adecuados para tiradas de hasta 100 piezas. Se puede crear una nueva iteración a un coste mínimo. Permiten crear un acabado superficial suave que no se requiere postprocesado en la mayoría de los casos. Las geometrías complejas, paredes delgadas y detalles finos se pueden programar fácilmente.

En otro campo de usan modelos impresos en 3D como moldes para la realización de gráficos en relieve, para personas con discapacidad visual, mediante materiales plásticos termoconformables. Permite la realización de moldes para crear gráficos tangibles de forma directa, rápida y económica que permite crear variante de manera rápida y sencilla. El proceso de termoconformado de láminas de plástico es un sistema de fabricación muy extendido en diversos sectores industriales. Uno en los que se emplea con mayor profusión es el del envasado de productos no líquidos, tratándose de un proceso muy económico y completamente adaptado a la producción en serie (Gual Ortí, Serrano Mira, & Mañez Pitarch, 2015).

Los moldes también son el recurso para el Diseño y fabricación de prótesis auriculares mediante tomografía computarizada, imágenes fotográficas tridimensionales y fabricación aditiva (Liacouras, Garnes, Roman, Petrich, & Grant, 2011). Utilizando la impresión 3D para producir el molde, puede reducir los pasos y el tiempo necesarios para crear una prótesis mediante el método tradicional de esculpir cera o arcilla. El propósito de este informe clínico es ilustrar cómo el uso de la fotografía tridimensional, la tecnología informática y la fabricación de aditivos puede reducir en gran medida muchos de los procedimientos preliminares utilizados actualmente para crear una prótesis auricular. Otro trabajo presenta un nuevo método compuesta por escaneo facial, modelado interactivo de arrugas y etapas de impresión de moldes para fabricar de manera fácil y eficiente máscaras de silicona para maquillajes de edad avanzada sin el uso de yeso y arcilla. La geometría de las arrugas finales se reconstruye utilizando un mapa de profundidad y se imprime el molde negativo de la cara arrugada (Choi, Shin, Choi, & Choi, 2016).

Por otra parte en el negocio dental se utiliza en los últimos años cada vez más las nuevas tecnologías, donde ya no es necesario sacar un molde de la boca sino se realiza mediante escáner 3D y los implantes o la ortodoncia se fabrica mediante impresión 3D (Lagravere & Flores-Mir, 2005). La impresión 3D ha digitalizado el campo de la joyería, donde han revolucionado la producción (Muñoz-Mesa & Sánchez-Trujillo, 2017). Así mismo en ámbito de la paleontología, donde en su momento la aparición del material flexible para los moldes como la silicona permitió un gran avance, las tecnologías de escaneo láser e impresión 3D mejoran los resultados debido a que no intervienen directamente con un modelo delicado, son más precisos y replicables a diversos tamaños (Tafforeau, y otros, 2006).

En la Universidad de Pamplona se imprimieron moldes de inyección, llegando a la conclusión que estos moldes son una buena herramienta para crear prototipos de las piezas que se desean estudiar o poner a prueba de una forma veloz y eficiente. Esta herramienta ahorra tiempos de estudio y materiales, además de ser económicamente más viable (Suárez Castrillón, Tafur Preciado, & Calderón Nieves, 2015). En otro trabajo se presenta la creación de moldes mediante impresoras 3D que fabrican en dos materiales diferentes, uno duradero y otro soluble, lo que permite fabricar moldes complejos junto a sus soportes que pueden ser disueltos. Esta técnica permite fabricar piezas o moldes 3D con formas internas complejas que antes no eran posibles (Rodríguez, Bhandari, Wang, & Sung-Hoon, 2015). En una investigación se exploraron tres métodos de fabricación de moldes para componentes ópticos: mecanizado CNC de plástico, mecanizado CNC de aluminio e impresión 3D de plástico. Concluyen que la impresión 3D requiere menos habilidad y mano de obra, sin embargo las piezas impresas en 3D tienen un acabado superficial inadecuado para moldear componentes ópticos por lo que es necesario reparar los acabados o mejorar las tecnologías (Noble, Walczak, & Dornfeld, 2014). Incluso se usan moldes impresos en 3D para la creación de dispositivos médicos, donde la impresión 3D permite crear moldes de inyección de manera rápida y a bajo coste pudiendo adaptar el diseño 3D digital posteriormente para elaborar moldes metálicos (Chung, y otros, 2014).

