

# CORAL 3D: PROYECTO DE APRENDIZAJE ENFOCADO A LA RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN DE HÁBITATS CORALINOS DE LA REGIÓN DE MURCIA MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D Y EL EMPLEO DE RESIDUOS DEL SECTOR DEL MÁRMOL

## Acción 3. Fuente de verificación FV3.1.

Estudio comparativo de impresión 3D para diferentes tipos de arrecifes artificiales.



Con el apoyo de:



Asociación Empresarial Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales

Departamento de Construcción Sostenible e Industria 4.0



**CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol.**

*Realizado con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica*



**Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto.**

## ÍNDICE

1. Objetivos .....	2
2. Tecnologías de impresión 3D para la fabricación de arrecifes artificiales .....	2
2.1. Fabricación aditiva e impresión 3D .....	2
2.2. Máquina CNC de corte de hilo o chorro de agua .....	4
2.3. Selección de la técnica de impresión 3D .....	6
3. Diseño del arrecife artificial .....	6
3.1. Consideraciones generales en el diseño de arrecifes artificiales .....	6
3.2. Diseño de los prototipos de arrecife artificial .....	7
3.1. Digitalización del bloque de piedra .....	8
3.3. Creación de los prototipos de arrecife artificial .....	10
3.4. Elección del prototipo a fabricar .....	13
4. Referencias .....	14

## 1. Objetivos

El objetivo de este informe es comparar las distintas tecnologías existentes para impresión 3D: fabricación aditiva, impresión de moldes y Maquinaria de Control Numérico Computarizado (CNC) para realizar la impresión 3D del arrecife artificial y seleccionar, finalmente, la más adecuada.

Por otra parte, se propondrán, varios prototipos de arrecifes artificiales diseñados con la técnica seleccionada para, finalmente, seleccionar uno de ellos para su fabricación.

## 2. Tecnologías de impresión 3D para la fabricación de arrecifes artificiales

### 2.1. Diferencias entre fabricación aditiva e impresión 3D.

La fabricación aditiva hace referencia a todas las técnicas de fabricación por adición de material empleadas con el objetivo de producir nuevos componentes complejos y durables. Se basaría en añadir capas de material hasta conseguir la forma deseada.

La impresión 3D se limitaría a un tipo concreto de tecnología aditiva, y se trata de la fabricación de modelos o piezas finales mediante el uso de una impresora 3D, capaz de emplear diferentes mezclas y materiales para general el producto deseado. Este tipo de avance ha sido muy importante en las tecnologías de fabricación por adición

Mediante fabricación aditiva aplicada al uso de la impresora 3D se pueden fabricar piezas a partir de un diseño de modelo 3D. En este punto, el proyecto propone dos opciones: el empleo de impresión aditiva e impresión 3D o la fabricación de moldes con impresora y rellenado posterior con la mezcla deseada.

### 2.2. Fabricación aditiva e impresión 3D

Esta tecnología se basa en construir la estructura del arrecife directamente, sin utilizar moldes ni utillajes, mediante la deposición de capas de material y su posterior consolidación, que puede realizarse mediante sinterizado láser, curado por luz ultravioleta o adición de un aglomerante, dependiendo de la tecnología.

La impresión 3D permite la fabricación de productos personalizados que se ajustan a las necesidades de cada usuario, siendo aplicada cada vez más en campos de todo tipo. Sin embargo, las impresoras 3D no pueden utilizar cualquier material. No obstante, hay una gran variedad de materiales usados para su impresión: desde transparentes a opacos, con colores, flexibles o rígidos, con gran resistencia e, incluso, manejables a alta temperatura. El diseño de un producto concreto lleva a escoger el material que debemos utilizar, la impresora y el proceso por el cual se imprimirá.

La versatilidad de las impresoras 3D ha hecho que su campo en la fabricación de arrecifes artificiales se extienda, bien por querer buscar diseños novedosos o atractivos para el buceo, o bien para crear formas efectivas para restaurar la vida marina y crear biodiversidad.

En la Figura 1 puede verse una impresora 3D trabajando en la deposición de capas de material cerámico para la fabricación de un arrecife artificial.

