

3.3.2 Naturaleza Generativa

Naturaleza Generativa es un proyecto de investigación que se desarrolla entre febrero y julio de 2015 dentro del MediaLab Prado, con el apoyo de ASA (Asociación de Sostenibilidad y Arquitectura)¹. El objetivo del proyecto es el desarrollo de herramientas de diseño generativo para crear artificialmente estructuras “vivas”, que den lugar a entornos físicos más adaptados a nuestra realidad de seres que crecemos y cambiamos. El grupo de investigación está formado por 10 profesionales de diferentes disciplinas: arquitectos, programadores y artistas². El prototipo físico derivado de la investigación, se produce entre el 22 de junio y el 3 de julio dentro del FabLab del Medialab Prado³, hibridando técnicas artesanales y de fabricación digital, presentándose en un evento abierto día 4 de julio⁴. El prototipo habitable de 500€ de presupuesto material, incluye proyecciones de video mapping y elementos biológicos que permiten el “crecimiento” de la estructura principal de membranas nervadas.

Este grupo se enmarca dentro del proyecto de investigación Tecnología Creativa, a cargo del mediador Nacho Cossío (programador experto en algoritmos generativos):

“Espacio de difusión y experimentación en la intersección entre tecnología y arte. Proyecto para experimentar de forma colaborativa sobre diseño generativo: investigación de procesos y herramientas para el diseño generado a partir de un conjunto de reglas, y su posterior realización con las herramientas disponibles en el Fablab de Medialab-Prado: impresora 3D, cortadora láser, fresadora y cortadora de vinilo”⁵.

1 <http://www.sostenibilidadyarquitectura.com/blog/presentacion-naturaleza-generativa/>

2 María Mallo, Nacho Cossío, Jacobo Bouzada, Carlos Fernández, Brezo Alcoceba, Daniel García, Marta Llorente, Sergio Arias, Kike de la Rubia y Fernanda Ramos.

3 Entre el 22 y el 26 de junio se desarrolla un taller abierto de producción (<http://medialab-prado.es/article/taller-de-produccion-naturaleza-generativa>). Participantes del taller: José Ramón Negrín, Miguel Pañeda, Juan Manuel Salvador, Teresa de Nova, Mateo Alcázar, Twiggy Hirota y Berta Guitierrez. En el montaje final entre el 29 de junio y el 3 de julio participan: María Mallo, Nacho Cossío, Carlos Fernández, Berta Gutierrez, Twiggy Hirota, Ana Carrascosa y Lara Casabona.

4 <http://medialab-prado.es/article/naturaleza-generativa>

5 teccreativa.medialab-prado.es/



Fig. 3.3.2.1. Referencias utilizadas en el grupo de investigación. Arriba, serie *Slim* de Bart Hess. En medio, *Body Architect* de Lucy McRae. Abajo, *Brainfores* de Gerda Steiner. Imágenes extraídas de www.barthess.nl, www.lucymcrae.net y www.steinerlenzlinger.ch.



Fig. 3.3.2.2. Fase de reuniones para fijar objetivos concretos dentro del grupo de investigación. Abajo se pueden ver algunas de las pruebas realizadas con látex.

La metodología de trabajo se compone de cuatro reuniones realizadas entre febrero y mayo de 2015, en las que se define el proyecto y los objetivos comunes del grupo. Se propone el trabajo con membranas flexibles de látex por dos motivos: por un lado la membrana traslúcida permite generar un espacio interior aislado del exterior que no se conseguía con el prototipo anterior de estructura de tubos de PVC. Por otro lado, una membrana flexible permite la interacción con el usuario, que es capaz de generar deformaciones de la geometría predefinida. Para enfatizar esa deformabilidad y ligereza, se decide que el prototipo esté colgado de cuerdas, de tal manera que la membrana permanezca siempre traccionada y no necesite de una estructura rígida de soporte. Además, el prototipo se concibe desde un primer momento como una pieza híbrida, que pretende generar en el interior un ecosistema propio, donde lo natural y lo artificial se funden (ver referencias en la Fig. 3.3.2.1). Durante estos meses también se hacen pruebas materiales (ver Fig. 3.3.2.2) y se avanza en el desarrollo de los algoritmos generativos.

Los algoritmos generativos son aquellos que reproducen patrones de evolución natural. En este caso se desarrollan patrones de venación, aquellos que reproducen el comportamiento de las venas en los vasos sanguíneos, los nervios de las hojas de los árboles, las raíces o las nervaduras de las alas de una libélula⁶.

Los algoritmos de venación trabajan partiendo de una serie de “auxinas” (termino que hace referencia a la hormona natural que regula el crecimiento vegetal), que están colocadas sobre una superficie de manera aleatoria o condicionada (como es el caso de las alas de libélula). Por otro lado se determina la posición de una o varias “raíces” (termino que también referencia al mundo natural). Tanto las *auxinas* como las *raíces* son puntos y el trabajo del el algoritmo consiste en generar los caminos de unión entre ellos de la manera más eficaz posible.

Las primeras pruebas del algoritmo a cargo de Jacobo Bouzada, se hacen colocando las

⁶ Runions et al. “Modeling and visualization of leaf venation patterns”, *Siggraph 05*, New York, ACM, 2005.