En el campo artístico y de la escultura, se están empezando a usar las nuevas tecnologías como el escáner láser y la fabricación digital mediante fresadoras o impresoras 3D para la creación de prototipos (Artec3D, 2019). En diversas ocasiones, las obras finales y sus correspondientes moldes se suelen trabajar a mano debido a su gran formato ya que no es habitual en las obras de arte no se suelen fabricar múltiples piezas. Sin embargo el uso de las tecnologías y la fabricación de moldes mediante impresoras 3D puede ser una herramienta útil para piezas de pequeño tamaño (aproximadamente de 20 cm).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo se han creado cinco tipos de moldes 3D diferentes. Para ello se han utilizado tres métodos de obtención del modelo inicial. Por un lado el modelado 3D mediante el programa gratuito Blender. Otra pieza se ha realizado por escaneo 3D mediante un escáner profesional, y por último una pieza combinando el escaneo 3D de bajo coste con programas de modelado gratuitos y sencillos como Meshmixer. Además hay dos tipos de moldes diferentes, por un lado moldes abiertos de una sola pieza y por otro, moldes cerrados de varias piezas.

Todas las piezas se han impreso en impresoras de bajo coste (entre 700 – 2000€) mediante el filamento PLA (ácido poliláctico). Este material es un polímero constituido por moléculas de ácido láctico, con propiedades semejantes a las del tereftalato de polietileno (PET) que se utiliza para hacer envases, pero que además es biodegradable.

Se describen e ilustran a continuación las técnicas para conseguir primero un modelo base digital en tres dimensiones, sobre el que se realiza a continuación un proceso digital para convertir el modelo en un molde. Como podemos observar, también se han escaneado obras (a partir de originales existentes de mediano y gran formato) para su reproducción en pequeño formato mediante moldes impresos en 3D. Se han realizado, mediante programas de diseño 3D, obras escultóricas para impresión en una o varias piezas, trabajando tanto moldes perdidos (se eliminarán para extraer las piezas fruto de la petrificación) como moldes para reproducción múltiple (se componen de varias piezas, con salida, de modo que en el momento de extracción del original, el molde mantiene su integridad y se podrá volver a usar).

Los moldes cerrados tienen como objetivo la petrificación interna; a través de las cuales se hará pasar el agua para que deposite las rocas carbonáticas según las formas dadas. Para la generación de formas escultóricas mediante moldes abiertos, el agua transita sobre ellos mediante la inmersión de madreformas que propicien y ordenen la acumulación de sedimentos calcáreos de acuerdo con formas preestablecidas.

### 3.1. Descripción de las diversas técnicas implementadas

En la primera técnica se obtiene un modelo mediante un programa de modelado 3D. Dentro de la tipología de moldes existentes, se ejecuta en este caso el estudio de una composición por piezas que permite la reutilización del molde. La construcción y análisis del despiece de la forma escultórica se lleva a cabo en el software "Blender", en el que a través de la observación del volumen, uso de cortes seccionales aplicados en los cambios de plano direccional y creación del inverso, se obtiene un negativo volumétrico para su paso a impresión 3D (Fig.11 ). Esta técnica nos aporta la ventaja de realizar uno o varios moldes siempre que se precise. A continuación se ha impreso el molde en una impresora 3D de bajo coste mediante el material PLA (Fig 12).