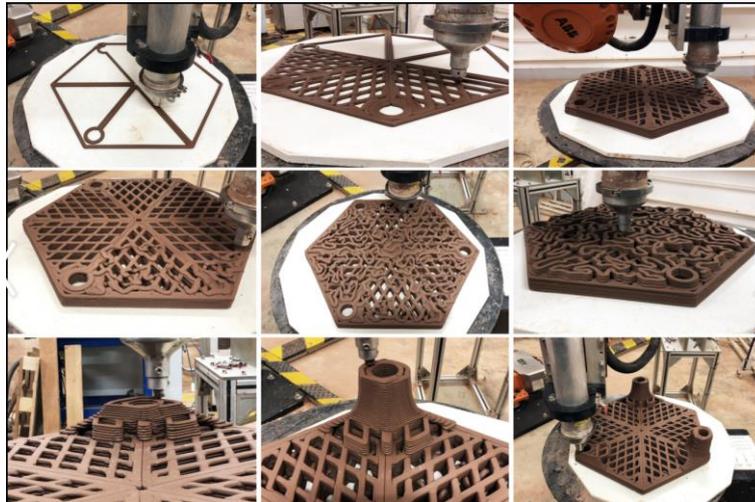


Figura 1. Proceso de elaboración de arrecife artificial con fabricación aditiva e impresión 3D llevado a cabo por Robotic Fabrication Lab, la Universidad de Hong Kong (Facultad de Arquitectura y el Instituto de Ciencia Marina).

© Robotic Fabrication Lab/Vriko You. Fuente: [https://www.archdaily.com/947495/rethinking-artificial-reef-structures-through-3d-clay-printing?ad\\_medium=gallery](https://www.archdaily.com/947495/rethinking-artificial-reef-structures-through-3d-clay-printing?ad_medium=gallery)

### 2.3. Uso de moldes creados con impresión 3D

Esta segunda propuesta para crear arrecifes artificiales se basa en la fabricación de un molde de inyección mediante impresión 3D, para su posterior relleno con la mezcla de materiales.

Esta opción ofrece también millones de posibilidades al poder crear moldes de cualquier forma o tamaño deseado y ofrece la ventaja, frente a la anterior opción, de que se pueden fabricar módulos o piezas individuales que, posteriormente, pueden ensamblarse para crear una estructura más grande. Esta ventaja aplicada a los arrecifes artificiales se traduce en que es posible construir un arrecife de grandes dimensiones (Figura 3) sin los inconvenientes que puede ocasionar una sola pieza maciza. Esto es, los módulos permiten transporte y manejo más fácil e incluso su ensamblado puede llevarse a cabo en el fondo marino.



Figura 2. Arrecife artificial modular creado mediante el relleno de moldes con cerámica. Fuente: <https://www.reefdesignlab.com/mars>

CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol. Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

#### 2.4. Máquina CNC de corte de hilo o chorro de agua.

Las máquinas CNC podrían considerarse otro tipo de impresión 3D y sirven para el corte y moldeado de material. Tienen instalada una computadora que controla la posición y velocidad de los motores que accionan los tres ejes de la máquina. Gracias a esto, pueden hacer movimientos que no se pueden lograr manualmente como círculos, líneas diagonales y figuras complejas tridimensionales, controlando el movimiento de la mesa, el carro y el husillo (De maquinas y herramientas, 2015). Una vez programada, ejecuta todas las operaciones por sí sola.

Los tipos de maquinaria CNC más comunes son las de corte de hilo o chorro de agua.

La máquina CNC con corte de hilo de metal o diamante (Figura 4) utiliza esta herramienta para se utiliza para cortar un contorno programado en una pieza. El hilo siempre atraviesa la pieza y es posible cortar piezas cónicas o de diferentes perfiles desde la superficie hasta el final. El hilo se basa generalmente en aleaciones de cobre y diámetros desde 0.02 hasta 0.33mm (GFMS, 2019), pero también los hay de diamante, empleados más en el corte de la piedra.



Figura 3. Máquina CNC de corte de hilo. Fuente: <https://www.directindustry.es/prod/wintech-engineering/product-78368-1491599.html>



Figura 4. Máquina CNC con hilo de diamante.

En el caso de usar una CNC con chorro de agua (Figura 6), se consigue cortar un material haciendo impactar sobre éste un chorro de agua a gran velocidad que produce el acabado deseado (Bolufer, 2014). De esta forma, también pueden obtenerse piezas con diferentes perfiles y formas tridimensionales.



Figura 5. Máquina CNC de corte por chorro de agua. Fuente:

<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/FeriaVirtual/Producto-Maquina-de-corte-por-chorro-de-aqua-CNC-Microstep-Aquacut-42946.html>

CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol. Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

## 2.5. Selección de la técnica de impresión 3D

Como se ha comentado en el informe FV2.2, al seleccionar como material a emplear en la fabricación del arrecife artificial el bloque de roca caliza, la técnica que se va a emplear para su impresión 3D va a ser la maquinaria CNC.