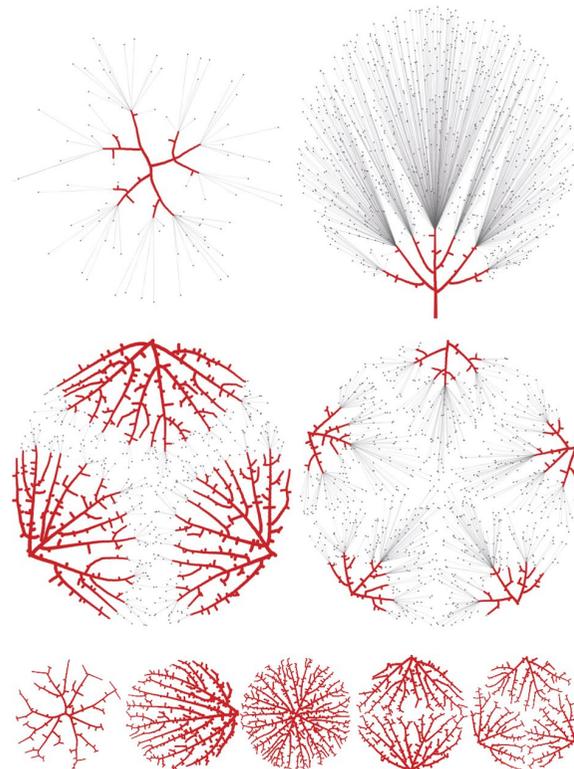


Fig. 3.3.2.3. Arriba, estados intermedios del algoritmo de venación con variación del número de raíces y la cantidad de auxinas. Abajo, la venación finalizada.

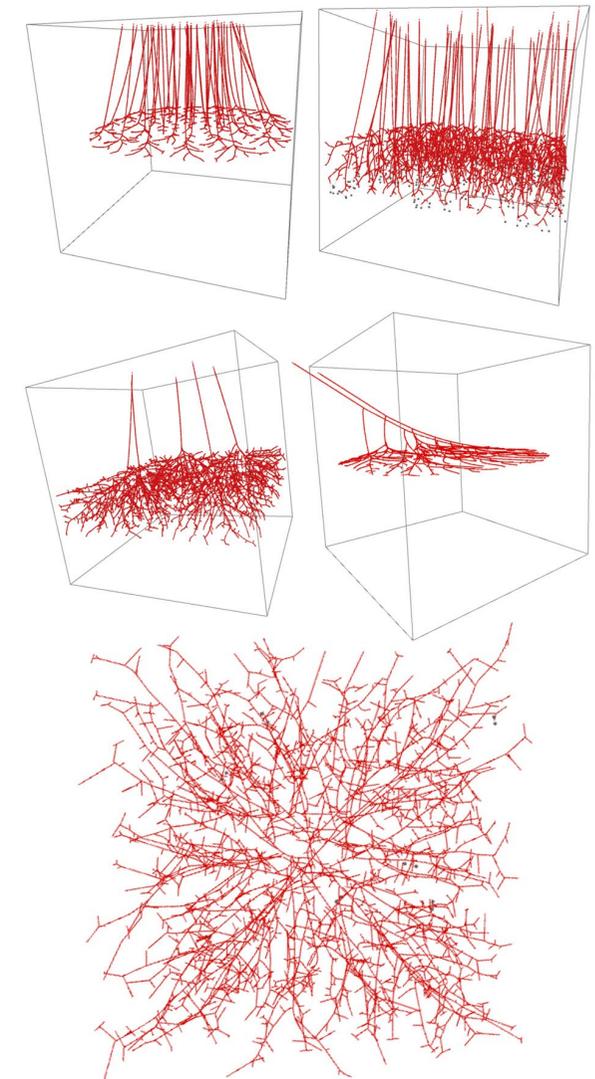


Fig. 3.3.2.4. Arriba, venaciones variando la cantidad de raíces que parten de un plano superior, y las auxinas que se distribuyen sobre una superficie plana o un volumen acotado. Abajo, vista en planta de una de las venaciones.

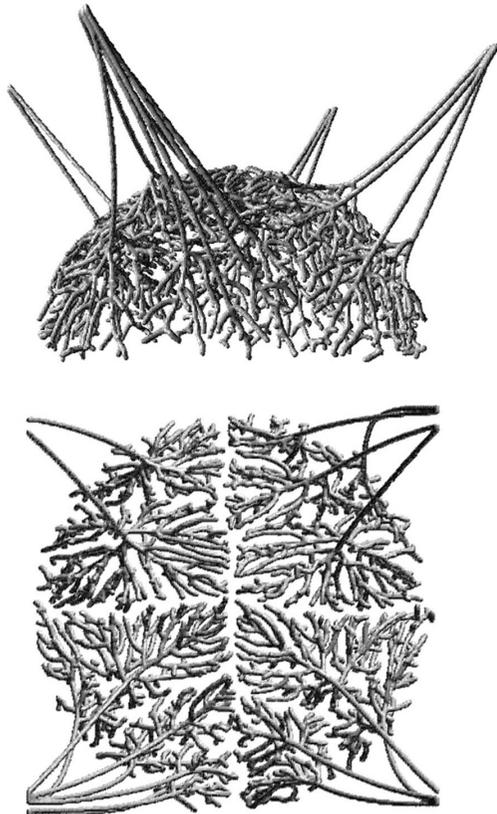


Fig. 3.3.2.5. Vista en planta y en perspectiva de una venación con varias raíces agrupadas en cuatro puntos y auxinas sobre un casquete semiesférico.

