



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL Y MECÁNICA DE CÁSCARAS DE  
SEMILLAS CHILENAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

VANESSA YAZMÍN SÁNCHEZ ASTETE

PROFESORA GUÍA:

VIVIANA ISABEL MERUANE NARANJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ERICK ISAAC SAAVEDRA FLORES

ALI AKBARI FAKHRABADI

SANTIAGO DE CHILE

2019

## **RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL**

**TÍTULO DE:** Ingeniera Civil Mecánica

**POR:** Vanessa Yazmín Sánchez Astete

**FECHA:** 2019

**PROFESORA GUÍA:** Viviana Isabel Meruane Naranjo

### **CARCATERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL Y MECÁNICA DE CÁSCARAS DE SEMILLAS CHILENAS**

La creación de nuevos productos y tecnologías ha ido incrementando de manera sustancial. Aquí juega un rol fundamental la innovación en los desarrollos productivos donde se intenta ser original y novedoso en la creación. La bioinspiración busca inspirarse en la naturaleza y estudiar sus formas, modos, sistemas, procesos y elementos para desarrollar una solución plasmada en algún producto o tecnología. Con el objetivo último de crear un material bioinspirado, las nueces tienen un particular interés, ya que simulan ser muy resistentes ante impactos. Para un mejor espectro se decide estudiar paralelamente almendras (de cáscara dura y blanda).

En primer lugar, se presentan los tópicos que permiten crear un hilo conceptual en el desarrollo del trabajo de título e introducir al lector en la materia. Para esto se describen los frutos a ser analizados y estudios realizados en torno a ellos para luego continuar con los fundamentos de cada ensayo y finalmente terminar con una sección dedicada a los materiales bioinspirados. El análisis microestructural se realiza en SEM y los ensayos a implementar ensayos de compresión, técnica de excitación por impulso (IET, por sus siglas en inglés) y prueba de impacto Charpy.

Un gran comportamiento mecánico presentan las almendras de cáscara dura con resultados que van desde un 14% mayor en IET para el módulo de elasticidad y un 520% mayor en compresión para la fuerza de rotura en comparación a las nueces. Los resultados para almendras de cáscara blanda son los más bajos en todos los ensayos realizados.

Los resultados muestran una microestructura que revela geometrías poligonales planas en almendras de cáscara blanda y poligonales con cavidad en nueces y almendras de cáscara dura. Esto difiere de la estructura típica de la madera conformada por fibras tubulares. Las cavidades presentan una configuración en su interior muy densa que le permitiría al material soportar cargas elevadas.

En resumen, este trabajo permite ser una antesala a la creación de un material bioinspirado en nueces y/o almendras.

*A mi mamá y a mi hermana  
Verito y Cony*

# Agradecimientos

Quiero mencionar en primera instancia a mi mamá, y dedicarte a ti el término de esta etapa, que fue bastante larga. Agradecerte por estar conmigo siempre, hasta el día de hoy, aún cuando ya no estás. Te quiero y te extraño mucho gorda.

Nico, mi hermano y mi mejor amigo, has sido un pilar fundamental en mi vida. Tengo siete años más de vida que tú, pero siento que he aprendido más de ti que tú de mí. Agradezco los malos y buenos momentos contigo, hemos sabido sortear las diferencias que existen entre tú y yo, y nos hemos mantenido unidos y aconsejándonos constantemente. Y obviamente agradecerte por las figuras esquematizadas del informe. Gracias gordo.

Sánchez, durante mucho tiempo compartimos intereses comunes, tenemos casi el mismo del humor, y es por esto que creo que estuve más unida a ti a lo largo de mi vida. Gracias por eso. La situación últimamente no ha sido fácil para ambos, pero hay algo cierto, y es que no estaría en esta instancia si no hubiese sido por ti.

Nitza, han sido varios años de amistad desde Bachi. Cómo olvidar el famoso “*the subway, the subway!*” cuando tuvimos que presentar nuestro trabajo de historia jaja, tu nivel de inglés es insuperable. A pesar de que en ocasiones pasa mucho tiempo y no sabemos nada de la otra, sé que nuestra amistad va más allá de la distancia y vamos a mantenernos incondicionales la una para la otra.

Por último, quiero dedicarles unas palabras a ustedes, Javi, Pau y Vale. Aunque tomamos caminos separados, fueron sin lugar a dudas una parte importante en mi vida. Quizás nos volvamos a encontrar, quizás no. Lo único que me queda por decir es gracias, por todos los momentos, los buenos y los malos.

## Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Motivación.....	2
1.3 Alcances.....	2
2. Antecedentes Específicos.....	4
2.1 Análisis Microestructural y Termogravimétrico de Semillas de Biomasa.....	4
2.2 Simulación No Lineal FEM en la Trituración de Nueces.....	5
2.3 Condicionamiento para Reducción de Daño en Kernel.....	9
3. Descripción de Ensayos Realizados y e Instrumentos utilizados.....	11
3.1 Nuez.....	11
2.1 Almendras.....	14
3.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	16
3.3 Técnica de excitación por impulso (IET).....	20
3.4 Ensayo de compresión.....	22
3.5 Prueba de impacto Charpy.....	25
3.6 Materiales Bioinspirados.....	25
4. Metodología.....	29
4.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	29
4.2 Técnica de excitación por impulso (IET).....	29
4.3 Ensayo de compresión.....	30
4.4 Prueba de impacto Charpy.....	31
4.5 Análisis de resultados.....	31
5. Resultados.....	32
5.1 Microestructura.....	32
5.2 Módulo de Elasticidad.....	35
5.3 Fuerza de Rotura, Tenacidad, Energía Absorbida, Rigidez.....	39
5.4 Relación entre Densidades y Propiedades Mecánicas.....	52
5.5 Energía Absorbida.....	55
6. Análisis de Resultados.....	57
6.1 Microestructura.....	57
6.2 Módulo de Elasticidad.....	58
6.3 Fuerza de Rotura, Tenacidad, Energía Absorbida, Rigidez.....	59
6.4 Energía Absorbida.....	61
6.5 Relación microestructura y propiedades mecánicas.....	62
7. Conclusiones.....	64
8. Bibliografía.....	66