Eligiendo esta opción, la construcción es más rápida, pues no hay que esperar al secado del material, ofreciendo igualmente muchas posibilidades de diseño. En el caso de usar una fabricación aditiva o con moldes, alargaría el proceso de fabricación.

Otro inconveniente considerado en cuanto a escoger los moldes como opción de fabricado, es que, si fueran materiales tradicionales como plásticos, probablemente estos no soportaran la presión o calor ejercidos a lo largo del proceso de inyección.

Por otra parte, el emplear una maquinaria CNC para la fabricación del arrecife artificial hace que el proyecto sea más novedoso, pues no hay citas de que se haya utilizado este tipo de metodología para la fabricación de este tipo de estructuras. De esta manera, este trabajo supondrá un avance en el conocimiento en el uso de esta tecnología aplicada a la fabricación de arrecifes artificiales.

Finalmente, hay que destacar que, con la opción de imprimir la estructura 3D sobre la roca con CNC, se contribuye de manera más directa al concepto de economía circular, pues se estarían revalorizando los residuos de la industria de forma muy eficaz, de hecho, bloques completos de piedra.

## 3. Diseño del arrecife artificial y replicabilidad en 5 tipos de arrecifes

### 3.1. Consideraciones generales en el diseño de arrecifes artificiales

Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado el concepto de *Nature-Centered Design*, que significa la posición del arrecife (u otra estructura natural) en el centro y utiliza herramientas de investigación de diseño como observaciones, prototipos, validación de usuarios y otros métodos para lograr intervenciones de restauración en la naturaleza (Tarazi et al., 2019).

Para diseñar un arrecife artificial hay que tener claro el propósito por el que va a ser fabricado, en este caso, la restauración de especies de corales mediterráneos. Concretamente en el diseño de un arrecife para restauración de estos organismos, el principal objetivo debe ser ofrecer refugio (Spieler et al., 2001).

Es importante también que se tengan en consideración las interacciones que tendrán lugar entre la estructura desarrollada con los corales a restaurar y, además el medio natural que le rodea. Un arrecife bien diseñado, no solo servirá para que se proliferen los organismos objeto, sino que también propiciará una fuente de refugio, asentamiento y alimento para muchos otros tipos de organismos animales y vegetales.

Como ya se determinó en la Acción 2 del proyecto, el material a emplear para la fabricación de los arrecifes artificiales va a ser bloques de piedra residuales de la industria de mármol, que tienen una alta composición en  $\text{CaCO}_3$ . Partiendo de que este es un material muy recomendado

para la restauración de organismos con esqueleto carbonatado, se va a hacer un estudio sobre las características de diseño.

El primer aspecto que hay que tener en cuenta en el diseño es la creación de un sustrato adecuado. Toda la biota colonizadora muestra preferencias por un sustrato u otro debido a las propiedades físicas o químicas del mismo (Spieler et al., 2001). Los corales, como se ha mencionado en anteriores informes, prefieren texturas rugosas (Carleton & Sammarco, 1987). En este caso, el mármol, por ser una roca natural ya presentaría algunas de las características que pueden favorecer el asentamiento de estos organismos sésiles, pero durante el diseño, se conferirá a la roca porosidades de distinto tamaño a la superficie para facilitar diferentes texturas y refugios. La idea es conferir estas cualidades usando solo métodos físicos, esto es, sin usar sustancias químicas que pudieran alterar el pH o composición de la roca, o incluso producir lixiviados tóxicos con el tiempo.

Otro aspecto importante es la creación de un perfil vertical, pues se ha demostrado que es un factor decisivo en el diseño efectivo de un arrecife artificial de coral (Spieler et al., 2001).

La posibilidad de cobijo y resguardo en el diseño de un arrecife artificial para corales es fundamental, pues como destacan algunos autores (Carr & Hixon, 1995; Tomascik, 1991), la depredación ha sido el principal factor limitante una vez los corales se han asentado en la estructura. Hay que prestar atención a los siguientes atributos: complejidad, tamaño de oquedades, espaciado, arquitectura, zonas de sombra, apilamientos,... (Sherman et al., 2002; Spieler et al., 2001). Los corales prefieren asentarse en intersecciones complejas (Carleton & Sammarco, 1987), pues así evitan la depredación.

En cuanto al tamaño y dimensiones, aún no está claro cual es la mejor distribución espacial en cuestiones de restauración, pero la clave general es procurar una configuración que provea un hábitat adecuado para predadores y presas, para evitar que exista una descompensación (Spieler et al., 2001). Sí que es importante que las estructuras se diseñen previendo su estabilidad en el medio marino (Spieler et al., 2001).

