

**APLICACIONES ESTRUCTURALES DEL DIAGRAMA VORONOI PARA LA
AMORTIGUACIÓN DE IMPACTOS PARTIENDO DEL ESTUDIO DEL PERICARPIO Y
MESOCARPIO DE LOS FRUTOS CÍTRICOS.**

Estudiantes

**Thomas Agudelo Londoño
Isabel Cristina Mejía Jiménez
Sara María Rojas Acevedo**

Asesores

**Laura Cristina Murillo Giraldo
Ever Patiño Mazo**

**Universidad Pontificia Bolivariana
Facultad De Arquitectura Y Diseño
Diseño Industrial
Medellín, COLOMBIA**

2015

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo la supervisión de Ever Patiño Mazo y Laura Cristina Murillo Giraldo, a quienes nos gustaría expresar nuestro más profundo agradecimiento por hacer posible la realización de este estudio.

Sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, paciencia y motivación han sido fundamentales para nuestra formación como Diseñadores Industriales de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Ustedes han inculcado en nosotros sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico sin los cuales no podríamos tener una formación completa; han logrado ganarse nuestra lealtad y admiración, así como sentirnos agradecidos por todos los conocimientos recibidos durante el periodo de de tiempo que ha durado este trabajo de investigación.

HOJA DE ACEPTACIÓN:

La presente monografía que tiene como título “APLICACIONES ESTRUCTURALES DEL DIAGRAMA VORONOI PARA LA AMORTIGUACIÓN DE IMPACTOS PARTIENDO DEL ESTUDIO DEL PERICARPIO Y MESOCARPIO DE LOS FRUTOS CÍTRICOS.”, es presentado por los estudiantes **Thomas Agudelo Londoño, Isabel Cristina Mejía Jiménez y Sara María Rojas Acevedo**, como requisito para optar al título de Diseñador Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana.
Investigación presentada el 2 de junio de 2015.

Para constancia es aceptado por:

D.I. Mg. Julián Antonio Ossa Castaño
Director de la Facultad de Diseño Industrial

D.I. Ever Patiño Mazo
Director del grupo de Investigación Morfología

Resumen

Los materiales presentes en la naturaleza a menudo muestran buenas propiedades estructurales. Por esta razón, la investigación parte de un análisis detallado del comportamiento estructural, mecánico y biológico de las porosidades en el diagrama de Voronoi y en las esponjas que conforman el pericarpio y el mesocarpio presentes en las cáscaras de los frutos cítricos. Esto con la finalidad de generar estructuras bio-inspiradas que muestren mayores propiedades de amortiguación y resistencia al impacto, y que en un futuro se puedan aplicar para la protección del cuerpo humano en múltiples actividades, tanto deportivas, laborales o en su vida cotidiana. Para ello se realizaron experimentaciones con estructuras de cartón corrugado con forma de Voronoi y otras representaciones geométricas para comparar las diferentes capacidades estructurales de dichas geometrías; y así aprobar que los diagramas de Voronoi, Basados en las estructuras presentes en las cáscaras de los frutos cítricos son los más aptos para dichas aplicaciones.

Abstract

The materials presents in the nature, usually shows the best structural proprieties, for that reason, this research begins with a detailed analysis of structural, mechanical and biological behavior of porosities in the Voronoi diagram and sponges that make the pericarp and mesocarp present in the skins of citrus fruits. This, in order to create bio-inspired structure that shows a higher damping properties and impact resistance, and can protect human body in multiple activities, sports and work or in everyday life, by the way this experiments were performed with corrugated structures shaped Voronoi and others gemetric performance o compared the different structural capabilities of this kind of geometrics structures and finally demonstrate that Voronoi diagram based in citrus fruits and pomelos are more suited for such applications.

Palabras Clave: Diagrama de Voronoi, mesocarpio, pericarpio, amortiguación, frutos cítricos.

CONTENIDO

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. PROBLEMATIZACIÓN**
 - 2.1. PREGUNTA**
 - 2.2. ELEMENTOS DEL PROBLEMA**
 - 2.3. OBJETIVOS**
 - 2.4. JUSTIFICACIÓN**
 - 2.5. ANTECEDENTES**
- 3. MARCO TEÓRICO**
 - 3.1. PROTECCIÓN**
 - 3.1.1. ANIMALES**
 - 3.1.2. PLANTAS**
 - 3.1.2.1 FRUTOS CÍTRICOS**
 - 3.1.1.1.1. FRUTOS SENCILLOS**
 - 3.1.1.1.2 FRUTOS SENCILLOS Y CARNOSOS**
 - 3.2. ESTRUCTURAS POROSAS**
 - 3.2.1. TEJIDO ÓSEO ESPONJOSO**
 - 3.2.2. POMELO**
 - 3.2.3. NANO-POROS**
 - 3.2.4. ESTRUCTURA VORONOI**
- 4. MARCO METODOLÓGICO**
 - 4.1. EXPERIMENTACIÓN A CARGAS DE COMPRESIÓN**
 - 4.2. EXPERIMENTACIÓN A ESFUERZOS DE AMORTIGUACIÓN**
- 5. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES**
- 6. GLOSARIO**
- 7. BIBLIOGRAFÍA**

1. INTRODUCCIÓN

La presente monografía denominada “Aplicaciones estructurales del diagrama de Voronoi para la amortiguación de impactos partiendo del estudio del pericarpio y mesocarpio de los frutos cítricos”, es el resultado de la investigación realizada en la Universidad Pontificia Bolivariana.

Este trabajo recopila y ordena la información proveniente de la investigación realizada con base en la experiencia personal y experimentación obtenida a partir del estudio de los frutos cítricos.

Durante la investigación, se entendió que los frutos cítricos tenían la capacidad de absorber fuertes impactos sin deformar su estructura interna, esto permitió el desarrollo del trabajo metodológico.

El estudio y aprovechamiento de la estructura interna de los frutos cítricos proporcionó la generación de nuevas estructuras que muestran mayores propiedades de amortiguación y resistencia al impacto, y que en un futuro se podrán aplicar para la protección del cuerpo humano en múltiples actividades, tanto deportivas, laborales o en su vida cotidiana.

Para llevar a cabo esta investigación, se realizaron una serie de experimentaciones con nuevas estructuras geométricas que ponen a prueba las características de cada una de ellas frente a impactos, fatiga y amortiguación; y de esta manera conseguir hacer una comparación entre ellas para probar que los diagramas Voronoi presentes en la cáscara de los frutos cítricos poseen mejores propiedades físicas para éste tipo de aplicaciones.

2. PROBLEMATIZACIÓN

2.1. PREGUNTA

¿Cómo a partir de la estructura del mesocarpio de las frutas simples (cítricos) se generan estructuras porosas que reproduzcan las propiedades de la amortiguación?

2.2. ELEMENTOS DEL PROBLEMA

- PROTECCIÓN
- ANIMALES
- PLANTAS
- FRUTOS CÍTRICOS
- ESTRUCTURAS POROSAS
- TEJIDO ÓSEO ESPONJOSO
- POMELOS
- NANO-POROS

2.3. OBJETIVOS

Objetivo general:

Determinar las características del mesocarpio de las frutas simples para la generación de estructuras porosas que reproduzcan las propiedades de la amortiguación.

Objetivos específicos:

1. Identificar las propiedades físicas y estructurales de amortiguación de los frutos cítricos
2. Experimentar con los patrones y estructuras referenciados en la naturaleza.
3. Verificar como los patrones referenciados en la naturaleza sirven para replicar las propiedades de la amortiguación.
4. Generar nuevas estructuras porosas que reproduzcan los principios de la amortiguación

2.4. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación aborda la porosidad para generar estructuras que permitan recibir impactos, protegiendo el cuerpo humano en múltiples actividades como deportes, labores, seguridad, etc. Basándose en estructuras y sistemas de protección existentes en la naturaleza.

