

“El arquitecto del futuro se basará en la imitación de la naturaleza, porque es la forma más racional, duradera y económica de todos los métodos”.  
(Antoni Gaudí)



UNIVERSITAT  
POLITÀCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR  
D'ARQUITECTURA

Clara M<sup>a</sup> Pérez Piñero

Trabajo Final de Grado  
en Fundamentos de la Arquitectura  
Abril 2019

Tutora: M.Ángeles Álvarez González

## CONSTRUCTORES DE LA NATURALEZA SUS TÉCNICAS







## **RESUMEN**

En este trabajo se demuestra la capacidad de algunos animales, no especialmente complejos, de crear sofisticadas construcciones con desarrollo tecnológico notable. Se ofrece, por tanto, un amplio abanico de las técnicas que son comúnmente utilizadas para modificar su entorno, creando nuevos ambientes, y adecuarlo a sus necesidades más básicas.

De este modo, es imprescindible estudiar previamente el funcionamiento del comportamiento animal y cuales son los criterios más influyentes en el desarrollo de la construcción de sus propios habitáculos.

Además, se evidencia que sin duda el ser humano ha obtenido de los animales las distintas técnicas, para aplicarlas después a usos diversos y desarrollarlas hasta alcanzar una gran eficiencia y complejidad, ofreciendo una visión crítica de la aplicación de sus técnicas a nuestras construcciones.

## **PALABRAS CLAVE**

Técnicas, habitáculo, construcción, animales, comportamiento, biomímesis

## **ABSTRACT**

This work demonstrates the capacity of some animals, not very complex, to create sophisticated constructions with remarkable technology. It offers, therefore, a wide range of techniques that are used to modify their environment, creating new environments, and adapt it to their most basic needs.

In this way, it is essential to study previously the behavior of animals and what are the most influential criteria in the development of the construction of their own living spaces.

In addition, it was evidenced that, without a doubt, the human being has obtained the results of the animals, the posterior techniques to multiple uses and advanced to the latest technology, a critical vision of the application of the techniques to our constructions.



## **KEY WORDS**

Techniques, living spaces, constructions, animals, behaviour, biomimicry

## **RESUM**

En aquest treball es demostra la capacitat d'alguns animals, no especialment complexos, de crear sofisticades construccions amb desenvolupament tecnològic notable. S'ofereix, per tant, un ampli ventall de les tècniques que són comunament utilitzades per a modificar el seu entorn, creant nous ambients, i adequar-lo a les seues necessitats més bàsiques.

D'aquesta manera, és imprescindible estudiar prèviament el funcionament del comportament animal i quins són els criteris més influents en el desenvolupament de la construcció dels seus propis habitatges.

A més, s'evidencia que sens dubte l'ésser humà ha obtingut dels animals les diferents tècniques, per a aplicar-les després a usos diversos i desenvolupar-les fins a aconseguir una gran eficiència i complexitat, oferint una visió crítica de l'aplicació de les seues tècniques a les nostres construccions.

## **PARAULES CLAU**

Tècniques, habitacle, construcció, animals, comportament, biomímesis



| <b>ÍNDICE</b>  | <b>PÁGINA</b> |
|--|---------------|
| <b>1.</b> Introducción   | 7-10          |
| <b>2.</b> Conducta animal  | 11-14         |
| <b>3.</b> Criterios que influyen en la construcción:                       | 15-19         |
| 3.1. Protección frente al entorno físico                                   | 16-18         |
| 3.2. Protección frente al entorno biológico                                | 19            |
| <b>4.</b> Las técnicas constructivas                                       | 21-56         |
| 4.1. Insectos:   | 23-34         |
| - Abejas   | 23-26         |
| - Avispas  | 27-29         |
| - Termitas   | 31-34         |
| 4.2. Arácnidos:  | 35-38         |
| - Arañas   | 35-38         |
| 4.3. Roedores:   | 39-42         |
| - Castores   | 39-42         |
| 4.4. Aves:   | 43-54         |
| -Faisán australiano  | 49-50         |
| -Carbonero cresta negra  | 51            |
| -Pájaro tejedor  | 52-53         |
| -Pájaro carpintero   | 54            |
| 4.5. Conceptos básicos de las técnicas constructivas                       | 55-56         |
| <b>5.</b> Analogías entre la arquitectura animal y la arquitectura humana. | 57-67         |
| 5.1. Ejemplos prácticos. Aplicación de técnicas animales.                  | 58-67         |
| <b>6.</b> Discusión-Conclusiones   | 69-72         |
| <b>7.</b> Bibliografía   | 73-78         |
| <b>8.</b> Créditos de imágenes   | 79-88         |





## 1. INTRODUCCIÓN

En tiempos de tecnología e innovación se tiene la percepción de que el único arquitecto en este mundo es el hombre. No es capaz de mirar alrededor y apreciar las construcciones fantásticas que nos rodean, realizadas por otras especies animales que comparten con nosotros nuestro planeta.

Y, es incuestionable que algunas construcciones del ser humano por sí mismas evidencian nuestra creatividad y aptitudes. No obstante, es totalmente necesario hacer un alto en el camino, explorar las fronteras del diseño para comprender y valorar las soluciones adoptadas por los animales. Y es que la cualidad de fabricar estructuras complejas no es una exclusiva del Homo sapiens, a pesar de que nos gusta marcar diferencias entre nuestra especie y otras especies animales.

Se trata de reivindicar una arquitectura menos conocida y, por consiguiente, menos valorada y/o estudiada de estos grandes arquitectos que con pocos recursos, han sido capaces de desarrollar extraordinarias herramientas y técnicas con el fin único de la supervivencia y protección. Se puede plantear como un paso atrás para indagar en el origen de la arquitectura humana, aquella que tiene como base, al igual que la animal, la protección y el refugio.

El término “arquitectura animal” fue acuñado en 1974 por el premio Nobel Karl Von Frisch (1886-1982), “Esta arquitectura nos muestra una de las facetas más hermosas y misteriosas de la evolución. Muchas veces con fines reproductivos o simplemente organizativos, algunos animales son capaces de elaborar estructuras sorprendentes que, no en vano, han servido de fuente de inspiración a diseñadores humanos en sus creaciones”.

El etólogo austriaco exponía que los seres humanos nos enorgullecemos de nuestros logros arquitectónicos pero, se cuestionaba si estos eran más meritorios que los de esos maestros constructores que siguen inconscientemente sus instintos.



Fig 1.1. Baya tejedor construyendo su nido

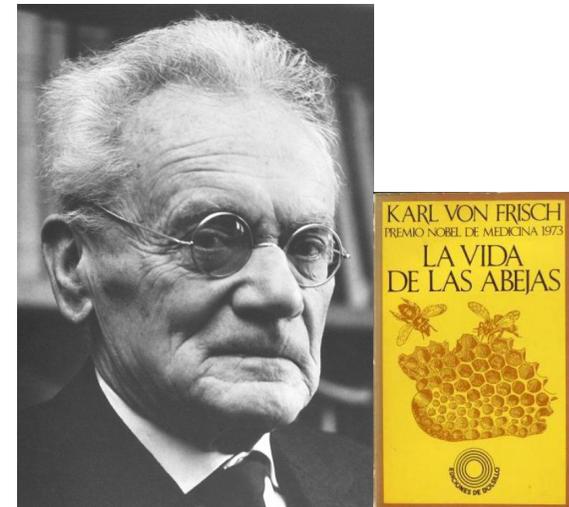


Fig 1.2. Los estudios del comportamiento de animal le valieron a Karl Von Frisch, el premio Nobel de Medicina y Fisiología, que compartió con Konrad Lorenz y Nikolas Tinbergen, por sus descubrimientos sobre la organización y el desencadenamiento de las pautas de la conducta individuales y sociales



Fig 1.3. Arquitectura tradicional de Palencia: palomar en Mazariegos. La arquitectura popular surge como respuesta a las necesidades y posibilidades de los usuarios y a las exigencias derivadas de la tradición cultural de la zona geográfica en que se produce al igual que sucede con la arquitectura llevada a cabo por los animales

Al igual que gran parte de la arquitectura tradicional, un aspecto clave es la utilización de los recursos propios de cada emplazamiento. Se ha respetado el lugar y estamos ante la arquitectura más sostenible que posiblemente exista.

Concluía que el comportamiento humano, es, sin duda, el resultado de la evolución de ciertas conductas animales y que para aquellas personas a las que les interese esas conexiones, encontrarán, lo más probable, en la arquitectura animal un tema que les apasionará para el resto de su vida.

Poco a poco, aquellas personas más curiosas por temperamento, irán entendiendo algo que a primera vista parecía incomprensible y les proporcionará una profunda satisfacción. Sin embargo, la suma total de misterios sin resolver sigue siendo inconmensurablemente más grande que la de nuestros hallazgos respecto a este tema.

Al mismo tiempo, se intenta tomar una posición contraria a considerar el diseño como una peculiaridad exclusiva del ser humano. Deleitan nuestro sentido estético y nos recuerdan que nuestra especie es sólo una de las millones que se esfuerza por resolver el reto principal de la existencia.

Aparece entonces, la voluntad de conocer cómo, dónde y con qué desarrollan sus obras para abstraer de ellas conceptos que puedan servir como futura fuente de inspiración a diseñadores humanos en sus creaciones.

Es posible que el tema de la arquitectura animal suene a una de esas “curiosidades del mundo animal” encantadoras, pero carentes de un interés científico que justifique su estudio o su investigación. Sin embargo, cuando se comienza a investigar los métodos de construcción de ciertos animales, se encuentran unas estructuras asombrosamente delicadas y unos principios arquitectónicos muy complejos que más adelante serán analizados en profundidad.

Resulta evidente que las estructuras que construyen la gran mayoría de especies animales para su propio cobijo y el de sus crías son tan esenciales para su supervivencia como lo es la arquitectura para la existencia y la cultura humana. Por tanto, se puede generar paralelismos entre las funciones que cumplen las construcciones animales y las humanas: modifican, para el beneficio de las especies, el mundo inmediato, incrementando la predictibilidad y el orden del hábitat.

Parafraseando al principal especialista en los hábitos constructores animales, Michael Hansell, en una de sus conferencias: “ Construye un nido y cambiarás el mundo<sup>1</sup>”



Fig 1.4. Las aves construyen sus nidos principalmente siguiendo tres objetivos: cuidar a sus crías, atraer pareja, prevenir parásitos y protegerse de los depredadores

1. PALLASMAA, J. (2001). Animales arquitectos. Lanzarote, Islas Canarias: Fundación César Manrique.pp 11



## 2. CONDUCTA ANIMAL

Los parámetros que regulan el comportamiento animal han sido estudiados a lo largo de la historia y como muchos otros temas en el campo de la biología, recibió su primer gran impulso con la obra del prestigioso naturalista inglés, Charles Darwin. Con dicho punto de partida y con el fin de llegar a la teoría actual, es necesario realizar un repaso a las más importantes y cómo han evolucionado hasta la idea determinante.

El comportamiento de los animales ha despertado el interés por numerosas razones, pero siempre han destacado por las llamativas manifestaciones que se podían observar en la naturaleza, cómo la han creado y moldean continuamente.

En el origen de las especies, Charles Darwin incluyó un capítulo acerca del instinto, término utilizado en su tiempo para hacer referencia a la conducta natural de los animales, en el que literalmente exponía “No intentaré dar definición alguna del instinto. Sería fácil demostrar que comúnmente se abarcan con un mismo término varios actos mentales diferentes; pero todo el mundo comprende lo que se quiere expresar cuando se dice que el instinto impulsa al cuclillo a emigrar y poner sus huevos en nidos de otras aves. Comúnmente se dice que es instintivo un acto para el que nosotros necesitamos experiencia que nos capacite para realizarlos, cuando lo ejecuta un animal, especialmente si es un animal muy joven, sin experiencia, y cuando es realizado del mismo modo por muchos individuos, sin que conozcan para qué fin se ejecuta. Pero podría yo demostrar que ninguno de estos caracteres es universal<sup>2</sup>”.

Este campo de estudio comenzó con Darwin, pero no terminó con él. Hubo cambios significativos después de él en el comportamiento animal. No obstante, sus predecesores no eliminan el principio general sino que lo refinan y desvelan nuevas hipótesis. La teoría darwiniana se presenta como un esquema libre con posibilidad de completar.

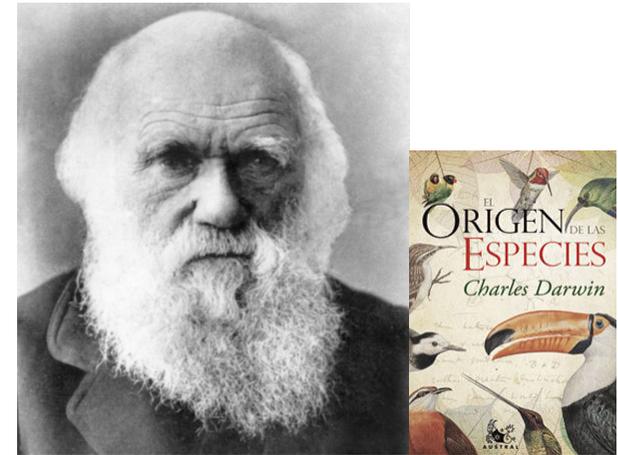


Fig 2.1. Para Darwin, el instinto es aquel componente conductual que da lugar a un tipo de acción no aprendida, que presenta como objetivo el asegurar la supervivencia del individuo y de su misma especie, al adaptarse eficazmente en el medio.

2. DARWIN, C. (2009). El Origen De Las Especies. Capítulo VIII. El instinto. Pozuelo de Alarcón: Espasa Calpe.pp 202.

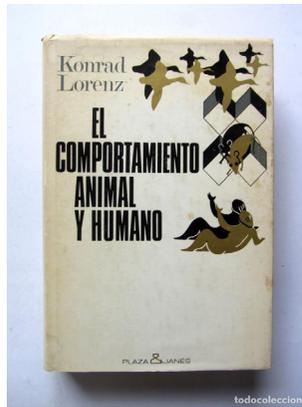
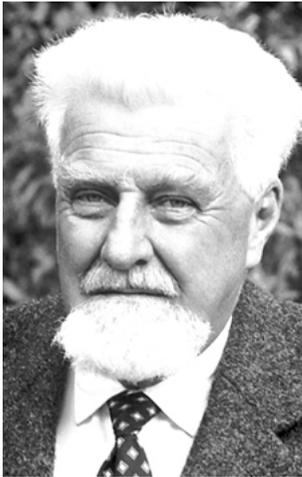


Fig 2.2. Lorenz explica en su libro que no todo lo adquirido debe ser atribuido a la experiencia, ni al aprendizaje, sino que nuestro ADN contiene cierta información que nos lleva a actuar ante ciertos estímulos

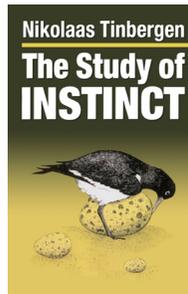


Fig 2.3. Niko Tinbergen brindó fundamentos a la etología, con estudios tanto a nivel experimental como observacional. Sus estudios dieron lugar al campo conocido como ecología comportamental que estudia el comportamiento animal

Hasta la década de 1930, a través de los escritos de Konrad Lorenz<sup>3</sup> y, más adelante, de los de Niko Tinbergen<sup>4</sup>, no empezó a tomar cuerpo una teoría más amplia acerca del comportamiento animal. Estos hombres fundaron la escuela europea de la etología (ciencia derivada de la zoología que estudia la conducta animal y formula leyes y modelos para intentar entender cómo, cuándo y por qué funciona, así como los factores que le afectan).

Tanto Konrad Lorenz como Niko Tinbergen partían de que “existen elementos comportables heredables desencadenados automáticamente por estímulos del ambiente”. Observar y describir lo que hacen los animales es, de por sí, fascinante y, como recalcan los primeros etólogos, constituye también un preámbulo esencial a un análisis más científico de su conducta.

Los etólogos y psicólogos adoptan enfoques diferentes, pero fácilmente combinables, respecto la conducta animal. En el caso de los psicólogos, la capacidad de aprendizaje de los animales y la flexibilidad que ésta otorga a su comportamiento son los principales puntos de estudio, ya que dichos aspectos pueden arrojar luz sobre los atributos equivalente de los humanos. Sin embargo, para los etólogos el aprendizaje tenía pocos efectos y tendían a concentrarse en modelos repetidos y similares formalmente en toda una especie, denominándolos “innatos” o “instintivos”, que eran supremos.

Desde el punto de vista etológico, existe un concepto denominado “pautas de acción fijas”, acciones que no se dejan de realizar hasta que se consiguen culminar, que están relacionadas con su actuar, y son en cierto modo, susceptibles de predicción. En su investigación, Barnett<sup>5</sup>, subrayaba que “tal conducta nunca es completamente uniforme, pero es posible distinguirla de formas de conducta desarrolladas gradualmente (aprendidas) por un individuo en respuesta a sus propias circunstancias”.

La realización de las telas de araña, los panales de abejas y avispas, los nidos de las aves, las madrigueras de ciertos mamíferos son algunos de los ejemplos que explican este tipo de pautas de acción fija.

3. LORENZ, K. (1975). El Comportamiento Animal Y Humano. Barcelona: Plaza y Janés.

4. TINBERGEN, N (2003). The Study Of Instinct. Oxford: Clarendon Press

5. BARNETT, S.A (1981). La conducta de los animales y del hombre. Madrid: Ed. Alianza.pp 204.



El estudio de la evolución conductual no es una tarea sencilla, ya que la conducta no deja fósiles a su paso. Lo más que se puede hacer es reconstruir el camino que debe haber seguido a partir de una comparación con la conducta de especies vivas en la actualidad.

En la batalla en torno al instinto y al aprendizaje, el resultado fue una combinación de ambas teorías. Se ha admitido que ni el instinto ni el aprendizaje pueden ignorarse en el desarrollo de cualquier patrón de comportamiento. Los genes y el medio ambiente afectan a la totalidad de la conducta.

El comportamiento forma parte connatural del propio animal, es decir, que es propio o natural del individuo, asocia al individuo con el medio que lo rodea a través de sus reacciones, incluyendo sus adaptaciones. A través del estudio del comportamiento se puede describir la conducta y las respuestas que generan con el hábitat que le rodea o con otros individuos.

Con esta síntesis se atisba a entender que cada especie tiene unas pautas de conducta específicas que puede desarrollar y adaptar dependiendo del entorno en el que se encuentre. Por lo tanto, se entiende el comportamiento como el modo en el que el animal interviene con su medio ambiente, los cambios que se producen tanto dentro como fuera de éste. La combinación de ambos factores; instinto y aprendizaje, será fundamental a la hora de describir y entender el desarrollo de sus técnicas constructivas.



### **3. CRITERIOS QUE INFLUYEN EN LA CONSTRUCCIÓN**

### 3. CRITERIOS QUE INFLUYEN EN LA CONSTRUCCIÓN

Los animales proyectan sus técnicas y construcciones hacia su naturaleza más primaria y básica como individuo y lo proyectan hacia su descendencia.

Para entender realmente lo que sucede cuando los animales construyen, es necesario ser consciente de los retos que estas criaturas están intentando superar, además de conocer los recursos y limitaciones que tienen que enfrentar recurriendo a las habilidades que la evolución les ha aportado. No obstante, se ha de reconocer la posibilidad de que los animales usen, en cierto grado, en sus proyectos su aptitud de percepción y creatividad.

Los elementos que intervienen en el correcto desarrollo de un habitáculo con su medio ambiente influyen en el buen funcionamiento de éste, e implica, con frecuencia, que deben relacionarse con el fin de conseguir la eficiencia a su funcionamiento integral.

Es muy importante señalar cuáles son los criterios ambientales que influyen en la construcción de sus habitáculos. Para ello, se toma como base lo expuesto por Michael Hansell<sup>6</sup> en su libro "Animal Architecture and building behaviour".

#### 3.1. Protección frente al entorno físico

##### -Control de la temperatura

Independientemente de que un organismo sea endotérmico o exotérmico, la exposición a temperaturas extremas puede llegar a ser estresante. El animal intenta evitar los cambios bruscos poniendo en práctica diversos elementos que contribuyan a este requisito.

Las dos fuentes más comunes de calor para los organismos provienen principalmente del sol y de su propio metabolismo. Sus técnicas de construcción se desarrollan de tal forma para conservar o disipar este calor.



Fig 3.1. Termiteros de *Amitermes meridionalis* orientados para aprovechar al máximo el calor que necesitan en el Litchfield National Park de Australia.



Fig 3.2. Nido del pájaro sastre

6. HANSELL, M. (2008). Animal Architecture and building behaviour. Oxford: Oxford University Press. pp 2-20



Fig 3.3. *Micrathena gracilis* tejiendo su telaraña en la posición más adecuada para controlar la temperatura.

Para dicho fin, diferentes especies de aves se sirven de musgo, líquenes, plumas, ramitas u hojas con el fin de lograr el aislamiento de los cambios bruscos de temperatura y cierto grado de comodidad.

Además, en insectos como la araña *Micrathena gracilis*, se observa que la elección del lugar, la arquitectura, y su orientación influenciará a la exposición del sol o el calor metabólico generado por el constructor. Su telaraña muestra una orientación dirección norte-sur cuyo propósito es estar constantemente recibiendo los rayos solares irradiados durante las mañanas, así como por las tardes en lugares en sombra, pero una orientación este-oeste en sitios abiertos donde las temperaturas en el ambiente se incrementan cuando el sol se encuentra en el cenit.

#### -Gestión del agua:

Es incuestionable que el agua es un recurso fundamental para nuestras vidas y para que el conjunto de los ecosistemas existentes pueda manifestarse en nuestro planeta. Es por esta razón, por la que su control será imprescindible para conseguir un habitáculo óptimo. Además, no se debe olvidar el control de la humedad, así como la presencia de moho y otros parásitos que pudieran perjudicar el equilibrio.

Los hábitats en los que se encuentran los animales pueden variar de estar completamente secos a totalmente húmedos. En un día muy seco, la principal prioridad será la protección contra la desecación, mientras que, por el contrario, un día muy lluvioso puede ocasionar destrozos importantes. De hecho, la arquitectura hecha de barro o papel desarrolla técnicas de protección y herramientas para dirigir la escorrentía a un lugar seguro.

Varias especies han resuelto este problema que es fundamental para la supervivencia.

Cuando el vapor de agua se convierte en lluvia, la arquitectura animal tiene que abordar una nueva serie de problemas. Destaca el ejemplo de los termiteros de las termitas (descritas en el siguiente apartado) *Cubitermes*, especie que habita en zonas húmedas con abundantes lluvias tropicales, cuyos tejados contribuyen a que el agua no se precipite fluidamente hacia la superficie debido a su forma de “seta”.



Fig 3.4. Termitas *Cubitermes*. Esta especie construye tejados sobresalientes con el fin de proteger la estructura principal de las precipitaciones

Por otra parte, existen algunas especies que aprovechan sus aptitudes para el ambiente marino y terrestre para ofrecer protección a sus madrigueras. Las casas de los castores ubicadas en el medio de una laguna artificial, generada por ellos mismos, son el ejemplo más obvio de esto.

#### -Ventilación y renovación del aire:

La protección contra las temperaturas extremas y contra el riesgo de depredadores, son dos de las funciones principales a la hora de construir, ambas necesitan la creación de una barrera física entre el constructor y el medio ambiente que lo rodea. Esto supone una limitación de intercambio de gases, que conduce a niveles reducidos de oxígeno y bastante altos en dióxido de carbono.

Este problema se acentúa en animales que construyen sus viviendas bajo tierra como los perritos de la pradera, las termitas o los castores. Los perritos de la pradera excavan largos túneles que van entre 1 a 3 metros de profundidad, y realiza varios accesos a diferentes niveles con el fin de hacer circular más fácilmente el aire interno al ingresar a través del más bajo el aire fresco y expulsar por el más alto el aire caliente del interior.

Existen dos respuestas posibles para la adaptación de los habitantes; una conductual y otra fisiológica. La conductual solo se puede conseguir a través de la ventilación, mientras que la fisiológica está completamente relacionada con el funcionamiento de los órganos de los que disponen.