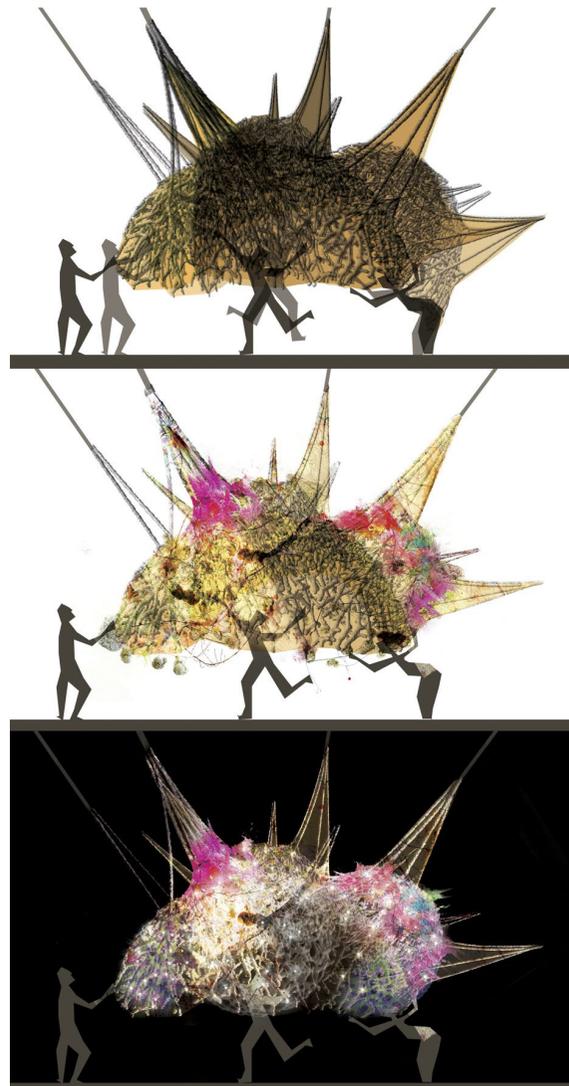


Fig. 3.3.2.6. Collages realizados partiendo de la venación anterior, que muestran el carácter interactivo, la capacidad de crecer y la implementación digital del prototipo.

auxinas y las raíces contenidas en la misma superficie plana (ver Fig. 3.3.2.3).

Posteriormente se sacan las raíces a otro plano superior y se realizan pruebas con las auxinas contenidas en un plano, y distribuidas en un volumen (ver Fig. 3.3.2.4).

Las siguientes pruebas se realizan colocando las auxinas sobre un casquete semiesférico con 4 puntos donde se agrupan las raíces que simulan los tensores desde los que el prototipo se cuelga. Al ser una venación abierta (cada auxina se conecta con la raíz más cercana) y no cerrada (cada auxina se conecta con varias raíces), se producen discontinuidades en la venación, dando lugar a cuatro cuadrantes diferenciados (ver Fig. 3.3.2.5).

Como primera aproximación a la geometría global del prototipo se realizan una serie de collages con varias esferas nervadas, que sugieren el carácter interactivo del prototipo: deformación de la geometría como respuesta a los movimientos de los usuarios en el interior; posibilidad de crecimiento a través de la integración de organismos vivos; implementación de lo físico con lo digital, mediante

dispositivos lumínicos y proyecciones de video mapping (ver Fig. 3.3.2.6).

La definición de la forma global se realiza paramétricamente en Grasshopper, partiendo de tres burbujas intersecadas entre sí, para generar un espacio interior complejo que se aleje de la geometría pura de una semiesfera. El conjunto se corta por un plano horizontal a 90 cm del suelo para permitir el acceso desde abajo al interior. La esfera más pequeña se mantiene en un plano superior para generar un espacio cóncavo en el que poderse introducir y permanecer suspendido (ver Fig. 3.3.2.7 y 3.3.2.8).

A la geometría resultante se le aplica un algoritmo de remallado triangular a través del componente de Grasshopper “MeshMachine”, desarrollado por Daniel Piker en abril de 2014⁷. Este componente, que no existía cuando hicimos el prototipo TIE, está basado en sus estudios sobre remallado dinámico que hemos analizado en el capítulo 2.4.2.