Se investiga alrededor de los frutos cítricos y de su capacidad para absorber los impactos, al caer de grandes alturas, a partir de esto se logra la implementación del diagrama de Voronoi, con el fin de reconocer fenómenos que puedan replicar características de la amortiguación.

El diagrama de Voronoi, permite generar desarrollos tridimensionales a partir de la división del plano en regiones, en tantos puntos como se tengan, de tal forma que a cada uno se le asigna la región formada entre ellos, generado a partir de las mediatrices de los puntos.

Finalmente es importante resaltar que el diagrama de Voronoi permitirá elaborar nuevas composiciones en estructuras que podrán replicarse para generar entonces los fenómenos de la amortiguación e implementar la protección requerida.

2.5. ANTECEDENTES

La geometría fractal no ha parado de ampliarse desde las investigaciones de Mandelbrot en los setenta. La forma en la que los fractales y el diagrama de Voronoi, parecen describir la naturaleza hace que se encuentren diversas aplicaciones desde tejidos urbanos, arquitectura hasta modelados en la computación.

Desde la arquitectura “La Geometría Fractal de la Naturaleza”, de Benoit Mandelbrot, la primera conexión establecida entre la Arquitectura y la Geometría Fractal, en la introducción del libro mencionado, dice que, a diferencia de arquitectura de Mies van der Rohe, basada en la Geometría Euclidiana, muchas construcciones del período de las Beaux Arts muestran ciertos aspectos fractales (Mandelbrot, 1997). Pero fue el arquitecto Peter Eisenman el primero en presentar un proyecto, House 11^a (Figura 1), en el que pueden identificarse algunas características fractales. Sin embargo, a quien se debe quizás la fuerte divulgación que tuvo el uso de las nuevas teorías ya mencionadas en Arquitectura, más allá de cualquier polémica y/o crítica posterior con respecto a su verdadero conocimiento sobre el tema, es al crítico de Arquitectura Charles Jencks, quien ha escrito innumerables artículos y varios libros al respecto (Alzogaray, 2007).

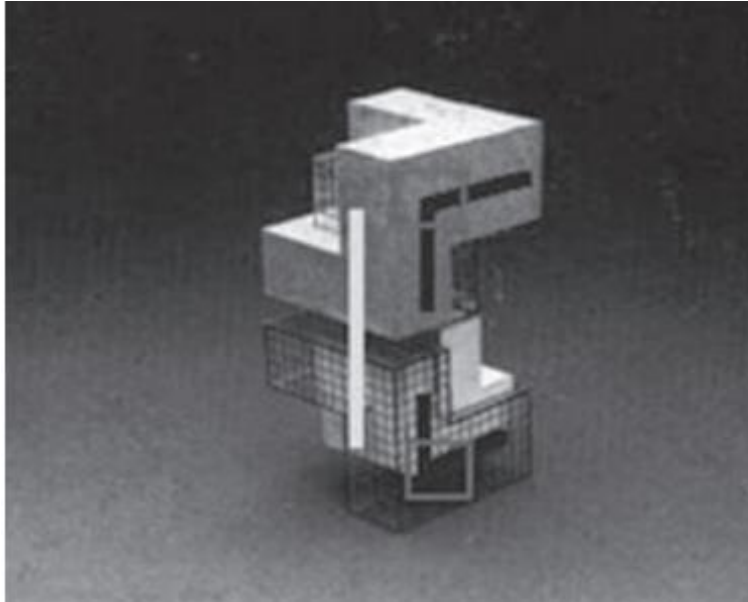


Figura 1. Eisenman, P. (2007). Maqueta House 11a. [Ilustración].

Actualmente, cuando se hace referencia a esta relación entre la Arquitectura y las nuevas perspectivas científicas, generalmente se piensa que estos procesos matemáticos deben desencadenar construcciones complejas, sin embargo no es así necesariamente.

Retomando el diagrama de Voronoi, se encuentra un artículo como antecedente en la aplicación, denominado ¿Algoritmos versus Arquitectura? Diagrama de Voronoi como herramienta de diseño, éste presenta como objetivo la aplicación de algoritmos en la generación de espacios arquitectónicos articulando una amplia variedad de sistemas sociales, escalas y requerimientos programáticos (Figura 2). La implementación de la herramienta elegida, el Diagrama de Voronoi, representó dos desafíos principales a la investigación: en primer término, de qué forma el protocolo matemático informaría al diseño y en segundo lugar, como conjugar los resultados obtenidos con la voluntad estética del diseñador (Loreto, 2006).

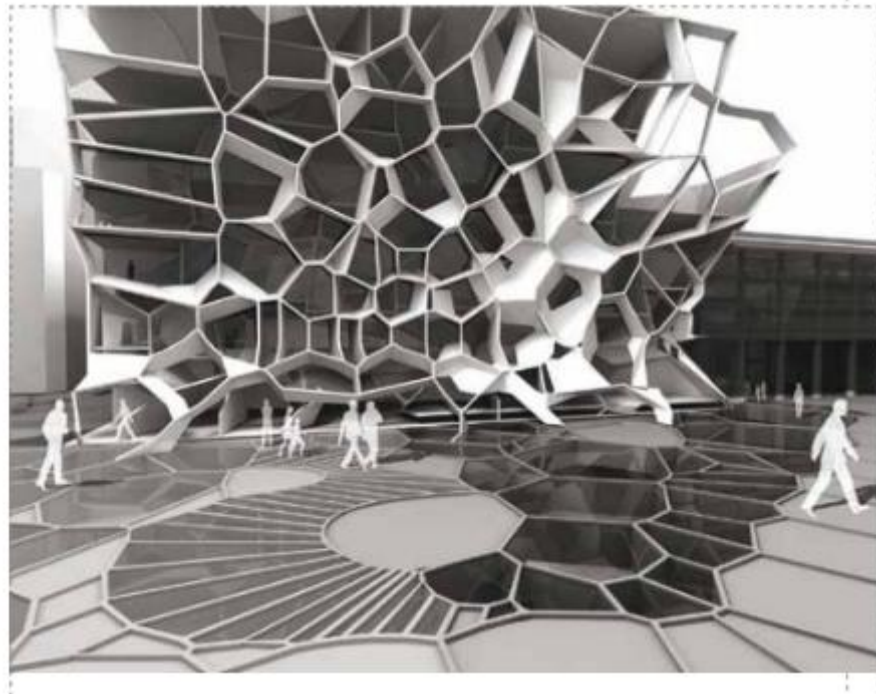


Figura 2. Loreto, M. (2006). Proceso de Iteración de NET.LAB. [Ilustración].

Con este fin, la investigación incluyó una serie de experimentos digitales y físicos, los cuales plantearon un cuestionamiento directo a las habilidades y rol del arquitecto dentro de un proceso digitalmente dirigido, en el cual más allá de crear una forma específica, se requiere la articulación de nuevas lógicas de diseño.

Se han realizado estructuras y sistemas aplicados a muchas áreas, ya sea para cuidar el cuerpo humano, proteger espacios u objetos de condiciones externas, así es como se aplica la fractalidad y el diagrama de Voronoi reconfigurando estructuras ya existentes que logran la protección de animales, humanos y objetos.

3. MARCO TEÓRICO

Esta investigación aborda la porosidad para generar estructuras que permitan recibir impactos, protegiendo el cuerpo humano en múltiples actividades como deportes, labores, seguridad, etc. Basándose en estructuras y sistemas de protección que existen en la naturaleza y otras aplicaciones ya existentes en tecnologías, construcciones y materiales.