La energía requerida para lograr dicha adaptación, en algunos casos, es proporcionada por el comportamiento de bombeo activo del ocupante; en otros, es la ejecución de la arquitectura la que genera una corriente de ventilación.

Las respuestas fisiológicas son variadas y muestran cómo a través de la evolución tanto el organismo como la arquitectura se han ajustado entre sí.



Fig 3.5. Construcción de una presa por parte de una familia de castores

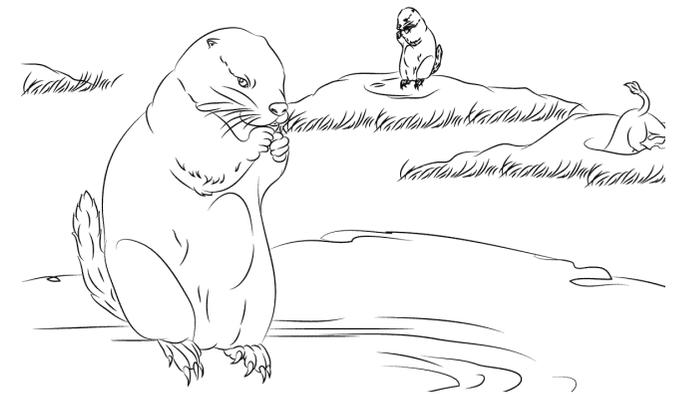


Fig 3.6. Los perritos de la pradera establecen enormes colonias constituidas por muchos grupos de familias, cada una de ellas con su propia madriguera y territorio. La entrada a la madriguera se realiza por un hueco vertical situado a 5 metros bajo tierra como máximo



Fig 3.7. El macho del faisán australiano dedica casi once meses a construir su nido y evita en todo momento ser reconocido utilizando colores similares a los de su entorno

### 3.2-Protección frente al entorno biológico

#### -Defensa contra depredadores y parásitos:

Para un depredador, las viviendas son potencialmente una fuente de alimento ya sea por los propios constructores, su prole o por los alimentos que tengan almacenados. La protección toma esencialmente dos formas: evitar ser descubiertos y prevenir las invasiones una vez que han sido reconocidos.

Las técnicas para evitar ser detectados se presentan en las obras construidas esencialmente confundiendo el organismo con el entorno o intentando engañar a sus depredadores dando un aspecto a sus habitáculos de lo que no son en realidad no son.

En este arte del camuflaje encontramos al Faisán australiano que construye su nido con materiales que coinciden en color con su fondo. Otro ejemplo es el pájaro sastre que cose su nido entre las hojas directamente para evitar ser percibido.

Como táctica de defensa, los constructores desarrollan la protección mecánica, con la que generan una barrera física para asegurar una garantía en la vida de su descendencia.

Un ejemplo de ello es la pequeña muralla bordeada que realizan las ranas gladiadoras brasileñas de forma redondeada. Ésta protege a los renacuajos mientras crecen de posibles depredadores.

#### -Obtención de alimentos:

El almacenamiento de alimentos dentro de los habitáculos reduce las fluctuaciones en la disponibilidad de alimentos a lo largo del año. Los animales disponen de un almacén en el que disponen víveres suficientes para asegurarse la supervivencia y el desarrollo de los más jóvenes. No obstante, estos almacenes también necesitan una atención especial en temas de mantenimiento y en particular con la protección contra el robo o la descomposición.

Al problema de la descomposición se le pone remedio mediante la inmovilización de presas vivas como hacen las avispas de las familias Pompilidae y Spheredae con presas artrópodos.





## 4. LAS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS

#### 4. LAS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS

Las construcciones animales son asombrosamente variadas. Prácticamente en todo el reino animal se puede encontrar cierto grado de hábito constructor, y las especies con mayor capacidad constructoras están distribuidas en todos los filums desde los protozoos a los primates. Sin embargo, hay que resaltar la especial destreza arquitectónica de la que disponen aves, insectos y ciertos grupos de aves.

No deja de sorprender y de ser motivo de especulación el hecho de que las construcciones de los animales de especies superiores se encuentran entre las menos ingeniosas de todo el reino animal. Las construcciones de los simios, por ejemplo, son cobijos hechos de cualquier modo, justo para pasar la noche, comparadas con las metrópolis que erigen las termitas, que tienen millones de habitantes y que, según ha sido observado, la ejecución ha mantenido intacta durante siglos. Es un interesante motivo de reflexión que el chimpancé- la especie animal más próxima a nosotros- no muestre grandes habilidades constructivas. Se limita a formar una plataforma de ramas para pasar la noche.

Muchos de los hallazgos estructurales y funcionales de las construcciones animales constituyen maravillosos ejemplos de casualidad y perfección. Tras millones de años de evolución y adaptación, la despiadada lucha por la supervivencia ha convertido las construcciones animales en impecables respuestas a sus condiciones vitales. Conforme a las estrictas leyes de economía y eficacia que las gobiernan, en las estructuras animales se reducen al mínimo el trabajo y los materiales empleados.

Tras analizar los criterios que definen y explican las técnicas constructivas utilizadas por los animales para sus madrigueras o nidos, es hora de ahondar más en profundidad cómo éstas son desarrolladas por sus creadores. Las más comunes, citando a Michael Hansell<sup>7</sup>, que se manifiestan en la naturaleza son: cobijo preconstruido; el esculpido y excavado; el apilamiento; el moldeado modelado y el moldeado extruido e hilado; el enrollado y plegado; el pegado; el tejido y el cosido.

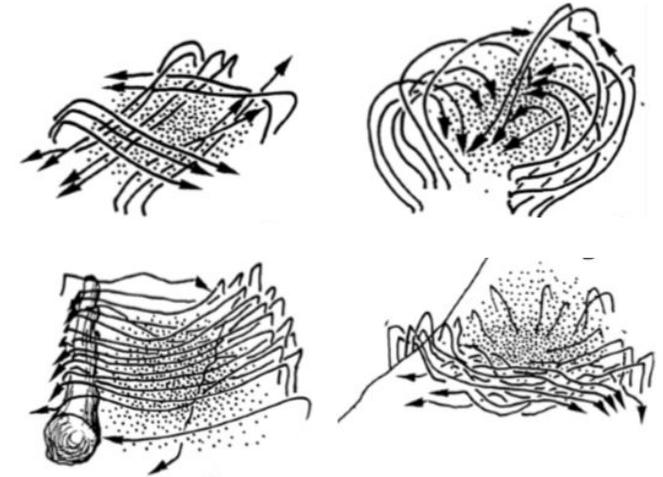


Fig 4.1. Diferentes tipos de nidos que construyen los gorilas. Nido tejido en rama. Nido hacia el centro. Nido tejido prensado. Nido tejido inclinado.



Fig 4.2. Chimpancé descanso en su nido

7. HANSELL, M. (2008). *Animal Architecture and building behaviour*. Oxford: Oxford University Press. pp 68-80: "piling up: fetch and drop, interlocking and weaving, sticking together, modelling, folding and rolling, spinning, sculpting"



Fig 4.3. El panal es el elemento unificador del enjambre. Éste está formado por una serie de celdillas dispuestas de manera geométrica donde se optimiza al máximo el espacio.

Como manifestó Karl von Frisch, premio Nóbel: “Hay biólogos que están convencidos de que si se persevera en la investigación, ya sean ellos ya sean las futuras generaciones de científicos terminarán encontrando la clave de la vida en todas sus manifestaciones. Me inspiran lástima. Pues nunca habrán experimentado esa sensación de profunda admiración frente a las obras de la naturaleza, algunas de las cuales se seguirán escapando siempre a su comprensión por parte de la mente humana”.

#### **4.1- Insectos**

En la familia de los insectos se estudiarán las técnicas constructivas de las abejas, avispas y hormigas (pertenecientes al orden de los himenópteros), siendo este un grupo que incluye a la mayoría de los insectos sociales. Las abejas y avispas son los principales polinizadores de las flores, por lo que se encuentran prácticamente en cualquier lugar donde haya plantas con flor. Por su parte, las hormigas son más abundantes en las regiones tropicales y subtropicales.

#### **-Abejas**

La construcción de paneles por parte de las abejas ha generado una fascinación e interés en multitud de autores que se han dedicado a estudiar sus cualidades. Su independencia, sencillez, eficiencia, organización y su espíritu trabajador son algunas de las más importantes y bien conocidas por todos sus observadores.

El habitáculo general de las abejas es llamado colmena, mientras que los panales son las superficies planas formadas de celdas. Éstas son los clásicos espacios hexagonales donde se cultiva la miel o se ponen los huevecillos de las abejas. La colmena tiene una gran importancia para la colonia ya que constituye el esqueleto que soporta al enjambre. Su finalidad consiste en guardar y proteger a cada uno de los individuos que forman parte de él, así como de los huevos<sup>8</sup>.

Otros autores<sup>8</sup> han concentrado la denominación de colmena a los albergues proporcionados solo por el hombre, pero en este apartado solo se describirán los realizados exclusivamente por ellas.

8. SEPÚLVEDA GIL, J.M (1980). Apicultura. Barcelona: AEDOS. pp, 263

Al mirar la colmena, nos encontramos prácticamente con un edificio, o mejor dicho, una población con calles espaciosas, formadas de témpanos perpendiculares, que serían los panales, unidos entre sí por medio de puentes y perforaciones con los que las abejas acortan las distancias<sup>9</sup>.

Por lo general, los panales se construyen de manera vertical, esto es de arriba hacia abajo cuando ofrece menos fortaleza, menos resistencia a la tensión (se derrumba antes con el calor), que el patrón horizontal. Quizás, para las abejas como especie, es más eficaz la reproducción de los enjambres que tienen métodos de conservar la tempera interna en sus límites razonables ( $< 40^{\circ} \text{C}$ ) mediante el mantenimiento de un espacio correcto entre panales, una ventilación adecuada... que la reproducción de los enjambres que hacen un panal más resistente y no tienen esos comportamientos.

Para moldear la cera y hacer los panales se necesita una temperatura de “moldeo”, de unos  $40^{\circ} \text{C}$ ; para conseguirla las abejas se agrupan en cadenas y racimos en las zonas de trabajo y “tiritan”, “que-man miel”, transforman la miel en calor, creando puntos de trabajo de la cera. Cuando la temperatura externa es alta el “escalón térmico” hasta los  $40^{\circ} \text{C}$  de moldeo de la cera es pequeño, y las abejas la trabajan con facilidad.

Ayudándose de la cera que producen, en forma de pequeñas y delgadas láminas pentagonales, forman pequeños sillares con los que van construyendo su panal. Las abejas la toman en sus patas, las amasan con la potente herramienta que poseen en la boca a modo de tenaza con una extraordinaria rapidez.

Cada panal consta de muchos millares de celdillas. En estas celdillas se construyen de una forma asombrosamente adecuada al objeto a que se destinan. El panal presenta una pared intermedia que es de cera y forma el fondo común de las celdillas construidas a ambos lados. Con objeto de obtener el debido refuerzo, las celdas de ambas caras se encuentran contrapuestas, con lo que, además se obtiene el máximo aprovechamiento del espacio. Las paredes que limitan lateralmente las celdillas que se hallan dispuestas de manera que el eje de las cavidades ofrece cierta inclinación descendente hacia el tabique de separación con el fin de que una vez llena la celdilla con miel fluida, ésta no se escape del recipiente que la contiene<sup>10</sup>.

9. REDONDO, I. (1999). Apicultura O Tratado De Las Abejas Y Sus Labores : De Las Colmenas, Colmenar Y Colmenero, De Los Enemigos De Las Abejas Y De Las Enfermedades Que Estas Padecen. Valencia : Paris-Valencia

10. FRISCH, K. (1976), La Vida De Las Abejas. Premio Nobel de medicina 1973. Barcelona: Labor

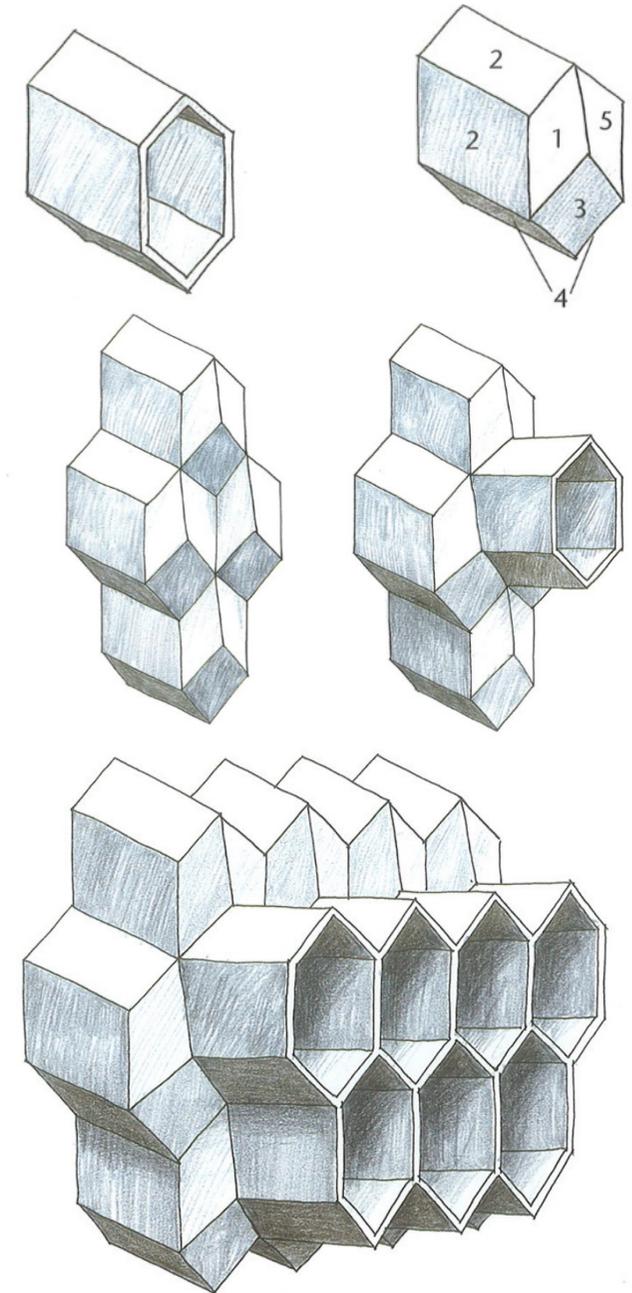


Fig 4.4. Geometría de las celdillas

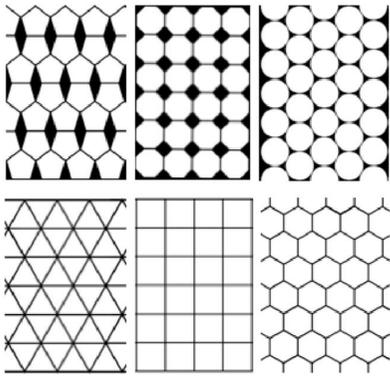


Fig 4.5. Redes geométricas que confirman que el mayor aprovechamiento se produce con la forma poligonal del hexagono

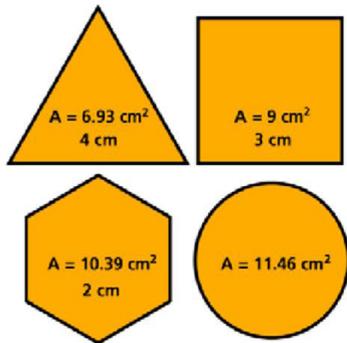


Fig 4.6. Área en el interior de diferentes poligonos con un mismo perímetro de 12 centímetros

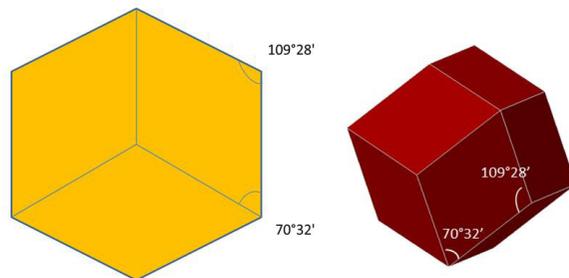


Fig 4.7. Ángulos creados en las celdillas

Ante esto, es probable que la parte más misteriosa así como la que llama más la atención en la construcción de la colmena, sean las celdillas. Estos compartimentos son considerados la unidad básica del panal. No es común que en ellas se almacene el polen y son destinadas a diferentes usos y varían en forma dependiendo de su tamaño. Las grandes están reservadas únicamente para la cría de reinas. Las celdas pequeñas y medianas tienen forma de prisma hexagonal terminados en un fondo piramidal con tres rombos mientras que la celda grande es llamada también especial porque ésta se adapta a cualquier lugar<sup>11</sup>.

Lo más digno de atención es que las paredes laterales de cada celdilla forman un hexágono. Esta figura no es elegida de manera arbitraria ya que las abejas igual que lo hacen los abejorros podrían construir, desde luego, sus celdas, de sección redonda o de secciones poligonales con un número diferente de lados, limitando unas con otras. Sin embargo, se ha comprobado que las celdillas de sección circular, pentagonal u octagonal, dejarían huecos entre sí, lo que representaría una pérdida de espacio y de material. Es decir, que las otras figuras geométricas no otorgan tantas ventajas como la hexagonal por las razones anteriormente mencionadas.

Las abejas han encontrado, por tanto, en la sección hexagonal, la forma de celdillas más adecuada y económica que puede imaginarse. Los ángulos que forman son medidos por ellas con los múltiples tentáculos sedosos que llevan en la cabeza y antenas.

Al hablar Charles Darwin, sobre la manera en que algunos construyen su colmena, expone que: “cuando oímos que las abejas han resuelto de modo práctico un problema geométrico muy difícil, a saber, construir sus celdillas con el mínimo gasto de cera, construyendo hexágonos opuestos alternativamente entre sí, con bases formadas por tres láminas romboidales con ángulos de 109° 28' y 70° 32' e inclinados entre sí en un ángulo de 120°[...] los matemáticos han estudiado y probado que son los correctos<sup>12</sup>”

11. PALLASMAA, J. (2001). Animales arquitectos. Lanzarote, Islas Canarias: Fundación César Manrique. pp 101-103

12. DARWIN, C. (1983). Ensayo sobre el instinto. Madrid: Ed. Tecnos. pp 56-57

Además, se ha demostrado matemáticamente, por ejemplo, que la forma de las celdas de las abejas es el modo más eficaz de almacenar miel en estructuras de cera. El grosor de la pared de las celdas que componen un panal es de 0,073 mm, con una tolerancia de 0,002 mm, una precisión que supera con mucho la de los constructores humanos. De hecho, las construcciones de estos animales se han ido optimizando gradualmente por la ley de la selección natural y su estructura es sorprendentemente fuerte: un panal de 37 x 22 centímetros, construido con tan solo 40 gramos de cera, puede contener hasta 1800 gramos de miel. Por estos asombrosos datos, a principios del siglo XVIII, el famoso científico Réaumur<sup>13</sup> llegó a proponer incluso que se adoptara la celda de la abeja como medida estándar.

Una gran cantidad de científicos, por el contrario, consideran que las celdillas de las abejas y avispa tienen forma hexagonal por cuestiones naturales sin que exista ninguna intencionalidad determinada en ello.

Ante esto, el Profesor Sepúlveda describe que “cuando las abejas construyen los panales guían las formas periféricas, según inician las celdillas, no tienen un límite definido, y tienden a la redondez de forma; según avanza la construcción se hacen más definidas las líneas geométricas, resultando las formas clásicas de la celdilla hexagonal con su fondo piramidal<sup>14</sup>.”

Sobre el mismo tema, hace referencia en su investigación en Doctor Cabezas y su esposa, quien describe que es posible que las abejas se valgan de sus ojos auxiliados de las mandíbulas, aún cuando “podrían ser las antenas tactando las que diseñen la pauta en la construcción”, teniendo en general como unidad básica, el tamaño de una celdilla para todo el panal.

Cuando se analizan la construcción de diferentes panales, se observa que, a pesar de ciertas similitudes, existen diferentes métodos y técnicas que dependen de la raza de la especie que en cuestión lo erige. Se encuentran varias formas de interseccionar las guías de los panales, siendo por lo general de forma oblicua entre sí la más común, originando un conjunto general de panales curvos e imbricados que forman una trama laberíntica.

13. René Antoine Ferchault de Réaumur un polímata, físico francés, interesado en amplios campos de la ciencia contribuyendo sobre todo a la entomología. Su trabajo más elocuente son las Mémoires pour servir à l'histoire des Insectes.

14. SEPÚLVEDA GIL, J.M (1980). Apicultura. Barcelona: AEDOS. pp 286



Fig 4.8. Redes geométricas que comprueban el aprovechamiento de los espacios internos en relación a un diferente polígono



Fig 4.9. La *Tetragonula coarboaria* construye su colmena en forma de espiral, algo sorprendente y a lo que no se le ha encontrado una explicación contundente. Investigadores creen que una posible ventaja adaptativa de esta forma es que es un uso eficiente del espacio, y también facilita la circulación de aire entre las capas



Fig 4.10. Nido de la avispa Polybia Singularis recubierto de una capa de barro endurecido



Fig 4.11. Construcción del nido de una avispa alfarera

## -Avispas

Las avispas modelan el papel, cartón o barro utilizando sus mandíbulas o sus abdómenes como herramientas para machacar, extender y alisar el material elástico. Las construcciones de arcilla de ciertas especies tropicales de avispas suelen ser unas sorprendentes obras maestras de la arquitectura animal. Por ejemplo, la *Polybia singularis* construye un nido colgado de una rama con arcilla extremadamente fina, el avispero puede llegar a pesar hasta un kilo y medio y tiene una ranura vertical que permite a las avispas entrar en los panales colgados en disposición horizontal. Por otro lado, la *Polybia scutellaris* de Norteamérica, construye un impresionante panal de papel dotado con unas excrescencias de punta muy afilada, que sirven para desalentar a los depredadores, pero también tienen una doble función: son huecas y sirven para almacenar la miel.

El problema en todas las técnicas de modelado es conseguir el grado de viscosidad adecuado. Se ha observado que ciertas avispas utilizan movimientos vibratorios para acelerar el proceso de secado del barro. De esta forma, fortalecen el material soldante e incluso eliminan las posibles burbujas de aire del material que modelan, de una forma similar al empleo humano de mecanismos vibratorios para mezclar el hormigón.

Debido a su interesante método constructivo, se estudiarán las técnicas de dos especies de avispas: la avispa alfarera y la avispa excavadora.

La avispa alfarera es una especie solitaria que no vive en enjambres como las abejas u otro tipo de avispas. Hay varias especies pero todas tienen la habilidad de moldear el barro para construir sus nidos. De hecho, su nido no solamente cumple la función de cobijo propiamente dicho, sino que se convierte en el lugar donde introduce a sus víctimas.



El nido de la avispa alfarera, es construido único y exclusivamente por la hembra. Esta es muy exigente con respecto a los materiales que usará para construir el nido.

Algo muy peculiar de esta avispa a la hora de comenzar a construir es que si el barro está demasiado blando, ella espera a que se seque. Si está demasiado seco, expele agua de su propio estómago para ablandarlo.

De esta manera podrá moldearlo a su gusto con la consistencia adecuada. El modus operandi es el siguiente: la hembra recolecta la arcilla, la mezcla con agua que saca de balsas o charcas y la presiona para conseguir finas tiras. Las coloca formando capas circulares con las que construye refinadas pequeñas jarras con un cuello estrecho usando sus mandíbulas y patas.

Una vez construido su nido, caza mayoritariamente arañas, las adormece con su veneno, las introduce en él, pone sus huevos y tapona el nido con barro hasta que sus crías estén listas para salir. Muchos investigadores señalan que la forma del nido inspiró a los nativos Americanos en su forma de hacer vasijas<sup>15</sup>.

Otra especie que ha servido de inspiración para que hace más de 2000 años los chinos aprendieran de ellas a hacer papel es la *Polistes dominula* o también conocida como avispa de papel. Para ello, emplean pequeñas partículas de madera que roen de los árboles y de los postes como materia bruta y luego mezclan estas fibras con su saliva, que tiene propiedades endurecedoras.