### 3.2. Diseño de los prototipos de arrecife artificial

La roca natural caliza ya presentaba algunas de las características que pueden favorecer el asentamiento de estos organismos sésiles, como la rugosidad, pero durante el diseño, se moldeó para que tuviera oquedades de distinto tamaño y profundidad, junto con inclinaciones variadas, con tal de facilitar diferentes texturas y refugios. La idea fue conferir estas cualidades usando solo métodos físicos mediante la maquinaria CNC, es decir, sin usar sustancias químicas que pudieran alterar el pH, la composición de la roca o incluso producir lixiviados tóxicos con el tiempo.

A modo general, se prestó atención a los siguientes atributos: complejidad, tamaño de oquedades, espaciado, arquitectura, zonas de sombra, apilamientos,... (Sherman et al., 2002; Spieler et al., 2001).

A continuación, se describirá cómo se ha realizado el diseño de los distintos tipos de arrecifes artificiales candidatos a ser fabricados en el proyecto.

Se han usado herramientas de diseño para controlar y manipular algunos aspectos estructurales del arrecife artificial. Para ello, se ha optado por un enfoque multidisciplinar (biológico y arquitectónico) para explorar la funcionalidad de la morfología de la estructura.

### 3.1. Digitalización del bloque de piedra

Inicialmente, fue necesario digitalizar el bloque de roca caliza seleccionado, con tal de poder moldearlo con los softwares digitales y conferirle un diseño específico. El primer paso para obtener dicha nube de puntos es realizar una tomografía computarizada, para la cual se necesita las dimensiones de la pieza y una fotogrametría de toda la pieza.

Las medidas del bloque al completo se realizaron midiendo con un metro todas las caras, tanto en vertical como en horizontal, como puede observarse en las Figura 6.



Figura 6. Medidas de las distintas caras del bloque de piedra caliza para realizar la nube de puntos.

La fotogrametría se realizó utilizando unas dianas de puntos colocadas sobre toda la superficie del bloque y en otras zonas de referencia fuera del mismo (Figura 7).



Figura 7. Colocación de las dianas sobre el bloque y los puntos exteriores de referencia.

Una vez colocadas las dianas, se fotografiaron todas las caras del mismo (Figura 8).



Figura 8. Fotografía a las distintas caras del bloque.

CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol. Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

Las medidas y fotografías obtenidas fueron integradas en los softwares Agisoft Metashape, AutoCAD y Autodesk 3ds Max, y se creó la imagen del despunte con textura (Figura 9).