A continuación se mostrará la importancia de los materiales para lograr la protección del hombre de fuertes impactos.

3.1. Protección

A través del tiempo el hombre ha utilizado diferentes tipos de materiales para protegerse de impactos y amortiguar los golpes. Para ello ha experimentado desde metales, cueros, maderas, hasta polímeros y espumas. También ha realizado estructuras y sistemas aplicados a muchas áreas, ya sea tanto para cuidar el cuerpo humano, o para proteger los objetos de condiciones externas, por ejemplo los cascos, que sirven para proteger la cabeza del ser humano de golpes directos, el chaleco antibalas que le permite soportar impactos de varios calibres sin que penetre en su piel, la suela de los tenis que ayuda amortiguar, reduciendo la fatiga y el desgaste de los músculos y los huesos por el golpe al correr. En las industrias, se generan empaques y carcasas que cubren los objetos para protegerlos tanto de la intemperie, como de los impactos al transportarlo y al exhibirlo.

Estos sistemas han sido creados por el hombre, pero en la naturaleza también se generan, tanto en animales como en plantas.

3.1.1. Animales.

En los artrópodos (Figura 3) se genera el exoesqueleto, cuya función es proteger, prevenir la deshidratación, sujetar los músculos, sentir las condiciones del entorno y protección contra los depredadores. La capa exterior es muy fuerte y resistente a la compresión. Cuando se ve comprometida, esta capa se agrieta. Las capas interiores tienen resistencia a la tracción y resisten la tensión. Esta combinación es ideal para resistir el daño de los depredadores que ejercen la fuerza de compresión en la capa externa y la fuerza de tracción en la capa interna. A nivel microscópico, el exoesqueleto tiene muchas capas. La capa interna, conocida como la epidermis, segrega una membrana de fibra de apoyo. Por encima de la epidermis está la procutícula compuesta de quitina rodeada por una matriz de proteína. Esta capa se solidifica para formar las placas rígidas del exoesqueleto. La epicutícula es la capa más externa. Esta previene el tejido blando del artrópodo de la desecación y protege de la invasión (Anderson, 2013).

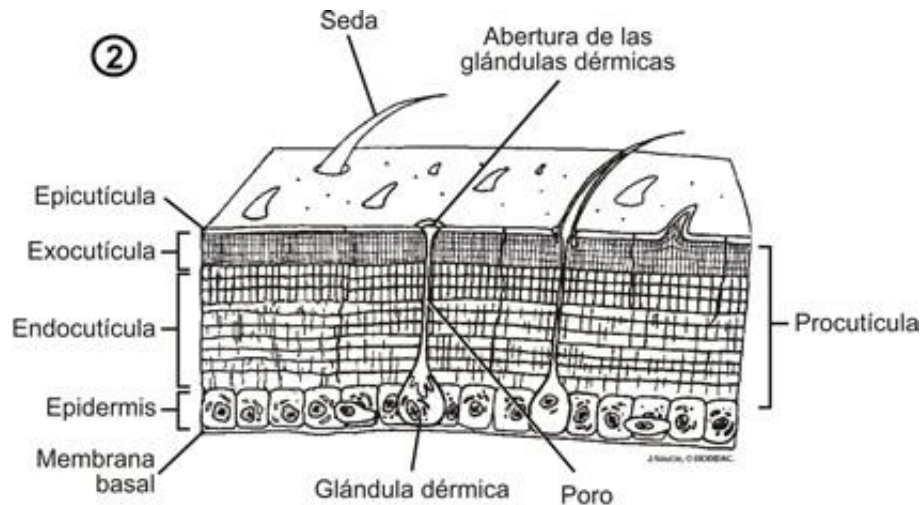


Figura 3. Asturnatura. (2015). Exoesqueleto. [Ilustración].

En los moluscos (Figura 4) se genera la concha, que tienen una estructura variada y crece lateralmente mediante un crecimiento marginal (por el borde de la concha) y también crece en grosor. Esta se forma durante toda la vida del animal y nunca deja de crecer. Cada año se le adicionan anillos de crecimiento. La concha es segregada por el manto y está constituida por una sustancia mineral, carbonato cálcico (CaCO_3) y una base orgánica, la conquiolina, que tiene naturaleza proteica y también contiene glúcidos. Se divide en tres capas: El Periostraco, es la capa externa y de naturaleza orgánica; el estraco, es la capa ancha de cristales prismáticos de carbonato cálcico y el hipostraco, es la capa más brillante formada por láminas, lamelas horizontales. Es la capa más externa y en ella el carbonato cálcico cristaliza de forma distinta a lo anterior, lo hace en forma de aragonito, formando el nácar (Subacuáticas Real Sociedad, 2009).

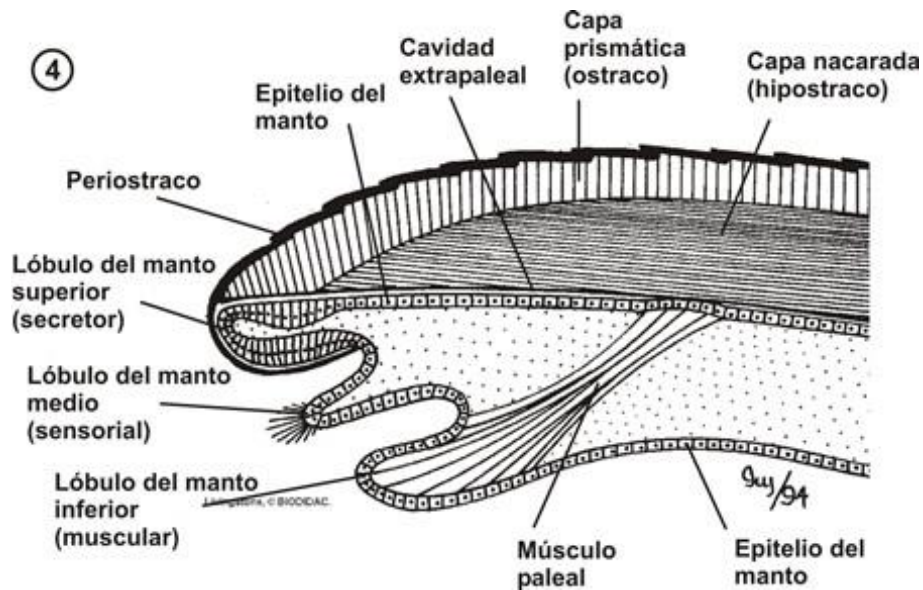


Figura 4. Asturnatura. (2015). Concha de los moluscos. [Ilustración].

Estos tipos de estructuras dan ejemplo de cómo poder soportar fuerzas a compresión por medio de capas, utilizando diferentes compuestos en cada una de ellas y entrelazándose para que cada capa soporte los esfuerzos de diferente manera.

3.1.2. Plantas

En los árboles de la familia fagacea, específicamente en el *Quercus Suber* (Alcornoque o árbol del corcho) (Figura 5) posee una corteza porosa y esponjosa llamada súber o felema, y es un tejido muerto que protege a otros tejidos interiores de una planta de la desecación, daño mecánico, insectos y herbívoros. Está formado por células muertas cuyas paredes están impregnadas con suberina (polímero natural o biopolímero formado por ácidos grasos hidroxidos y epóxidos unidos por enlaces éster) (Taiz, y Zeiger, 2010), éste actúa como una barrera entre las plantas y el ambiente aunque unas grietas llamadas lenticelas permiten el intercambio de gases entre el interior de la planta y el ambiente. De este modo ofrece protección mecánica, y al mismo tiempo, constituye un buen aislador térmico ya que sus cavidades celulares (lumen) están llenas de aire (Valla, 2007).



Figura 5. Hondudiario. (2014). Corteza del Alcornoque. [Fotografía].