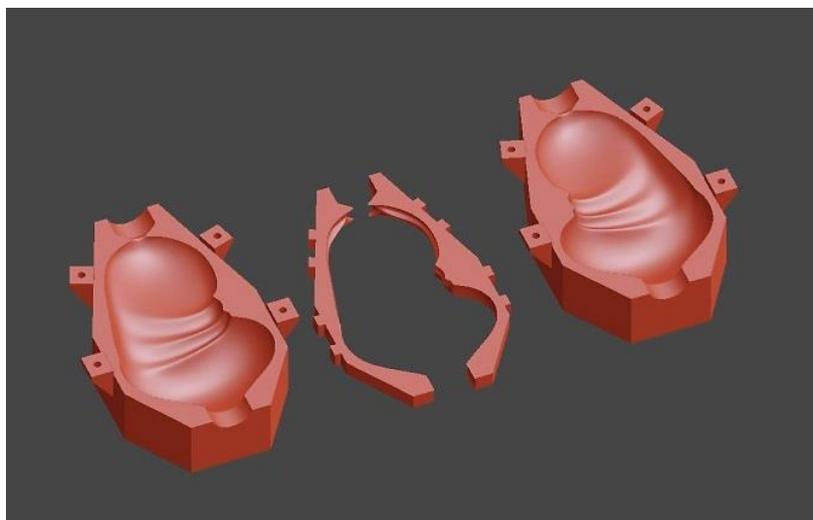


Fig. 11 Modelado 3D de un molde cerrado y reutilizable de varias piezas mediante el programa gratuito de modelado 3D Blender

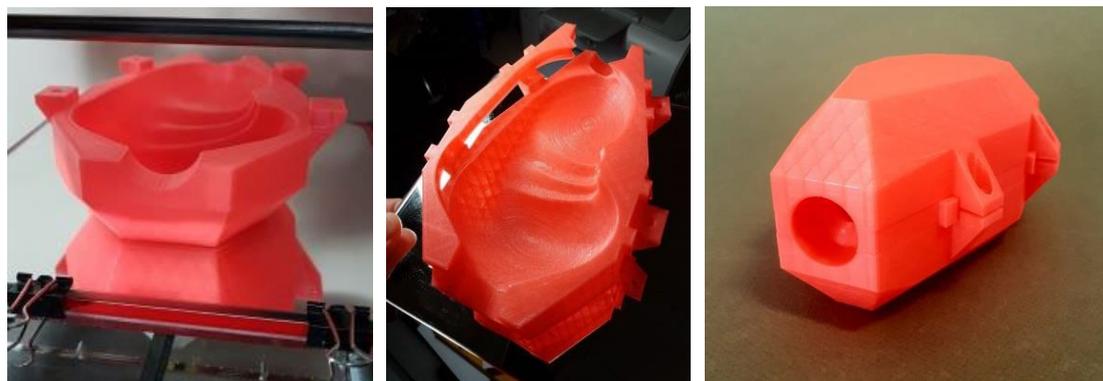


Fig. 12 Resultado de piezas de un molde cerrado de varias piezas impresos en 3D mediante PLA en una impresora 3D de bajo coste

En el segundo método de creación de molde, se parte de una escultura previamente hecha mediante tallado en piedra (Fig. 13). Dicha escultura tiene un tamaño superior al de las tuberías donde se introducirán los moldes. Pero gracias a la digitalización es sencillo crear un molde y reducir el tamaño hasta el adecuado para la inmersión.



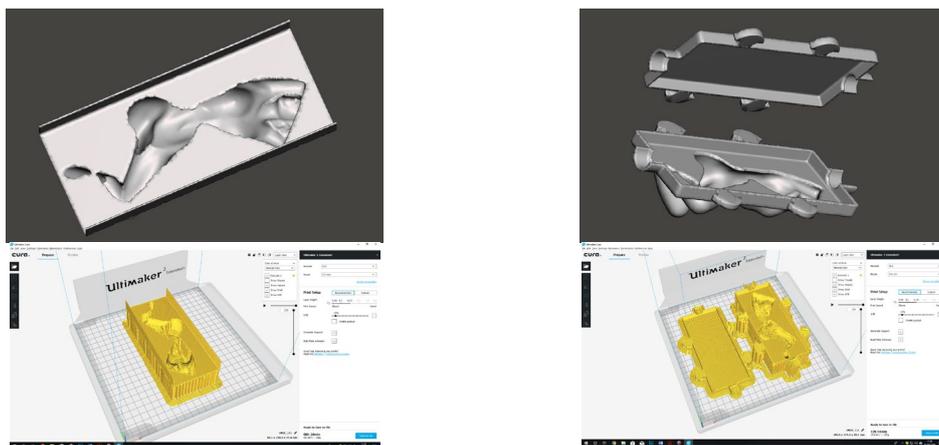
Fig. 13: Escultura original tallada en piedra

En este proceso se ha escaneado una escultura tallada con anterioridad mediante el escáner Artec™ Eva para obtener un modelo en digital (Fig. 14) de la escultura y proceder a su edición en programas de modelado 3D.