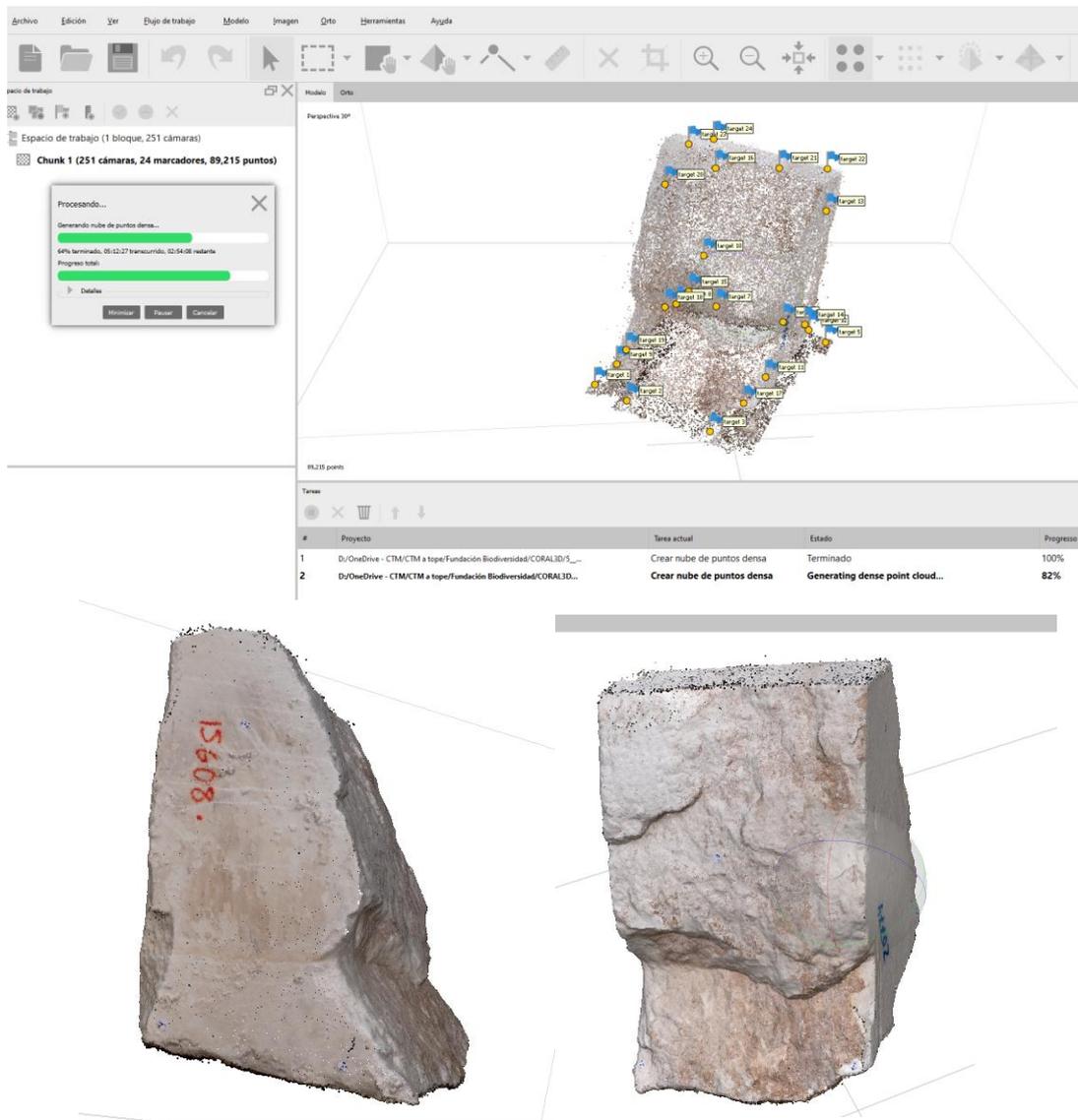


Figura 9. Nube de puntos obtenido tras la tomografía (izquierda) y bloque con textura digitalizado (derecha).

### 3.3. Creación de los prototipos de arrecife artificial

A partir de la textura del bloque digitalizada, con los softwares anteriormente mencionados, se crearon varios diseños de arrecife artificial, atendiendo a los criterios ecológicos mencionados anteriormente.

Aunque la propuesta inicial eran cinco tipos de arrecifes, finalmente, se elaboraron diez prototipos, que pueden verse en las siguientes imágenes (Figura 10-19):

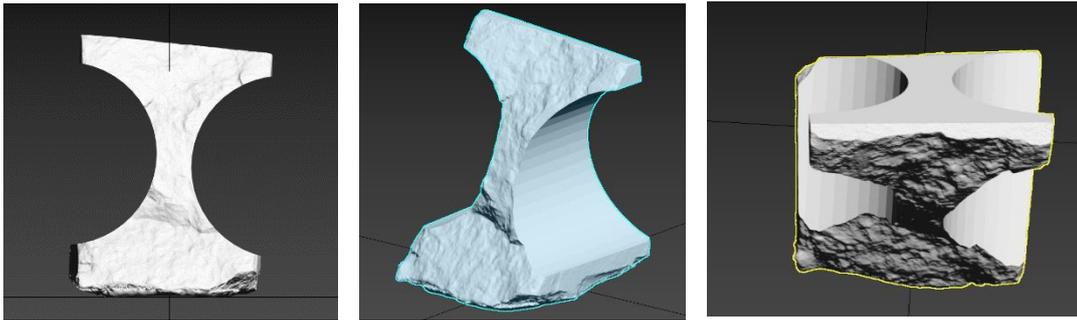


Figura 10. Primer prototipo diseñado de arrecife artificial.

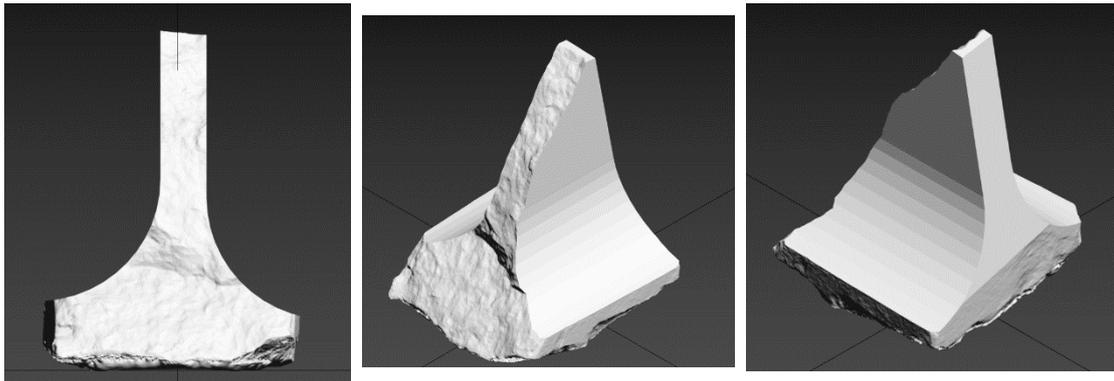


Figura 11. Segundo prototipo diseñado de arrecife artificial.