Otro ejemplo sería, la piel de algunos frutos, llamada mesocarpio, que es la parte de la fruta que se consume normalmente y es resultado de la transformación de la pared ovárica de la flor, por lo que habitualmente envuelve al endocarpio que a su vez envuelve a las semillas.

3.1.2.1. Frutos cítricos

El fruto consiste en el ovario maduro e incluye partes de la flor que madura en él como el receptáculo, el tubo floral y las brácteas. La pared del ovario constituye en el fruto maduro una capa denominada pericarpio y sus diversas modificaciones en volumen total, grosor de la pared, consistencia, coloración, composición química y forma general; característica que traen como consecuencia la gran diversidad de frutos que actualmente se conocen. El pericarpio (Figura 6) está constituido por tres capas distintas denominadas de afuera hacia adentro (Baraona y Barrantes, 2000):

- **Exocarpio:** es la capa más externa, incluye la epidermis y los estratos subyacentes.
- **Mesocarpio:** es la capa media del pericarpio, en algunos frutos puede volverse muy carnosa como el caso del melocotón.
- **Endocarpio:** es la capa interior de la cubierta del fruto que suele corresponder a la epidermis interna.

Los frutos se clasifican morfológicamente en tres grupos: frutos sencillos, frutos agregados y frutos múltiples.

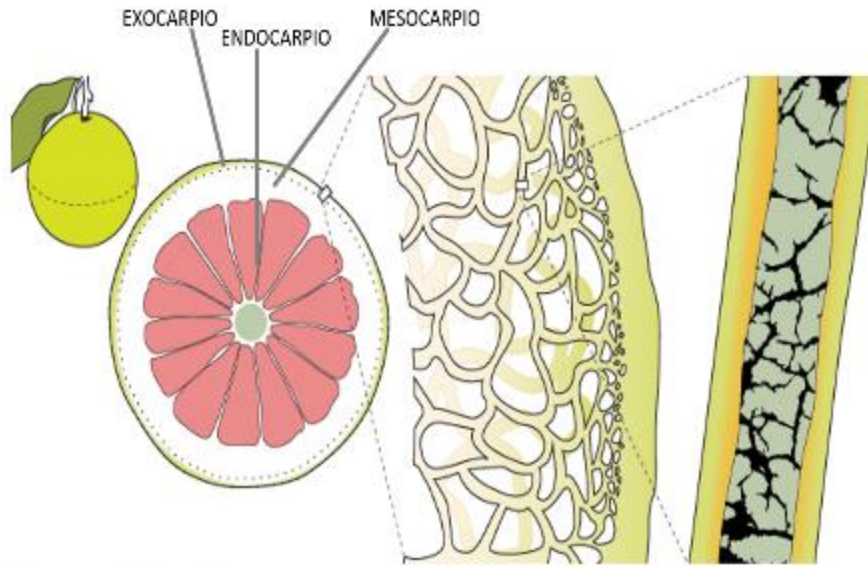


Figura 6. UPB. (2014). Capas del pericarpio. [Ilustración].

3.1.1.1.1. Frutos sencillos:

De acuerdo a su consistencia y estructura los frutos sencillos se agrupan en: frutos sencillos secos, frutos sencillos carnosos y frutos sencillos carnosos-secos.

3.1.1.1.2. Frutos sencillos y carnosos:

En estos frutos todo el pericarpio y sus partes accesorias se ponen suaves y carnosas con la madurez. Esta clase de frutos se subdivide en: baya y hesperidio (Omogrosso, 2009).

3.2. Estructuras porosas

3.2.1. Tejido óseo esponjoso

La porosidad de los tejidos óseos esponjosos juega un papel fundamental para lograr generar estructuras que permitan recibir impactos, protegiendo el cuerpo humano en múltiples. A continuación se muestra la composición de estos tejidos que serán útiles para el estudio.

El tejido óseo esponjoso (Figura 7) no contiene osteonas verdaderas, sino que consta de laminillas dispuestas en una red irregular de columnas delgadas de hueso, llamadas trabéculas. La estructura de las osteonas del tejido óseo compacto parece muy organizada, mientras que las trabéculas del hueso esponjoso dan la impresión de tener una organización menor. Sin embargo, estas últimas se orientan de manera precisa a lo

largo de las líneas de esfuerzo, una característica que permite a los huesos resistir esfuerzos y transferir fuerzas sin romperse (Veimon, 2011).

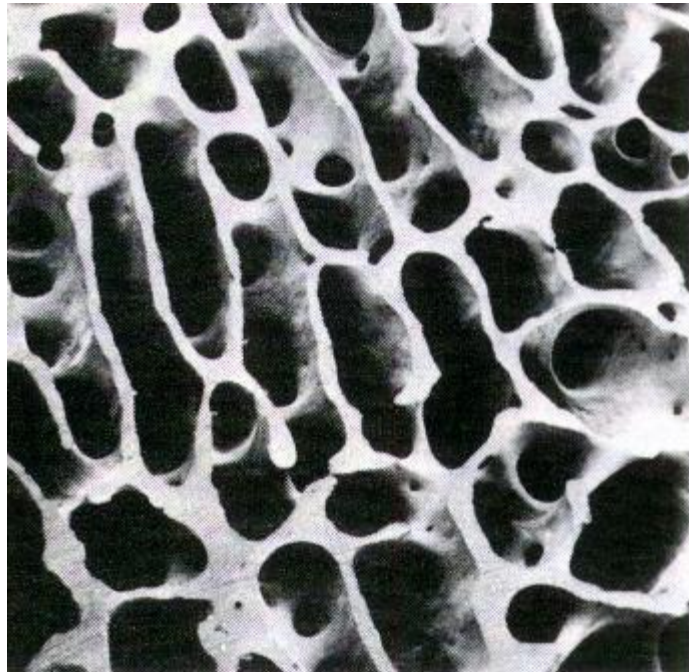


Figura 7. UCV. Microscopía del tejido óseo esponjoso. [Fotografía].

Comprender como se distribuyen las cargas en las trabéculas de los huesos y la composición de las estructuras permite el desarrollo de estructuras resistentes. Así que el estudio de los nano poros en los materiales, se convierte en un factor importante para el desarrollo de nuevas estructuras.

Existen otras estructuras porosas como los tejidos óseos esponjosos y los nanos esponjosos que al igual que el alcornoque y los pomelos poseen una estructura celular particular, que permite asociarse con la protección.

3.2.2. Pomelos

Nombre botánico: Citrus Grandis (Figura 8). Es un árbol grande, espinoso, con una copa redonda y ancha; los ramos son angulares a menudo con vello; las hojas son muy grandes, hasta 20 cm de largo por 12 cm de ancho.

Las espinas son grandes en los arboles de semilla. Las flores son grandes hasta 7cm, solitarias o por racimos de hasta 10.

El fruto es el más grande de los cítricos, comúnmente 10 a 30 cm de diámetro, a veces hasta 60 cm y 10 kg es redondo o en forma de pera, de color amarillo, con la cascara muy gruesa.

La pulpa, blanca o roja, se divide en 11 a 16 gajos; contiene semillas grandes, arrugadas (Geilfus y Bailón, 1994).