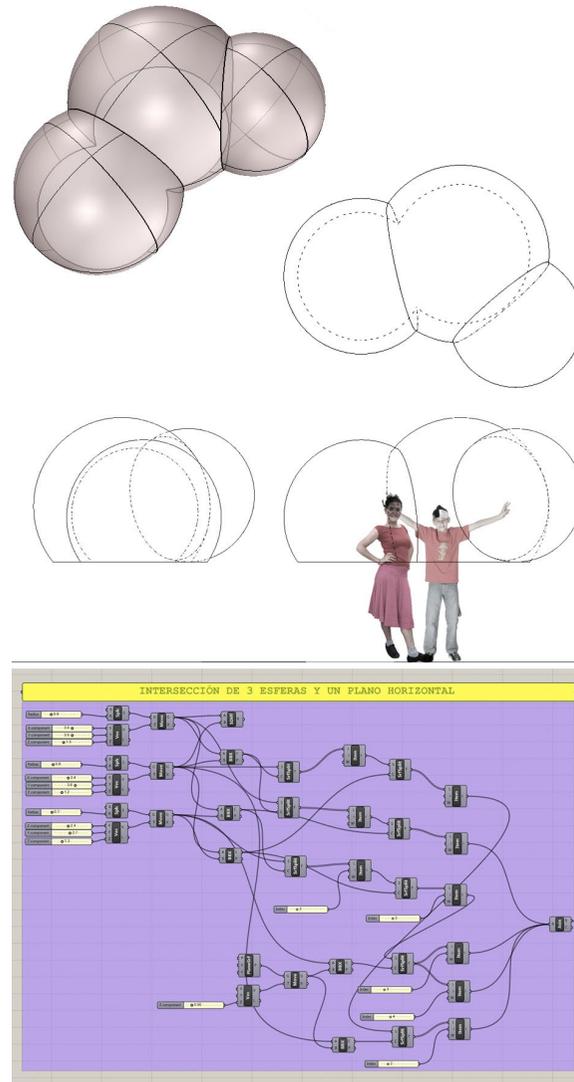


Fig. 3.3.2.7. Definición paramétrica de la geometría global realizada en Grasshopper. Tres esferas de radios 60, 70 y 80 cm respectivamente intersecan entre ellas y con un plano horizontal a 90 cm del suelo.

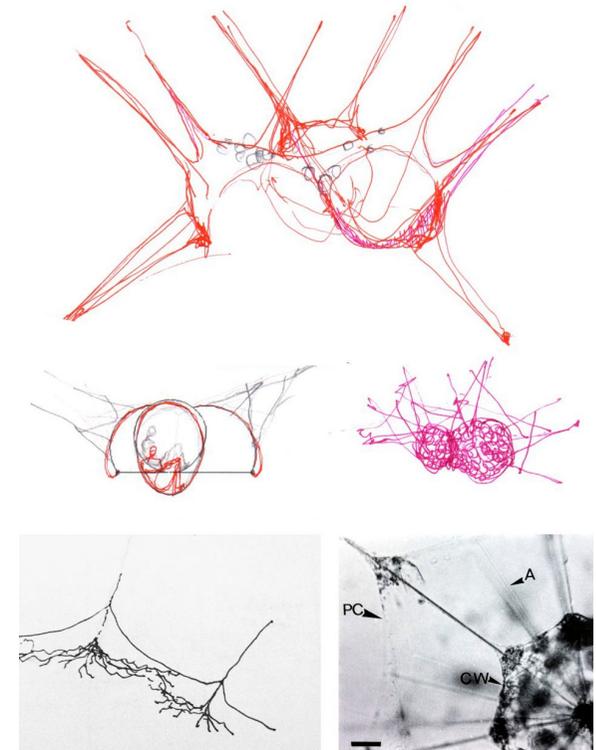


Fig. 3.3.2.8. Croquis de proceso en los que se estudia la membrana flexible con posibilidad de ser habitada y la estructura traccionada de sustentación. Abajo a la derecha comparación con la membrana celular de un radiario del grupo *Acantharia*, traccionada por las espículas (ver pág. 59).

⁷ <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/dynamic-remeshing-now-with-feature-preservation-curvature>

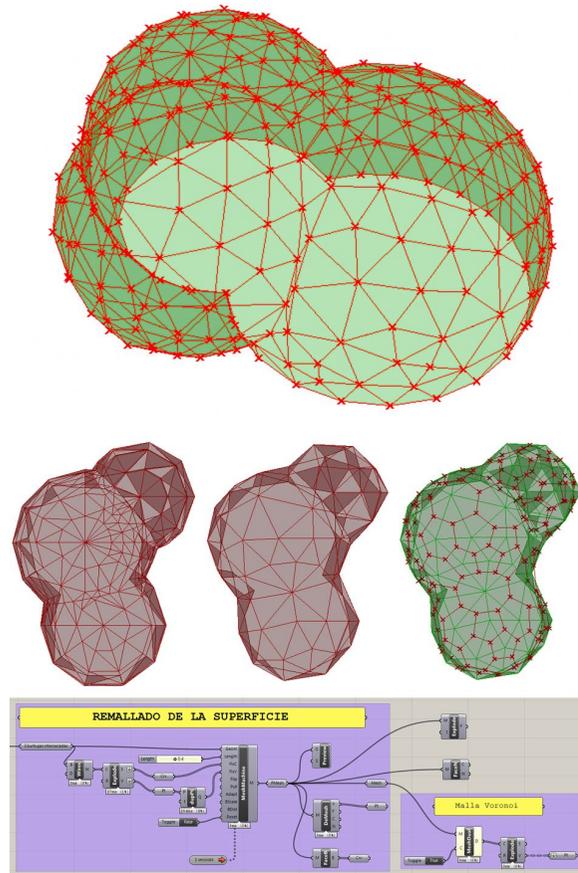


Fig. 3.3.2.9. Arriba, primera prueba de remallado triangular con longitud de arista 20 cm. En medio, trabajo del algoritmo de remallado con una longitud de arista de 40 cm, de izquierda a derecha: estado inicial, estado final y malla dual. Abajo, definición paramétrica de las mallas.