## Índice de Cuadros

Cuadro 3.1: Características del nogal y nuez.....	13
Cuadro 4.1: Rangos de masas designados para nueces, almendras de cáscara dura (ACD) y almendras de cáscara blanda (ACB).....	30
Cuadro 5.1: Promedio y desviación estándar de las dimensiones en la microestructura (cáscaras).....	33
Cuadro 5.2: Promedio y desviación estándar de las dimensiones en la microestructura (kernel).....	35
Cuadro 5.3: Masa, dimensiones y frecuencia en nueces, n=30 vertical y 30 horizontal.....	37
Cuadro 5.4: Masa, dimensiones y frecuencia en almendras de cáscara dura, n=30 vertical y 30 horizontal.....	37
Cuadro 5.5: Masa, dimensiones y frecuencia en almendras de cáscara blanda, n=30 vertical y 30 horizontal.....	37
Cuadro 5.6: Módulo de elasticidad en nueces, n=30 vertical y 30 horizontal.....	38
Cuadro 5.7: Módulo de elásticas en almendras de cáscara dura, n=30 vertical y 30 horizontal.....	38
Cuadro 5.8: Módulo de elasticidad en almendras de cáscara blanda n=30 vertical y 30 horizontal.....	38
Cuadro 5.9: Masa, dimensiones y diámetros en nueces, n=540.....	41
Cuadro 5.10: Masa, dimensiones y diámetros en almendras de cáscara dura, n=360.....	42
Cuadro 5.11: Masa, dimensiones y diámetros en almendras de cáscara blanda, n=540.....	43
Cuadro 5.12: Esfericidad, volumen, densidad y superficie de áreas en nueces, n=540.....	44
Cuadro 5.13: Esfericidad, volumen, densidad y superficie de área en almendras de cáscara dura, n=360.....	45
Cuadro 5.14: Esfericidad, volumen, densidad y superficie de área en almendras de cáscara blanda, n=540.....	46
Cuadro 5.15: Propiedades mecánicas en nueces, n=540.....	47
Cuadro 5.16: Propiedades mecánicas en almendras de cáscara dura, n=360.....	48
Cuadro 5.17: Propiedades mecánicas en almendras de cáscara blanda, n=540.....	49
Cuadro 5.18: Energía absorbida en prueba de impacto Charpy, n=100 por fruto.....	56

## Índice de Figuras

Figura 2.1: Microestructura cáscara de nuez (izquierda) y almendra (derecha).....	4
Figura 2.2: Microestructura cáscara de almendra en diferentes etapas de madurez.....	5
Figura 2.3: Setup del ensayo de compresión.....	6
Figura 2.4: Resultados ensayos de compresión.....	6
Figura 2.5: Relación del esfuerzo-deformación bi-lineal.....	7
Figura 2.6: Materiales idealizados de cáscara de nueces y kernel usados en la simulación FEM.....	8
Figura 2.7: Resultados de la simulación.....	9
Figura 2.8: Curvas fuerzas versus desplazamiento típico obtenido mediante ensayos de compresión.....	10
Figura 2.9: Fuerza de ruptura en cáscaras de kernel para la variedad Non Pareil.....	10
Figura 3.1: Exportaciones de cargamentos de nueces con cáscara.....	12
Figura 3.2: Exportaciones de cargamentos de nueces sin cáscara.....	12
Figura 3.3: Capas de fruto de nogal.....	14
Figura 3.4: Superficie planta de frutos secos.....	16
Figura 3.5: Microscopio SEM de la FCFM, modelo FEI Quanta 250.....	17
Figura 3.6: Diagrama esquemático SEM.....	18
Figura 3.7: Geometrías regulares.....	20
Figura 3.8: Esquema de metodología IET.....	21
Figura 3.9: Representación esquemática de ensayos sometidos a carga estática P.....	22
Figura 3.10: Estructura básica de una máquina universal electromecánica.....	22
Figura 3.11: Curva típica esfuerzo vs deformación.....	23
Figura 3.12: Esquema prueba de impacto Charpy.....	25
Figura 3.13: (A) Pájaro alcedo atthis y (B) tren bala japonés.....	26
Figura 3.14: Diseño de espiral para imitar a la naturaleza.....	27

Figura 4.1: Corte rectangular horizontal y vertical en la semilla.....	30
Figura 4.2: Configuración viga libre-libre.....	30
Figura 4.3: Representación esquemática de los ejes x, y, z.....	31
Figura 5.1: Microestructura almendra de cáscara blanda.....	32
Figura 5.2: Microestructura almendra de cáscara dura.....	33
Figura 5.3: Microestructura nuez.....	33
Figura 5.4: Kernel almendra de cáscara dura.....	34
Figura 5.5: Kernel nuez.....	34
Figura 5.6: Frecuencia natural nuez vertical (izquierda), nuez horizontal (derecha).....	35
Figura 5.7: Frecuencia natural almendra de cáscara dura vertical (izquierda), almendra de cáscara dura horizontal (derecha).....	36
Figura 5.8: Frecuencia natural almendra de cáscara blanda vertical (izquierda), almendra de cáscara blanda horizontal (derecha).....	36
Figura 5.9: Módulo de elasticidad calculadas mediante ensayo IET para las muestras de nueces y almendras.....	39
Figura 5.10: Gráfico Fr vs Rdp en nueces.....	39
Figura 5.11: Gráfico Fr vs Rdp en almendras de cáscara dura.....	40
Figura 5.12: Gráfico Fr vs Rdp en almendras de cáscara blanda.....	40
Figura 5.13: (a) Fuerza de rotura (N), (b) rigidez (N/mm), (c) energía absorbida (Nmm) y (d) tenacidad (kPa) versus masa (g) en nueces.....	50
Figura 5.14: (a) Fuerza de rotura (N), (b) rigidez (N/mm), (c) energía absorbida (Nmm) y (d) tenacidad (kPa) versus masa (g) en almendras de cáscara dura.....	51
Figura 5.15: (a) Fuerza de rotura (N), (b) rigidez (N/mm), (c) energía absorbida (Nmm) y (d) tenacidad (kPa) versus masa (g) en almendras de cáscara blanda.....	52
Figura 5.16: (a) Fuerza de rotura (N), (b) rigidez (N/mm), (c) energía absorbida (Nmm) y (d) tenacidad (kPa) versus densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) en dirección X.....	53
Figura 5.17: (a) Fuerza de rotura (N), (b) rigidez (N/mm), (c) energía absorbida (Nmm) y (d) tenacidad (kPa) versus densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) en dirección Y.....	54
Figura 5.18: (a) Fuerza de rotura (N), (b) rigidez (N/mm), (c) energía absorbida (Nmm) y (d) tenacidad (kPa) versus densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) en dirección Z.....	55