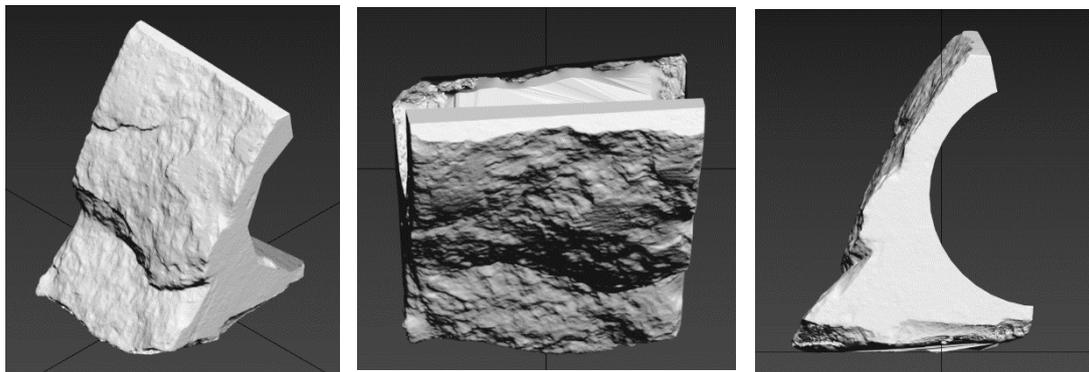


Figura 12. Tercer prototipo diseñado de arrecife artificial.

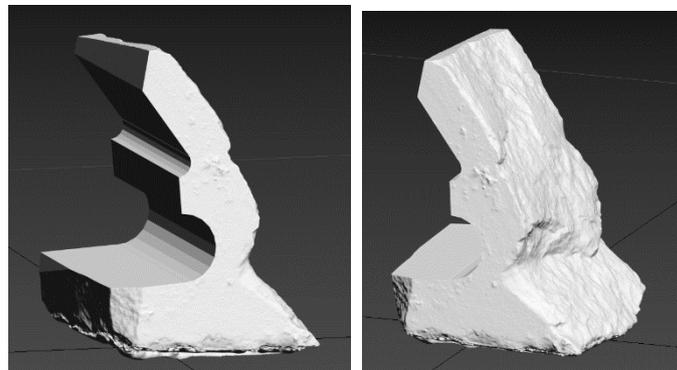


Figura 13..Cuarto prototipo diseñado de arrecife artificial.

CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol. Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

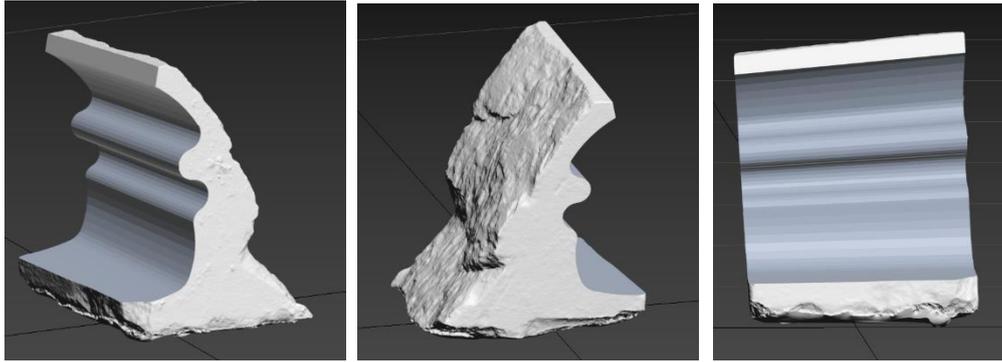


Figura 14. Quinto prototipo diseñado de arrecife artificial.