Fig. 14a: Escáner 3D Artec™ Eva usado para digitalizar la escultura; Fig. 14b: Resultado del escaneo.

A continuación se ha transformado el modelo digital en un molde, mediante operaciones booleanas de sustracción, y se ha preparado el molde para imprimir en una impresora 3D. En este caso se ha realizado dos tipos de moldes diferentes a partir del mismo modelo, por un lado un molde abierto por el que el agua puede fluir libremente y se estima obtener un relieve de dicha escultura (Fig. 15a). Por otro lado se ha realizado un molde de dos piezas, del que se estima obtener una pieza de bulto redondo, incluida la peana de la escultura (Fig. 15b). Además se han añadido dos tubos por donde se conectará el molde a las tuberías de agua. También se ha agregado unos ganchos al exterior de ambas partes para poder asegurar el cierre del molde.



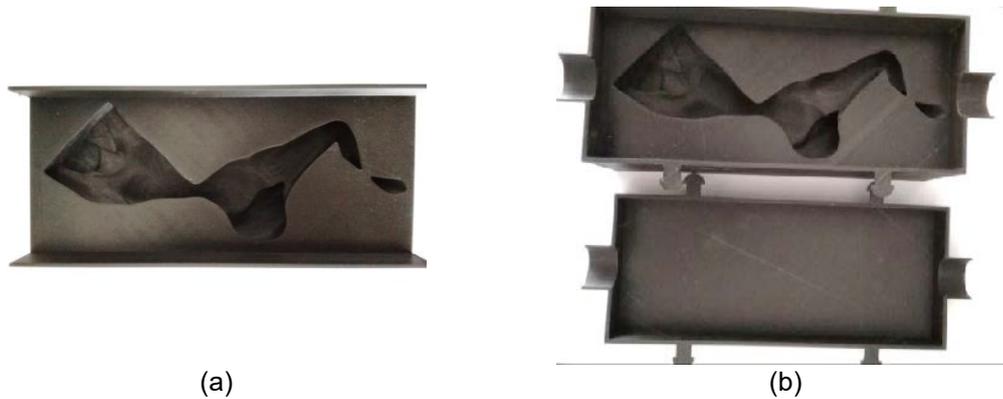


Figura 15a: Molde abierto en formato digital y su preparación para imprimir en una impresora 3D; Figura 15b: Molde cerrado en dos piezas en formato digital y su preparación para imprimir en una impresora 3D y Moldes impresos en 3D mediante PLA

En el último caso se ha utilizado el escáner portable 3DSense para escanear un busto humano. El modelo digital además se ha editado con un programa 3D llamado Meshmixer (Fig. 16).

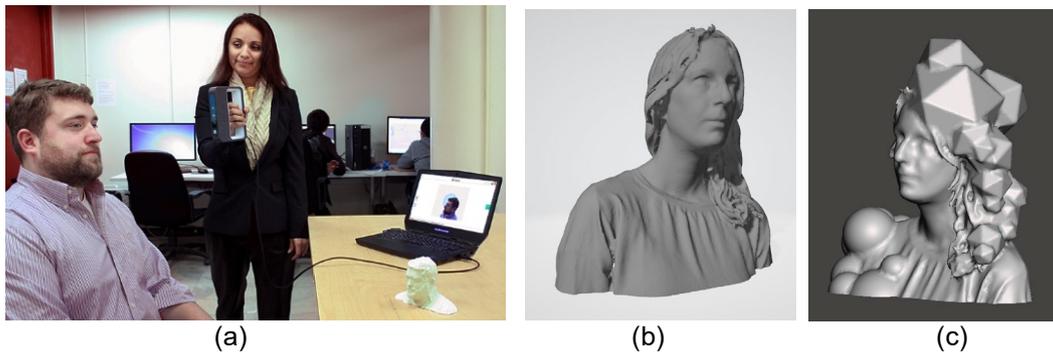


Figura 16a: Escáner 3DSense usado para digitalizar el busto; Figura 16b: Resultado de la digitalización; Figura 16c: Busto editado en un programa de modelado 3D

A continuación se ha transformado la escultura resultante en un molde mediante operaciones de offset y sustracción booleana. Además se han añadido los tubos por donde se conectará el molde a los demás moldes y a las tuberías de agua (Fig. 17).