Figura 5.19: Resultado en muestras de almendras de cáscara dura ensayadas mediante prueba de impacto Charpy.....	56
Figura 6.1 Sección transversal de almendras de cáscara dura.....	63

# Capítulo 1

## Introducción

La creación de nuevos productos y tecnologías ha ido incrementando de manera sustancial en esta época, lo que va de la mano con dos factores importantes, dar un mayor confort al ser humano que le permita ser más eficiente y óptima su vida y, por otro lado, ser empáticos con nuestro entorno. Aquí juega un rol fundamental la innovación en los desarrollos productivos que busca ser original y novedoso en la creación. De la misma manera en que un artista quiere plasmar sus ideas en una pintura o compositor que busca cohesionar de manera sublime palabras que den vida a una canción, se necesita inspiración... ¿y por qué no buscarla en la naturaleza?

La bioinspiración busca inspirarse en la naturaleza y estudiar sus formas, modos, sistemas, procesos, elementos para desarrollar una solución plasmada en algún producto o tecnología. José Luis Arias, médico veterinario de la Universidad de Chile hizo mención de lo que significa la inspiración en la naturaleza: *“Bueno, el hombre en la ingeniería hace las cosas de arriba para abajo (top down). Cuando Miguel Ángel fabrica el David, toma un bloque de mármol, le empieza a sacar pedazos y termina con la estatua. Si la biología tuviera que hacer un David, no partiría por un trozo de piedra, lo haría con un átomo de mármol e iría juntando uno tras otro, y de abajo para arriba (bottom up). Totalmente al revés”*<sup>1</sup>.

El presente trabajo que lleva por nombre *Caracterización microestructural y mecánica de semillas chilenas* se da un primer avance para el desarrollo de un material bioinspirado a partir del estudio de nueces y almendras. Se determinarán algunas propiedades mecánicas y se realizará un análisis de la microestructura.

En primera instancia se presentan los objetivos, motivaciones y alcances del trabajo. Luego, se realiza una revisión de antecedentes y bibliografías para contextualizar la investigación que permita tener una base para los capítulos posteriores. Se presenta, también, la metodología utilizada para la realización de cada ensayo, mostrando posteriormente los resultados obtenidos. A continuación se exponen una serie de análisis para finalmente se establecer las conclusiones más importantes a considerar.

### 1.1 Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es la caracterización microestructural de cáscaras de semillas chilenas, en particular nueces y almendras, y su relación con sus propiedades mecánicas. Para lo expuesto se establecen los siguientes objetivos específicos:

---

<sup>1</sup> Entrevista realizada a Explora, un programa Conicyt el 2016.

- Identificar la microestructura de un conjunto de cáscaras de nueces y almendras.
- Determinar las propiedades mecánicas de cáscaras de nueces y almendras.
- Relacionar las propiedades mecánicas identificadas con la microestructura del conjunto de cáscaras.

## **1.2 Motivación**

La naturaleza tal como es percibida por los seres humanos ha tomado un poco más de miles de millones de años para ser la estructura que es en la actualidad, evolucionando constantemente para enfrentarse a las condiciones adversas a las que está sometida. No es al azar su condición.

Los materiales naturales o biológicos pueden entenderse como el resultado de un proceso de optimización desarrollado a lo largo de cientos de millones de años de evolución. Algunos ejemplos de la naturaleza, tales como conchas de molusco, madera y hueso, muestran que a partir del ensamble de constituyentes microscópicos de baja rigidez y resistencia es posible obtener materiales naturales sólidos capaces de desplegar sobresalientes propiedades mecánicas a nivel macroscópico.

De esta manera, es posible extraer y analizar información de materiales biológicos con el fin de replicar los sistemas que lo componen. Hay incluso investigaciones que consideran la manufactura de materiales biomiméticos como por ejemplo, crear materiales que sean capaces de modificar sus propiedades mecánicas frente a estímulos.

Esta tesis busca contribuir a esta área de investigación, en una primera instancia, con la caracterización de cáscaras de nueces y almendras. Las nueces tienen un particular interés, ya que simulan ser muy resistentes ante impactos: resisten la caída del nogal o la apertura de sus cáscaras ante depredadores como las ardillas. En este sentido surge la misión de analizar este fruto: sus propiedades mecánicas y microestructura. Para tener comparaciones se decide estudiar paralelamente almendras.

## **1.3 Alcances**

El trabajo de título a desarrollar busca establecer una relación entre microestructura y propiedades mecánicas, para esto el estudio abarca tres tipos de cáscaras: nueces (*Juglans Regia*, variedad Serr), almendras de cáscara blanda (variedad Sonora) y almendras de cáscara dura (variedad Marcona). En el ensayo de compresión un total de 540 nueces, 360, almendras de cáscara dura y 540 almendras de cáscara blanda fueron ensayadas. En la prueba de técnica de excitación por impulso (IET, por sus siglas en inglés) se ensayaron 60 muestras por cada tipo de fruto, mientras que en la prueba de impacto Charpy se ensayaron 100 por cada tipo de semilla.