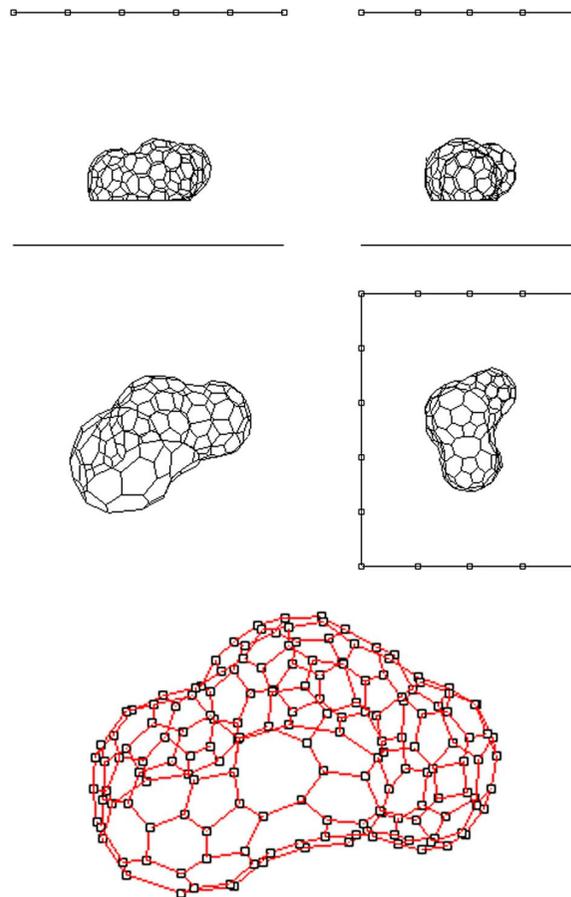


Fig. 3.3.2.10. Vistas de la malla definitiva (alzados, planta y perspectiva), detallando la posición respecto del hueco del forjado superior y los 18 puntos de anclaje en la barandilla.

Las primeras pruebas de remallado se realizan con gran cantidad de puntos, generándose una malla que reproduce fielmente la geometría de partida, pero dando lugar a demasiada cantidad de celdas para ser producidas. Finalmente se opta por un remallado triangular de longitud media de aristas 40 cm. A partir de esta malla se generan las polilíneas duales gracias al componente “Mesh Dual”, obteniéndose 83 celdas no planas con 554 vértices (ver Fig. 3.3.2.9).

El lugar previsto para la colocación del prototipo es una zona de la planta principal del MediaLab Prado que tiene una doble altura generada por un hueco en el forjado superior de 5,5 x 4,4 m. De esta manera, los 18 soportes de la barandilla del forjado superior se convierten en los puntos de anclaje de la estructura nervada traccionada (ver Fig. 3.3.2.10). Por otro lado, como todos los puntos de anclaje están en un plano superior, a 4,7 m del suelo, se descartan los puntos de la malla inferiores para construir la venación.

El algoritmo de venación desarrollado en Processing se aplica a la geometría definitiva

va, tomando como auxinas los 377 vértices de la malla seleccionados, y como raíces, los 18 puntos de los soportes de la barandilla superior. El algoritmo, sin embargo, sólo necesita 7 de las 18 raíces para llegar a todas las auxinas de manera eficaz (ver Fig. 3.3.2.11).

La venación resultante se toma como referencia teórica y no literal en la construcción final del prototipo, ya que encontramos los siguientes conflictos: las venas no están tensadas y aparecen cambios de dirección sin que exista una bifurcación que los justifique; las raíces principales se bifurcan demasiado cerca de la geometría, produciéndose en ocasiones la penetración de los nervios en el interior de la membrana; el algoritmo no tiene en cuenta la fuerza de la gravedad y el peso de la malla, apareciendo nervios que se bifurcan hacia arriba provocando una falta de tensión en la realidad física.

Se realizan varios intentos fallidos de subsanación de los errores detectados, tanto modificando el algoritmo en Processing como a través del software de *form finding* Kangaroo. Finalmente se opta por tomar la venación como una guía topológica (que determina qué puntos están unidos con cuáles y en qué orden) y establecer las longitudes de los tramos de cuerda replanteándolos *in situ*.

Volviendo a la geometría de la malla, observamos que las celdas resultantes cumplen con algunas de las características de teselaciones irregulares eficientes que hemos estudiado en epígrafes anteriores: tendencia a formar ángulos de 120° y de 90° en los bordes; nudos en los que confluyen siempre tres aristas; predominancia de celdas hexagonales. Sin embargo, encontramos algunos elementos que no responden a las teselaciones eficaces estudiadas: una celda de 9 lados y otra de 4, además de gran cantidad de pentágonos adyacentes (ver Fig. 3.3.2.12). Esto es debido a la poca resolución de la malla (bajo número de celdas) unido a los grandes cambios de curvatura de la forma global (transiciones de curvaturas cóncavas y convexas provocadas por las intersecciones entre esferas).