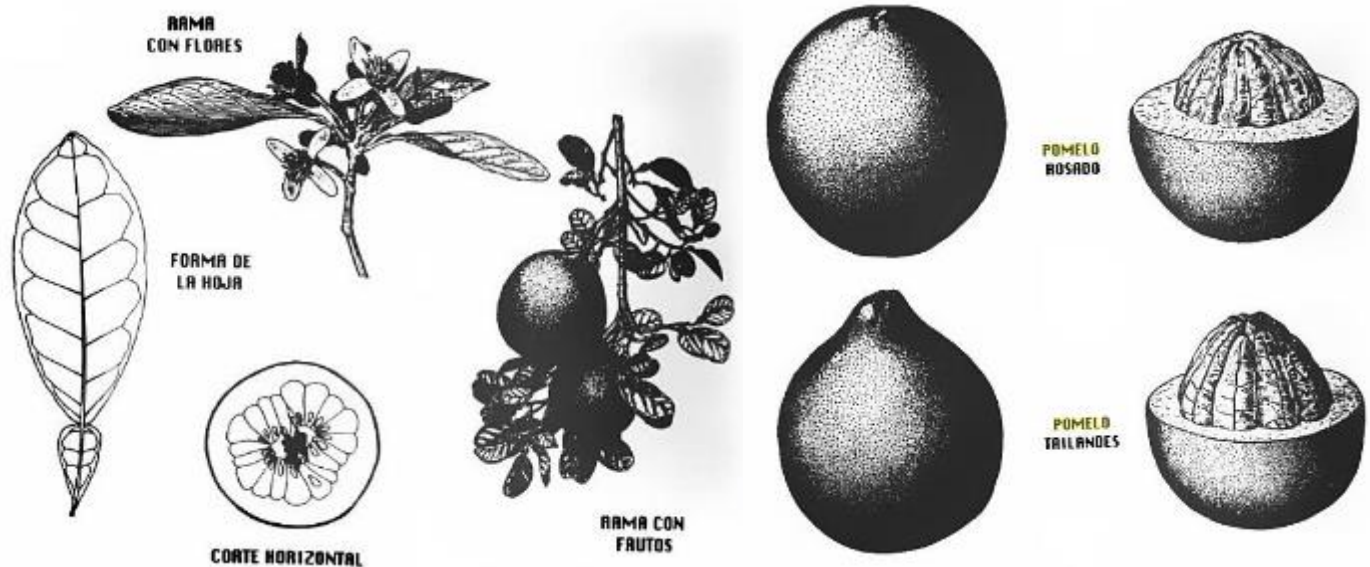


Figura 8. Geilfus y Bailón. (1994). Pomelo. [Ilustración].

Todas las frutas son relativamente pesadas y carecen de toda la adaptación aerodinámica, pero comparten el mismo reto de tener que soportar el impacto desde una altura de más de 10 metros. Un claro ejemplo es el fruto pomelo (*Citrus grandis*) que puede caer desde una altura similar, esto sin mostrar daños exteriores significativos, debido a la organización jerárquica de la cáscara de la fruta, llamada pericarpio.

Como modelos biológicos, se tiene la nuez de macadamia y el coco, que poseen una combinación de mesocarpio fibroso y esponjoso, y un endocarpio duro. Estas características le permiten al fruto disipar hasta un 90% de la energía producida por el impacto mediante la pared del fruto y la pulpa. A compresión produce una pérdida del 50% a 70% de la energía durante un ciclo de histéresis. Pero la combinación de estas extraordinarias propiedades de alta disipación de energía, falla benigna y casi completa recuperación de grandes deformaciones dará lugar a nuevos materiales ligeros y bioinspirados completamente (Seidel, Bührig, Fleck, y Speck, 1990).

Esta capacidad de disipar energía se encuentra casi siempre en las estructuras porosas de los cuerpos, a continuación se presenta la composición de los nanos poros y como estos pueden influir en la protección de los cuerpos.

3.2.3. Nano poros

Gracias al esfuerzo realizado durante las últimas décadas se pueden preparar sólidos con porosidad previamente diseñada y, en la medida en que se pueda controlar la periodicidad de las redes de huecos y la microestructura del esqueleto cerámico, se podría encontrar nuevas aplicaciones. Las estructuras nano porosas, con un alto grado de conectividad, se pueden proporcionar vías adecuadas para la difusión y en este sentido, se han desarrollado nuevas estructuras basadas en redes porosas (Figura 9).

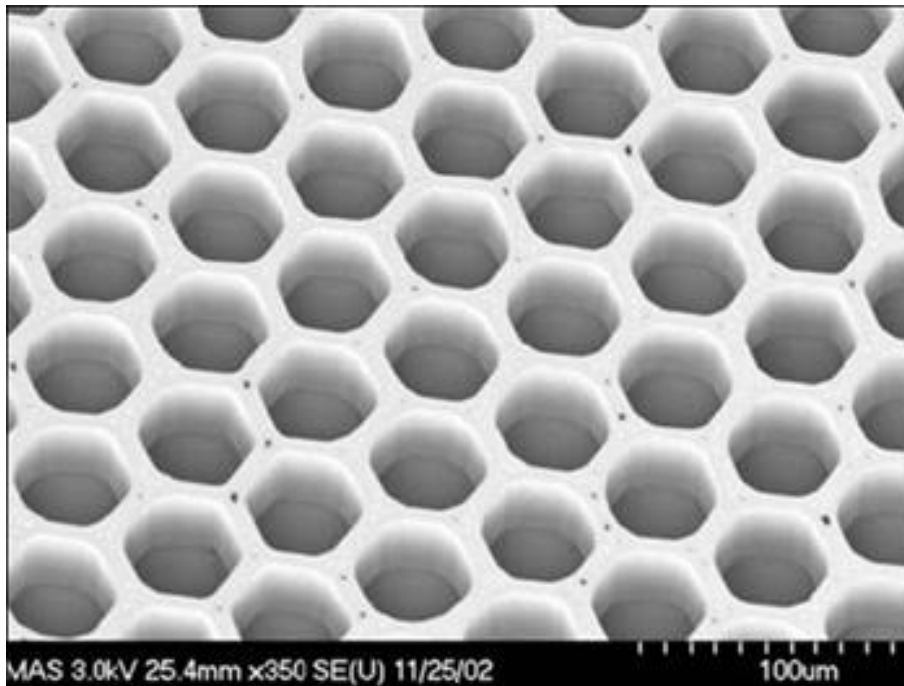


Figura 9. García, JL. (2009). Fotografía electrónica de barrido de las rejillas del secuenciador GS-FLX (Roche) donde se depositan las microesferas que contienen el DNA. [Fotografía].

Con estos estudios se puede diseñar materiales con nano poros, controlando el tamaño del poro y su distribución de acuerdo a necesidades específicas, en este caso enfocado hacia la protección.

Los pomelos poseen algunas de las propiedades de estos poros. "Análisis semi-cuantitativos de secciones finas de cáscara de pomelo revelaron una transición gradual de densidad entre Exocarpio y mesocarpio. Así, estructuralmente, la densidad del Exocarpio no puede separarse claramente del mesocarpio esponjoso. Nuestra hipótesis es que, debido a esta falta de un cambio abrupto en la composición del tejido y las propiedades estructurales y mecánicas se reducen el riesgo de deslaminación de los tejidos durante el impacto. La fuerza de impacto que actúa sobre el pomelo depende de

la velocidad de la fruta antes del impacto y su peso, sino también de la consistencia del terreno. En condiciones naturales, parte de la energía total se disipa por el suelo relativamente flexible, como normalmente existente en las regiones donde pomelos crecen naturalmente. En las pruebas presentadas cargas mecánicas que actúan sobre los frutos se incrementaron por la caída de los frutos en un suelo duro. Así toda la energía cinética debe haber sido disipada por los frutos mismos. El mesocarpio con sus espacios intercelulares llenos de aire representa una espuma compresible. Como el módulo de Young de esta parte esponjosa de la cáscara es más bien baja, llegamos a la conclusión de que su capacidad de disipar grandes cantidades de energía debe ser el resultado de la composición estructural de la cáscara " (Fischer. SF., et al. 2010).