El estudio de microestructura se da lugar en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés).

El estudio de las propiedades mecánicas se da lugar en el Departamento de Mecánica y Ciencias de los Materiales, mediante el uso de la técnica de excitación por impulso, ensayos de compresión y ensayos de impacto Charpy.

El trabajo de investigación concluirá con el análisis que busca relacionar y vincular la microestructura con las propiedades mecánicas de las cáscaras estudiadas.

## Capítulo 2

# Antecedentes Específicos

En este capítulo se detallarán algunos estudios previos encontrados en torno a dos temas tratados en este trabajo de tesis: microestructura y ensayos de compresión. En el primero se aborda el análisis de varias semillas que son sometidas a SEM, a un ensayo nanoindentado para la obtención de propiedades mecánicas y a un análisis termogravimétrico. En los otros dos se aborda ensayos de compresión, cuyo propósito permite abarcar un objetivo común, pero con focos distintos.

### 2.1 Análisis Microestructural y Termogravimétrico de Semillas de Biomasa

De acuerdo a [24], hay un interés mundial en la producción de plásticos biodegradables para reducir el impacto ambiental producido por los desechos plásticos. Sin embargo, los plásticos biodegradables presentan bajas propiedades mecánicas. Los materiales celulósicos provenientes de fuentes renovables obtenidos de las industrias agrícolas han ganado importancia como potenciales elementos de refuerzo para materiales termoplásticos biodegradables. Además, la biomasa derivada de los cultivos es considerada como uno de los recursos renovables más prometedores para sustituir los materiales a base de gasolina.

Se espera que al estudiar la microestructura, la composición química y algunas propiedades mecánicas dentro de la semilla, se puedan encontrar nuevas aplicaciones y usos para este material desechado actual.

Se han encontrado granos abiertos poligonales en su microestructura como lo mostrado en la figura 2.1 mediante análisis SEM para nueces y almendras. En la figura 2.2 se observa una almendra en diferentes etapas de madurez donde se forman cavidades y en su interior *láminas enrolladas*.

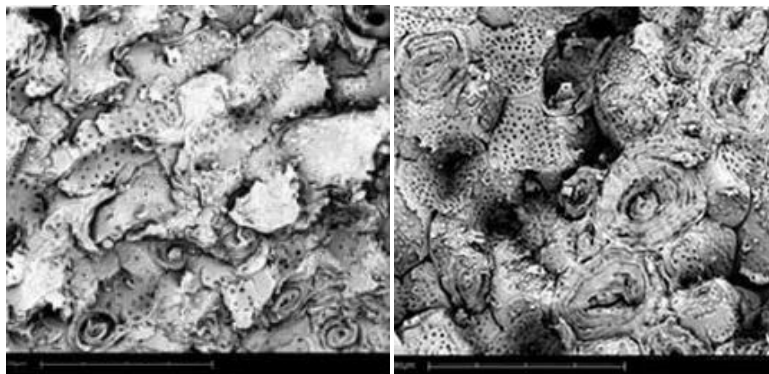


Figura 2.1: Microestructura cáscara de nuez (izquierda) y almendra (derecha) [24].

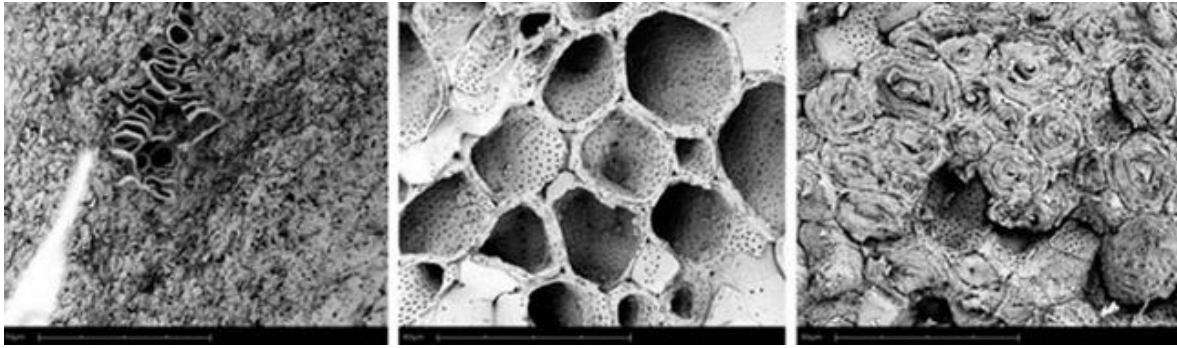


Figura 2.2: Microestructura cáscara de almendra en diferentes etapas de madurez [24].

El módulo de nanoindentación ( $E_r$ ) identificada es de 9 GPa para la nuez, mientras que para la almendra es de 5-6 GPa, este módulo difiere del correspondiente en una prueba de tracción, ya que los materiales ensayados tienen un comportamiento no isotrópico. La dureza nanoindentada corresponde a 450 MPa y 200 MPa para nuez y almendra respectivamente.

En un análisis de la degradación térmica de biomasa mediante TGA (Thermogravimetric Analysis) se reconoce en nueces una pérdida de hemicelulosa a los 210-315°C, seguido de una degradación de celulosa a los 330-450°C. Este estudio muestra una estabilidad térmica que es acorde con el elevado  $E_r$ , y la alta dureza se condice con la baja pérdida en peso de la celulosa (en comparación a otras semillas estudiadas).

De la misma manera, mediante el estudio TGA se determina la pérdida en peso de hemicelulosa y celulosa en almendras. Estas pérdidas son mayores, lo que podría explicar la baja dureza (en comparación a la nuez) y bajo módulo debido a una baja estabilidad térmica.