Otra de las especies de avispas más interesantes del reino animal por la construcción de su habitáculo es la avispa excavadora. Esta avispa también es conocida con el nombre de avispa lobo o lobo de las abejas por su especialización en capturar abejas comunes. Perfora varios nidos individualmente, invirtiendo varias horas en cada uno de ellos. Después de realizar pequeños movimientos en la tierra, la avispa emerge a la superficie como si fuera un topo, levantando un montoncito de tierra húmeda y echando la arena que ha sacado, a varios centímetros de la entrada<sup>16</sup>.



Fig 4.12. Vasijas realizadas por las avispas alfareras donde conservan a sus presas



Fig 4.13. Construcción de un nido de la *Polistes dominula*, iniciado por la reina de la colmena

15. NICHOLSON, J (2005 ). *Animal Architects*. Crows Nest, Sidney: Allen & Unwin. pp 29

16. GARCÍA SANTIBÁÑEZ SAUCEDO, H.F. (2007). *Biodiseño: Aportes Conceptuales de Diseño en las Obras de los Animales*. Tesis. Barcelona: Univesitat de Barcelona. pp 269

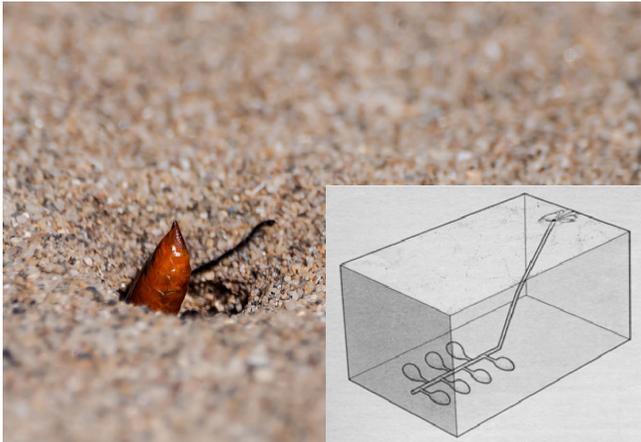


Fig 4.14. La avispa *Philanthus triangulum* excavando su madriguera. En ella puede llegar a preparar hasta siete cámaras donde depositará a sus larvas con alimento

Tal como nos lo narra el Doctor Niko Tinbergen, zoológico neerlandés, padre de la etología y conocido por su propuesta de explicar la conducta mediante 4 preguntas, al estudiar las cámaras de los túneles de varios nidos de estas avispas: “Éstas se abrían en el extremo del túnel de entrada, que era de un metro. Cada cámara contenía un huevo o una larva y un par de abejas. Todos los nidos contenían de una a siete cámaras<sup>17</sup>”.

Llama la atención la coincidencia del diseño que existe entre los nidos de esta especie de avispa con las tumbas egipcias, ya sean las que están por dentro de alguna pirámide o en las que están en el subsuelo en el desierto, éstas se caracterizan por estar básicamente aisladas de la vida cotidiana, con el fin de conceder y garantizar un descanso pleno a dicha persona.

Por lo general, las tumbas están proyectadas de tal manera que se dispone en su eje central el pasillo principal de toda la obra arquitectónica. Es común llegar a través de él, a distintos espacios y cámaras, que tenían la función de concentrar sus tesoros y objetos, teniendo una ubicación especial la cámara funeraria en donde se depositaba el sarcófago con la momia<sup>18</sup>. Aquí se puede observar el paralelismo con las cámaras y recorridos que construyen en sus habitáculos las avispas excavadoras.

17. TINBERGEN, N.(1985). *Naturalistas Curiosos*. Barcelona: Salvat. pp 260

18. SILOTTI, A (1997), *El Valle de los Reyes y los Templos y Necrópolis de Tebas*. Barcelona: Martínez Roca. pp 168





Fig 4.15. Termitas de la especie *Hospitalitermes Hospita-* les transportas bolitas de líquen y musgo que les servirán de alimento o de sustrato para cultivar hongos. Las termitas cooperan para alimentarse al igual que para construir nidos de una arquitectura asombrosa



Fig 4.16. Fotografía de los nidos de las termitas *Amitermes meridionalis*, más conocidas como termitas brújula. Sus construcciones tienen forma de pared y están orientados de norte a sur para aprovechar al máximo el calor del sol.

## -Termitas

Las termitas son un grupo de insectos sociales que viven en colonias y construyen sus nidos enfrentándose de una forma eficaz y satisfactoria a problemas estructurales, térmicos, de seguridad, de vialidad, restauración o ventilación a través de su diseño.

La mayor parte de ellas viven en climas tropicales o subtropicales, pero algunas viven en climas templados, lo que ha derivado en plagas urbanas en algunas regiones.

Se las pueden considerar como ninjas diminutas y con un sistema de organización brutal. A causa de tener un carácter sociable (al igual que las hormigas y las abejas), la colonia que exista en las cercanías de su vivienda, todas y cada una de ellas tomarán de alimento todo lo que se encuentren a su paso y lo llevarán hasta su nido .

Los hábitos de las termitas son tan fascinadores como los de las hormigas. El naturalista Jules Desneux, se ha ocupado toda su vida en estudiar la estructura de los nidos de termitas africanas. Él mismo exponía que sus nidos “Son como bolas o jarros cuya pared está formada por una serie de columnitas colocadas en forma de espiral con un complicado sistema de galerías que se continúan, pasando unas por encima de otras o entrecruzándose, todo perfectamente regular y como hecho con un torno.”<sup>19</sup>

Además, basado en sus investigaciones se reconocen tres fases en su comportamiento constructivo: incoordinación, en el que las termitas en un estado de aturdimiento comienzan las labores de trabajo, la interacción, cuando la colonia se divide en diferentes grupos y se realiza una división de las tareas de trabajo, tras lo que comienzan con sus tareas y la final coordinación entre dichos grupos de forma satisfactoria (termitas aturdidas comienzan a trabajar), interacción (cada grupo comienza con sus tareas) y coordinación<sup>20</sup>. En resumen, el funcionamiento de tales sociedades se basa en elaborados sistemas de comunicación y en una división del trabajo en el seno de la casta obrera, lo que se manifiesta por diferencias morfológicas.

19. CHAUVIN, R. (1965). *Las sociedades animales: abejas, termitas, hormigas, peces, aves y mamíferos*, Barcelona: Ediciones Zeus. pp 150

20. CHAUVIN, R. (1965). *Las sociedades animales: abejas, termitas, hormigas, peces, aves y mamíferos*, Barcelona: Ediciones Zeus. pp 170-180

Son capaces de construir enormes ciudades verticales que llegan a ser habitadas por 2 millones de termitas y pueden llegar a medir lo mismo que un edificio de dos alturas. Crean nidos de tamaños y formas muy variados que están formados por un grupo muy complejo de cavidades interconectadas, unidas al mundo exterior por una red de galerías subterráneas o cubiertas. Las paredes exteriores pueden llegar a ser tan resistentes como el hormigón además de tener cierto carácter impermeable. Dichas paredes están hechas de arena y saliva, mientras que las interiores con saliva y excrementos. Este diseño descrito es típico de las termitas africanas *Macrotermes* de Costa de Marfil, cuyos termiteros se asemejan a montañas escarpadas<sup>21</sup>.

A su vez, son capaces de excavar huecos tan profundos que pueden llegar a 40 metros de largo en busca de agua para beber y usar para construir sus nidos. Cuando dichos nidos se edifican bajo tierra se denominan hipogeos mientras que sobre el suelo son epigeos.

Una de las técnicas utilizadas por todas las especies que más asombra a día de hoy debido a su perfeccionamiento es el sistema de aire acondicionado y ventilación que desarrollan. Tiene lógica que hayan desarrollado un método tan tecnificado y avanzado pensado en la gran cantidad de termitas que pueden llegar a vivir en un nido dentro de los pequeños túneles y habitaciones. Sin un sistema lo suficientemente eficaz, rápidamente se ahogarían. Un suministro de aire fresco es fundamental en este aspecto, por lo que algunos montículos de termitas tienen impresionantes y complicados sistemas de ventilación.

Se enfrentan, por tanto, a un reto formidable para ventilar la colonia y mantener tanto la temperatura y como la humedad en valores constantes, mientras que en el exterior se puede llegar a una diferencia térmica de 40 °C entre la temperatura mínima y la máxima.

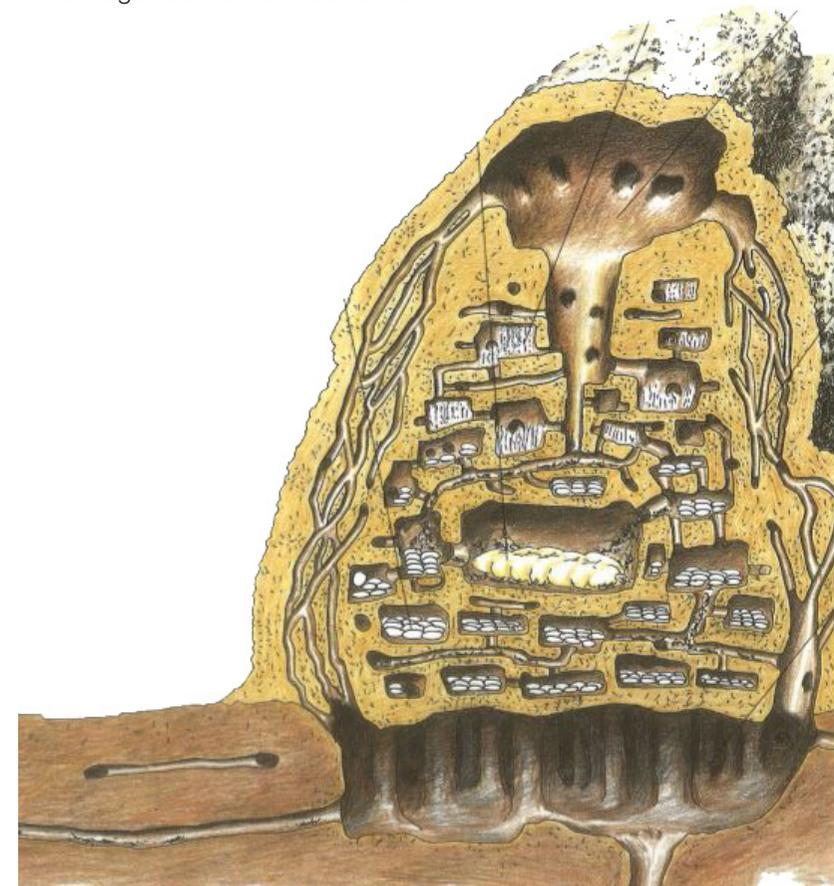
Su sistema de climatización se basa en el “efecto Venturi”<sup>22</sup> puesto que cavan una especie de acondicionador de aire, en la base del nido, que enfría el aire a través de cámaras excavadas en el barro húmedo, conectadas mediante conductos que los unen con los mantos acuíferos del subsuelo y al mismo tiempo se envía el aire caliente a la parte superior a través de un conducto.

21. LÜSCHER, M (1972). “Air Conditioned Termite Nests”, en *The Insects*, Readings from Scientific American, W.H Freeman and Company, San Francisco. pp 271-278

22. BIRKHEAD, T.(1996). *Secretos del Mundo Animal*. Milan: Reader's Digest. pp 120



Fig 4.17. Montículo de termitas *Macrotermes*. Muchos de estos montículos se encuentran en el extremo final de Australia, y pueden sobrevivir a la furia de ciclones y a los estragos de los incendios de arbustos





Cuando es necesario, las termitas modifican los circuitos de canalización, con la apertura de nuevos túneles y el taponamiento de otros, para regular el calor y la humedad.

Usando imágenes térmicas y sensores para detectar los movimientos de aire, un grupo de investigadores ha conseguido descubrir cómo funciona su efectivo sistema de climatización. Según el estudio que han publicado en 'Proceedings of the National Academy of Sciences', sus estructuras funcionan de forma similar a nuestros pulmones, inhalando oxígeno y expulsando dióxido de carbono.

Fig 4.18. Sección vertical a través de un termitero que muestra pasajes aéreos que conectan el interior del nido a espacios que se encuentran justo debajo de la pared exterior del montículo

De hecho, existe una especie de termita que realiza su nido en forma de torre desarrollando un sistema de refrigeración que además de mantener la temperatura constante, realizan una ventilación y renovación del aire, expulsando el dióxido de carbono al exterior e introduciendo oxígeno al interior.

El aire caliente cargado de dióxido de carbono ascenderá a través de las galerías laterales, y gracias a la porosidad de las paredes se producirá la difusión hacia el exterior del dióxido y hacia el interior del oxígeno. Dentro del nido existen zonas que están completamente enjambradas con termitas (habitaciones o zonas de estar), mientras los habitáculos habilitados para el sistema de ventilación están desérticos a no ser que se requiera de alguna reparación.

Las termitas han conseguido hacer evolucionar sus técnicas de construcción, utilizando fuentes de energía renovables y aprovechando todo lo que la naturaleza les ofrece. Esta es la razón por la que no existen dos termiteros iguales ya que siempre se adaptan a las condiciones en las que se enfrentan.



Por ejemplo, en zonas lluviosas y tropicales, se construyen una serie de tejados colgantes para proteger las paredes del nido en general de las fuertes lluvias, tal y como hacen las termitas *Cubitermes*. Esta especie va construyendo los tejados sobresalientes de sus montículos con formas cónicas con el fin de proteger la estructura principal. Se encuentra un cierto parecido a la forma de una seta, una pagoda o de un paraguas.

Por otro lado, las termitas australianas construyen sus nidos en forma de bloque de cinco metros de alto por tres de ancho, con orientación norte-sur. Esta orientación permite que el sol caliente por la tarde y otra vez por la mañana temprano. Durante el caluroso medio día, el sol brilla por una zona muy estrecha del bloque y prácticamente el calor no es absorbido.

Otro aspecto muy importante a la hora de la construcción de un termitero son la eficiencia en las circulaciones interiores. No cabe duda que la complejidad de la red de comunicación entre las cámaras aumenta conforme lo hace el tamaño del nido.

La digitalización a través de un tomógrafo de rayos X de los termiteros apoyada de la teoría de grafos realizada por los investigadores Guy Therauluz, Andrea Perna y Pascale Kuntz, mostró que presentan una conectividad débil. El conjunto del nido se encuentra recorrido por grandes vías de comunicación sobre las que se conectan arborescentemente varios grupos de cámaras. De esta forma, cada grupo se halla unido a las grandes vías por un solo túnel.

Este tipo de estructura tiene dos objetivos fundamentales; la protección ante depredadores y la conexión ágil de diferentes zonas del nido.

Estos científicos plantean la hipótesis que ante la percepción local que tienen las termitas de su estructura la optimización de los recorridos puede ser estimada a través de la centralidad de la vía principal

Es definitiva, las termitas en su conjunto juegan y controlan a la perfección con ciertos parámetros constructivos como son la orientación, los sistemas de ventilación y los recorridos



Fig 4.19. Termitero de la especie *Cubitermes*. El montículo con forma de "Pagoda" puede llegar a medir más de metro de altura

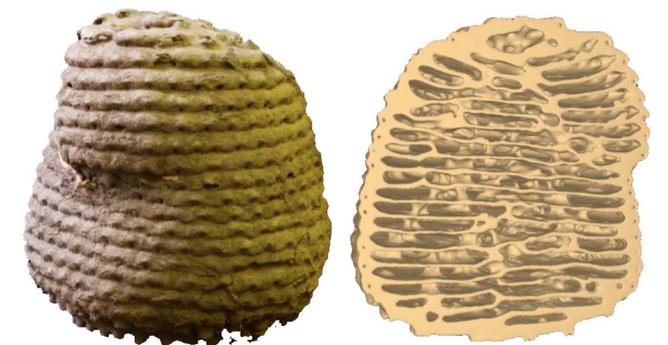


Fig 4.20. Interior de un nido de termitas *Apicotermes* reconstruido mediante tomografía de rayos X. La superficie exterior de dichos nidos presenta microestructuras espaciadas que desembocan en pasillos circulares alojados dentro de la corteza del nido



Fig 4.21. Fósil de hormigas encontrado con 100 millones de años de antigüedad preservado en ámbar

## 4.2- Arácnidos

En este apartado se describirán las técnicas constructivas de los arácnidos, específicamente las arañas y cómo sus telas empezaron a evolucionar hace cientos de millones de años. Se han llegado incluso a encontrar fósiles de araña que tienen 300 millones de años, y hay hormigas conservadas, junto a sus “rebaños” de áfidos, en ámbar con 100 millones de años de antigüedad.

### -Arañas

La característica más singular de las arañas es su capacidad no ya para producir seda, cosa que también hacen otros muchos insectos, sino para tejérsela, algo realmente único en todo el reino animal. Algunas de sus telarañas lucen como verdaderas obras de arte.

Elaboran telarañas totalmente integradas al medio sobre el que las tejen, hiladas según delicados diseños y provistas de una sustancia pegajosa que les sirve para atrapar y retener a sus víctimas, para las que constituyen una trampa mortal. Algunos de sus hilos son más fuertes proporcionalmente, que el mejor de los aceros fabricados por el ser humano.

Asombra descubrir que ninguno de los metales creados por el hombre o de las resistentes fibras modernas se aproximan siquiera a la combinación de resistencia y de elasticidad del hilo de tracción de una tela de araña. La resistencia a la tensión del hilo tejido por la araña es más de tres veces superior a la del acero. La elasticidad de la tela de araña es igualmente sorprendente; antes de romperse llega a alcanzar un 229 % de extensión, frente al mínimo 8% del acero.

El hilo de seda de las telas de araña es incluso más fuerte que la poliamida Kevlar, material utilizado en los chalecos antibalas y en las máscaras faciales; puede absorber sin romperse impactos cinco veces más fuertes que los que permite ésta. Según un artículo publicado en el Science News del 21 de enero de 1995, una tela de araña con un grosor de hilo y un tamaño de malla similares a los de una red de pesca podría atrapar a un avión de pasajeros en pleno vuelo.



Fig 4.22. Videos que muestran el proceso constructivo que siguen las arañas para construir su telaraña

El método y proceso de construcción de la tela que siguen en general todas las especies es el basado en la extrusión y el hilado.<sup>23</sup>

Los hilos de seda son generados a través de unas glándulas que se localizan en el abdomen, las cuales producen un hilo para un propósito específico. Existen siete tipos de glándulas productoras, sin embargo, cada araña posee algunas de estas glándulas y no todas al mismo tiempo. Dependiendo de para qué se vaya a emplear la seda, se combinan diferentes hilos extruidos de uno o más pares de hileras.

La materia prima inicial que las arañas usan para tejer la tela es una solución líquido cristalina que contiene proteínas, y que fluye fácilmente por los tubos presentes en el abdomen de la araña.

La arquitectura de las telas de araña puede clasificarse de la siguiente forma<sup>23</sup>:

1. Orb webs: Telas definidas por hilos espirales o radiales
2. Tagle webs o cobwebs : telas con un aparente desorden pero muy eficaces en la captura.
3. Tubular webs: Con forma de tubo suelen encontrarse en las bases de los árboles o en el suelo
4. Funnel webs: Planas y horizontales con un túnel en el centro en el cual se aloja la araña.
5. Sheet webs: Presentes entre la vegetación en forma de hoja plana.

La clásica telaraña es la denominada orbicular (orb) formada de una estructura radial y espiral. El modelo de orb web es construido por más de 4600 tipos de especies de arañas. Las mismas, son el 95% pertenecientes a la familia Araneoidea y pueden, a su vez, dividirse en dos categorías dependiendo del tipo de seda utilizada, la cual puede ser adhesiva, provista por una seda viscosa de fibras recubiertas con un pegamento acuoso, o espirales “cribellate” consistente en fibras pseudo flageliformes rodeadas por hilos con espigas secas, que hacen que la presa se enrede en ella en vez de pegarse.



Fig 4.23. Orb web (izquierda) y coweb (derecha)



Fig 4.24. Tubular web



Fig 4.25. Funnel web (izquierda) y sheet web (derecha)

23. HANSELL, M. (2009). Built By Animals The natural history of animal architecture. Oxford: Oxford University Press. pp 115

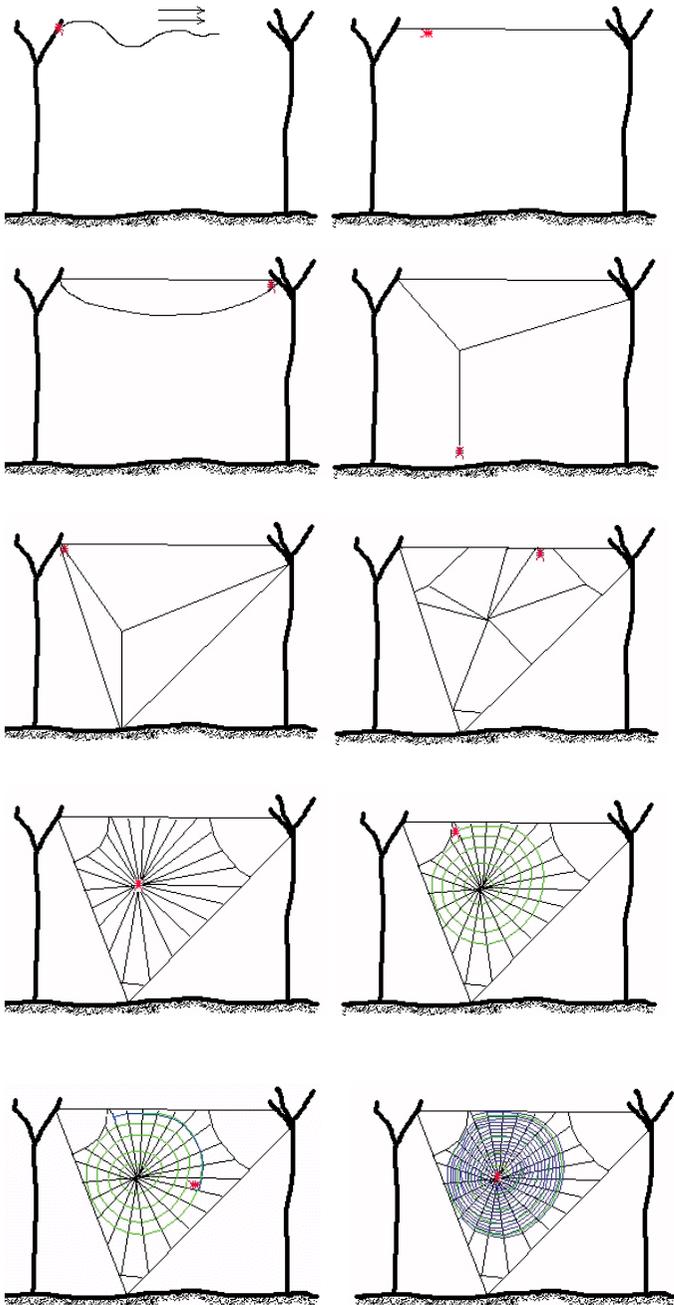


Fig 4.26. Secuencia de la construcción de la red orb

El proceso de construcción de este tipo de red orbicular que sigue la araña *Araneus Umbraticus* fue descrito por Michael Hansell<sup>24</sup> y puede ser explicado en varias etapas:

La parte más difícil parece ser el primer hilo, pero la solución es simple. La araña produce un hilo que queda sujeto por una punta o extremo a una ramilla o rama principal situada en la posición más alta, preferiblemente en espacios airados y que coinciden con vuelos de insectos. Mientras, la otra punta es llevada por el viento para sujetarse entonces en algún otro punto, es decir que inicia su red con un hilo de seda flotante. En esta etapa la araña cuenta con la ayuda del viento o llevarlo ella misma a otro punto en que sujetarlo. La araña cruza cuidadosamente el hilo inicial reforzándolo con un segundo hilo. El proceso se repite hasta que el hilo esté lo suficientemente fuerte.

Utilizando esta línea como soporte, la araña teje otra, aflojando los hilos.

Después de este hilo la araña construye un hilo flojo y enseguida, a partir de este hilo, teje un tercer hilo formando una Y, anexando un tercer hilo en el punto medio del segundo hilo.

Estos son los primeros tres hilos de la tela. Luego se construye un armazón para conectar los otros hilos a través de unos radiales. Entonces los rayos de la tela están terminados.