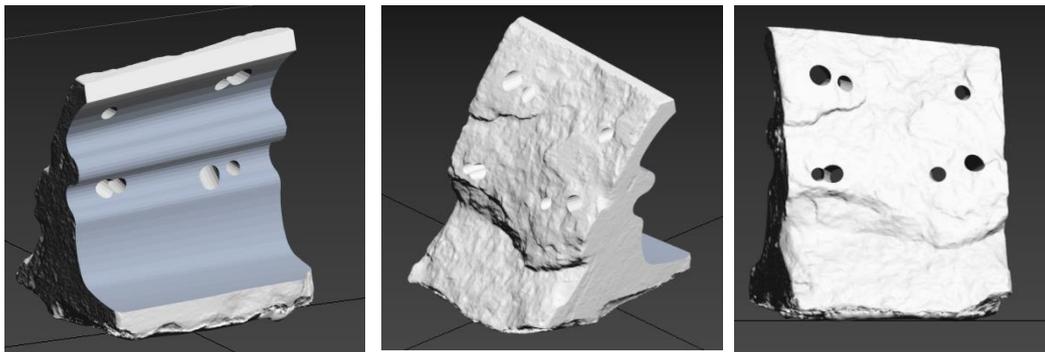


Figura 15. Sexto prototipo diseñado de arrecife artificial.

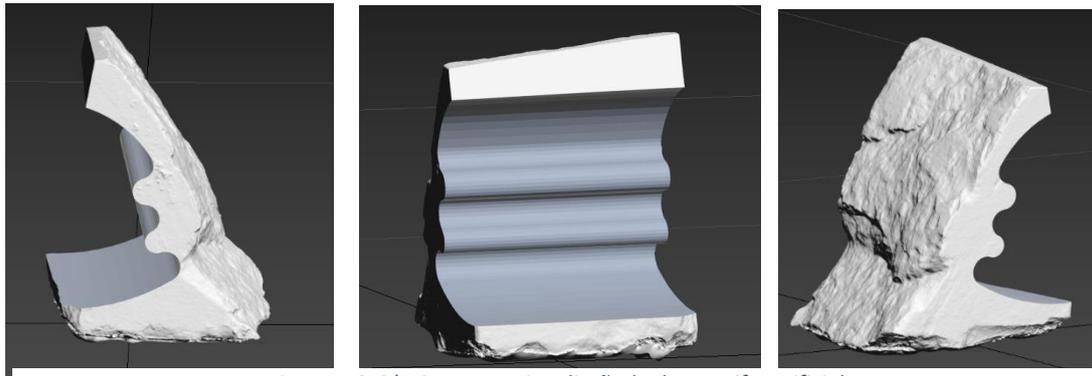


Figura 16. Séptimo prototipo diseñado de arrecife artificial.

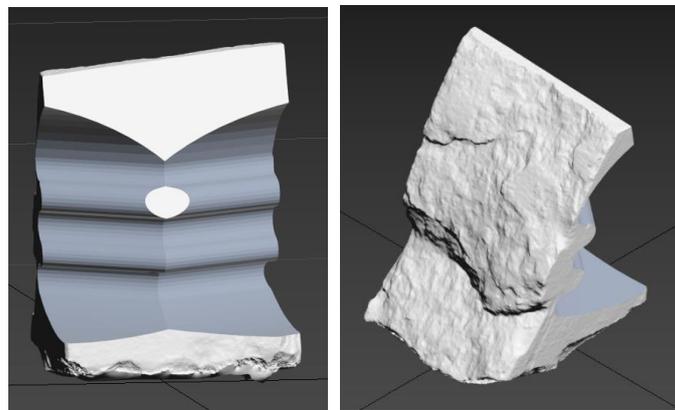


Figura 17. Octavo prototipo diseñado de arrecife artificial.

CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol. Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

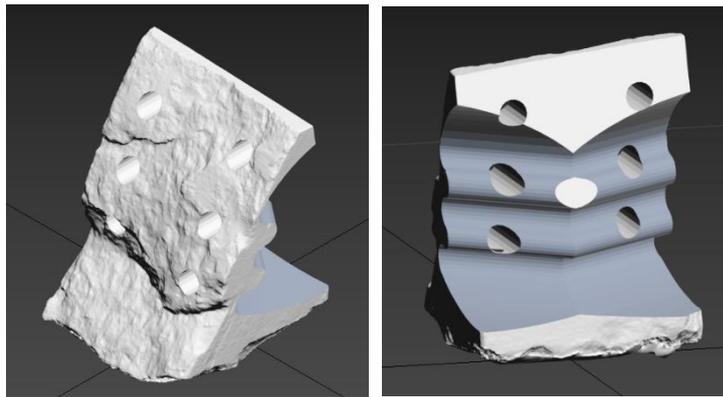


Figura 18. Noveno prototipo diseñado de arrecife artificial.