## 2.2 Simulación No Lineal FEM en la Trituración de Nueces

De acuerdo a [13], la nuez es uno de los frutos más cultivados en el mundo y altamente comercializado. Es consumido por su sabor y aspectos nutricionales. Los consumidores están tomando más y más atención a la nuez descascarada. Para obtener Kernels con la mejor calidad se necesita que el procesamiento de la nuez sea óptimo, esta etapa es crítica. Para crear un buen sistema de descascarado se necesita un estudio de las propiedades mecánicas del fruto. En este sentido, se presenta un caso de estudio: una simulación no lineal FEM para descascarar nueces con una herramienta de mano.

Se realizan ensayos de compresión en tres direcciones X, Y, Z, en la figura 2.3 se muestra el setup. En total, 10 nueces fueron ensayadas para cada dirección. El contenido de humedad promedio es de  $6.86 \pm 0.22\%$ . La velocidad de compresión es de 2.5 mm/min.

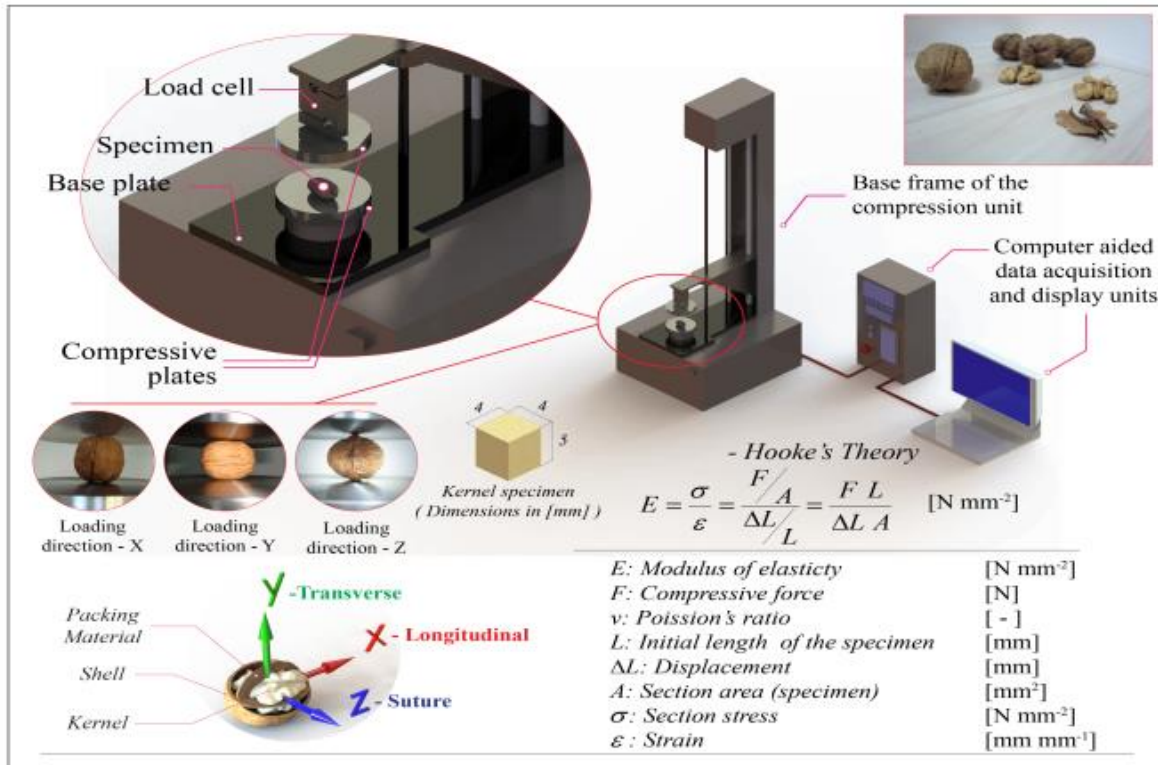


Figura 2.3: Setup del ensayo de compresión [13].

El resultado gráfico de la fuerza de ruptura promedio a la deformación se muestra en la figura 2.4.