La distancia entre los hilos de seda nunca es mayor que el alcance de la araña. Ahora el hilo adhesivo es trazado entre los rayos a partir del centro de la tela, formando finalmente la espiral deseada.

Hay que añadir que los arácnidos emplean un hilo separado a modo de andamio para construir sus telas, esta hebra extra, que estabiliza los hilos radiales y facilita la movilidad de la araña durante la fase de construcción, se suprime cuando la obra está terminada. Además cada hilo seco que expone la araña, es cubierto además por una fina capa o revestimiento de lípidos o grasa para evitar su pronto deterioramiento por un exceso de humedad, con el que los protege contra bacterias y hongos que pudieran alimentarse de los nutrientes de esta seda.

24. HANSELL, M. (2008). *Animal Architecture and building behaviour*. Oxford: Oxford University Press. pp 24-25

La geometría básica de una tela de araña orb se compone principalmente de 6 tipos diferentes de hilo, o elementos estructurales que conforman la red<sup>25</sup>.

1. Hilo de puente. Estos hilos son los encargados de sustentar todo el peso de la red por lo que son de la seda más resistente. Generalmente la araña se desplaza sobre esta línea.
2. Hilo de anclaje. La araña selecciona cuidadosamente el punto de anclaje y coloca en ese lugar el hilo correspondiente. Este tipo de hilo también se construye con seda muy fuerte ya que por lo general solo dispone uno.
3. Hilo de marco. Estos hilos están unidos por ambos lados al hilo de anclaje. Junto con el hilo de anclaje, forman el marco exterior de la tela de araña. Está hecho con seda menos fuerte, y es un hilo único.
4. Hilo de radio. El radio es la conexión desde la red central más conocida como hub al marco. La araña caminará por estos radios por lo que están hechos de seda no pegajosa.
5. Hilo para espiral auxiliar. Estos hilos sirven de referencia para colocar la espiral de captura de seda pegajosa. La mayoría de las especies quitan este elemento auxiliar al colocar la espiral definitiva de captura.
6. Hilo de espiral de captura. Es la única seda pegajosa en la tela de araña. Estos hilos atrapan todo lo que los toca y es donde las presas quedan enredadas.

Además de construir redes (y para aquellas arañas que no las construyen), las arañas usan la seda para otros propósitos como formar capullos ya que las hembras no ponen huevos sueltos sino que los encierran en un saco ovífero, envolver a sus presas en apretados envoltorios, mecanismo de seguridad para anclar las telas o como filamento flotante para volar o tender radios, cuyos hilos tienen gran resistencia a tracción; o como un retiro para aquellas que no construyen entre las hojas, en la corteza o en el suelo. Otro tipo de redes son las conocidas como estabilimento, cuya función aún se desconoce pero se cree que sirve para alertas a aves de la presencia para que no choquen contra ellas.

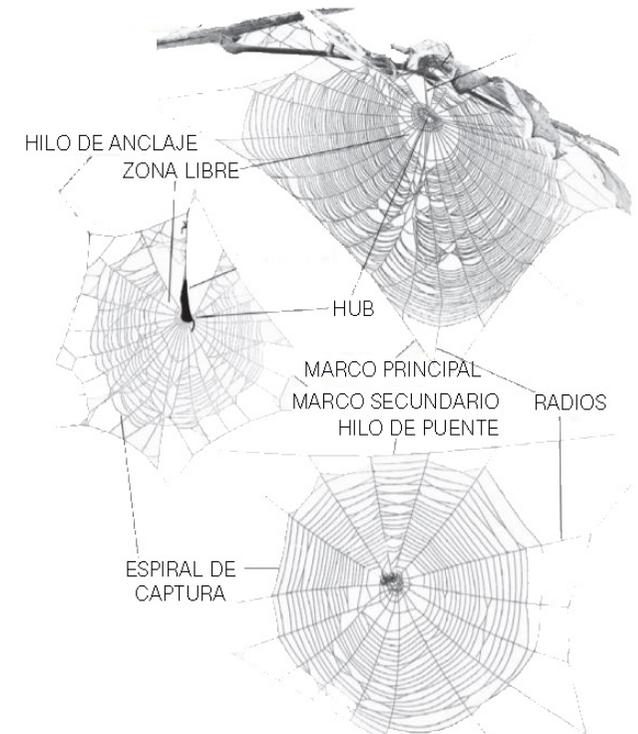


Fig 4.27. Geometría de una tela de araña

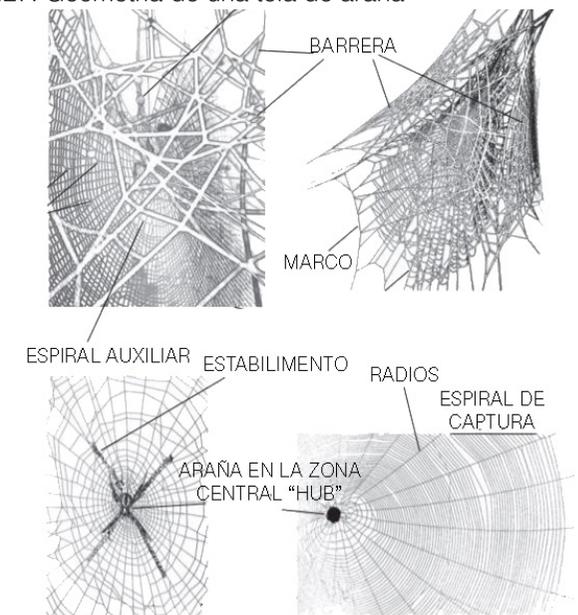


Fig 4.28. Geometría de una tela de araña

25. Brisbane Insects and Spiders <<http://www.brisbaneinsects.com>> [Consulta: 10 de julio de 2018]



### **4.3- Roedores**

#### **-Castores**

Ningún otro mamífero iguala en ingenio arquitectónico al castor. La técnica de construcción de un dique por un castor es altamente depurada tanto que ha dado de que hablar pensando en una particular “inteligencia” para sus trabajos, pero sus construcciones no varían y siguen siendo iguales hoy que hace siglos.

Es el animal que más cambia el medio ambiente que le rodea con el propósito de crear su hábitat ideal. El elemento clave para comenzar a trabajar en su madriguera es un lago. Si no encuentran ninguno, seleccionan un buen sitio en un riachuelo o en un río y construyen la pared de la presa para crear un estanque o un pequeño lago.

De esta forma, los castores construyen diques y canales para controlar o crear flujos de agua, estableciendo el nivel de agua donde lo deseen para asegurar la seguridad del hogar de la familia, y generar arterias transportadoras esenciales para encontrar comida y mover con facilidad los materiales de construcción.

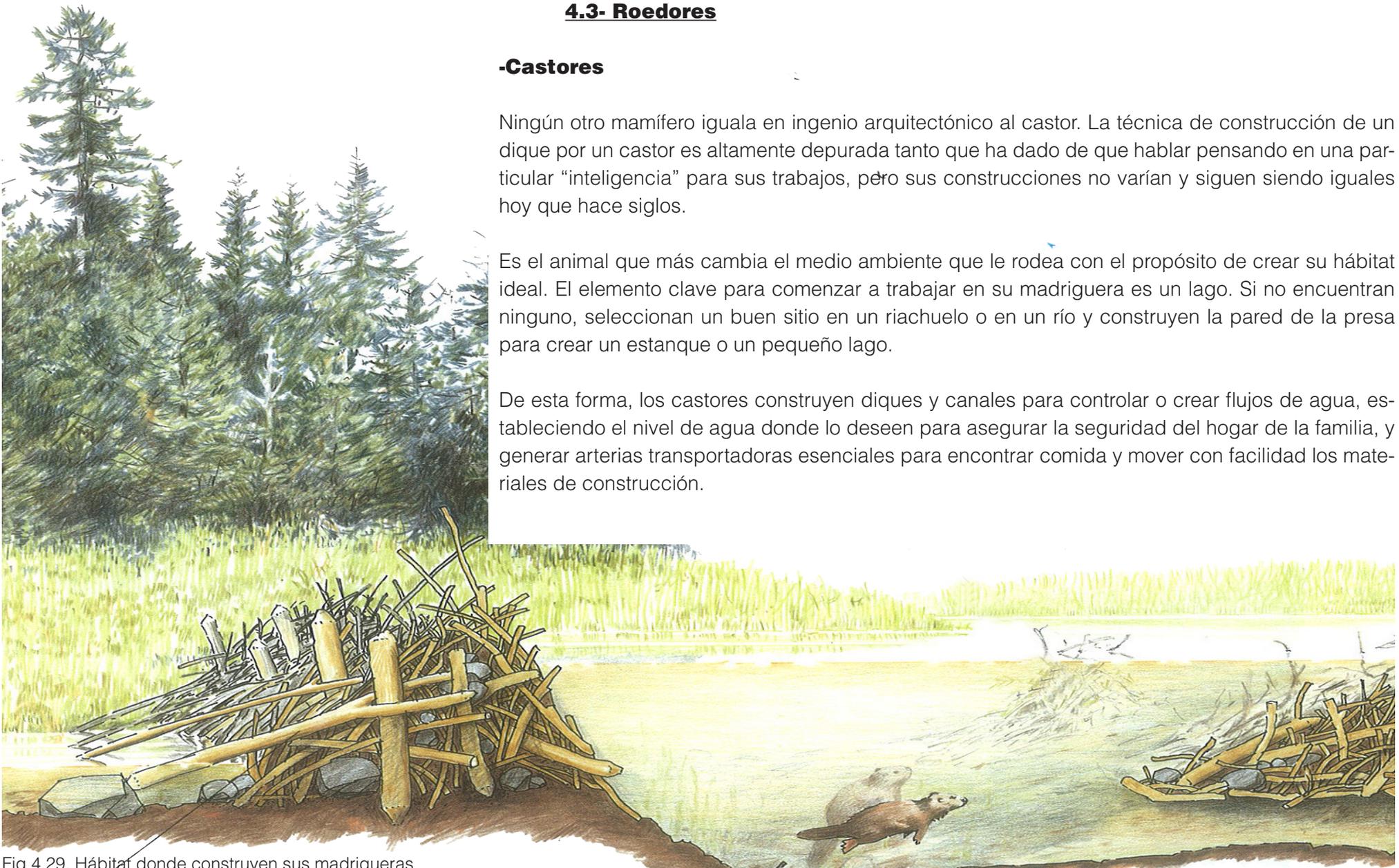


Fig 4.29. Hábitat donde construyen sus madrigueras

Como no hay dos situaciones en las que se pueda aplicar la misma técnica para resolver los problemas hidráulicos, los castores al igual que los humanos tienen la oportunidad de demostrar la creatividad que poseen.

A través de un uso inteligente del agua como defensa, escogen un sitio para excavar la madriguera cuya entrada esté, al menos, a cincuenta centímetros bajo el agua, pero, por el contrario, las habitaciones se colocan sobre la línea de agua para mantenerse secas.

En medio del estanque construyen su madriguera, un lugar seguro con entradas por debajo del agua y habitaciones secas por dentro. Talan árboles a lo largo de los ríos para usarlos como materiales de construcción, incluso llegan a excavar canales que los dirigen al río así pueden hacer flotar los troncos hasta el sitio del estanque desde distancias muy grandes.

Un elemento que determina el modus operandi de los castores es su anatomía. Cuentan con cuatro incisivos muy fuertes y afilados que les sirven para roer toda clase de madera, patas traseras palmadas para nadar, mientras que las delanteras, cubiertas de un pelo más negro, son semejantes a manos, cada una con cinco dedos bien desarrollados que les permiten agarrar cualquier ramilla o piedra. y una larga cola que les sirve como timón cuando están en el agua o como pierna de reposito.

Estos animales roen, con sus enormes y afilados dientes incisivos, la base de los árboles jóvenes, e incluso troncos de más de 50 cm de diámetro en cuestión de minutos para crear presas sobre un metro de grueso y sobre 3 metros de alto, y tan largo como lo necesiten. La más larga descubierta alcanza los 700 metros.

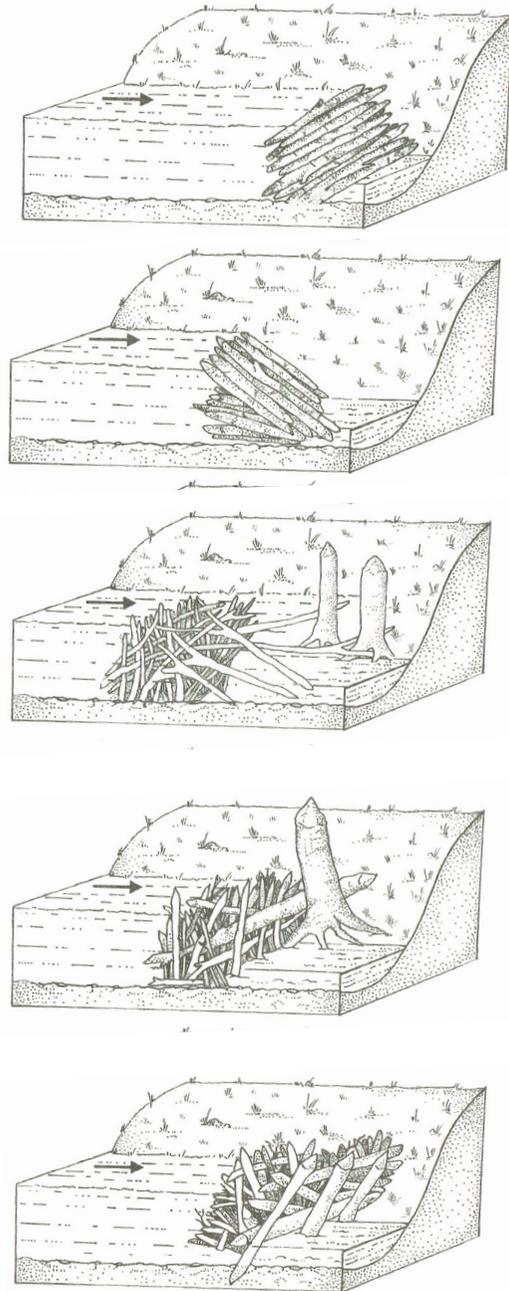
Una vez cortados, los empujan corriente arriba por canales cavados especialmente para ello, luego clavan algunas varas en posición vertical en el lecho del río y arrastran largos troncos y ramas para atravesar estos puntuales. Para lastrar esta vegetación utilizan piedras y las unen con barro en las orillas. Este dique es capaz de resistir la presión del agua en el lago recién formado por ellos.



Fig 4.30. La característica anatomía del castor le permite realizar sus trabajos de construcción con total libertad. De hecho, sus incisivos no paran de crecer por lo que necesitan roer árboles constantemente para mantener una longitud saludable.



Fig 4.31. Videos en los que se muestra el proceso de construcción de la madriguera de un castor



Respecto a las técnicas que utilizan para construir los diques, existen 5 modos<sup>26</sup>:

- Una opción es dejar los troncos cruzando la corriente, esto funciona bien cuando la corriente es muy pequeña.
  - Otra posibilidad es alinear los troncos con la corriente apoyando algunos con la corriente.
  - Un tercer modo es comenzar con un conjunto de troncos sueltos colocados verticalmente en la cama y anclados en su lugar con ramas de aguas abajo. Estas llaves se deben mantener en su lugar, tal vez con piedras traídas al sitio de trabajo. y ramas se colocan a lo largo de la corriente con las verticales para evitar que se arrastren.
  - Una cuarta opción es comenzar con uno o más elementos horizontales pesados cortados en su lugar, anclarlos con troncos verticales y luego rellenarlos con más ramas horizontales.
  - Una quinta opción es comenzar con elementos verticales muy resistentes, seguidas de elementos horizontales en sentido de aguas arriba, luego más verticales, luego otro conjunto de horizontales junto con las ramas trabajadas cuando la oportunidad lo permita.
- Mantener el agua bastante alta le trae muchas ventajas a los castores una de ellas es que inundan los bosques circundantes y les permite llegar nadando a su fuente de alimentación.

El castor es un animal que se adecua al entorno por lo que construye madrigueras y presas adaptándose a la dirección y sentido del agua.

A continuación, los castores construyen su madriguera, enorme y abovedada, de barro, varas y piedras, de aproximadamente 2 metros de altura y 12 longitud, transversalmente, amontonando las ramitas en el medio del estanque, aprisionándolo, aguantándolo con piedras para que no se vaya flotando. Adentro, ahuecan la cámara donde vivirán, que además posee una plataforma para dormir cómodamente en la que utilizan trocitos de madera y que tendrá al menos dos entradas subacuáticas. Al principio del invierno, los castores lo embadurnan todo con barro para hacerlo impermeable.

Fig 4.32. Diferentes técnicas constructivas que utilizan los castores en general

26. GOULD, J. L. y GOULD, C. G. (2007). Animal architects: Building and the evolution of intelligence. New York, N.Y: Basic Books

Cuando la familia progresa o prospera se mejora las estancias con ramas o ramillas. Llegados a este punto punto, algunos castores empiezan a apilar palitos de madera en la orilla con anticipación donde romperá la expansión de la habitación en superficie. Una vez que la excavación alcanza el aire, siguen apilando para crear una cubierta entrelazada y utilizan barro para sellar y endurecer la estructura, dejando suficiente hueco para ventilación.

Algunos castores incluso convierten sus madrigueras en islas retiradas excavando un foso de un metro y medio de ancho alrededor de ellos.

Esta especie puede llegar a coexistir en paz con ratones, insectos o ratones de campo. Esto se debe a que los castores comprenden lo que es necesario y cual es su objetivo: supervivencia a base de cooperación y respeto, es su gran estrategia .



Fig 4.33. Sección donde se muestra el interior de la madriguera y cómo se accede por un canal bajo el agua a ella



Fig 4.34. El águila calva construye el nido más grande de América del Norte con palos y ramas lo más alto posible sobre las que coloca una cama de un material más blando para colocar sus huevos. El más grande registrado llegó a pesar más de dos toneladas



Fig 4.35. Las golondrinas son un ejemplo de aves que anidan en colonias numerosas. El nido lo construyen plano con barro, la saliva y algo de paja. Lo sitúan tan pegado al techo de la estancia que resulta imposible mirar en su interior

#### **4.4- Aves**

Nadie duda de que las aves que fabrican nidos son unas magníficas arquitectas, pero hasta ahora se pensaba que su habilidad venía inexorablemente determinada por los genes y el instinto.

Se creía que detrás de sus actos no estaba el raciocinio o la experiencia. Sin embargo, un estudio publicado por la revista especializada “Proceedings of the Royal Society B” apunta a que detrás de esa facultad hay un proceso cognitivo más sofisticado.

Las técnicas de construcción, a menudo condicionadas por el medio en el que vive el ave son a veces muy elaboradas y se puede constatar una extraordinaria diversidad, tanto en cuanto a las formas como a los materiales utilizados.

Estos son muy variados, desde elementos vegetales (hierbas, hojas raicillas, ramitas, cortezas...), hasta otros de origen mineral (grava, barro...) o animales (crines, lana...). El emplazamiento tiene también un papel importante, sobre todo de cara a la protección del nido. Las especies más pequeñas suelen ocultarlo a la vista de los depredadores. Las de mayor tamaño, a las que les resulta imposible hacerlo invisible, garantizan su seguridad construyéndolo en lugares de difícil acceso.

Finalmente, existen especies que anidan de modo aislado, como por ejemplo un gran número de fringílidos como los jilgueros o los canarios. Y a la inversa, aves marinas, grajas, garzas, golondrinas y cierto número de otras especies anidan en colonias más o menos numerosas. Tal forma de nidificar permite a estas aves organizar una defensa colectiva de polluelos frente a los depredadores.

Según Maurice Dupérat<sup>27</sup> a pesar de la gran diversidad de nidos, es posible agruparlos en un cierto número de tipos dependiendo de las técnicas más o menos elaboradas empleadas por las aves y también con arreglo a los materiales utilizados.

27. DUPÉRAT, M.(2008) Nids & Oeufs. Paris: Artémis. pp 34-51

### 1. Nidos rudimentarios o inexistentes

Los huevos son depositados en una simple depresión del suelo o en un hueco que la hembra moldea con el vientre. El fondo está a veces cubierto de vegetales o de materiales encontrados en las inmediaciones. Anidan de esta manera especies diferentes familias: la becada, el chotacabra, el chorlitejo.

### 2. Grandes amasijos de plantas o ramas

Este tipo de nido se encuentra casi únicamente en el agua o en sus proximidades. Los materiales son recogidos arracimados y más o menos entrelazados. A menudo no son arreglados interiormente. Entre las especies que anidan de este modo se encuentran los fumareles, los colimbos y los búhos nivales.

### 3. Plataformas de pequeñas ramas o plantas, más o menos acondicionadas

Estos nidos pueden encontrarse sobre el suelo o en las proximidades de agua, pero mucho más frecuentemente en los árboles o sobre acantilados o cornisas. Los materiales que los componen están bien entrelazados y la cara interior se halla a menudo recubierto de materiales más finos. Diversas aves construyen este tipo de nido: la garza, el aguilucho lagunero, la gaviota reidora, la paloma torcaz.

### 4. Nidos de ramillas, hojas o hierbas, en ocasiones forrados de plumas

Son ejemplos de una arquitectura bastante compleja y el acondicionamiento interior es a menudo muy confortable. Construidos esencialmente por las anátidas, lo más frecuente es encontrarlos cerca del agua.

### 5. Nidos en forma de copa o de bola

Las aves entrelazan más o menos sabiamente delgados tallos vegetales para formar una copa, cuyo interior suele estar mullidamente tapizado de materiales finos y suaves.



Fig 4.36. El ostrero deposita sus huevos en una pequeña depresión excavada en el suelo



Fig 4.37. Algunas especies como la garza o la gaviota depositan sus huevos en plataformas realizadas con ramas o plantas en contacto con la superficie



Fig 4.38. La curruca común construye su nido con forma de copa y lo acomoda con materiales delicados



Fig 4.39. El avión zapador anida en colonias situadas en taludes terrosos donde excava un túnel de 70-100 cm en el que hacen una cámara o un ensanchamiento

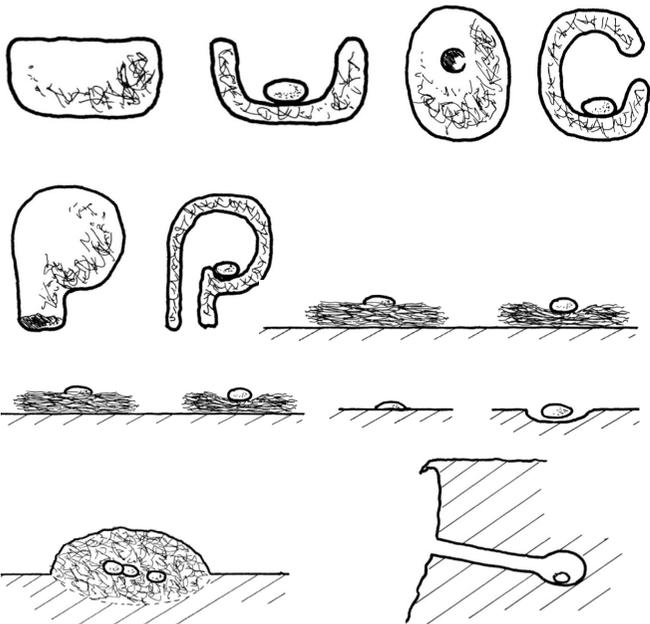


Fig 4.40. Representación conceptual de los tipos de nidos en cuanto a su forma. De arriba a abajo y de izquierda a derecha: de copa, de bóveda, los bóveda con tubo, los nidos de plato, los de cama, los rascados, los amontonados y excavados

## 6. Nidos peculiares

El avión zapador, el martín pescador, el abejaruco y el gálgulo, construyen en ocasiones su galería con ayuda del pico y sacan la tierra con las patas.

Otros como el avión común realizan auténticos trabajos de albañilería. Sus nidos compuestos de bolitas de tierra húmeda aglutinada son típicos fáciles de observar. El de ciertas golondrinas, a menudo adherido a una viga en el interior de construcciones agrícolas o similares, adopta la forma de un cuarto de esfera abierto por la parte superior.