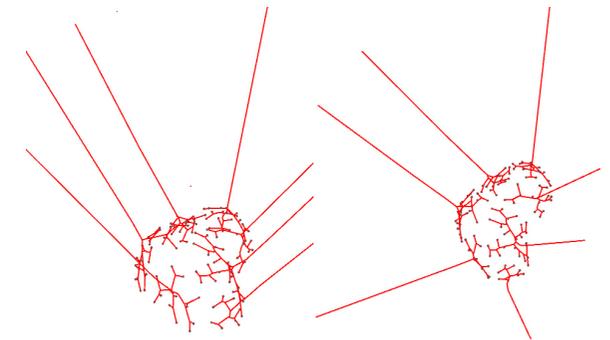


Fig. 3.3.2.11. Algoritmo de venación desarrollado por Nacho Cosío en Processing. Los 377 puntos de la malla se conectan a 7 puntos de anclaje de los 18 disponibles.

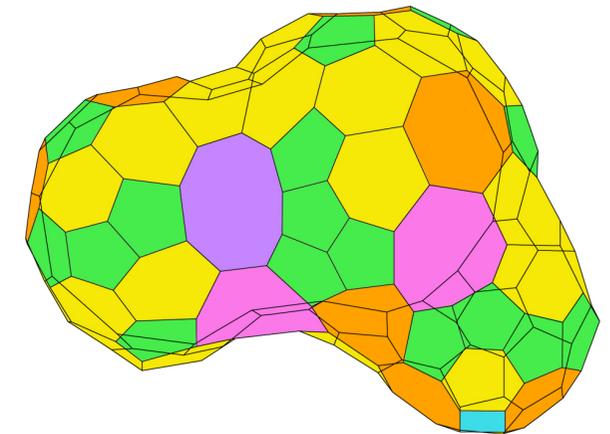


Fig. 3.3.2.12. Análisis geométrico de la malla: descartando las celdas de borde se obtienen 26 hexágonos (en amarillo), 17 pentágonos (en verde), 13 heptágonos (en naranja), tres octógonos (en rosa), un eneágono (en morado) y un cuadrilátero (en azul). Se observa que las celdas de mayor número de lados se sitúan principalmente en las curvaturas cóncavas y las de menor número de lados en las convexas.

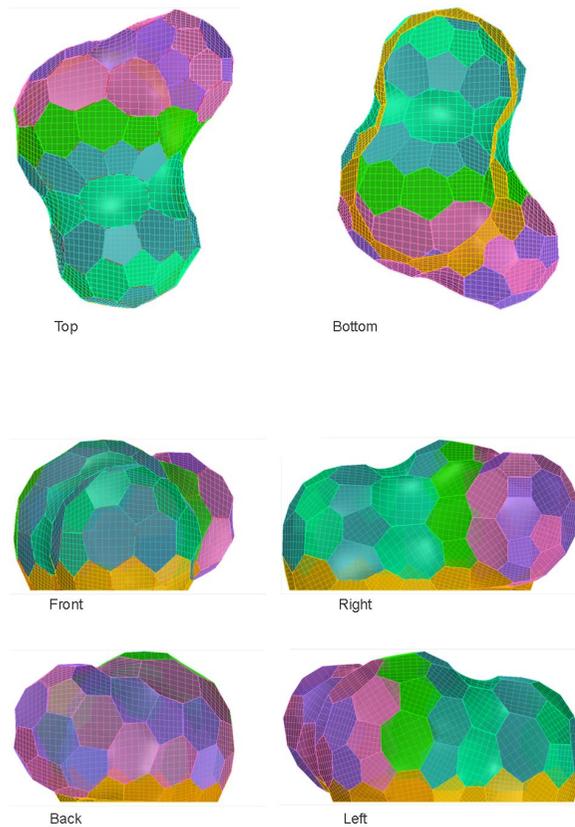


Fig. 3.3.2.13. Vistas generales de la geometría con las celdas coloreadas según su disposición en hileras para facilitar su producción.

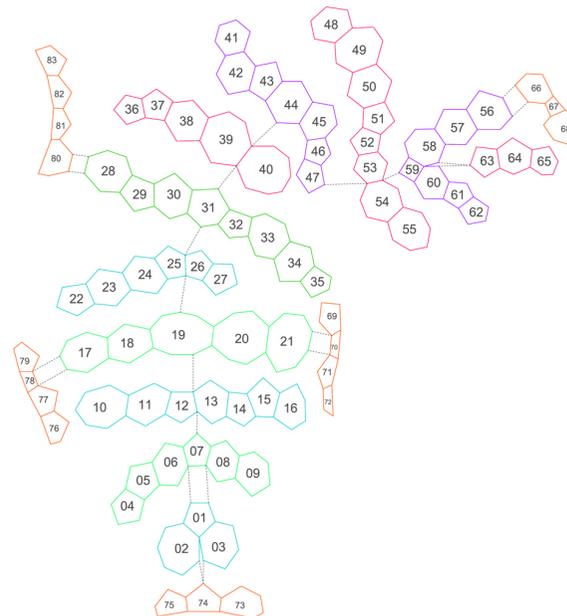


Fig. 3.3.2.14. Despliegue y numeración de las celdas formando hileras, de tal manera que ninguna celda se solapa. Este sistema permiten la construcción de cada hilera de manera independiente y de una sola vez.