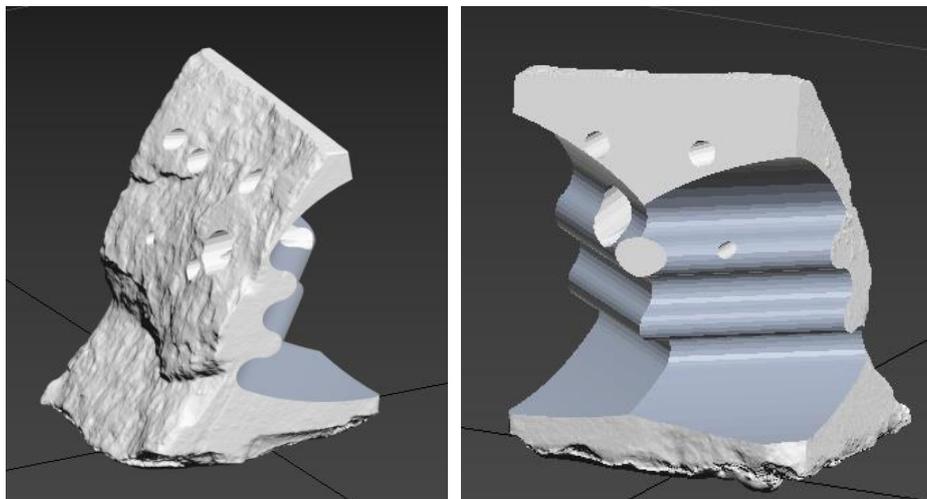


Figura 19. Décimo prototipo diseñado de arrecife artificial.

#### 3.4. Elección del prototipo a fabricar

De todos los diseños contemplados, finalmente se eligió el que se muestra en la Figura 19, pues fue el que más criterios ecológicos cumplía, a la vez que también ofrecía estabilidad.

Como puede observarse en la imagen, posee una cara con más pendiente y rugosidad, con algunas oquedades en distintos tamaños y alturas. La otra cara, con dos orientaciones distintas, es algo más lisa, la pendiente es menos pronunciada, poseyendo distintos escalones a diferentes alturas. También posee oquedades de varios tamaños.

Este diseño variado ofrece muchos más nichos potenciales que los anteriormente mostrados, pues ofrece distintas posibilidades de exposición a las corrientes y a la intensidad de luz.

Este diseño seleccionado fue transformado a un archivo de tipo stl. con el que, posteriormente, la maquinaria (CNC) pudo imprimir el diseño seleccionado. Dicho procedimiento, se detalla en la FV3.2.

## 4. Referencias

- Bolufer, P. (2014). *Corte por chorro de agua*. Interempresas. <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/117732-Corte-por-chorro-de-agua.html>
- Carleton, J. H., & Sammarco, P. W. (1987). Effects of Substratum Irregularity on Success of Coral Settlement: Quantification by Comparative Geomorphological Techniques. *Bulletin of Marine Science*, 40(1), 85-98. <https://www.researchgate.net/publication/233666538>
- Carr, M. H., & Hixon, M. A. (1995). Predation effects on early post-settlement survivorship of coral-reef fishes\*. *Mar. Eco. Pro. Ser*, 124, 31-42.
- De maquinas y herramientas. (2015). *Introducción a la tecnología CNC*. Mecanizado. <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/introduccion-a-la-tecnologia-cnc>
- GFMS. (2019). *Electroerosión (EDM) por corte de hilo*. GF Machining Solutions. [https://www.gfms.com/country\\_ES/es/Products/EDM/wire-cut-edm.html](https://www.gfms.com/country_ES/es/Products/EDM/wire-cut-edm.html)
- Sherman, R. L., Gilliam, D. S., Spieler Sherman, R. E., & Spieler, R. E. (2002). Artificial reef design: void space, complexity, and attractants. *ICES Journal of Marine Science*, 59, 196-200. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1163>
- Spieler, R. E., Gilliam, D. S., & Sherman, R. L. (2001). Artificial substrate and coral reef restoration: What do we need to know to know what we need. *Bulletin of Marine Science*, 69(2), 1013-1030.
- Tarazi, E., Parnas, H., Lotan, O., Zoabi, M., Oren, A., Josef, N., & Shashar, N. (2019). Nature-Centered Design: How design can support science to explore ways to restore coral reefs. *Design Journal*, 22(sup1), 1619-1628. <https://doi.org/10.1080/14606925.2019.1594995>
- Tomascik, T. (1991). *Settlement patterns of Caribbean scleractinian corals on artificial substrata along a eutrophication gradient, Barbados, West Indies* (Vol. 77).