Dominique Lestel<sup>28</sup>, iniciador en Francia de una forma de pensar sobre los animales en una perspectiva ontológica, indica que las aves utilizan muchas técnicas de desarrollo para elaborar sus nidos, mediante distintos procedimientos en el uso de los materiales. Entre las técnicas de desarrollo, estarían las de tejer, pegar, superponer, entrecruzar, clavar, anudar, excavar, embalar, enrollar, colocar, coser, tapizar así como amontonar y rascar. Estas técnicas se realizan a través de cuatro procedimientos: arrancamiento y el traslado, adición y combinación, la modificación y el remodelaje, y la sustracción o eliminación.

Según la clasificación de Mike Hansell<sup>29</sup>, los nidos pueden catalogarse exclusivamente por su forma: de copa, de bóveda, los bóveda con tubo, los nidos de plato, los de cama, los rascados, los amontonados y excavados.

Remitiendo a la simplificación que realiza sobre las técnicas que se muestran en la gran mayoría de los nidos construidos por pájaros, se pueden dividir en: escultura, apilado, moldeado, pegado, trabado y tejido o cosido.

El objetivo de todas estas técnicas se puede resumir esencialmente en dos aspectos: asegurar que el nido se mantiene unido al lugar de origen y que todos los materiales y componentes de los que está compuesto no se hacen pedazos o acaban desarmados.

28. LESTEL, D. (2003). Les Origines Animales De La Culture. Paris: Flammarion. pp 70

29. HANSELL, M. (2005). Bird Nests And Construction Behaviour. Cambridge: Cambridge University. pp 60-80

### -Método de escultura:

Los escultores , ya sea en los árboles o sobre tierra, ilustran el poder del pico de un pájaro para excavar una cavidad lo suficientemente larga y profunda para la cría y para los jóvenes y, que, en especies subterráneas, excavan una madriguera para dar seguridad adicional. Un ejemplo sería el pájaro carpintero cuyo nido típico es una cavidad esculpida o talla en el interior de una rama muerta de un árbol con una estrecha entrada con el fin de limitar el acceso. El método de construcción en estas especies es golpear la madera con la parte afilada y más puntiaguda de su pico, mientras están sujetos al tronco con sus potentes garras.

### -Método de apilamiento:

Es muy común entre las aves de gran tamaño como cigüeñas. Conlleva la recogida del material, su transporte hasta el emplazamiento escogido para la construcción y su pegado en el mismo sin ayuda de materiales adhesivos. Es frecuente el tejido o entrelazado de ramas. Es una técnica en la que los materiales simplemente están dejados caer uno encima de otro.

El amontonamiento se realiza a través de la selección y uso de diferentes materiales para fines estructurales. Por ejemplo, el nido de la graja, contiene 5 capas distintas de materiales: ramas gruesas, como estructura básica, ramas finas, en parte entretejidas, alrededor del borde interior, musgo y arcilla de fondo; y 2 capas de revestimiento interior /hierba, hojas musgo, tallos de plantas.

### -Método de modelado:

Consiste en dar una forma diferente a un material húmedo, el cual, cuando se seca, endurece en la forma deseada. Encierra dos procesos: el de modelar una masa amorfa de material maleable dándole la forma deseada; y el de extrudir sustancias secretadas por el propio animal a través de una fina matriz y luego construir una estructura con las hebras. Este método de moldeado requiere una delicada coordinación y unos miembros corporales adecuados a su función de herramientas de trabajo. La mayoría de los pájaros usan esta técnica para construir con barro, un material que aproximadamente no utilizan más del 5% de las especies del mundo.

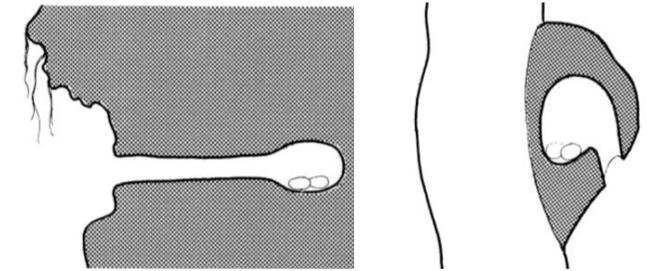


Fig 4.41. Representación conceptual de dos tipos diferentes de nidos realizados por el método de la escultura

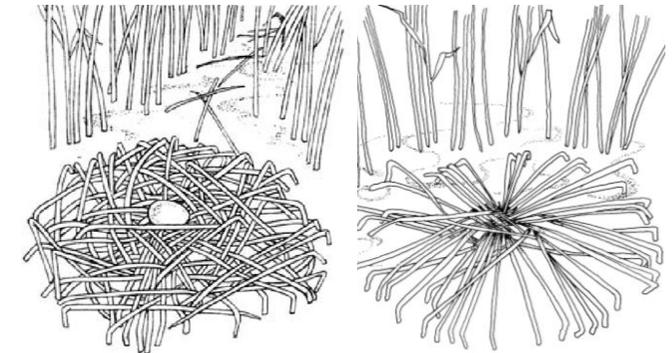


Fig 4.42. Nido de cama tejido por el ganso, donde dobla hacia el centro los juncos y carrizos de las orillas de los lagos y ríos

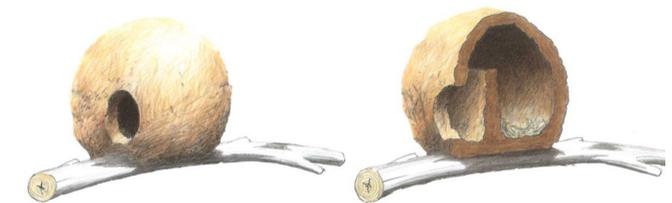


Fig 4.43. Tanto el macho como la hembra del pájaro hornero cooperan para llevar más de 2000 pellas de barro al sitio de construcción que mezclan con paja y con excrementos de animales para empastar el barro con el fin de completar su nido



Fig 4.44. Los tejedores baya pertenecientes a la familia de los pájaros tejedores, denominada Ploceidae, utilizando su pico para entrelazar y enredar los filamentos vegetales y construir su nido

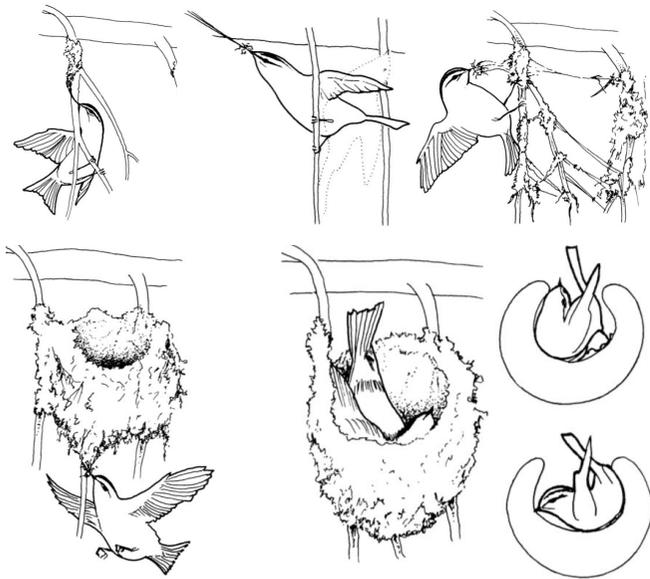


Fig 4.45. Construcción del nido por el reyezuelo el cual comienza con la creación de un marco de seda de araña para contener y mantener la vegetación que lo conforma. La forma final la realiza con un movimiento de pecho

### -Método de pegado:

Es la técnica constructiva por la que se mantienen unidos a través de la aplicación de un adhesivo o pegamento. Mocós, barro, heces pueden actuar como adhesivos.

### -Método de tejido:

El tejido cubre un grupo de técnicas variadas y materiales las cuales tienen como factor común que no dependen de ningún adhesivo porque los materiales, una vez que han entrado en contacto, permanecen unidos.

Es fundamental en este tipo de construcción que los materiales utilizados sean todos secos y por lo tanto, se puedan mantener unidos sin ayuda de ningún adhesivo. Se reconocen tres métodos de construcción en esta categoría: enredado, cosido/hilvado o remaches y velcro.

Este método es posiblemente la categoría más importante dentro de las técnicas de construcción y se considera una técnica que está englobada dentro del trabado.

El empleo del velcro es la técnica más efectiva dentro del tejido y supone el entrelazamiento de la vegetación por hilos de seda. El reconocimiento de los nidos muestran que 25 de las 45 familias de Paseriformes, orden de aves de pequeño tamaño, alas bien desarrolladas y patas provistas de cuatro dedos tres dirigidos hacia delante y uno hacia atrás, usan seda como material estructural y fuera de esta familia, la utilización por los colibríes o pájaros zumbadores es casi universal.

La seda se envuelve alrededor de las ramitas más redondeadas en el sitio donde comienzan a construir el nido, sacan un hilo de esa seda como si estuvieran hilvando y se envuelve en un segundo punto y así sucesivamente. Para poder completar el nido, construyen una especie de andamio para poder colocar una cubierta de musgo a este entretejido con forma de copa.

La construcción de la copa nido se acompaña de un mayor estiramiento y envoltura de la seda antes de dar forma a la siguiente copa con movimientos enérgicos del pecho, las alas y los pies.

La técnica del tejido requiere dos cualidades: una herramienta anatómicamente especializada, como el pico del pájaro, y una pauta de conducta que permita seguir el recorrido del hilo. La técnica de tejido más desarrollada es el resultado de la evolución de una tendencia a invertir el sentido de una vuelta o bucle, a girar y a dividir un objeto en franjas, y a mantener una franja moviéndose constantemente en una dirección.

### **-Método de Cosido.**

No existe una diferencia clara entre los procesos de tejido y cosido. En este último proceso se dan puntadas, que atraviesan otro material, en lugar de formar una malla. Sólo algunas especies de pájaros son capaces de construir con este método.

El nido hecho con hojas de plantas por el pájaro sastre está cosido con seda de telas de araña, cortezas o fibras de algodón; los extremos sueltos de las puntadas están rematadas con pequeños nudos para garantizar su sujeción.

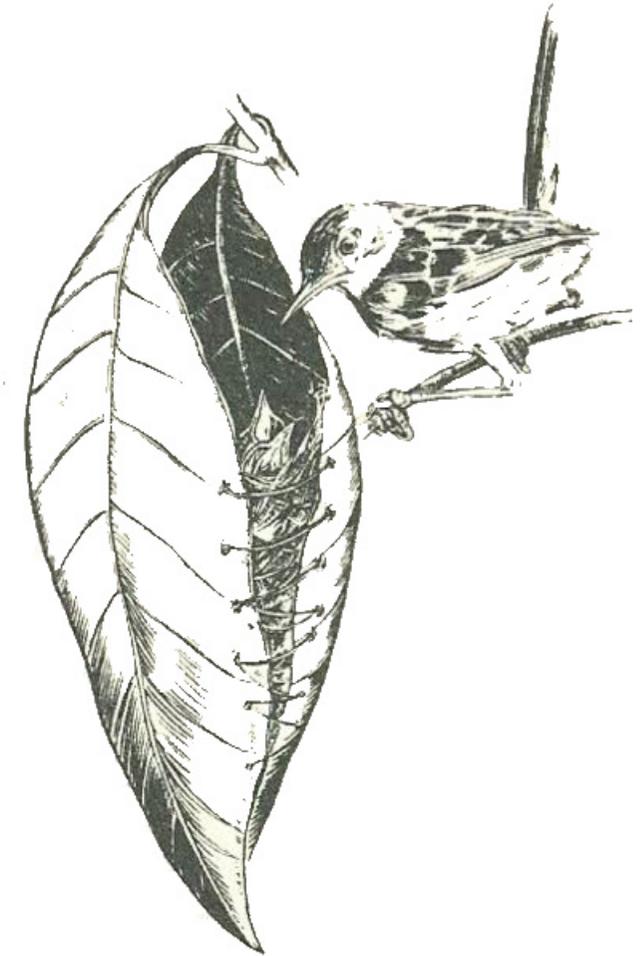


Fig 4.46. El pájaro sastre emplea técnicas de costura para unir dos hojas, con las que forma el caparazón externo de su nido

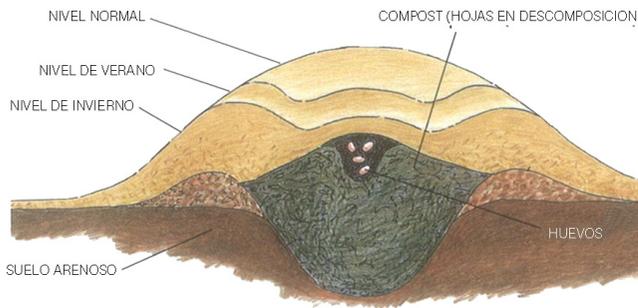


Fig 4.47. Sección transversal del nido realizado por un faisán australiano



Fig 4.48. El faisán australiano es el ave que construye el nido de mayor tamaño entre todas las existentes. Son tímidas, cautelosas y solitarias que usualmente vuelan solo para escapar del peligro o para alcanzar un árbol para posarse

Tras un estudio exhaustivo y una detallada clasificación de las técnicas constructivas más comunes entre la totalidad de las aves, es hora de ahondar específicamente en algunas de las especies constructoras más curiosas y su forma de trabajar.

### **-Faisán australiano. *Leipoa ocellata*.**

Esta ave, también conocida como megápodo, es endémica de Australia y destaca por construir el nido más grande de todas las aves.

Desarrollan sus nidos en un hábitat desértico por lo que deben enfrentarse a grandes cambios de temperaturas ya que se pasa de un calor sofocante por el día a frío intenso por la noche. A pesar de estas condiciones, son capaces de mantener sus huevos a la temperatura adecuada, todo gracias a sus técnicas.

El Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1973, Kart von Frisch<sup>30</sup>, en su investigación sobre la arquitectura animal menciona que el macho selecciona un área en el suelo del bosque que no esté muy sombrío. Después de limpiar todos los escombros de ese lugar, deja un espacio libre aproximado de un metro cuadrado.

Más tarde, en abril, el macho cava un hoyo en el suelo que puede llegar a los 3 metros de ancho y 1 metro de profundidad. En él, amontona y arrastra hojas y arena que se encuentran a un radio de aproximadamente 50 metros para rellenarlo y formar un montículo. Cuando las hojas empiezan a pudrirse, comienzan a calentarse como lo hace el compost y pueden llegar a calentar los huevos a unos 33 grados de temperatura. Meses más tarde, en agosto cubre el montículo con una gruesa capa de tierra arenosa. Desde ese momento, comprueba todos los días la temperatura con diferentes métodos: cavando un hoyo en el montón de tierra, saltando encima o tomando una pequeña cantidad del compost en su pico para más tarde escupirlo.

30. FRISCH K. y FRISCH O. (1983). Animal Architecture. New York: Van Nostrand Reinhold Co.

Cuando queda satisfecho, invita a la hembra para que compruebe la construcción del nido. Es ella la que se encarga de dar el visto bueno y en ocasiones, el macho debe comenzar otra vez.

Cuando llega el otoño, el faisán australiano puede llegar a depositar hasta treinta en el montículo formado. El macho continúa con sus inspecciones de temperatura para comprobar si la temperatura es la correcta. Cuando llega el invierno y las temporadas de lluvias, el macho remueve el montículo mojado para crear una cámara bajo este que funciona como incubadora. La técnica que utiliza para mantener una temperatura constante consiste en depositar o retirar del montículo material dependiendo de la situación.

Por lo tanto, en días invernales, cuando el huevo puede estar muy frío, hace un cráter en la parte superior, dejando solamente una fina capa de arena para que así los rayos de sol puedan calentar la pila de hojas que hay por abajo.

El faisán australiano da vueltas sobre la arena que ha retirado para mantenerla lo más caliente posible antes de que la vuelva a colocar sobre el montículo, para mantener el compost caliente durante la noche. Hacer esto puede llevarle sobre 5 horas.

En este nido los huevos están entre 50 y 100 días hasta que eclosionan después de lo cual deben excavar un túnel hacia arriba para salir del montículo que puede durar entre 2 y 15 horas.



Fig 4.49. Fotografía del nido encontrado en la reserva Monjebup North al sur de Australia.



Fig 4.50. Vídeos que muestran el proceso de construcción del faisán, cómo actúan ante los cambios de temperatura y la sorprendente eclosión de los huevos

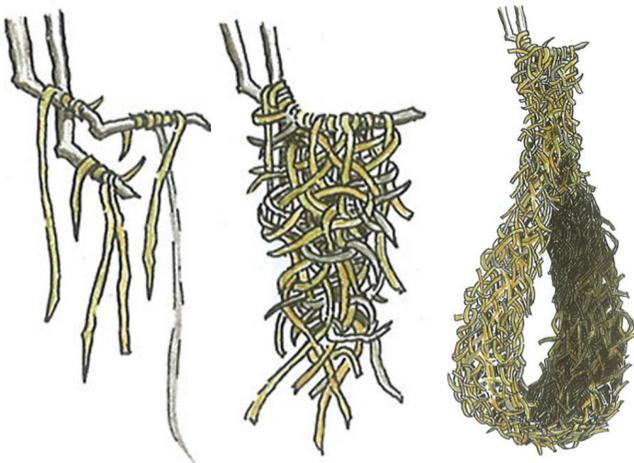


Fig 4.51. Fases seguidas por el carbonero cresta negra para construir su nido en las ramas más finas de los árboles



Fig 4.52. Resultado final obtenido por esta pequeña ave

### -Carbonero cresta negra

Es un pájaro pequeño que puede ser encontrado en Europa, África y Norte América. Sus acogedores nidos cuelgan de las ramitas más finas de los árboles.

En realidad, es una manera de evitar a los depredadores, ya que no pueden trepar ni posarse una rama tan fina. Sin embargo, no es la única técnica que utilizan con el fin de proteger su nido de los depredadores, ya que, respecto a otras aves, construyen una pequeña entrada en lugar de dejar el nido completamente abierto. Algunos nidos tienen incluso puertas que se construye como una tapa de tejido de ramitas y hierba pegadas al fondo de la entrada.

Esta puerta funciona como un puente levadizo para cubrir el hueco de la entrada en su totalidad. Para conseguir una construcción óptima de todos los elementos del nido, los pájaros más jóvenes tienen que practicar durante mucho tiempo. Construir los nidos puede llevar de tres a cuatro semanas. El proceso de construcción se desarrolla de la siguiente manera:

Primero, el carbonero empieza enrollando las hebras de la paja, hierba o pelo alrededor de una o más ramitas, dejando el final de cada hebra colgando.

A continuación, se dispone a consigue otro material con el que entreteje las hebras colgantes para formar una gruesa cuerda colgante.

Después, extiende la cuerda dejándola caer, dividiéndola en dos. Estas dos partes son unidas, adquiriendo la cuerda forma de honda.

Finalmente, completa las aberturas en ambos lados del final de la honda dejando un pequeño hueco en la parte superior.

Los nidos de los carboneros han sido usados por personas con otros propósitos. De hecho, la tribu africana de los Masais en África los utiliza como monederos o bolsos.

### -Pájaro tejedor común

Estas aves de la familia Ploceidae habitan en el África subsahariana, Australia y las regiones tropicales de Asia ya sea en solitario o en comunidad. De esta última manera, elaboran el que se considera el nido más grande de la Tierra construido por pájaros, ya que se asemeja a un verdadero edificio lleno de habitaciones para descansar, abrigados de la noche en el centro del nido, o a la sombra más fresca de día en su periferia, y donde pueden convivir varias generaciones de aves de tejedores<sup>31</sup>.

A pesar de que existen 57 especies conocidas de este pájaro, con características distintas y estilos y estrategias diferentes para tejer su nido, son todos unos expertos en la elaboración de nudos.

Son considerados uno de los pájaros más habilidosos del mundo debido al refinado trabajo que realizan de cestería al realizar sus nidos. Como otros pájaros, el resultado de su trabajo es fruto de mucha práctica durante la juventud. Sus esfuerzos más tempranos suelen ser bastante torpes si no eligen los nudos correctos ya que el peso al terminar puede hacer que el nido al completo caiga al suelo.

La planificación que siguen para completar su nido es la siguiente<sup>32</sup>:

Primero, el macho elige una rama que tenga una bifurcación y la usa para soportar el anillo de hierba y tallos que entreteje cuidadosamente utilizando su pico y patas. Con las patas sostiene las puntas de las fibras contra una rama y a su vez hace un nudo para que no se suelte, mientras que la otra punta la sostiene con el pico y así va tejiendo en círculo la entrada del nido. Deja los nudos sueltos para que así pueda fácilmente deshacerlos en el caso de que no estén bien hechos y no atraigan a la hembra y tenga que construirlo otra vez.

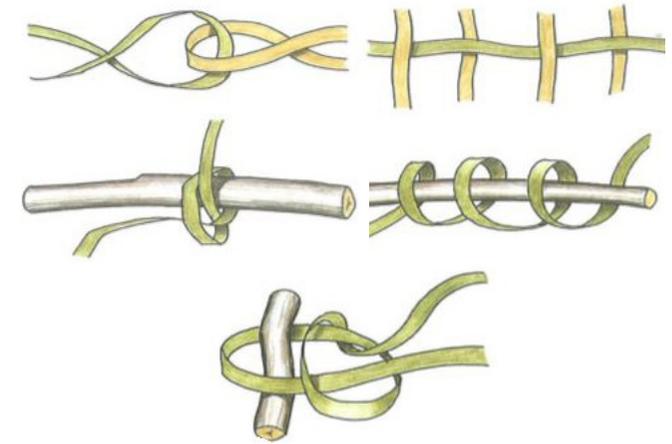


Fig 4.53. Diferentes nudos que son capaces de realizar los pájaros tejedores



Fig 4.54. El tejedor elige el final de una rama fina y ahorquillada como soporte para el nido en forma de cesta que está empezando a construir

31. Muy interesante <[www.muyinteresante.es/naturaleza/preguntas-respuestas/como-anidan-los-pajaros-tejedores](http://www.muyinteresante.es/naturaleza/preguntas-respuestas/como-anidan-los-pajaros-tejedores)> [Consulta: 1 de febrero de 2019]

32. GROSVENOR, G.N.(1996). Animales Muy Salvajes. Las Aves Y Sus Nidos. Barcelona: RBA. The National Geographic Society



Fig 4.55. La bola hueca creada será la cámara principal a la que se le añade una de entrada en la parte inferior. Cuando termina el macho se cuelga debajo del nido y llama a las hembras con su reclamo



Fig 4.56. Los nidos de los pájaros tejedores sociales son las mayores construcciones elaboradas por las aves en lo alto de un árbol. S Un solo nido puede llegar a albergar hasta 15 parejas de estos pájaros

Luego gradualmente extiende el anillo hacia afuera, y colgándose de él, teje alrededor de su cuerpo una bola hueca que será la cámara principal. Es decir, continúan tejiendo con otras fibras, y van calculando la tensión óptima porque si las fibras quedan muy flojas, el nido colapsa.

También se extiende el anillo hacia el otro lado, creando otra habitación, pero dejando un hueco para la entrada. En la medida que avanzan van calculando donde debe irse ampliando el nido, donde curvarlo, donde deben tejer más grueso, así hasta finalizar la entrada.

Este tubo de escape es la única entrada al nido dando protección contra la mayoría de las serpientes de árbol que usualmente está hacia abajo guindando de una rama. Una vez ha terminado, el macho se cuelga debajo del nido y llama a las hembras con su reclamo.

Una de las especies más destacadas dentro de los pájaros tejedores es el tejedor social o republicano. Construyen enormes nidos de paja, de hasta cuatro metros y medio de diámetro.

Inician la construcción alrededor de una rama robusta en un árbol de gran porte como las acacias que acaban casi por ocultar. Las aves recogen paja o hierbajos y los entretejen en forma de sombrilla, curvada en la parte superior.

En su interior tejen cámaras-nido individuales, que protegen cuidadosamente de la temperatura externa a través de unas cámaras que evitan el sol durante el día y lo retienen para pasar la noche. Cada una de las cámaras-nido está acolchada con montículos de hierba.

Las paredes internas de separación suelen ser endebles, pero todas las cámaras están protegidas de la lluvia por el techo impermeable. Se trata de las mayores construcciones elaboradas por las aves en lo alto de un árbol que llegan a albergar a decenas de familias.