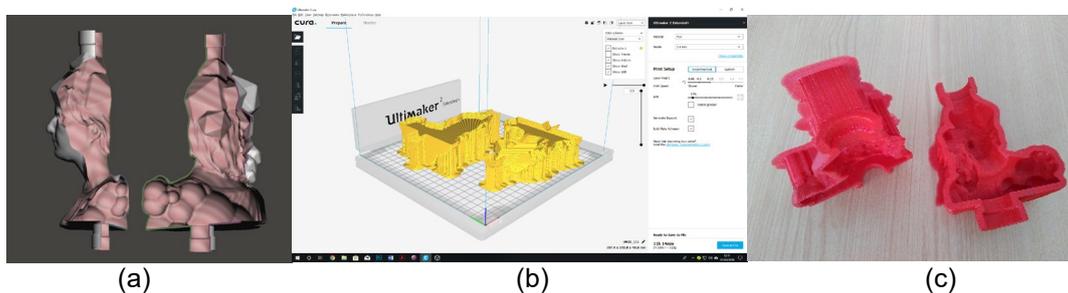


Figura 17a: Ambos partes del molde en formato digital. Figura 17b: Preparación del molde para su impresión 3D; Figura 17c: Molde impreso en PLA

### 3.2. Conexión de los moldes a aguas carbonatada/salmueras de rechazo

Como ya se ha anotado, se están desarrollando varias baterías de moldes: unos generados mediante técnicas digitales e impresos mediante 3D de bajo costo, a los que se refiere esta ponencia, y otros generados mediante materiales tradicionales (silicona, cera, escayola, etc.) en los que trabajan también otros miembros del grupo de investigación. De manera simultánea se están preparando los espacios y conducciones necesarios para los procesos de petrificación,

inicialmente en dos lugares: 1.- Zona cercana a la bocamina de la galería El Rebosadero, y 2.- En la EDAS de Aripe, en zona cercana a las membranas que separan las salmueras de rechazo y antes de que la salmuera reciba la dosificación química que habitualmente se le añade para evitar la colmatación de las tuberías que la conducen al punto de vertido.

Al no disponer de trabajos previos similares al que preparamos y tampoco de recursos suficiente para una toma de datos muy frecuente sobre parámetros ambientales, el desarrollo simultáneo de los diversos procesos de petrificación facilitará la extracción de conclusiones.

De acuerdo con los resultados experimentales de petrificación llevados a cabo con anterioridad, se ha previsto someter los moldes y madreformas a la acción del agua durante un periodo de tres meses, con un mínimo de cinco controles intermedios.

#### 4. CONCLUSIONES

El uso de los moldes en el ámbito de bellas artes y la escultura han estado siempre presentes y son una de las técnicas más extendidas en este campo. Tradicionalmente, la creación de un molde es una técnica que lleva una inversión de tiempo, varios materiales y esfuerzo. Sin embargo con las tecnologías de escaneado, modelado e impresión 3D se abren nuevas posibilidades en el campo de la creación de moldes.

Por un lado no se precisa de un modelo inicial al cual se elabora un molde alrededor. Con las herramientas digitales la creación de un molde es una operación estándar que los programas realizan con diferentes modificadores en pocos pasos.

También se cuenta con la posibilidad de escanear en 3D esculturas ya existentes y variar el tamaño sin esfuerzo. Una vez se tiene un modelo digital inicial se le pueden crear gran variedad de moldes (abiertos, cerrados de varias piezas) sin perder el original y en mucho menos tiempo comparado con técnicas manuales. Así mismo es posible intervenir sobre un original tantas veces como se desea sin romper o perder la forma original. La fabricación de moldes mediante impresoras 3D permite crear moldes sin esfuerzo y se pueden modificar las piezas si es necesario. También permite volver a imprimir los moldes infinitas veces.