Esta investigación del pomelo arroja que la porosidad es una alternativa viable para disipar la energía de los fuertes impactos y así generar estructuras que protejan el cuerpo humano en actividades que impliquen riesgos, ya sean laborales, deportivas, entre otras.

Para entender estas composiciones geométricas se pueden realizar abstracciones directas de estructuras presentes en la naturaleza, mirando su configuración, los patrones que se repiten y las funciones que cumplen con respecto a los esfuerzos. De este modo se pueden estudiar estas características desde la geometría fractal.

3.2.4. Estructura Voronoi

El diagrama de Voronoi es la división del plano en regiones, en tantos puntos como se tengan, de tal forma que a cada uno de ellos se le asigna la región formada por aquellos puntos que están más cercanos a él, generado a partir de las mediatrices de los puntos (Martínez, 2015). Al realizar un análisis microscópico detallado del mesocarpio y el epicarpio del pomelo, se encuentran regiones en forma de polígonos irregulares a los cuales se les asigna un punto en el centro de cada uno. (Figura 10).

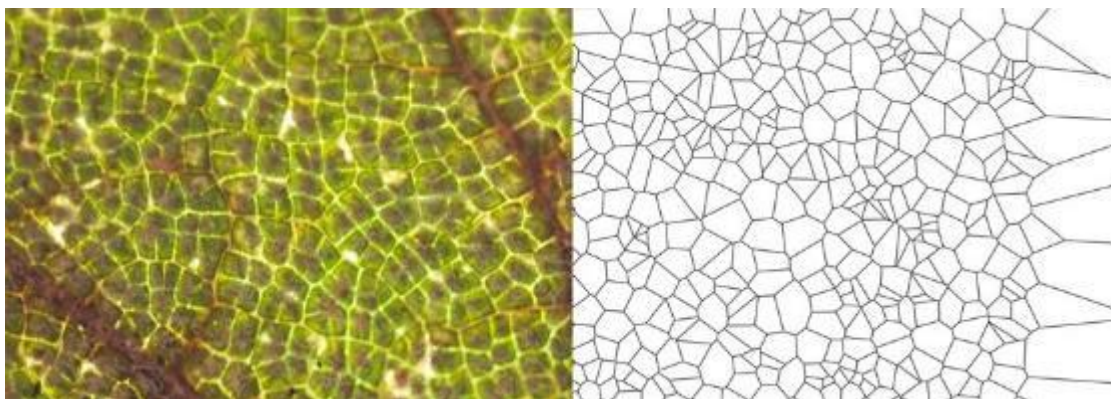


Figura 10. Opengreens. (2011). Diagrama Voronoi en plantas. [Ilustración].

Esta diagramación permite generar desarrollos tridimensionales por medio de poliedros irregulares que conforman en conjunto, una estructura Voronoi. Así que por medio de estas, se podría generar sistemas que permitan la protección tanto del cuerpo humano como de otros elementos para amortiguar impactos.

4. MARCO METODOLÓGICO

La identificación de las propiedades físicas y estructurales de amortiguación de los frutos cítricos, se basó en el análisis de los documentos donde se presentó una síntesis de la información, posteriormente se realizó una microscopías del epicarpio y mesocarpio de limones y pomelos, para identificar la similitud en sus patrones geométricos y el desarrollo de su estructura interna.

A partir de esto se inició una fase experimental donde se tomaba como referencia los resultados arrojados por la microscopia y se generaron nuevas estructuras, con las cuales se pudo verificar la información haciendo una réplica de las propiedades encontradas en los resultados iniciales (Figura 11).

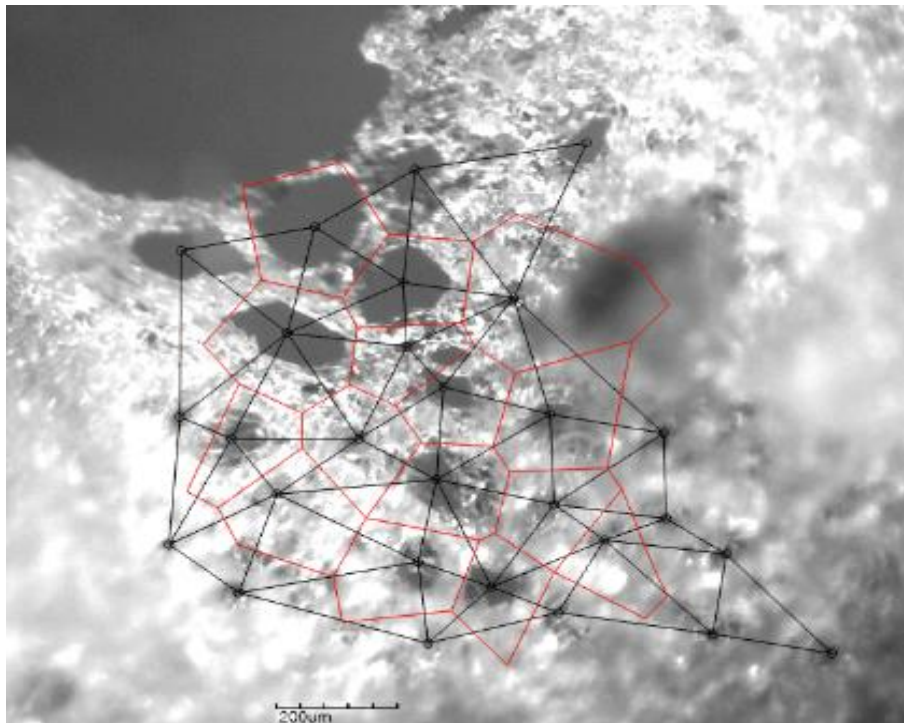


Figura 11. UPB. (2014). Microscopía de mesocarpio del pomelo. [Fotografía].

4.1. Experimentación a cargas de compresión.

La verificación partió de la comparación entre tres estructuras diferentes; círculos, cuadrados y estructura Voronoi, distribuidas en superficies de cartón con el mismo porcentaje de material, éstas fueron sometidas a una serie de pruebas de compresión y amortiguación, seguida de la creación de una nueva composición tridimensional a partir de la estructura Voronoi extraída del mesocarpio. (Figura 12)



Figura 12. UPB. (2104).Estructuras en cartón corrugado con los patrones geométricos. [Fotografía].

Ésta verificación arrojó como resultado que la estructura Voronoi (Figura 13) logró soportar más carga en la prueba de compresión, con un peso máximo de 30.5 kg, seguida del patrón circular soportando una carga de 28.5 kg y el patrón de cuadrados llegando al punto de fatiga en los 24.2 kg.



Figura 13. UPB. (2014). Prueba de compresión a estructura voronoi. [Fotografía]

4.2. Experimentación a esfuerzos de amortiguación.

Para la prueba de amortiguación se realizaron dos prototipos, uno a partir de la superposición de varias capas de cartón corrugado de la estructura Voronoi (Figura 14), que en su interior contenían un bombillo, este prototipo fue lanzado en caída libre a diferentes alturas para comprobar la resistencia y fatiga, ante los impactos y la amortiguación de la estructura y el material, alcanzando una altura de 23.5 mts, distancia en la que el bombillo llegó a su fractura después de 9 pruebas más (Figura 15).



Figura 14. UPB. (2014). Estructura por capas de cartón corrugado. [Fotografía].



Figura 15. UPB. (2014). Modelo compacto para la experimentación. [Fotografía].

El otro prototipo construido en cartón paja (Figura 16), se realizó partiendo de una estructura Voronoi aplicada a un poliedro regular (Hexaedro), compuesto por varios poliedros irregulares (Figura 17), éste en su interior contenía un bombillo, al igual que el prototipo anterior. La experimentación tuvo el mismo proceso, donde se midió la fatiga de la estructura y el material, al igual que su capacidad para amortiguar los impactos. Se obtuvieron resultados más eficientes, donde la nueva estructura después de 30 mts, aunque presenta daños a causa de la disipación de esfuerzos, no llegó a su punto de fractura (Figura 18).