En este caso decidimos primar la viabilidad constructiva sin renunciar a la complejidad de la forma y seguimos adelante con la malla generada.

Las celdas de la malla no son planas, lo cual no es un inconveniente porque se producen en un material flexible como es el látex. Sin embargo, es necesario su despliegue digital para poder fabricar las celdas en su verdadera magnitud. La geometría se divide en hileras que se colorean según su posición. Cada celda se triangula y se despliega en Rhinoceros generando el documento guía con las celdas numeradas para la producción (ver Fig. 3.3.2.13 y 3.3.2.14).

La membrana se fabrica en látex líquido, durante el taller abierto de junio de 2015 en el MediaLab Prado. Cada hilera se produce independientemente mediante la colocación de listones de borde pegados sobre plástico transparente en el que previamente se ha trazado la huella de las celdas ploteadas en papel. Una vez seco el látex se aplica polvo de talco y se colocan cintas de tela para delimitar las celdas (ver Fig. 3.3.2.15).

Después de fabricar las 16 hileras durante tres días, comienza la fase de unión entre ellas utilizando las mismas cintas de tela pinceladas con látex. El problema surge cuando se empiezan a generar los volúmenes ya que es difícil mantener la junta plana y el látex tarda varias horas en solidificarse. Este es el motivo por el que se cambia el sistema de unión y las cintas se comienzan a pegar con cianoacrilato (loctite), ver Fig. 3.3.2.16.

La membrana terminada se compone de 83 celdas cuyas aristas se hayan delimitadas por las cintas, que a su vez dejan 10 cm sobrantes a cada lado. Por tanto, en cada vértice confluyen 3 cintas preparadas para ser anudadas a otra elástica que forma el primer tramo de venación.

La venación comienza en los vértices de las celdas con cinta elástica para conseguir la máxima tensión posible. Estos primeros tramos se agrupan siguiendo las directrices del algoritmo y se anudan al siguiente tramo de venaciones constituidos por cuerdas de 4 mm. A su vez, estas cuerdas se vuelven a agrupar y se anudan al último tramo de vena-



Fig. 3.3.2.15. Producción de la membrana. Las celdas se imprimen por grupos en DIN A1 y se trasladan a las bandas plásticas con cinta siguiendo la disposición de las hileras. Los contornos de las hileras se delimitan pegando listones de madera DM de 3 mm fabricados en corte láser, que se colocan en esvástica o cortándolos a medida. Una vez confeccionada la hilera se vierte el látex que se distribuye con ayuda de espátulas. Tras 24 horas el látex seca y se aplica polvo de talco para evitar el tacto pegajoso. Posteriormente se colocan cintas de tela pinceladas con látex para delimitar las celdas.



Fig. 3.3.2.16. Proceso de unión de las hileras entre sí. Se comienza utilizando el sistema de pegado de las cintas con látex encontrando dificultades debido al tiempo de secado y la imposibilidad de mantener la junta plana cuando se empiezan a generar las curvaturas de la membrana. Finalmente se opta por el pegado con adhesivo instantáneo (loctite) y agilizando enormemente proceso.



Fig. 3.3.2.17. Proceso de anudado y generación de la venación, constituida por cintas elásticas en un primer tramo, cuerdas de 4 mm en el segundo tramo y cuerdas de 6 mm en el tercero.



Fig. 3.3.2.18. Proceso de izado de la membrana y tensado de la estructura de venación traccionada.

ción formado por cuerdas de 6 mm que llegan hasta los puntos de anclaje a 4,7 m de altura, en las barandillas del forjado superior.

En un primer momento se sigue fielmente las conexiones dictadas por el algoritmo de venación desarrollado, pero una vez colgada la membrana, se reajustan algunas de las direcciones para evitar pliegues de las celdas que al estar fabricadas en material flexible no admiten compresiones (ver Fig. 3.3.2.17 y 3.3.2.18).

Por este motivo, finalmente se utilizan 12 de los 18 puntos disponibles para el anclaje, y no sólo 7 como indicaba el algoritmo.

Paralelamente a la fabricación de la membrana, se realizan otros elementos secundarios a modo de texturas que colonizan el interior del habitáculo. Estos elementos se basan en tejidos celulares vistos al microscopio, que se calcan para producir moldes de madera DM cortados en láser. Los moldes se reproducen en látex de dos maneras: por un lado se obtienen piezas independientes a las que se añaden especias para generar una mayor diversidad; y por otro se generan tejidos

perforados utilizando las piezas de madera pegadas sobre plástico. Además de estos elementos se incorporan plantas cedidas por el vivero del Parque del Retiro, que se introducen en sacos de látex y se adhieren a la membrana. De esta manera, se genera un interior repleto de “células” artificiales y organismos vivos.