Además, construyen numerosos falsos nidos esparcidos por las ramas de los árboles, gracias a los cuales los pájaros tejedores burlan a su gran depredador, la serpiente devoradora de huevos.

## -Pájaros carpinteros

El pájaro carpintero pertenece a la extensa familia de los Piciformes que deriva de la terminología latina que significa picus (carpintero) y formes (forma).

La forma característica que tiene su pico los hace inconfundibles entre otras especies además de convertirse en la herramienta necesaria para construir sus nidos. Además, tienen una lengua muy larga y pegajosa que también participará en el proceso de construcción.

El pájaro carpintero tiene en su anatomía todo el equipamiento necesario por los leñadores. Sus garras afiladas y su cola rígida les permite posarse en los troncos mientras pican la madera y la corteza con sus potentes picos.

Excavan en los árboles, buscando insectos y larvas para comer, y construyen dentro sus propios nidos. Los pájaros carpinteros utilizan también sus picos como baquetas, golpeando en las ramas huecas para comunicarse con otros pájaros<sup>33</sup>.



Fig 4.57. Representación que muestra que los pájaros carpinteros pueden tallar nidos incluso en la madera sólida de los árboles



Fig 4.58. Un pájaro carpintero limpiando su nido en la zona de Guápiles (Costa Rica)



Fig 4.59. Vídeo que muestra el proceso de limpieza y adecuación del nido del pájaro carpintero

33. HANSELL, M. (2008). Animal Architecture and building behaviour. Oxford: Oxford University Press. pp 305



C  
O  
N  
C  
E  
P  
T  
O  
S  
B  
Á  
S  
I  
C  
O  
S

- SUPERVIVENCIA
- FORMA-FUNCIÓN
- VERSATILIDAD MATERIALES
- MANTENIMIENTO
- MEDICIONES MICROMÉTRICAS
- VENTILACIÓN Y CONTROL HUMEDAD
- APROVECHAMIENTO ESPACIO INTERIOR
- ENTENDIMIENTO TERRENO
- CRITERIOS CRECIMIENTO
- CERCANÍA ALIMENTO

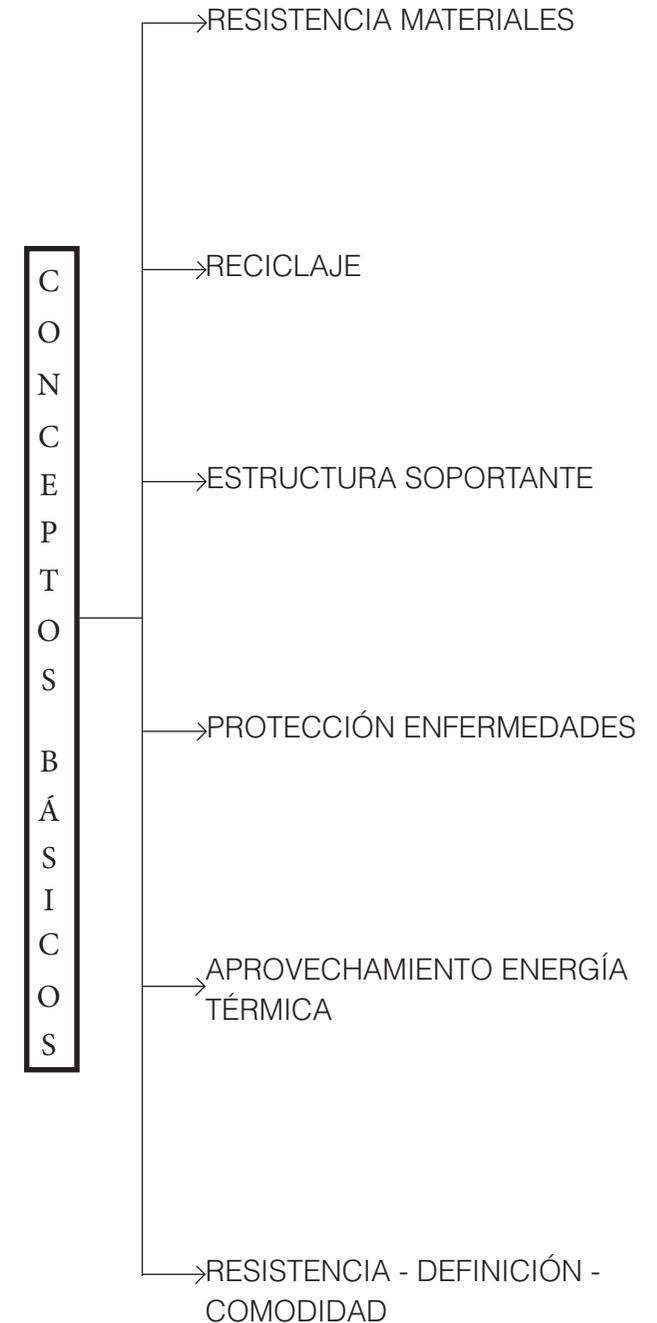
#### **4.5. Conceptos básicos de las técnicas constructivas**

Tras el estudio y análisis de una variedad bastante diversa de técnicas animales y su comportamiento se pueden sacar a relucir algunos de los conceptos más evidentes que hemos detectado en la edificación de sus habitáculos. Entre otros son<sup>34</sup>:

- 1.** La prioridad de la supervivencia del inquilino en el medio ambiente donde habita.
- 2.** El empleo constante de la forma siguiendo a la función en la construcción de los habitáculos
- 3.** La versatilidad es común en el tipo de materiales para optimizar su uso en la construcción del habitáculo.
- 4.** El mantenimiento permanente de varios habitáculos para preservar su vida en ese contexto.
- 5.** Ciertas construcciones son generadas con mediciones micrométricas, como son los casos de las celdas elaboradas por las aves y avispas.
- 6.** Prioridad de la ventilación y control de humedad como requisito esencial de los habitáculos para mantenerse sanos.
- 7.** Frecuente distribución lógica para el aprovechamiento del espacio interior en los nidos de grandes sociedades.
- 8.** Conocimiento evidente del contexto en donde habita, para aprovechar al máximo las propiedades del terreno.
- 9.** La capacidad de visualizar su etapa de crecimiento como inquilino, para planear los criterios del crecimiento del habitáculo.

34. HANSELL, M. (2009). Built By Animals The natural history of animal architecture. Oxford: Oxford University Press.

- 11.** La fortaleza proporcional de los materiales seleccionados para la construcción.
- 12.** Muchos materiales de construcción, son consumibles por el inquilino, presentando con ello la posibilidad de reciclar.
- 13.** Es común elegir primero la “estructura soportante” para fortalecer más la resistencia de su habitáculo.
- 14.** Utilización de ciertos elementos de protección en los materiales para evitar enfermedades, como es el caso de la telarañas y de los nidos de ciertas aves.
- 15.** La orientación de los nidos está en referencia al sol para aprovechar al máximo la energía térmica en algunas aves y termitas.
- 16.** Los nidos y las madrigueras llegan a presentar tres tipos de componentes: estructuras base con material tosco y burdo, que le da rigidez y resistencia, elementos intermedios que contribuyen a definir y limitar la forma del nido, material complementario que aporta comodidad interior al usuario así como un mantenimiento de la temperatura, permeabilidad de la humedad, y eliminación de posibles parásitos.





## **5. ANALOGÍAS ENTRE LA ARQUITECTURA ANIMAL Y LA HUMANA**

## 5. ANALOGÍAS ENTRE LA ARQUITECTURA ANIMAL Y LA ARQUITECTURA HUMANA

El hombre ha conseguido desarrollar sus propias técnicas constructivas y destacar de los que fueron sus iniciadores en el arte de la construcción gracias a su gran capacidad para acumular experiencia gracias a la imaginación y de transmitir esa información de generación en generación.

Esa supremacía y especialización que ha ido ganando el hombre respecto a los animales han provocado que rara vez vuelva éste la vista hacia las construcciones animales, aparentemente precarias y primitivas. Sin embargo, los animales llevaban millones de años construyendo antes de que nuestros propios conceptos arquitectónicos empezaran a evolucionar.

Cuando estos largos periodos evolutivos se comparan con los escasos millones de años de evolución desde la aparición de Homo erectus, no extraña que las técnicas constructivas de los animales superen en algunos aspectos a las nuestras. En otras palabras, millones de años antes de que Homo sapiens construyera sus torpes primeras estructuras ya había animales arquitectos sobre la tierra y por eso las construcciones animales superan en ocasiones a la arquitectura humana.

Por esta razón, la observación de las actividades constructivas de los animales aun hoy día puede ser, enormemente enriquecedora para el proyecto arquitectónico y se han intentado llevar a la práctica en diversas ocasiones.

No obstante, a la hora de aplicar técnicas animales en la arquitectura humana suele resultar en la gran mayoría de ocasiones un fracaso. Hay que recordar que los animales construyen siguiendo las instrucciones que les indican sus genes más lo que aprenden viendo a sus mayores construir. Ninguna especie animal trata de construir como otra diferente.

Muy rara vez sucede que el hombre conscientemente aplique las técnicas de otros animales para solucionar un problema de construcción de espacios para humanos quedando su aportación en el aspecto más trivial y superficial. Sin embargo, cuando lo logra, nos encontramos con la denominada Arquitectura biomimética.

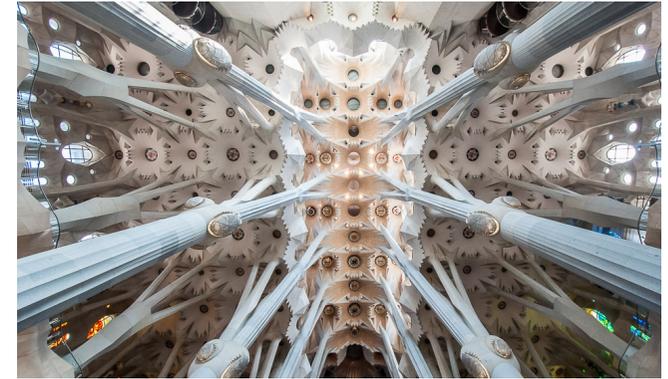


Fig 5.1. En el interior de la Sagrada Família, Gaudí se inspira en la característica geométrica de los árboles denominada ramificación

- 1. IDENTIFICA**  
LA FUNCIÓN
- 2. DEFINE**  
el contexto
- 3. BIOLÓGIZA**  
el reto
- 4. DESCUBRE**  
los modelos naturales
- 5. EXTRAE**  
los principios del diseño
- 6. EMULA**  
los principios de la vida

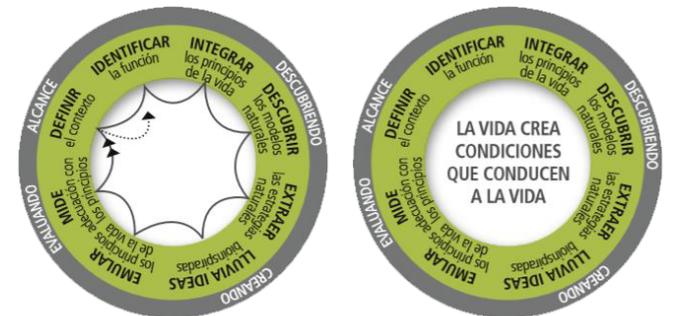


Fig 5.2. El reto a la biología. La biología es la única tecnología conocida que es sostenible por lo que es necesario identificar las soluciones que nos brinda la biodiversidad y conocer la forma de actuación siguiendo sus mismos pasos



- 1. DESCUBRE**  
los modelos naturales
- 2. RESUME, EXTRAE**  
los principios de diseño
- 3. LLUVIA DE IDEAS**  
de las aplicaciones potenciales
- 4. EMULA**  
las estrategias de la naturaleza
- 5. EVALÚA**  
comprobando los principios de la vida
- 6. EMULA**  
los principios de la vida

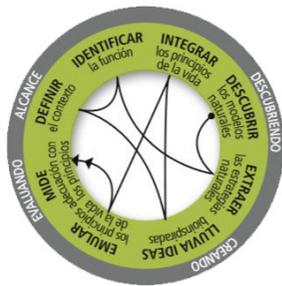


Fig 5.3. De la biología al diseño. La arquitectura biomimética es una consciente emulación inspirada por la naturaleza de las soluciones innovadoras que nos brinda y que hemos de saber dónde aplicar

La palabra biomímesis<sup>34</sup> proviene del griego bios, vida, y mimesis, imitación. La biomímesis es el estudio, entendimiento, replicación y adaptación de los principios, métodos y sistemas naturales aplicables a diseños de escala humana, como los pertinentes a la Ingeniería, la Arquitectura y la tecnología.

La arquitectura biomimética es una filosofía contemporánea que busca soluciones sostenibles en la naturaleza, sin replicar puramente sus formas, sino que a través de la comprensión de las normas que las rigen. Este enfoque multidisciplinario busca seguir una serie de principios en lugar de centrarse en códigos estilísticos.

Estos mecanismos naturales parecen funcionar mejor que algunas de las tecnologías más avanzadas en la actualidad, requieren de menos energía y no producen residuos ni dejan huellas. El desafío está en cómo los arquitectos los estamos llevando a la realidad... y si realmente terminan funcionando como el sistema que los inspiró<sup>35</sup>.

Nos acerca a un diseño más natural, ya que si tomamos en cuenta las estrategias y soluciones que utiliza la naturaleza, podemos aplicarlas en varios aspectos. Estas formas naturales han demostrado funcionar mucho mejor que las tecnologías más innovadoras que existen en la actualidad, actuando de manera directa en el diseño de estructuras.

La Biomimética es uno de los conceptos más antiguos utilizados por el hombre, porque se trata de aprender de la naturaleza, solo que ahora tiene un impacto más notable por las grandes problemáticas sociales a las que se enfrenta el ser humano. La pregunta que siempre aparece es, si la naturaleza ya lo ha inventado, ¿por qué no copiarlo?

35. BENYUS, J. (1997).Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. New York, Harper Perennial.

36. Plataforma arquitectura. <<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-312614/arquitectura-biomimetica-que-podemos-aprender-de-la-naturaleza>> [Consulta: 10 de marzo de 2019]

Dentro de la biomímesis existen tres grandes enfoques<sup>37</sup>:

El primero sería “La naturaleza como modelo”(inspiración), en la que se estudia los modelos naturales para luego imitarlos, o utilizarlos como inspiración. En este primer grupo encontramos obras como el avispero en Culver City, CA, EEUU de Eric Owen Moss o el Aeropuerto de Brno-Terminal de salidas de Petr Parolek, en las que el objetivo principal es copiar únicamente la forma de la naturaleza.

El segundo es “La naturaleza como medida”, donde se presenta la utilización de un estándar ecológico para juzgar lo que sería correcto, o no.

Y tercero, aparece “la naturaleza como mentor” rama que toma a la biomímesis como una nueva manera de ver y valorar la naturaleza. Nos acercamos a los ecosistemas naturales y nos planteamos cómo encaja cada producto dentro de una cadena más amplia

Esta última es convierte en la más interesante en la aplicación de este apartado ya que se basa en lo que se puede aprender del mundo natural, la forma de aplicar técnicas constructivas de los animales las obras humanas, es decir, la transposición.

Así se deduce que la biomímesis se puede adaptar a todo tipo de diseños<sup>38</sup>. Desde biólogos, diseñadores, ingenieros y demás científicos, se inspiran en la naturaleza para generar nuevas soluciones.

Otra aplicación interesante de biomímesis en el campo del diseño arquitectónico y estructural, se presenta cuando se concibe a la estructura como parte significativa del valor formal del objeto arquitectónico. Un gran exponente de este principio es el maestro Gaudí, el cual fundamentaba la forma de las estructuras principalmente en la naturaleza, caracterizándose éstas por una capacidad de generación geométrica y por unas posibilidades plásticas inigualables. Gaudí planteaba que “la naturaleza puede descomponerse con ayuda de la geometría, que se erige como instrumento fundamental de la arquitectura”<sup>39</sup>



Fig 5.4. The Beehive, en español conocido como el “avispero”, fue nombrado en retrospectiva debido a su forma se encuentra en California



Fig 5.5. La marca Mercedes Benz sacó al mercado un diseño inspirado en el pez cofre para mejorar rendimiento aerodinámico, aumentar seguridad y comodidad. El diseño del automóvil se basa en la relación entre rigidez y peso que presenta el pez. Este es el claro ejemplo de que la biomímesis es aplicable a a todas las ciencias

37. BENYUS, J. (1997). Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. New York, Harper Perennial

38. VINCENT, J. (2006) “Applications: Influence of Biology on Engineering”, en Journal of Bionic Engineering, No.3. pp161-177

39. TÁRRECH, A.P (2011). La Sagrada Familia según Gaudí. Barcelona: El Aleph Editores



Fig 5.6. Vista exterior del estadio



Fig 5.7. La estructura del estadio nacional es considerada una de las más grandes de acero del mundo. Parece caótica pero está detenidamente racionalizada. En primer lugar se colocan los 24 pilares que llevan la mayor parte de las cargas y definen la forma en planta y fachada

Con los parámetros anteriormente expuestos, se analizan los casos prácticos de arquitectura humana que cumplen con el tercer enfoque de la biomímesis en los que se utilizan algunas de las técnicas descritas en el apartado anterior.

### 1. Estadio Nacional Beijing : Herzog & De Meuron (2008, PEKÍN, CHINA)

El Estadio Nacional de Pekín, diseñado para su uso durante los Juegos Olímpicos de Verano de 2008, así como para los Juegos Paralímpicos del mismo año que se empleará nuevamente durante los Juegos Olímpicos y Paralímpicos de Invierno de 2022.

El diseño del estadio estuvo inspirado en la formación de los nidos de las aves. Los arquitectos han logrado plasmar el concepto de tal manera sobre su obra que el proyecto pronto se ganó el sobrenombre de “nido de pájaro” de manera espontánea entre la población china.

El diseño se basa en los nidos de las aves no sólo a nivel estético sino también a nivel estructural. Toda la estructura visible desde el exterior imita las ramas entrelazadas de los nidos que al trabajar en conjunto las unas con las otras logran resistencias inimaginables para cada elemento aislado. La idea surgió de un solo hilo envuelto alrededor de una pelota en la que capas de geometría lógica da la apariencia de aleatoriedad y la forma orgánica de la estructura.

Su diseño tuvo que ser fuente de inspiración y ser capaz de resistir un terremoto. Por lo tanto el peso ligero se combinan con la fuerza de 110 000 toneladas de un nuevo tipo de acero, el más puro que se haya desarrollado en China, incluyendo 36 km de puntales de acero. Se trata de “una de las maravillas de la ingeniería clave en el mundo de hoy”<sup>40</sup>. Aunque la impresión que produce es la de una disposición casual y casi natural, naturalmente los puntos de encuentro de los diversos elementos y la dirección que asumen dentro del nido, son fruto de precisos cálculos.

En el centro del área que alberga también las demás estructuras olímpicas, el estadio parece estar posado como una astronave, con una silenciosa majestuosidad cuyo atractivo viene dado también por su forma ligeramente ondulada.

40. China Highlights <<https://www.viaje-a-china.com/guia-beijing/atracciones/estadio-nacional-de-nido.htm>> [Consulta: 1 de marzo de 2019]

## 2. Eastgate Center: Mick Pearce (1996, Zimbaue)

El Eastgate Center está situado en Harare, Zimbaue y representa una de las mejores adaptaciones de arquitectura ecológica hasta el momento.

En el edificio se puede encontrar un complejo de oficinas y centro comercial que fue diseñado usando los principios de la biomimesis por el arquitecto Mick Pearce en colaboración con Arup ingenieros y Scott Turner.

Tanto Scott como su equipo escanearon inicialmente los termiteros y crearon modelos tridimensionales a partir del diseño de los nidos, y concluyeron que el diseño podía aplicarse a escala humana e influenciar los sistemas de refrigeración pasiva. Mick Pearce se interesó en dicho trabajo ya que los sistemas de aire acondicionado en África resultan muy costosos y difíciles de mantener por lo que optó por la refrigeración pasiva.

No se proyectó sistema convencional de aire acondicionado o calefacción, no obstante mantiene una temperatura regulada a lo largo del año usando métodos inspirados en las termitas africanas.

Dichas termitas en Zimbabwe construyen montículos gigantes dentro de los cuales cultivan un hongo que es su principal fuente de alimento. Dicho hongo debe mantenerse a exactamente 31 grados centígrados, mientras que las temperaturas afuera oscilan entre 2 grados por la noche a 40 durante el día. Las termitas logran esta notable hazaña al abrir y cerrar constantemente una serie de conductos de ventilación y calefacción a lo largo del montículo a lo largo del día (tal y como se ha explicado en el apartado de técnicas constructivas) para conseguirlo.

Con un sistema de corrientes de convección cuidadosamente ajustadas, se aspira aire en la parte inferior del montículo, hacia abajo en recintos con paredes fangosas, y hacia arriba a través de un canal hasta el pico del montículo de termitas. Las industriosas termitas constantemente cavan nuevos respiraderos y tapan los viejos para regular la temperatura.



Fig 5.8. Vista exterior del Eastgate Center y su comparación con el sistema de ventilación de un termitero



Fig 5.9. En el vídeo se muestra el funcionamiento del edificio a través de esquemas funcionales y su inspiración en la naturaleza

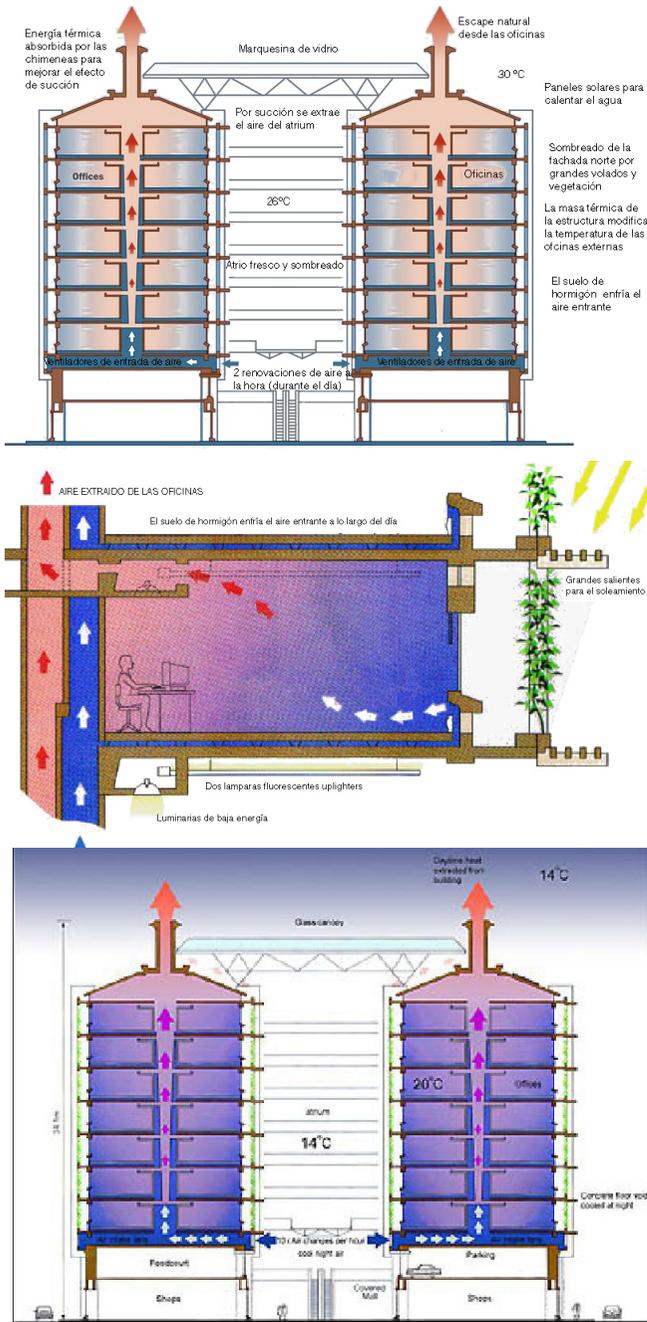


Fig 5.10. Esquema de la ventilación del edificio durante el día y la noche

Su interés principal es la dosificación de energía calórica que estas estructuras realizan, con el fin de mantener una temperatura óptima tanto de día como de noche.