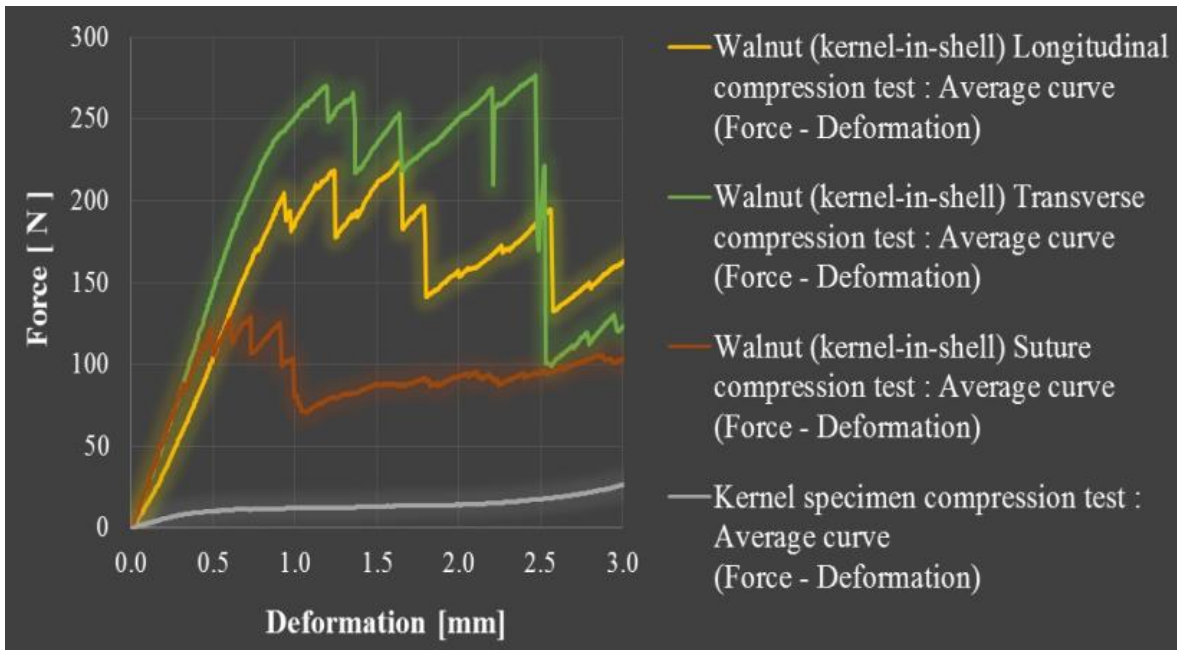


Figura 2.4: Resultados ensayos de compresión [13].

Los datos de esfuerzos-deformación verdaderos fueron convertidos a partir de datos de fuerza-desplazamiento. Se utilizaron para calcular el módulo de elasticidad, propiedad esencial para determinar la deformación en la etapa de carga elástica. Detrás de la deformación elástica, algunos problemas pueden involucrar deformación plástica. La deformación plástica de los materiales se puede interpretar como una falla del material, de hecho, es válida para la mayoría de los materiales orgánicos. En este sentido, la relación del esfuerzo-deformación bi-lineal bajo cargas de tracción y compresión se puede graficar como lo mostrado en la figura 2.5.

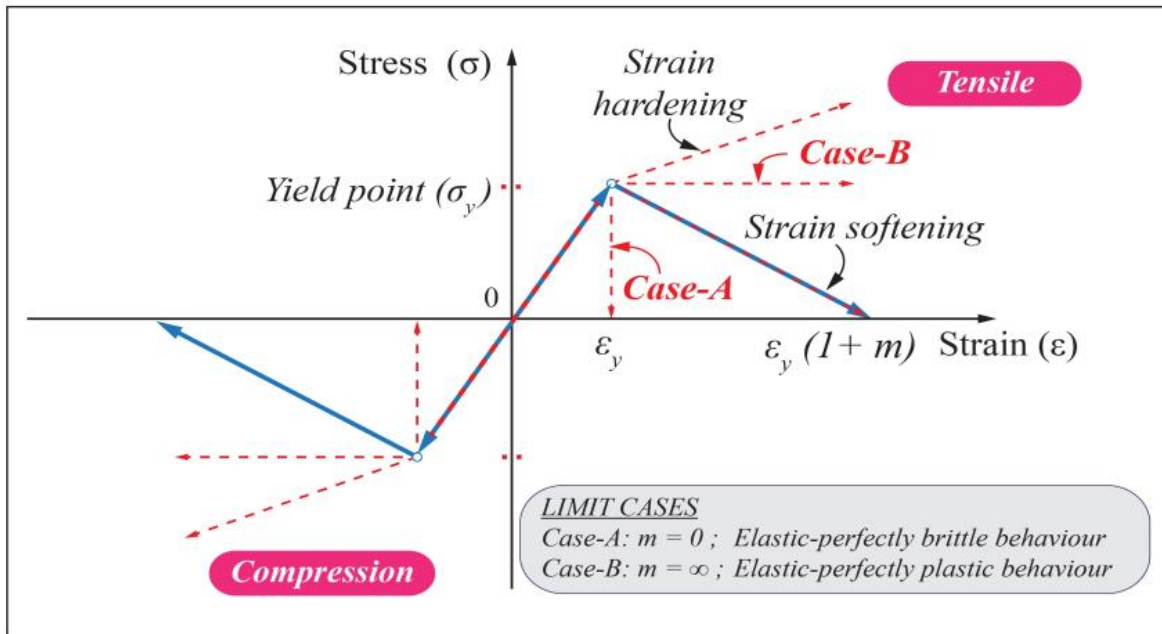


Figura 2.5: Relación del esfuerzo-deformación bi-lineal [13].

El comportamiento de deformación elástica perfectamente frágil se muestra en la figura 2.5 y es bastante similar al comportamiento experimental que presentan las cáscaras de nueces. Por lo tanto, no estaría mal asumir un material ortotrópico perfectamente frágil. Para la herramienta de mano se asume un material elástico-plástico (bi-linear strain hardening en la figura 2.5). En este sentido, los modelos del material idealizado y sus propiedades se pueden describir a través de las curvas experimentales promedio de esfuerzo-deformación verdadero mostrado en la figura 2.6. El coeficiente de Poisson es otro parámetro importante estudiado en varios productos agrícolas de un gran número de investigaciones.