Durante esta última fase de montaje, se decide no permitir que las personas se suban a la zona cóncava diseñada para tal fin. El motivo es la poca confianza en las juntas, la gran deformabilidad de la membrana y las grandes descompensaciones que de cargas que se producirían. Hacemos una prueba con un bebé y después llenamos esa zona de plantas (ver Fig. 3.3.2.19).

Finalmente el prototipo, al que se le da el nombre de *Protosphaera*, se presenta el 4 de julio de 2015 en MediaLab Prado (ver Fig. 3.3.2.20), en un evento en el que se implementa el prototipo físico con proyecciones de video mapping, movimientos provocados por la actuación de la bailarina Llomar Cualpas y recitales de Los Hedonistas.

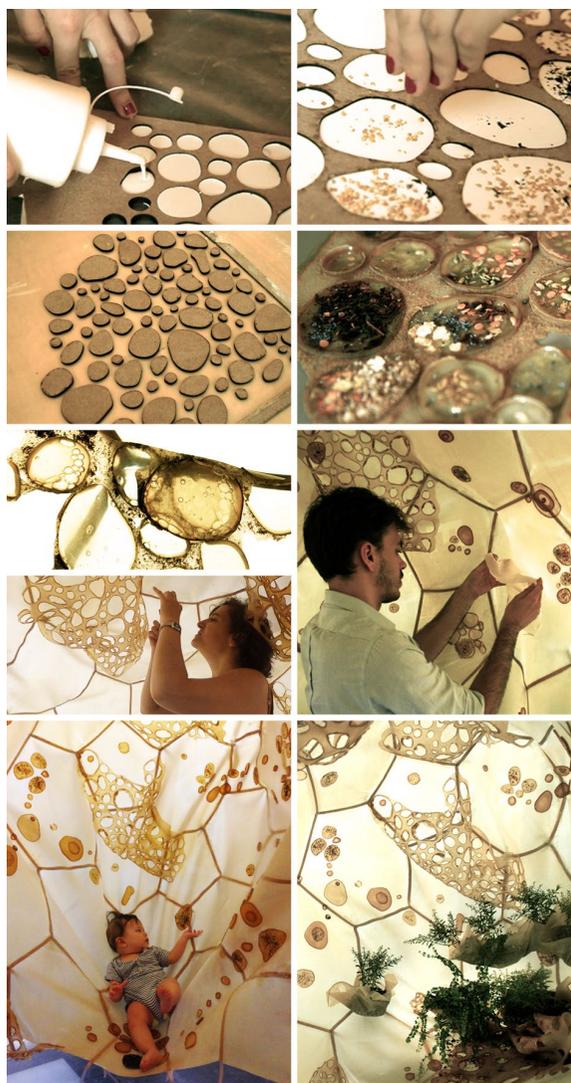


Fig. 3.3.2.19. Proceso de producción y colocación de los elementos interiores realizados en látex con moldes de DM cortados en láser. Prueba de carga con un bebé de 6 kg en la zona cóncava interior y colocado de plantas en pequeños sacos realizados en látex. .



Fig. 3.3.2.20. Cartel de presentación del evento, realizado por la superposición de una fotografía del montaje y una imagen de un cultivo de hongos que se realiza en una pecera durante la semana de producción, como parte de la experimentación con organismos vivos.



Fig. 3.3.2.21. Evento de presentación del prototipo con proyecciones de video mapping, actuaciones de la bailarina Llomar Cualpas y recitales de Los Hedonistas (tratando temas como lo vivo y el distanciamiento de lo muerto).

Las proyecciones se realizan desde tres puntos diferentes cubriendo todo el volumen de la pieza. Dos de los proyectores se utilizan para proyectar audio visuales en movimiento, generadas con algoritmos generativos basados en los crecimientos de tejidos celulares; y el tercer proyector se conecta a un microscopio que proyecta imágenes de muestras de sales, vegetales y hongos a tiempo real.

Las fotografías realizadas durante el evento (ver Fig. 3.3.2.21) muestran el carácter orgánico de la pieza. Es interesante observar cómo la membrana se vuelve casi transparente cuando los puntos de luz provienen del interior (la bailarina lleva linternas en piernas y brazos), y es opaca cuando sólo actúan las proyecciones exteriores.

La percepción de este prototipo de investigación como un “organismo” artificial “vivo” se consigue gracias al conjunto físico y digital, que solo podemos reproducir a través de los vídeos realizados⁸:

<https://vimeo.com/133971948>, video corto donde se ve el prototipo en movimiento.

<https://vimeo.com/133889795>, vídeo largo (13 min) que además relata el proceso de trabajo.

⁸ Las fotografías mostradas en este epígrafe y la documentación audiovisual de los vídeos han sido generadas por la autora de esta investigación, Raúl González, Carlos Fernandez, Sergio Arias y Berta Gutierrez. La realización y montaje del primer vídeo es de Sergio Arias y la del segundo vídeo es de Raúl González, con música de Paisajes Invisibles.

Toda la documentación gráfica de este epígrafe ha sido realizada por la autora de esta investigación, salvo las relativas a los algoritmos generativos (Fig. 3.3.2.3-5 y 3.3.2.11), realizadas por Jacobo Bouzada y Nacho Cosío.