El proyectista explica la metodología seguida por estos insectos para dar a entender y explicar de una forma más efectiva su inspiración y las razones que la llevan a aplicarla.

Ahondando en su estructura funcional y organizativo, Eastgate es un complejo que consta de dos edificios unidos por un techo de vidrio. Debajo de esto, encontramos las comunicaciones horizontales (pasarelas) y verticales (ascensores) suspendidos en cables de viga de celosía que se extienden sobre el atrio.

Su morfología principal es similar a la de una chimenea, extrae el aire caliente (menos pesado) y renueva el aire que se encuentra en el interior por medio de corrientes más frescas (aire más pesado) presentes en la parte inferior. De esta manera se crea una red de conductos que actúan como un sistema de refrigeración, evitando la instalación, o por lo menos reduciendo las horas diarias de funcionamiento, de maquinaria de acondicionamiento de aire.

Al igual que sucede en las termitas, las paredes exteriores del Eastgate son porosas y reciben el calor, que el 'cuerpo' del centro comercial absorbe. Por la noche, ese calor que ha ido enfriándose sale del edificio y volverá a calentarse con la llegada del día.

El Eastgate Center, que en gran parte está hecho de hormigón, tiene un sistema de ventilación que funciona de la siguiente manera: El aire exterior que se extrae se calienta o se enfría por la masa del edificio dependiendo de cuál es más caliente, el hormigón del edificio o el aire. Luego se ventila en los pisos y oficinas del edificio antes de salir por chimeneas en la parte superior.

El aire es extraído continuamente de el espacio abierto del por ventiladores situados en el primer piso. Luego, se empuja secciones verticales de suministro de conductos que se encuentran en la columna central de cada uno de los dos edificios. El aire fresco reemplaza el aire viciado que sube y baja a través de los orificios de escape en los techos de cada piso.

41. BENYUS, J. (2009, Julio) Biomimicry in Action. Oxford, TED Talks

Finalmente, ingresa a la sección de escape de los conductos verticales antes de que salga del edificio a través de las chimeneas.

Como resultado, el edificio consume únicamente el 10%<sup>41</sup> de la energía que consume un edificio de oficinas tradicional, gracias a trasladar la técnica constructiva de las termitas a un edificio lo que conlleva imitar los principios básicos de termorregulación de dicha especie.

Durante los primeros cinco años de su construcción, se ahorraron alrededor de 3,5 millones de dólares (más de 2,5 millones de euros) en gasto energético gracias a su diseño.

Debido a su gran éxito, además de en el Eastgate Centre, el sistema de ventilación pasiva inspirado en los termiteros africanos fue repetido en el edificio Portcullis House de Londres, edificado en 2001 frente al palacio de Westminster.

Dicho proyecto fue realizado por el estudio TERMES, el cual describe que el principio de su sistema de refrigeración es conocido por constructores desde la Antigüedad: el calor que es almacenado durante el día puede ser ventilado de noche, cuando las temperaturas descienden.

De esta forma consiguen que durante el inicio del día el edificio esté fresco y cuando por la mañana y a mediodía la actividad de máquinas, las personas y la radiación solar empiezan a generar calor, este es absorbido por el edificio a través de una porosidad previamente planteada para almacenarlo. De esta forma, la temperatura se incrementará, pero no drásticamente.

Por la tarde, mientras la temperatura exterior desciende, el aire interno caliente es ventilado a través de las chimeneas, asistido por ventiladores. Al ser menos denso, el aire caliente tiende a ascender de manera natural, dejando espacio para el aire fresco de la base del edificio. Finalmente, por la noche, el ciclo de refrigeración continúa, con aire frío concentrándose en las aberturas del suelo hasta que la estructura porosa del edificio ha alcanzado una temperatura ideal para el día siguiente.



Fig 5.11. Vista exterior de Portcullis House en Londres.



Fig 5.12. Vista interior del patio central del Portcullis House



Fig 5.13. Vista general del Estadio Olímpico

### 3. Estadio olímpico de Munich, Frei Otto, 1972

El Estadio Olímpico de Múnich es un estadio olímpico ubicado en la ciudad de Múnich, capital del estado de Baviera al sur de Alemania. Se construyó para albergar los Juegos Olímpicos de Múnich 1972, y con posterioridad fue sede de la Copa Mundial de Fútbol de 1974.

Fue construido basándose en el principio de las estructuras tensadas. Estas estructuras poseen una tecnología propia, basada principalmente en el comportamiento del material. La exigencia de una curvatura doble en toda la superficie de la membrana textil condiciona la forma de la misma y, por tanto, su aspecto final. La capacidad creadora y los conocimientos del proyectista, con la utilización sistemática de programas informáticos, son los que marcarán el resultado arquitectónico definitivo<sup>42</sup>.

Dentro de las estructuras tensadas se encuentran una de los sistemas biológicos más estudiados en el campo de la arquitectura a lo largo de la historia, las telas de araña. Para entender esta tipología estructural, es importante conocer su geometría y su materialidad. Dependiendo de su morfología, las telas de araña pueden clasificarse en distintas tipologías: las de geometría orbicular, definidas por hilos radiales, las tubulares, con forma de tubo, o las telas en forma de malla, presentes en la vegetación en forma de hoja plana. Además, cada una de estas estructuras está compuestas por diferentes partes, completando el conjunto de la estructura. Los radios se caracterizan por su rigidez y resistencia. Las espirales transversales están formadas por una fibra menos rígida, más elástica y deformable, pero no tan resistente como los radiales.

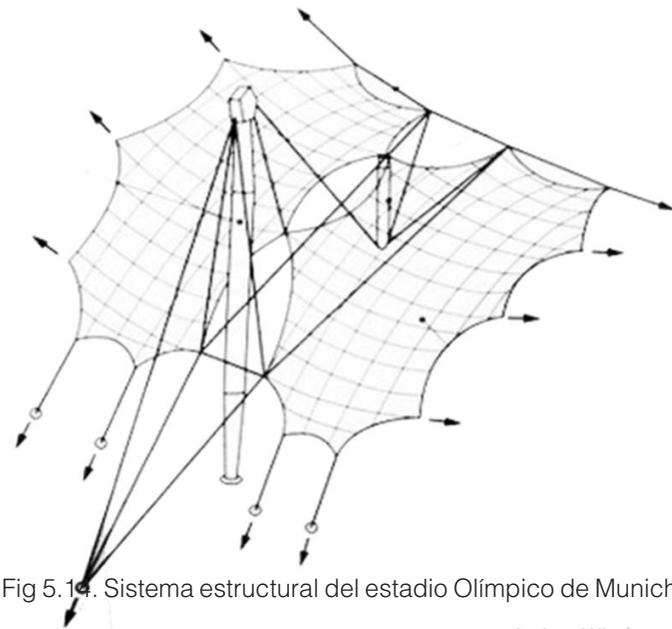


Fig 5.14. Sistema estructural del estadio Olímpico de Munich

La cubierta del estadio, que cubre y unifica el estadio, utiliza una membrana suspendida a través de unos mástiles verticales que transmiten las cargas hacia la parte firme. Además, tiene una superficie de 74 800 m<sup>2</sup> y una malla rectangular de cables pretensados, distanciados 75 centímetros hacia ambos lados y con un ángulo de intersección variable, lo cual hace posible que se adapte a las curvaturas que posee la cubierta. La cobertura proyectada no sólo cubre el estadio, sino los otros equipamientos del complejo deportivo, unificando de esta manera los elementos del Parque Olímpico.

42. IASO. <<https://www.iasoglobal.com>> [Consulta: 1 de marzo de 2019]

Por otro lado, esta membrana, formada por un tejido de poliéster, se estabiliza lateralmente a través de una red de cables más pequeños conectada a otro cable de acero mayor conectado a los cimientos de hormigón de cada extremo creando lo denominado como una tensoestructura<sup>43</sup>.

Sin embargo, existe una gran diferencia entre esta propuesta arquitectónica y la composición biológica del tejido de seda. La gran dimensión de los cables y las conexiones entre éstos muestran grandes diferencias respecto a la estructura de las telas de araña de tamaño más reducido.

El desarrollo de materiales más sofisticados en los últimos años ha permitido acercamientos más acordes que se acercan más al ejemplar de los arácnidos.

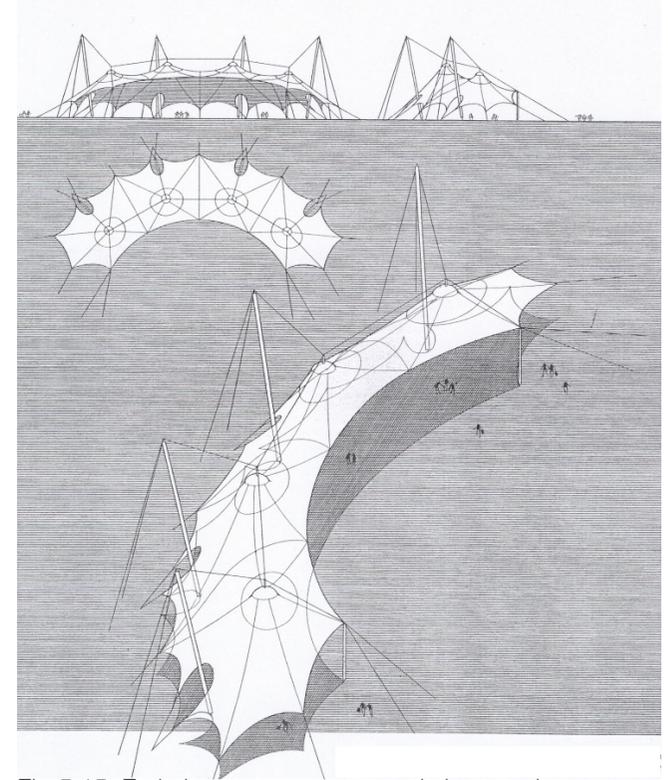


Fig 5.15. En la imagen se muestra el sistema de estructura tensada que conforma el estado Olímpico

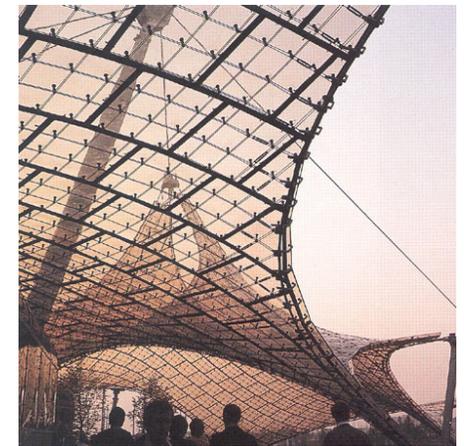


Fig 5.16. En la imagen se muestra el sistema de estructura tensada que conforma el estado Olímpico

43. Las tensoestructuras son estructuras formadas por tejidos pretensados y redes de cables que se sustentan a base de elementos rígidos tipo mástiles, arcos o pórticos. Responden a la actuación de las cargas desarrollando únicamente esfuerzos de tracción, por lo que constituyen una estructura bastante ligera. Es el caso de la tela de araña por ser ligera aunque fuerte, resistente y fácil de mantener. Datos de Tensoestructuras, Luisa Basset Salom



Fig 5.17. Estructura recíproca del Puente de Luxmore de Jamie McCulloch y Atelier One

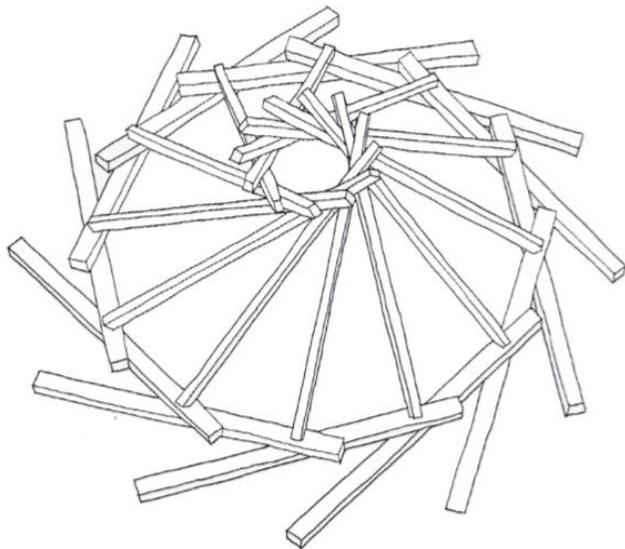


Fig 5.18. Esquema básico de funcionamiento de una estructura recíproca

#### 4. El puente de Luxmore, de Jamie McCulloch y Atelier One. Estructuras recíprocas

El puente de Luxmore es un claro ejemplo donde se aplica la idea de estructura recíproca<sup>44</sup> y tejidos amarrados que pueden verse en construcciones actuales dentro del mundo de la bioconstrucción y la arquitectura sostenible. Sin embargo, los primeros estudios acerca de la geometría fueron realizados por Leonardo da Vinci en torno al año 1500.

Esta estructura es la empleada en sus nidos por el tejedor común el cual los construye utilizando más de 6 diferentes tipologías de nudos en su construcción. No obstante, no se trata de una técnica restringida a esta familia sino que es aplicada por las aves en general cuando la luz que debe ser cubierta entre ramas excede el tamaño de las ramillas dispuestas para la ejecución del nido. .

En el diseño del puente de madera de Luxmore y en todas las estructuras recíprocas, vemos un juego de diferentes operaciones de simetría. Estas son: la repetición, la reflexión, la rotación, y la ampliación/reducción que se puede observar en los elementos de madera con los que está construido.

Constituyen, a su vez, una trama tridimensional basada en el mutuo soporte de sus elementos constitutivos conformando así un circuito de fuerzas cerrado.

Cada elemento estructural a su vez se apoya y sirve de apoyo al otro. La estabilidad de la estructura depende del equilibrio entre las fuerzas de tracción y compresión para que simultáneamente se anulen en los nudos o puntos de unión/apoyo de los elementos constitutivos. Esto permite cubrir grandes vanos sin soportes intermedios o sistemas de pórticos, dejando espacios diáfanos. Su disposición geométrica da como resultado una estructura estable, siendo 3 el número mínimo de elementos

44. HUERTA DE FERNANDO, L. (2017). Técnicas Biomiméticas aplicadas a la arquitectura. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid





## 6. DISCUSIÓN / CONCLUSIÓN

Tras todo el desarrollo y la exhaustiva investigación acerca del proceso constructivo en diversas especies animales y la posible aplicación de algunas de sus técnicas en el ámbito humano se pueden extraer unas conclusiones bastante variadas y que llegan a ser contradictorias en ciertos momentos. Dichas conclusiones son consecuencia de la alusión y referencia de estudios de gran complejidad por parte de ciencias de lo más diversas durante la Historia.

La naturaleza es un ente tangible que nos rodea y por lo tanto, nos crea curiosidad conocer su funcionamiento.

Independientemente de los orígenes de la arquitectura, y considerando la importancia de analizar las leyes de la naturaleza, las primeras fuentes donde se hace referencia a las ventajas de estudiar el medio ambiente las encontramos en uno de los filósofos más importantes de la antigua Grecia, Demócrito de Abdera, quien ya señalaba que al concebir las invenciones el ser humano, habría de imitar a la Naturaleza, pues “Copiando a los animales, aprendemos las cosas más importantes. Somos aprendices de la araña imitándole en los oficios de tejer y confeccionar prendas de vestir.

“Copiando a los animales aprendemos las cosas más importantes. Somos aprendices de la araña imitándole en los oficios de tejer y confeccionando prendas de vestir. Aprendemos de las golondrinas a construir viviendas, y de las aves cantoras, del ruiseñor y del cisne, a cantar. La propia naturaleza nos enseña a cultivar la tierra<sup>45</sup>”.

No hay que olvidar la gran importancia que le concede al estudio de este campo Leonardo Da Vinci<sup>46</sup>: “Puesto que es mi intención el consultar a la experiencia primero y mostrar después por razonamiento la razón por la que esa experiencia está obligada a actuar de esa manera, antes de seguir adelante en un tema, lo probaré primero por experimentación. Y esta es la verdadera regla según lo cual deben proceder todos aquellos que analizan los efectos de la naturaleza; aunque la naturaleza empieza con la causa y termina en la experiencia, nosotros debemos seguir el camino opuesto, es decir, debemos empezar por la experiencia y por medio de ella investigar la causa”

45. Democrito de Abdera (420 a.C.) filósofo y matemático griego que vivió entre los siglos V-IV a. C

46. DA VINCI, L. (1999), Cuaderno de notas. Madrid: Ediciones y distribuciones Mateos. pp. 207



Incluso el filósofo de la ciencia Gaston Bachelard<sup>47</sup> incluyó en su seminal obra *La Poética del espacio* un capítulo dedicado a los nidos. En este influyente libro sobre la poética de la iconografía arquitectónica, Bachelard cita una opinión de Ambroise Paré (padre de la cirugía, la anatomía, la teratología y la sanidad militar.)

“La iniciativa y la técnica con la que construyen sus nidos los animales es tan eficaz que no es posible mejorarlas de tanto como superan a los albañiles, carpinteros y canteros. Pues no hay hombre que sea capaz de construir una casa tan adecuada para él mismo y para sus crías como las que se construyen estos animalitos. De esta verdad procede el proverbio según el cual el hombre puede hacerlo todo salvo construir un nido igual que los pájaros<sup>47</sup>”.

A pesar de que todas las especies que construyen tienen una elevada técnica manipulativa, tal y como se ha visto en apartados anteriores, se puede remarcar pues es especialmente evidente, el trabajo de dos de ellas; arañas, insectos que derivan su técnica del hecho de estar dotados de múltiples patas articuladas y sutiles piezas bucales y las aves cuyos afilados picos unidos a unas cabezas extremadamente móviles les permiten movimientos muy precisos.

Son de estas últimas de las que expertos científicos y estudiosos del tema han profundizado y han dedicado más espacio en sus escritos con el fin de desentramar todos sus sistemas y procedimiento de actuación.

Por lo que no cabe duda que dichas construcciones hayan significado una ventana abierta sobre los procesos de evolución, de la tradición y de la adaptación ecológica.

Lo que se saca en claro es que nuestra arquitectura está condenada comprometer su funcionalidad porque en nuestras obras se tiene el deseo de representar simbólicamente nuestro mundo así como en ciertos casos un deseo de inmortalidad. Una obsesiva búsqueda de novedad y nuevos inventos que han demostrado en ciertas ocasiones más que avances retrocesos, debido a su alto impacto en el medio ambiente. No se debe olvidar la tendencia a distanciarse de la tradición, la funcionalidad y la racionalidad en la arquitectura moderna.

47. Ambroise Paré. *Le livre des animaux et de l'intelligence de l'homme*. Ouvres complètes, édition J.F. Malgaigne, vol. III p. 740

Realmente, la arquitectura humana se puede vincular más a unas directrices culturales, metafísicas y estéticas que a una lógica y funcionalismo puros.

Sin embargo, además de lo impresionantemente hermosas que resultan las construcciones animales, estas representan un funcionalismo ecológico sin compromisos. Sus formas y estructuras nacen del contexto y de la inevitabilidad de la lógica estructural y funcional. Las termitas, por ejemplo, construían sus termiteros de la forma que los construyen hoy decenas de millones de años antes de que caminasen sobre la tierra nuestros primeros antepasados primates.

Y este hecho tiene una clara razón, la arquitectura animal nos muestra el procedimiento lógico que ha ido probando e investigando por miles de millones de años a través de la práctica. Nos muestra y enseña la vía apropiada para alcanzar una arquitectura ecológica que actualmente todo el mundo busca en sus diseños y construcciones.

Es por tanto necesario invertir dicha imagen y como dijo Juhani Pallasma imaginarnos viviendo en casas inspiradas por las construcciones de los grandes maestros constructores del mundo animal.

¿Entonces se debe volver a las formas de construcción primitivas? La respuesta es un rotundo no. Mayor eficacia y sofisticación son claramente los objetivos del proceso de evolución de la arquitectura animal, por lo que nuestros diseños deben avanzar con el apoyo de la tecnología hacia una avanzada sofisticación.

Hemos visto que cada uno de los habitáculos propuestos por las especies animales responde a la forma en la que solventar sus dificultades primordiales para sobrevivir de las condiciones de su hábitat y los depredadores correspondientes. En esta situación, es imprescindible crear un balance perfecto entre la necesidad, la creatividad y la calidad.

Justo este balance ha ido siendo olvidado por el ser humano basándose en el interés por ser innovador en el que ha primado lo insólito a través de la creatividad, olvidando que la creatividad es en sí, un medio y no un fin.



## 7. BIBLIOGRAFIA

ADAY, B. (2017) "Aliados del huerto: avispas alfareras" en *La huerta de Toni*, 8 de mayo  
<<http://www.lahuertinadetoni.es/aliados-del-huerto-avispa-alfareras/>> [Consulta: 10 de febrero de 2019]

Aves en el nido. <<https://www.fondosanimales.com/imagenes-aves-en-el-nido-jpg>> [Consulta: 20 de marzo de 2019]

BAHAMÓN, A. y PÉREZ, P. (2007). *Arquitectura Animal : Analogías Entre El Mundo Animal Y La Arquitectura Contemporánea*. Barcelona : Parramón, D.L

BARNETT, S.A (1981). *La conducta de los animales y del hombre*. Madrid: Ed. Alianza.

BASSET SALOM, L. (2012) *Tensoestructuras. Objeto de aprendizaje* . Valencia: Universitat Politècnica de València, < <https://riunet.upv.es/handle/10251/16499>> [Consulta 18 de julio de 2018]

BELLMAN, H. (1994). *Arácnidos, Crustáceos Y Miriápodos : Artrópodos Europeos Y De La Península Ibérica*. Barcelona: Blume.

BENYUS, J. (1997), *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York, Harper Perennial

BENYUS, J. (2009, Julio) *Biomimicry in Action*. Oxford, TED Talks

BIRKHEAD, T.(1996). *Secretos del Mundo Animal*. Milan: Reader's Digest.

Brisbane Insects and Spiders <<http://www.brisbaneinsects.com>> [Consulta: 10 de julio de 2018]

CHAUVIN, R. (1965). *Las sociedades animales: abejas, termitas, hormigas, peces, aves y mamíferos*, Barcelona: Ediciones Zeus.

China Highlights<<https://www.viaje-a-china.com/guia-beijing/atracciones/estadio-nacional-de-nido.htm>>  
[Consulta: 1 de marzo de 2019]



CHUNG, L. (2016). Madrigueras de conejos. Barcelona: PowerKids Press.

DA VINCI, L. (1999), Cuaderno de notas. Madrid: Ediciones y distribuciones Mateos.

DARWIN, C. (1998). La Expresion De Las Emociones En Los Animales Y En El Hombre. Madrid:Alianza Editorial.

DARWIN, C. (2009). El Origen De Las Especies. Capitulo VIII. El instinto. Pozuelo de Alarcón: Espasa Calpe.

DARWIN, C. (1983). Ensayo sobre el instinto. Madrid: Ed. Tecnos.

Dominio mundial. <<https://dominiomundial.com/13-impresionantes-hogares-construidos-por-animales-arquitectos/>> [Consulta: 10 de julio de 2018]

DUPÉRAT, M.(2008) Nids & Oeufs. Paris: Artémis

EVANS, P. (1987) “Advances in Insect Physiology” en *Elsevier Science & Technology*. Volume 41.

FRISCH K. y FRISCH O. (1983). Animal Architecture. New York: Van Nostrand Reinhold Co.

FRISCH, K.(1976), La Vida De Las Abejas. Premio Nobel de medicina 1973. Barcelona: Labor

GARCÍA SANTIBÁÑEZ SAUCEDO, H.F. (2007). *Biodiseño: Aportes Conceptuales de Diseño en las Obras de los Animales*. Tesis. Barcelona: Univesitat de Barcelona.

GOULD, J. L. y GOULD, C. G. (2007). Animal architects: Building and the evolution of intelligence. New York, N.Y: Basic Books.