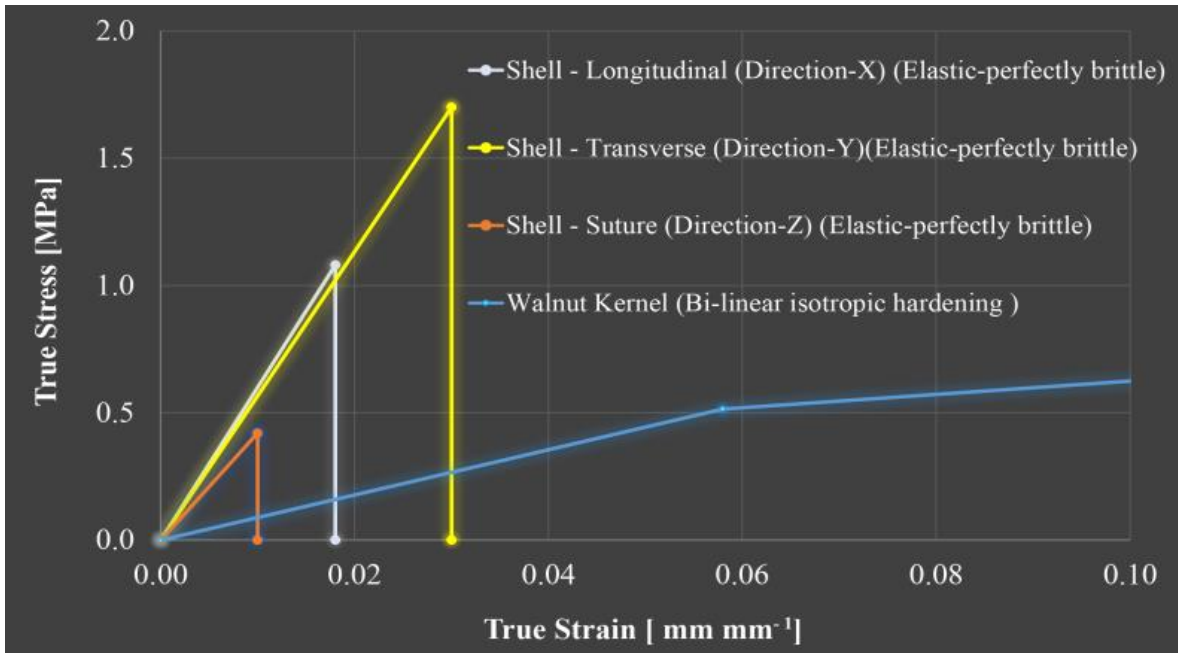


Figura 2.6: Materiales idealizados de cáscara de nueces y kernel usados en la simulación FEM [13].

Un escáner láser de escritorio Next Engine 3D se utilizó para digitalizar la geometría, SolidWorks se utilizó para estructurar el mallado de la superficie y finalmente la simulación es realizada en Ansys.

Los resultados de la simulación se muestran en la figura 2.7. En A se muestra la progresión de la deformación por esfuerzo no lineal del fruto (cáscara y kernel) versus tiempo. La simulación duró 0.005 s. El valor máximo de esfuerzo fue de 5.370 y 0.274 MPa para la cáscara y kernel respectivamente. En B se representa la progresión de la deformación por esfuerzo de la herramienta de mano versus tiempo. A primera vista, el máximo de 288 MPa en la herramienta es superior al esfuerzo de fluencia definido para el material de la herramienta (210 MPa).

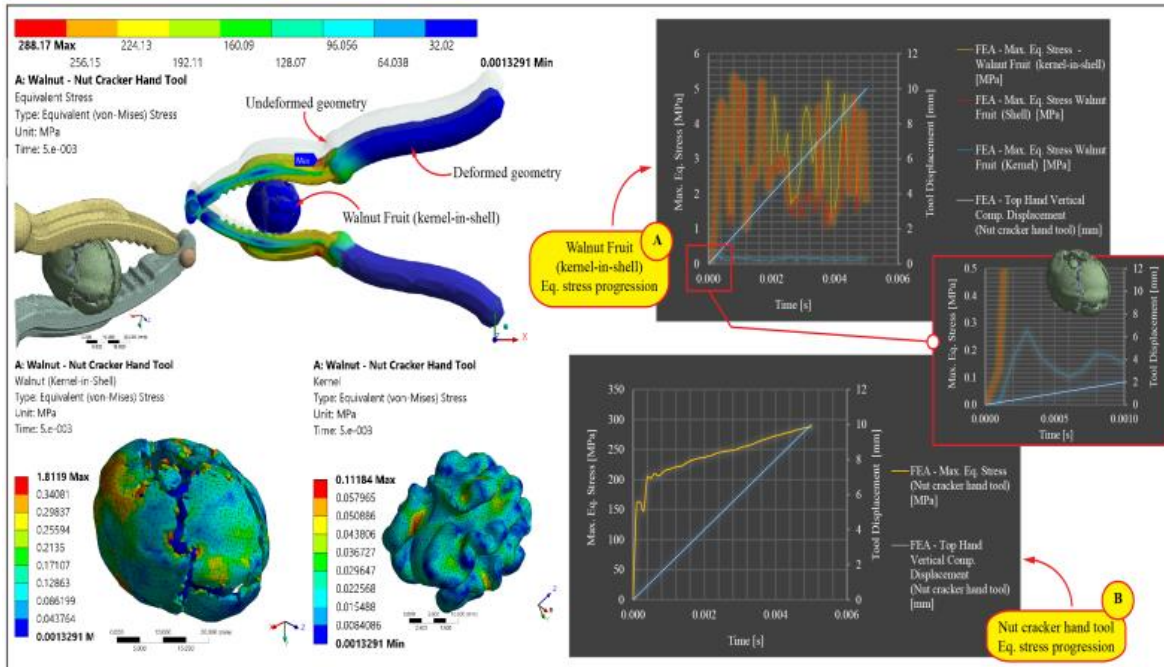


Figura 2.7: Resultados de la simulación [13].

## 2.3 Condicionamiento para Reducción de Daño en Kernel

De acuerdo a [26], los equipos comerciales utilizados comúnmente en el procesamiento de almendras que permiten descascararlos, comprime y cizalla los frutos lo que genera la ruptura de las cáscaras pero también daño en los kernels, sobre todo en las variedades de cáscara dura. Al condicionar las almendras, mediante remojo en agua y reposo antes de su procesamiento, se muestra una disminución en el daño de los kernels y un mejoramiento en la resistencia al impacto de la cáscara.

Para la variedad Non Pareil (cáscara blanda) fueron necesario sólo 10 minutos de remojo, y para las variedades Tarraco, Marcona y Vyro (cáscara dura) el período fue de 3 y 8 h. La temperatura ambiente es entre 15-20°C. Las almendras se sumergieron en un cubo largo lleno de agua y después de cumplido el tiempo se vació el cubo y se dejaron reposar.