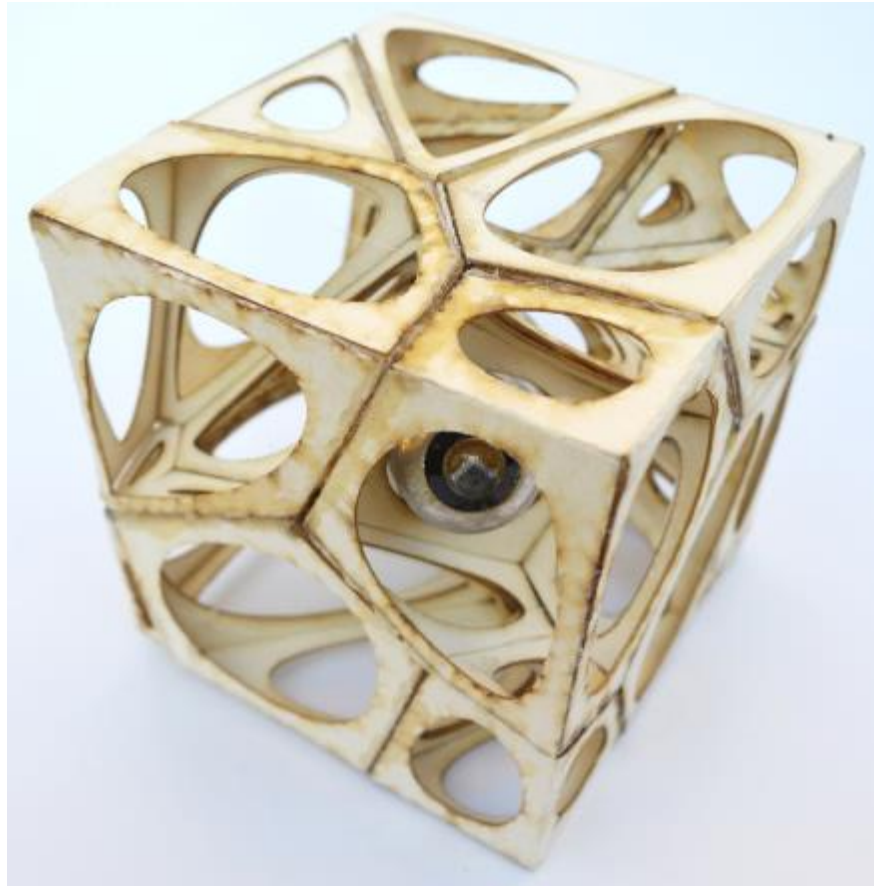


Figura 16. UPB. (2015). Modelo de experimentación de hexaedro voronoi en cartón paja. [Fotografía].

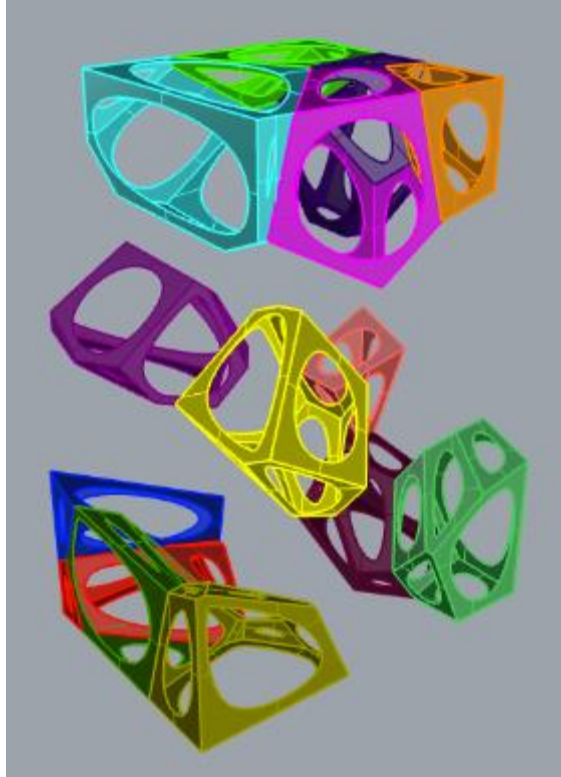


Figura 17. UPB. (2015). Composición estructural de poliedros irregulares. [Ilustración].



Figura 18. UPB. (2015). Fracturas evidenciadas después de las pruebas. [Fotografía].

5. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Al cumplir la fase experimental del proyecto, los resultados obtenidos en las tres pruebas fueron favorables, ya que al someter las estructuras a cargas de amortiguación y compresión se pudo justificar que los diagramas de Voronoi son eficientes para ello. Por lo tanto, es recomendable utilizarlas para realizar estructuras que tengan que soportar esfuerzos de amortiguación de impactos, esto depende de los materiales con el cual se construya, la disposición de la geometría y la forma.

Se cumplen los objetivos determinados por medio de la aplicación de las bases teóricas y experimentales que se investigaron a lo largo del proceso, desarrollando dos tipos diferentes de estructuras Voronoi aplicadas a diferentes materiales, donde gracias la efectividad de los resultados, brindan nuevas alternativas para aplicar a la protección y amortiguación de impactos.

El material con el cual se realice la estructura influye en el resultado, pero la diagramación Voronoi interviene aún más en la efectividad de esta, respecto a la amortiguación de impactos.

Estas estructuras se podrían aplicar a diferentes áreas, ya sea para realizar materiales bio-inspirados o para generar estructuras con estas cualidades, así aplicarlo en la áreas de la salud, el diseño, la ingeniería, la arquitectura, entre otras.

6. GLOSARIO

- **Amortiguación:** En una máquina, dispositivo que sirve para compensar y disminuir el efecto de choques, sacudidas o movimientos bruscos (RAE).
- **Diagramar:** Elaborar un esquema, gráfico o dibujo con el fin de mostrar las relaciones entre las diferentes partes de un conjunto (RAE)
- **Diagrama de voronoi:** es una estructura que captura la información de proximidad de un conjunto de puntos P descomponiendo el plano en regiones poligonales convexas. Esta estructura tiene un gran interés para este proyecto por las aplicaciones geométricas que posee. Entre sus aplicaciones geométricas, se encuentra la construcción de la triangulación de Delaunay dualizando el diagrama de Voronoi, o la búsqueda del punto p_i más cercano a un punto q del plano. Entre sus aplicaciones no geométricas, se encuentran usos ecológicos, como la de determinar la supervivencia de organismos en competencia por alimentos o luz (por ejemplo, árboles en un bosque), y usos en redes sociales para representar las relaciones entre personas (Okabe, Boots, y Sugihara, 1992).
- **Exoesqueleto:** Piel o parte de ella engrosada y muy endurecida, ya por la acumulación de materias quitinosas o calcáreas sobre la epidermis, frecuentemente en forma de conchas o caparazones, como en los celentéreos, moluscos y artrópodos, ya por haberse producido en la dermis piezas calcificadas u osificadas, como son las escamas de los peces y las placas óseas cutáneas de muchos equinodermos, reptiles y mamíferos (RAE).
- **Fatiga:** Pérdida de la resistencia mecánica de un material, al ser sometido largamente a esfuerzos repetidos (RAE).
- **Fractal:** Figura plana o espacial, compuesta de infinitos elementos, que tiene la propiedad de que su aspecto y distribución estadística no cambian cualquiera que sea la escala con que se observe (RAE).
- **Geometría:** Estudio de figuras que utiliza un sistema de coordenadas y los métodos del análisis matemático (RAE).
- **Hexaedro:** Sólido limitado por seis caras (RAE).
- **Mesocarpio:** capa intermedia del pericarpio, generalmente se ubica bajo del epicarpio, es la parte carnosa en muchas frutas y se origina de la transformación del parénquima clorofílico del ovario. mesos= medio y karpus= fruta (Botánica general y descriptiva, 1930)

- **Osteonas:** unidades estructurales del tejido óseo maduro, laminillas óseas de 3 a 7 um de espesor y que en las regiones de sustancia compacta forman sistemas tubulares finos (Welsch y Sobotta, 2006).
- **Pericarpio:** es la parte del fruto correspondiente a las paredes del ovario, y contiene una o más semillas (Botánica general y descriptiva, 1930).
- **Poliedro:** Sólido limitado por superficies planas (RAE).
- **Poros:** Orificio, por su pequeñez invisible a simple vista, que hay en la superficie de los animales y de los vegetales (RAE).
- **Protección:** a una persona, animal o cosa de un perjuicio o peligro, poniéndole algo encima, rodeándole, etc (RAE).