Por otro lado se pueden encontrar inconvenientes como por ejemplo el tamaño que nos permiten las impresoras. Debido a que la mayoría de máquinas de bajo coste tienen un tamaño de impresión de unos 20 cm es más complejo fabricar piezas más grandes. Aunque es posible crear los moldes por despiece para aumentar el tamaño. También hay moldes cerrados difíciles de fabricar para los que se necesitan soportes de impresión que luego son complicados o imposibles de remover. En este caso es necesario recurrir al despiece del molde.

En lo que atañe a los objetivos específicos de uso para los moldes –procesos de petrificación a partir del agua-, destacar que esta propuesta es una clara novedad en nuestro ámbito, lo que ha obligado a adaptaciones de calado en el diseño e impresión de moldes mediante herramientas y procedimientos que, en el campo concreto de la creación plástica, se han usado hasta ahora fundamentalmente para la producción de modelos.

#### 5. REFERENCIAS

Suárez Castrillón, A., Tafur Preciado, W., & Calderón Nieves, P. (2015). Aplicación de herramientas CAD/CAM para el diseño y fabricación de prototipos de moldes de inyección de plásticos. *Tecnura*, 19(46), 115-121. doi: doi:10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a09

Artec3D. (21 de 1 de 2019). *La escultura se une a la tecnología de escaneo 3D*. Obtenido de <https://www.artec3d.com/es/news/sculpting-meets-3d-scanning-technology>

- Barrie, B. (1992). *Mold Making, Casting and Patina: For the Student Sculptor*. Michigan: Thomson-Shore, Incorporated.
- Bethany. (01 de 09 de 2019). *Everything You Need To Know About SketchUp*. Obtenido de <https://www.scan2cad.com/cad/everything-about-sketchup/>
- Camba, J., Bonnet de León, A., de la Torre-Cantero, J., Saorin, J., & Contero, M. (2016). Application of low-cost 3D scanning technologies to the development of educational augmented reality content. *2016 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, (págs. 1-6). Houston.
- Choi, Y.-J., Shin, I.-K., Choi, K., & Choi, S.-M. (2016). Fabrication of Face Molds and Silicone Masks using 3D Printing. *Journal of KIISE*, 516 - 523.
- Chung, P., Heller, J., Etemadir, M., Ottoson, P., Liu, J., Rand, L., & Roy, S. (2014). Prototipado rápido y económico de dispositivos médicos utilizando moldes impresos en 3D para moldeado por inyección de líquidos. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, 88(51745). doi:10.3791 / 51745
- Cordeiro Delgado, F. (2015). Aplicación del proceso de petrificación calcárea al diseño de souvenir. *Trabajo final del Master en Innovación en diseño para el sector turístico*. La Laguna: Universidad de La Laguna. Obtenido de [https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/7160/TFM\\_FRANC\\_CORDEIRO\\_MIDST\\_.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/7160/TFM_FRANC_CORDEIRO_MIDST_.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- del Caño, A., de la Cruz, M., & Solano, L. (2007). Diseño, ingeniería, fabricación y ejecución asistidos por ordenador en la construcción: evolución y desafíos a futuro. *Informes de la Construcción*, 59(505), 53-71.
- Gonizzi Barsanti, S., Remondino, F., & Visintini, D. (2012). Photogrammetry and Laser Scanning for Archaeological Site 3D Modeling - Some Critical Issues. *2nd Workshop on The New Technologies for Aquileia*. Aquileia, Italy.
- Goodship, V. (2004). *Practical Guide to Injection Moulding*. Shawbury: iSmithers Rapra Publishing.
- Gual Ortí, J., Serrano Mira, J., & Mañez Pitarch, M. (2015). Aplicación de la fabricación aditiva en la obtención de moldes para termoconformar gráficos tangibles orientados a personas con discapacidad visual. *Integración. Revista sobre discapacidad visual* , 1-31.
- Hakimian, E., & Sulong, A. (2012). Analysis of warpage and shrinkage properties of injection-molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the Taguchi method. *Materials & Design*(42), 62-71. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.058>
- Lagravere, M., & Flores-Mir, C. (2005). The treatment effects of Invisalign orthodontic aligners: A systematic review. *The Journal of the American Dental Association*, 136(12), 1724-1729. doi:<https://doi.org/10.14219/jada.archive.2005.0117>
- Langland, T. (1999). *From Clay to Bronze. A studio guide to figurative sculpture*. New York: Watson-Guptill Publications.
- Leakey, L., & Dzambazov, T. (2013). *Prehistoric Collections and 3D Printing for Education. Low-cost 3d printing for Science, Education and Sustainable Development*. Trieste (Italy).