GROSVENOR, G.N.(1996). Animales Muy Salvajes. Las Aves Y Sus Nidos. Barcelona: RBA. The National Geographic Society

Hablemos de insectos. <<https://hablemosdeinsectos.com/nido-de-la-avispa-alfarera/>> [Consulta: 10 febrero 2019]

HANSELL, M. (2008). *Animal Architecture and building behaviour*. Oxford: Oxford University Press.

HANSELL, M. (2005). *Bird Nests And Construction Behaviour*. Cambridge: Cambridge University

HANSELL, M. (2009). *Built By Animals The natural history of animal architecture*. Oxford: Oxford University Press.

HARRISON, C.(1991). *Guía de campo de los nidos, huevos y polluelos de aves España y de Europa*. Madrid: Ed Omega.

HOFFMANN, A. (2003). *El maravilloso mundo de los arácnidos*. Ciudad de México: F.C.E.

HOLLAND, M. (2015) "Sheet web weavers still active" en *Naturally Curious*, 10 de octubre. <<https://naturallycuriouswithmaryholland.wordpress.com/category/sheet-webs/>> [Consulta: 28 febrero de 2019]

HUERTA DE FERNANDO, L. (2017). *Técnicas Biomiméticas aplicadas a la arquitectura*. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

JORDAN MONTES, F. (2013). *El universo de los insectos*. Madrid: S.A. mundi-prensa libros

Kubbo Arquitectura. (2012). "Viviendo en un termitero" en *Green*, 4 de octubre <<http://greenbykubbo.blogspot.com/2012/10/viviendo-en-un-termitero-biomimesis.html>> [Consulta 1 de julio de 2018]

LESTEL, D. (2003). *Les Origines Animales De La Culture*. Paris: Flammarion.

LORENZ, K. (1975). *El Comportamiento Animal Y Humano*. Barcelona: Plaza y Janes.



LÜSCHER, M (1972). “Air Conditioned Termite Nests”, en *The Insects, Readings from Scientific American*, W.H Freeman and Company, San Francisco.

MORENO DE LUCA, L., GALVIS CHACÓN, M.J. y GARCÍA, R.J (2012). “Biomímesis en arquitectura e ingeniería estructural” en *Revista M*, vol.10, nº1, 78-101

NICHOLSON, J (2005 ). *Animal Architects*. Crows Nest, Sidney: Allen & Unwin.

O’NEILL, A. (1996). *Me pregunto por qué las arañas tejen telas: y otras preguntas sobre los invertebrados*. Madrid: Ed Everest

PALLASMAA, J. (2001). *Animales arquitectos*. Lanzarote, Islas Canarias: Fundación César Manrique,

Plataforma arquitectura. <<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-312614/arquitectura-biometrica-que-podemos-aprender-de-la-naturaleza>> [Consulta: 10 de marzo de 2019]

REDONDO, I. (1999). *Apicultura O Tratado De Las Abejas Y Sus Labores : De Las Colmenas, Colmenar Y Colmenero, De Los Enemigos De Las Abejas Y De Las Enfermedades Que Estas Padecen*. Valencia : París-Valencia

SEPÚLVEDA GIL, J.M (1980). *Apicultura*. Barcelona: AEDOS.

SILOTTI, A (1997), *El Valle de los Reyes y los Templos y Necrópolis de Tebas*. Barcelona: Martínez Roca.

SLATER, P. (2000). *El Comportamiento Animal*. Cambridge: Cambridge University Press

THERAULAZ, G., PERNA A., KUNTZ, P.(2013). “El arte de construir un nido” en *Investigación y Ciencia*, vol 447, pp. 82 <[http://www.perna.fr/investigacion\\_y\\_ciencia2013.pdf](http://www.perna.fr/investigacion_y_ciencia2013.pdf)> [Consulta: 1 de marzo de 2019]

TÁRRECH, A.P (2011), La Sagrada Familia según Gaudí. Barcelona: El Aleph Editores

TINBERGEN, N.(1985). Naturalistas Curiosos. Barcelona: Salvat.

TINBERGEN, N (2003). The Study Of Instinct. Oxford: Clarendon Press.

VERHOEF-VERGALLEN, E. J. J. (2001). La enciclopedia de los conejos y roedores. Madrid: LIBSA.

VINCENT, J. (2006) “Applications: Influence of Biology on Engineering”, en *Journal of Bionic Engineering*, No.3., pag 105-200

WILLY, D. (2016) Habitanimal urbanimal. Universidad de los Andes. Bogotá: Uniandes

YOUTUBE, “Araña tejiendo su telaraña”, en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=8WiRbX-2jRRI>> [Consulta: 1 de marzo de 2019]

YOUTUBE, “Los Diques de los Castores HD by OIndianaJokesO”, en Youtube < <https://www.youtube.com/watch?v=0vLZgSSPntQ> > [Consulta: 1 de febrero de 2019]

YOUTUBE, “How Beavers Build Dams. Leave it to Beavers/PBS”, en Youtube < <https://www.youtube.com/watch?v=yJjaQExOPPY>> [Consulta: 1 de febrero de 2019]

YOUTUBE, “Tela de araña como la construye. Representación y explicación animada” en Youtube <[https://www.youtube.com/watch?v=EV04Fi\\_IJJA](https://www.youtube.com/watch?v=EV04Fi_IJJA)> [Consulta: 1 de marzo de 2019]



**Fig 1.1.** Dominio mundial. <<https://dominiomundial.com/13-impresionantes-hogares-construidos-por-animales-arquitectos/>> [Consulta: 10 de julio de 2018]

**Fig 1.2.** The Nobel Prize. <<https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1973/frisch/facts/>> [Consulta: 5 de marzo de 2019]

**Fig 1.3.** Radio Palencia.  
<[https://cadenaser.com/emisora/2016/11/26/radio\\_palencia/1480158254\\_187335.html](https://cadenaser.com/emisora/2016/11/26/radio_palencia/1480158254_187335.html)> [Consulta: 20 de marzo de 2019]

**Fig 1.4.** Aves en el nido. <<https://www.fondosanimales.com/imagenes-aves-en-el-nido-jpg>> [Consulta: 20 de marzo de 2019]

**Fig 2.1.** History. <<https://mx.tuhistory.com/hoy-en-la-historia/darwin-inicia-su-viaje-por-la-costa-peruana>> [Consulta: 5 de marzo de 2019]

**Fig 2.2.** Fundación universitaria Konrad Lorenz carreras universitarias y posgrados en Bogotá.  
<<http://www.konradlorenz.edu.co/es/informacion-institucional/quien-era-konrad-lorenz.html>> [Consulta: 10 de febrero de 2019]

**Fig 2.3.** Biografía y vidas <[https://www.biografiasyvidas.com/biografia/t/tinbergen\\_nikolaas.htm](https://www.biografiasyvidas.com/biografia/t/tinbergen_nikolaas.htm)> [Consulta: 5 febrero de 2019]

**Fig 3.1.** Getty images.  
<<https://www.gettyimages.es/detail/foto/magnetic-termite-aerial-view-of-mounds-in-fotograf%C3%ADa-de-stock/590534202>> [Consulta: 5 febrero de 2019]

**Fig 3.2.** Ojo del buitre. <<http://ojodelbuitre.blogspot.com/2011/09/aves-pajaro-sastre-orthotomus-sutorius.html>> [Consulta: 10 marzo de 2019]

**Fig 3.3.** Naturalista. <<https://www.naturalista.mx/photos/5348799>> [Consulta: 10 marzo de 2019]



**Fig 3.4.** Flickr. <<http://www.cataglyphis.fr/Presse/2015/Cubitermes2.JPG>> [Consulta: 1 de febrero de 2019]

**Fig 3.5.** Pinta el mundo. <<http://www.supercoloring.com/es/dibujos-para-colorear/represa-de-castores-en-el-parque-nacional-voyageurs>> [Consulta: 10 marzo de 2019]

**Fig 3.6.** Pinta el mundo. <<http://www.supercoloring.com/es/dibujos-para-colorear/el-perrito-de-las-praderas-excava-madrigueras-en-la-tierra?version=print>> [Consulta: 10 marzo de 2019]

**Fig 3.7.** GROSVENOR, G.N.(1996). Animales Muy Salvajes. Las Aves Y Sus Nidos. [Barcelona]: RBA. The National Geographic Society; pp. 14

**Fig 4.1.** GARCÍA SANTIBÁÑEZ SAUCEDO, H.F. (2007). *Biodiseño: Aportes Conceptuales de Diseño en las Obras de los Animales*. Tesis. Barcelona: Univesitat de Barcelona. pp. 56

**Fig 4.2.** Master Primatología. <<https://primatologia.net/2014/05/16/los-chimpances-escogen-los-arboles-para-nidificar-segun-sus-propiedades-biomecanicas/>> [Consulta: 10 de marzo de 2019]

**Fig 4.3.** Muy interesante. <<https://www.muyinteresante.es/naturaleza/articulo/asi-vacunan-las-abejas-reina-a-las-crias-de-la-colmena-941438599010>> [Consulta: 15 enero de 2019]

**Fig 4.4.** NICHOLSON, J. (2005). Animal Architects. Crows Nest, NSW: Allen & Unwin, pp 28

**Fig 4.5.** GARCÍA SANTIBÁÑEZ SAUCEDO, H.F. (2007). *Biodiseño: Aportes Conceptuales de Diseño en las Obras de los Animales*. Tesis. Barcelona: Univesitat de Barcelona; pp. 267

**Fig 4.6.** GARCÍA SANTIBÁÑEZ SAUCEDO, H.F. (2007). *Biodiseño: Aportes Conceptuales de Diseño en las Obras de los Animales*. Tesis. Barcelona: Univesitat de Barcelona; pp. 266

**Fig 4.7.** Naukas. Ciencia, escepticismo y humor <<https://naukas.com/2017/03/29/sobre-abejas-matematicas-y-pompas-de-jabon/>> [Consulta: 5 marzo 2019]

**Fig 4.8.** Ovacen. <<https://ecosistemas.ovacen.com/biocenosis/relaciones-intraespecificas/>> [Consulta: 5 marzo de 2019 ]

**Fig 4.9.** Xalaka. <<https://www.xataka.com/ecologia-y-naturaleza/estas-abejas-construye-sus-colmenas-en-espiral-y-nadie-parece-saber-por-que>> [Consulta: 25 julio 2018]

**Fig 4.10.** Ibycter. <<http://ibycter.com/category/research/>> [Consulta 5 marzo 2019]

**Fig 4.11.** Hablemos de insectos. <<https://hablemosdeinsectos.com/nido-de-la-avispa-alfarera>> [Consulta: 10 febrero 2019]

**Fig 4.12.** NICHOLSON, J. (2005). *Animal Architects*. Crows Nest, NSW: Allen & Unwin; pp. 29

**Fig 4.13.** REGALADO FERNANDEZ, O.R. (2014). La geometría de la vida II en *Mito. Revista Cultural. Colombia* <<http://revistamito.com/la-geometria-de-la-vida-ii/>> [Consulta: 25 enero de 2019]

**Fig 4.14.** MIGRADDO, D. (2012). “Avispa excavadora” en *Tras la huella de la luz*, 6 de julio <<http://migrado.blogspot.com/2012/07/avispa-excavadora-pryonix-sp.html>> [Consulta: 1 de julio 2018]

**Fig 4.15.** THERAULAZ, G., PERNA A., KUNTZ, P. (2013). “El arte de construir un nido”. *Investigación y Ciencia*, vol 447 pp. 1 <[http://www.perna.fr/investigacion\\_y\\_ciencia2013.pdf](http://www.perna.fr/investigacion_y_ciencia2013.pdf)> [Consulta: 1 de marzo de 2019]

**Fig 4.16.** El definido. <<https://www.eldefinido.cl/actualidad/mundo/8970/9-animales-que-deberiamos-contratar-como-arquitectos/>> [Consulta: 1 julio de 2018]

**Fig 4.17.** Kubbo Arquitectura. (2012). “Viviendo en un termitero” en *Green*, 4 de octubre <<http://greenbykubbo.blogspot.com/2012/10/viviendo-en-un-termitero-biomimesis.html>> [Consulta 1 de julio de 2018]

**Fig 4.18.** NICHOLSON, J. (2005). *Animal Architects*. Crows Nest, NSW: Allen & Unwin; pp. 26-27



**Fig 4.19.** El definido. <<https://www.eldefinido.cl/actualidad/mundo/8970/9-animales-que-deberiamos-contratar-como-arquitectos/>> [Consulta: 1 julio de 2018]

**Fig 4.20.** THERAULAZ, G., PERNA A., KUNTZ, P.(2013). “El arte de construir un nido” en *Investigación y Ciencia*, vol 447, pp. 82 <[http://www.perna.fr/investigacion\\_y\\_ciencia2013.pdf](http://www.perna.fr/investigacion_y_ciencia2013.pdf)> [Consulta: 1 de marzo de 2019]

**Fig 4.21.** GRIMALDI, A.D., BARDEN, P.(2016). “Hormigas en ámbar muestran conducta social hace 100 millones de años” en *Ciencia plus*. <<https://www.europapress.es/ciencia/ruinas-y-fosiles/noticia-hormigas-ambar-muestran-conducta-social-hace-100-millones-anos-20160212113036.html>> [Consulta: 10 de marzo de 2019]

**Fig 4.22.** YOUTUBE, “Araña tejiendo su telaraña”, en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=8WiRbX2jRRI>> [Consulta: 1 de marzo de 2019]  
YOUTUBE, “Tela de araña como la construye. Representación y explicación animada” en Youtube <[https://www.youtube.com/watch?v=EV04Fi\\_IJA](https://www.youtube.com/watch?v=EV04Fi_IJA)> [Consulta: 1 de marzo de 2019]

**Fig 4.23.** Difference.guru. <<https://difference.guru/difference-between-a-spider-web-and-a-cobweb/>> [25 de junio de 2018]

**Fig 4.24.** Reddit. <[https://www.reddit.com/r/spiders/comments/2heho7/tubular\\_spider\\_web/](https://www.reddit.com/r/spiders/comments/2heho7/tubular_spider_web/)> [Consulta: 28 febrero de 2019]

**Fig 4.25.** HOLLAND, M. (2015) “Sheet web weavers still active” en *Naturally Curious*, 10 de octubre. <<https://naturallycuriouswithmaryholland.wordpress.com/category/sheet-webs/>> [Consulta: 28 febrero de 2019]

**Fig 4.26.** Web building spiders <[http://www.brisbaneinsects.com/brisbane\\_weavers/index.htm](http://www.brisbaneinsects.com/brisbane_weavers/index.htm)> [Consulta: 28 febrero de 2019]

**Fig 4.27 y 4.28.** EVANS, P. (1987) “Advances in Insect Physiology” en *Elsevier Science & Technology*. Volume 41, pp 200

**Fig 4.29.** NICHOLSON, J. (2005 ). Animal Architects. Crows Nest, NSW: Allen & Unwin; pp 22

**Fig 4.30.** Castores en Patagonia. <<http://www.wkndheroes.com/la-impactante-realidad-del-efecto-de-los-castores-en-la-patagonia/>> [Consulta: 2 marzo de 2019], Fotonat. <[http://www.fotonat.org/details.php?image\\_id=59615](http://www.fotonat.org/details.php?image_id=59615)> [Consulta: 2 marzo de 2019]

**Fig 4.31.** YOUTUBE, “Los Diques de los Castores HD by OIndianaJokesO”, en Youtube < <https://www.youtube.com/watch?v=0vLZgSSPntQ> > [Consulta: 1 de febrero de 2019]  
YOUTUBE, “How Beavers Build Dams. Leave it to Beavers/PBS”, en Youtube < <https://www.youtube.com/watch?v=yJjaQExOPPY>> [Consulta: 1 de febrero de 2019]

**Fig 4.32.** GOULD, J. L. y GOULD, C. G. (2007). Animal architects: Building and the evolution of intelligence. New York, N.Y: Basic Books.; pp 261

**Fig 4.33.** Beaverlodge Pictures. <<https://airfreshener.club/quotes/www-beaverlodge-pictures-http.html>> [Consulta 23 de marzo de 2019]

**Fig 4.34.** Bird Nest Tall Tree <<https://cellcode.us/quotes/bird-nest-tall-tree.html>> [Consulta: 10 de marzo de 2019]

**Fig 4.35.** Natural zoo. <<https://naturalzoo.es/producto/nido-golondrina-comun/>> [Consulta: 10 de marzo de 2019]

**Fig 4.36.** DUPÉRAT, M.(2008) Nids & Oeufs. Paris: Artémis, pp 15

**Fig 4.37.** DUPÉRAT, M.(2008) Nids & Oeufs. Paris: Artémis, pp 16

**Fig 4.38.** DUPÉRAT, M.(2008) Nids & Oeufs. Paris: Artémis, pp 16

**Fig 4.39.** Quedada natural. <<http://quedadanatural.net/foro/guia-detalle.php?seo=342&g=aves>> [Consulta: 17 de enero de 2019]



**Fig 4.40.** HANSELL, M. (2005). Bird Nests And Construction Behaviour. Cambridge: Cambridge University; pp 45

**Fig 4.41.** HANSELL, M. (2005). Bird Nests And Construction Behaviour. Cambridge: Cambridge University; pp 65

**Fig 4.42.** HANSELL, M. (2005). Bird Nests And Construction Behaviour. Cambridge: Cambridge University; pp 68

**Fig 4.43.** NICHOLSON, J. (2005 ). Animal Architects. Crows Nest, NSW: Allen & Unwin; pp 25

**Fig 4.44.** HOLGÍN, M.J., (2013) “El arte de los pájaros tejedores” en el blog de la tabla, 2 septiembre. <<https://www.elblogdelatabla.com/2013/09/el-arte-de-los-pajaros-tejedores.html>> [Consulta: 28 febrero de 2019]

**Fig 4.45.** HANSELL, M. (2005). Bird Nests And Construction Behaviour. Cambridge: Cambridge University; pp 88

**Fig 4.46.** HOLGÍN, M.J., (2013) “El arte de los pájaros tejedores” en El blog de la tabla, 2 septiembre. <<https://www.elblogdelatabla.com/2013/09/el-arte-de-los-pajaros-tejedores.html>> [Consulta: 28 febrero de 2019]

**Fig 4.47.** HANSELL, M. (2005). Bird Nests And Construction Behaviour. Cambridge: Cambridge University; pp 9

**Fig 4.48.** Mallefowl. <<https://www.bushheritage.org.au/species/malleefowl>> [Consulta: 1 marzo de 2019]

**Fig 4.49.** Mallefowl <<https://www.weblearneng.com/mallee-fowl>> [Consulta: 1 marzo de 2019]

**Fig 4.50.** YOUTUBE, “Mallee Fowl Nesting”, en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=Mr-KLqdlwrvU>> [Consulta: 1 de marzo de 2019]

YOUTUBE, “Malleefowl rare footage ABC news”, en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=OVvKZpPlrh0>> [Consulta: 1 de marzo de 2019]

**Fig 4.51-4.52.** HANSELL, M. (2005). Bird Nests And Construction Behaviour. Cambridge: Cambridge University; pp 17

**Fig 4.53-4.54.** HANSELL, M. (2005). Bird Nests And Construction Behaviour. Cambridge: Cambridge University; pp 18-19

**Fig 4.55.** HANSELL, M. (2005). Bird Nests And Construction Behaviour. Cambridge: Cambridge University; pp 19 y Flickr. <<https://www.flickr.com/photos/69er/7044323991/in/photostream/>> [Consulta: 1 febrero de 2019]

**Fig 4.56.** Muhimu. <<https://muhimu.es/medio-ambiente/arquitectura-animal/>> [Consulta: 1 marzo de 2019]

**Fig 4.57.** HANSELL, M. (2005). Bird Nests And Construction Behaviour. Cambridge: Cambridge University; pp 25

**Fig 4.58.** Efe Verde <<https://www.efeverde.com/noticias/america-pide-mayor-compromiso-contracambio-climatico-dia-de-la-tierra/>> [Consulta: 28 febrero de 2019]

**Fig 4.59.** YOUTUBE, “En minuto y medio no se construye un nido”, en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=fHKPCEHiDUQ>> [Consulta: 1 de febrero de 2019]

**Fig 5.1.** Fotonazos. <<https://www.fotonazos.es/2014/02/fotos-espectaculares-del-interior-de-la-sagrada-familia-de-gaudi/>> [Consulta: 10 marzo de 2019]

**Fig 5.2-5.3.** BIOCRONOMY 3.8. Biomimicry + Packaging Innovation Toolkit <<https://biomimicry.net/product/biomimicry-packaging-innovation-toolkit/>> [Consulta: 28 febrero de 2019]



**Fig 5.4.** Eric Owen Moss Architects. <<http://ericowenmoss.com/projects/>> [Consulta: 1 marzo de 2019]

**Fig 5.5.** Daimler. <<https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Design-and-technology-inspired-by-nature-Mercedes-Benz-bionic-car-at-The-Museum-of-Modern-Art-in-New-York.xhtml?oid=9907850>> [Consulta: 20 febrero de 2019]

**Fig 5.6.** Artium. <<http://catalogo.artium.org/dossieres/exposiciones/premios-pritzker-viaje-por-la-arquitectura-contemporanea/estadio-nacional-de>> [Consulta: 1 marzo de 2019]

**Fig 5.7.** Plexo. <<http://www.fadu.edu.uy/viaje2015/articulos-estudiantiles/estadio-olimpico-nacional-de-beijing/>> [Consulta: 20 febrero de 2019]

**Fig 5.8.** Ask nature. <<https://asknature.org/idea/eastgate-centre/#.XJDcRdpKhPY>> [Consulta: 1 de marzo de 2019]

**Fig 5.9.** Ask Nature. < <https://asknature.org/idea/eastgate-centre/#.XJadYNpKhPY> >[Consulta: 1 de marzo de 2019]

YOUTUBE, “See How Termites Inspired a Building That Can Cool Itself”, en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=620omdSZzBs>> [Consulta: 1 de marzo de 2019]

**Fig 5.10.** Eastgate. <<http://www.mickpearce.com/Eastgate.html>> [Consulta: 15 febrero de 2019]

**Fig 5.11.** Alamy. < <https://www.alamy.es/foto-portcullis-house-en-el-centro-que-es-un-edificio-de-oficinas-para-el-spm-big-ben-y-la-torre-del-reloj-a-la-izquierda-el-puente-de-westminster-a-la-derecha-londres-59542302.html>> [Consulta: 25 de marzo de 2019]

**Fig 5.12.** Alamy. <<https://www.alamy.es/foto-atrio-interior-de-portcullis-house-de-londres-westminster-12642336.html>> [Consulta: 25 de marzo de 2019]

**Fig 5.13.** Casiopea. <[https://wiki.ead.pucv.cl/Caso\\_Estudio\\_Estadio\\_Olimpico\\_de\\_Munich/\\_Frei\\_Otto\\_-\\_Proyecto\\_Stuttgart\\_21\\_-\\_Sagrada\\_Familia\\_/A.Gaudi](https://wiki.ead.pucv.cl/Caso_Estudio_Estadio_Olimpico_de_Munich/_Frei_Otto_-_Proyecto_Stuttgart_21_-_Sagrada_Familia_/A.Gaudi)> [Consulta 10 marzo de 2019]

**Fig 5.14.** HUERTA DE FERNANDO, L. (2017). *Técnicas Biomiméticas aplicadas a la arquitectura*. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; pp 13

**Fig 5.15.** Casiopea. <[https://wiki.ead.pucv.cl/Caso\\_Estudio\\_Estadio\\_Olimpico\\_de\\_Munich/\\_Frei\\_Otto\\_-\\_Proyecto\\_Stuttgart\\_21\\_-\\_Sagrada\\_Familia\\_/A.Gaudi](https://wiki.ead.pucv.cl/Caso_Estudio_Estadio_Olimpico_de_Munich/_Frei_Otto_-_Proyecto_Stuttgart_21_-_Sagrada_Familia_/A.Gaudi)> [Consulta 10 marzo de 2019]

**Fig 5.16.** HUERTA DE FERNANDO, L. (2017). *Técnicas Biomiméticas aplicadas a la arquitectura*. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; pp 12

**Fig 5.17.** HUERTA DE FERNANDO, L. (2017). *Técnicas Biomiméticas aplicadas a la arquitectura*. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; pp 13