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alzogaray, I. (2007). Geometría fractal y arquitectura: ¿un vínculo consistente? Forma y Simetría: Arte y Ciencia: Congreso de Buenos Aires
- Baraona, M Y Barrantes, E. (2000). Fruticultura general (fruticultura 1). (2º ed.). Costa rica: EUNED. P. 54- 55.
- Fischer. SF., Thielen, M., Loprang, RR., Seidel, R., Fleck, C., Speck, T., Bührig-Polaczek, A. (2010). *Pummelos as concept generators for biomimetically-inspired*. Advance biomaterials, No 12.
- Geilfus, F y Bailón, P. (1994). El árbol al servicio del agricultor: Guía de especies. Costa Rica. 1994. P 300 – 303.
- Loreto, M. (2006). ¿Algoritmo versus arquitectura? Diagrama de Voronoi como herramienta de diseño.
- Mandelbrot, B. (1997). La geometría fractal de la naturaleza. Tusquet.
- Martínez, U. (2015). Aplicación de la geometría computacional en la reconstrucción 3D basada en Diagramas de Voronoi. Tesis, Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas. Puebla, México.
- Omogrosso, N. (2009). Guía de estudio BPS: Semilla. Instituto pedagógico Maturín. UPEL (Universidad Pedagógica Experimental Libertador).
- Seidel, R. Bührig, A. Fleck, C. y Speck, T. (1990). Impact resistance of hierarchically structured fruit walls and nut shells in view of biomimetic applications. 6º Plant Biomechanics Conference. Cayenne.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2010). Plant Physiology: chapter 13 Secondary metabolites and defense, (3º ed.). Sinauer Associates. Pp. 690.
- Valla, J. (2007). Botánica. Morfología de las plantas superiores. (1a ed.). Buenos Aires: Hemisferio sur. Pp: 352.

7.1. CIBERGRAFÍA

- Anderson, Samantha. (2013). Beneficios del exoesqueleto de un artrópodo. Recuperado de: http://www.ehowenespanol.com/beneficios-del-exoesqueleto-artropodo-info_203121/. [Consultado el 6 de Marzo de 2015]
- Botánica general y descriptiva. (1930). Pp. 297 Recuperado de: <https://books.google.com.co/books?id=KYpXAAAAMAAJ&q=mescarpio++definicion&dq=mescarpio++definicion&hl=en&sa=X&ei=1ttrVcPFEYHtgT6xYKACg&ved=0CBoQ6AEwAA> [Consultado el 31 de Mayo de 2015].

- Okabe, B. Boots, K. y Sugihara, A. (1992). Spatial Tessellations Concepts and Applications of Voronoi Diagrams, Ed. JHON WILEY & SONS. Recuperado de: <http://www-ma2.upc.edu/~geoc/DVALon/MemoriaDVALon.pdf> [Consultado el 31 de Mayo de 2015].
- Subacuáticas real sociedad. (2009). Biología de los moluscos. Recuperado de: http://www.ciclo.subacuaticasrealsociedad.com/index.php?option=com_content&view=article&id=214%3AAbiologia-de-los-moluscos&catid=63%3AAbiologia&Itemid=193&lang=eu. [Consultado el 31 de Mayo de 2015].
- Veimon. (2011). TEJIDO ÓSEO ESPONJOSO [Mensaje de Blog]. Recuperado de <http://elmercaderdelasalud.blogspot.com/2011/08/tejido-oseo-esponjoso.html>. [Consultado el 6 de Marzo de 2015].
- Welsch, U., Sobotta, J. (2006). Histología. Editorial médica Panamericana. Madrid: España. Recuperado de: <https://books.google.com.co/books?id=7zFxo6bmxl0C&pg=PA134&dq=osteonas&hl=en&sa=X&ei=WOJrVenhKcanggTlu4GQCQ&ved=0CBwQ6AEwAA#v=onepage&q=osteonas&f=false> [Consultado el 31 de Mayo de 2015].

7.2. REFERENCIA DE IMÁGENES

- Figura 1. Eisenman, P. (2007). Maqueta House 11a. [Ilustración]. Recuperado de: <http://www.mi.sanu.ac.rs/vismath/BA2007/sym09.pdf>.
- Figura 2. Loreto, M. (2006). Proceso de Iteración de NET.LAB. [Ilustración]. Recuperado de: <file:///C:/Users/USER/Downloads/28202-95496-1-PB.pdf>.
- Figura 3. Asturnatura. (2015). Exoesqueleto. [Ilustración]. Recuperado de: <http://www.asturnatura.com/imagenes/articulos/crustaceos/cuticula.jpg>.
- Figura 4. Asturnatura. (2015). Concha de los moluscos. [Ilustración]. Recuperado de: <http://www.asturnatura.com/imagenes/articulos/moluscos/wwwbordemantoconcha.jpg>.
- Figura 5. Hondudiario. (2014). Corteza del Alcornoque. [Fotografía]. Recuperado de: <http://www.hondudiario.com/sites/default/files/Descoche-Alcornoque-02.jpg>.
- Figura 6. UPB. (2014). Capas del pericarpio. [Ilustración].
- Figura 8. UCV. Microscopía del tejido óseo esponjoso. [Fotografía]. Recuperado de: <http://www.anatomiahumana.ucv.cl/morfo1/foto1/11.jpg>.
- Figura 8. Geilfus y Bailón. (1994). Pomelo. [Ilustración].
- Figura 9. García, JL. (2009). Fotografía electrónica de barrido de las rejillas del secuenciador GS-FLX (Roche) donde se depositan las mircroesferas que contienen el DNA. [Fotografía].

Recuperado de: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/farmavet/instituto-roche.com/images/espejo/bio_fig3.gif.

- Figura 10. Opengreens. (2011). Diagrama Voronoi en plantas. [Ilustración]. Recuperado de: <http://opengreens.net/archives/1991>.
- Figura 11. UPB. (2014). Microscopia de mesocarpio del pomelo. [Fotografía].
- Figura 12. UPB. (2014). Estructuras en cartón corrugado con los patrones geométricos. [Fotografía].
- Figura 13. UPB. (2014). Prueba de compresión a estructura voronoi. [Fotografía].
- Figura 14. UPB. (2014). Estructura por capas de cartón corrugado. [Fotografía].
- Figura 15. UPB. (2014). Modelo compacto para la experimentación. [Fotografía].
- Figura 16. UPB. (2015). Modelo de experimentación de hexaedro voronoi en cartón paja. [Fotografía].
- Figura 17. UPB. (2015). Composición estructural de poliedros irregulares. [Ilustración].
- Figura 18. UPB. (2015). Fracturas evidenciadas después de las pruebas. [Fotografía].