- Liacouras, P., Garnes, J., Roman, N., Petrich, A., & Grant, G. (2011). Designing and manufacturing an auricular prosthesis using computed tomography, 3-dimensional photographic imaging, and additive manufacturing: A clinical report. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 78 - 82. doi:[https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(11\)60002-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(11)60002-4)
- Morral, F., Jimeno, E., & Molera, P. (1985). *Metalurgia general, Volumen 2*. Barcelona: Reverté S. A.
- Muñoz-Mesa, L., & Sánchez-Trujillo, J. (2017). El impacto de la impresión 3D en la joyería. *Lámpsakos*, 1(16), 89-97.
- Noble, J., Walczak, K., & Dornfeld, D. (2014). Rapid Tooling Injection Molded Prototypes: A Case Study in Artificial Photosynthesis Technology. *6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014*, 14, págs. 251-256. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.035>
- Rich, J. C. (1914). *The materials and methods of sculpture*. New York: Dover Publications Inc.
- Rodrigue, H., Bhandari, B., Wang, W., & Sung-Hoon, A. (2015). 3D soft lithography: A fabrication process for thermocurable polymers. *Journal of Materials Processing Technology*, 217, 302-309. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.005>
- Roosendaal, T. (03 de 09 de 2019). *Blender*. Obtenido de History: <https://www.blender.org/foundation/history/>
- Sanchez Bonilla, M. (8-12 julio 2015). Las 'piedras del agua'. Posibilidades escultóricas y propuesta ambiental. V Simposio Virtual Internacional Valor y Sugestión del Patrimonio Artístico y Cultural, 8-12 julio 2015. enlace: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/>. V *Simposio Virtual Internacional Valor y Sugestión del Patrimonio Artístico y Cultural*. Universidad de La Laguna.
- Sanchez Bonilla, M., Oropesa Hernández, T., Pérez Jiménez, M., & Viña Rodríguez, F. (2019). Las piedras del Agua. Punto de partida e investigaciones iniciales del G.I Arte y Entorno de la ULL. *Póster*. Obtenido de <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/14467>
- Sánchez Bonilla, M., Oropesa Hernández, T., Pérez Jiménez, M., Viña Rodríguez, F., Núñez Pestano, J., Guitián Garre, M., . . . Meier, C. (2019). Aprovechamiento de residuos líticos provenientes de aguas subterráneas carbonatadas. *Póster*. Universidad de La Laguna. Obtenido de <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/14440>
- Sauras, J. (2003). *La escultura y el oficio de escultor*. Barcelona: Serbal.
- Tafforeau, P., Boistel, R., Boller, E., Bravin, A., Brunet, M., Chaimanee, Y., . . . Nemoz, C. (2006). Applications of X-ray synchrotron microtomography for non-destructive 3D studies of paleontological specimens. *Applied Physics A*, 83(2), 195-202. doi:<https://doi.org/10.1007/s00339-006-3507-2>
- Viki, Carlos, Ortega, L., Villar, M., Fernández, M., Torras, M., & Casas, M. (18 de 5 de 2014). *Impresoras3D*. Obtenido de Impresoras3D.com: <http://www.impresoras3d.com/>
- Zonder, L., & Sella, N. (2013). *Moldes impresos en 3D PolyJet: La alternativa moderna*. Madrid: Statasys.