Se realizaron ensayos de compresión para medir su resistencia mecánica a una velocidad de 0.2 mm/s. Las curvas fuerza versus desplazamiento se muestran en la figura 2.8. Se puede observar una baja fuerza de ruptura en la variedad Non Pareil y altas fuerzas de ruptura para las variedades de cáscara dura. Para cada variedad el condicionamiento no creó un efecto significativo en la magnitud de la fuerza requerida para su quiebre. Sin embargo, sí se muestra que la ruptura de desviación aumentó con el condicionamiento. Así, la rigidez de las cáscaras se redujo.

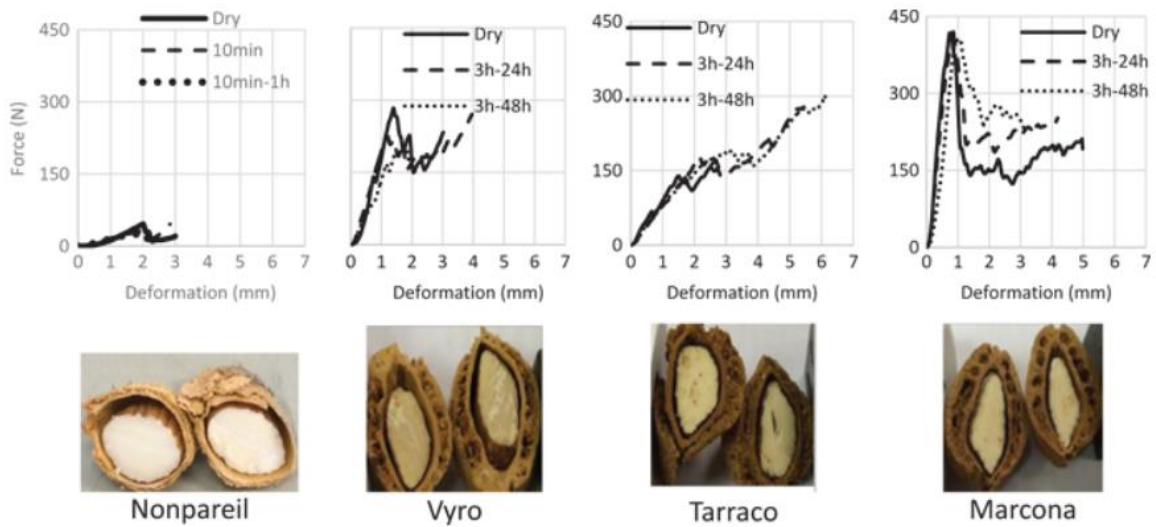


Figura 2.8: Curvas fuerzas versus desplazamiento típico obtenido mediante ensayos de compresión [26].

La disminución de daño en el kernel debido al aumento en el contenido de humedad se puede explicar ya que al agregar agua al kernel, actúa como plastificante, incrementando su resistencia mecánica. En la figura 2.9 se muestra una fuerza de compresión mucho mayor en kernels que en cáscaras. Trabajos previos ya han mostrado que la adición de agua reduce la fragilidad del kernel.

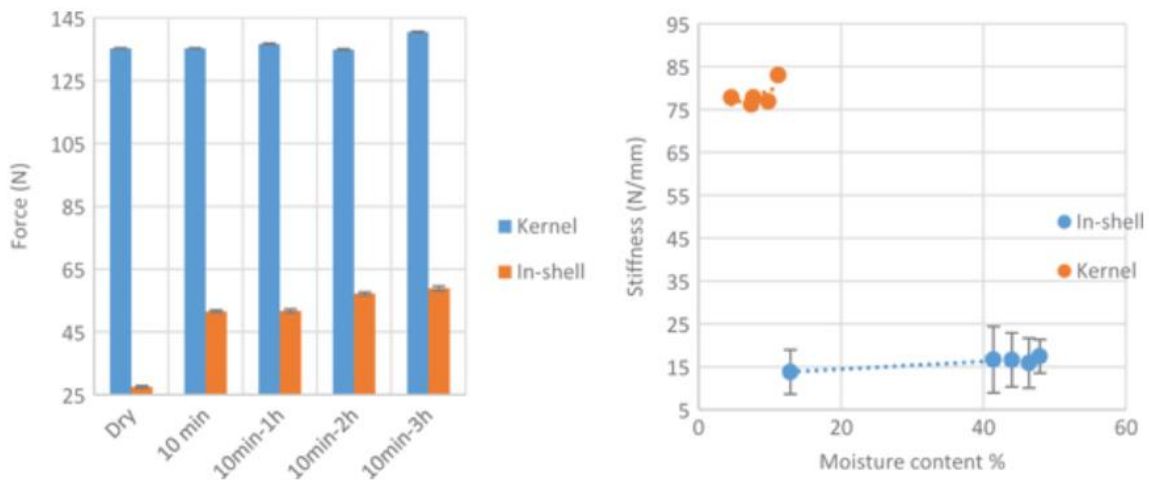


Figura 2.9: Fuerza de ruptura en cáscaras y kernel para la variedad Non Pareil [26].

## Capítulo 3

# Descripción de Ensayos, Frutos e Instrumentos Utilizados

En este capítulo se abordarán todos los tópicos que dan vida a este trabajo para introducir al lector en el tema principal y crear un hilo conceptual. Para esto se describen los frutos a ser analizados y estudios realizados en torno a ellos para luego continuar con los fundamentos de cada ensayo y finalmente terminar con una sección dedicada a los materiales bioinspirados.

### 3.1 Nuez

El Nogal, árbol frutal, nativo de Persia, se introdujo en Grecia gracias a la realeza, de aquí fue llevado a China para posteriormente ser propagado por Europa. Desde España, debido a las colonizaciones se introdujo en Chile [14].

El Nogal es un árbol caducifolio, esto hace referencia a los árboles que pierden su follaje durante una parte del año, considerado muy vigoroso, alcanza entre 24 a 27 metros de altura y su tronco puede alcanzar entre 3 a 4 metros de diámetro, así, la poda resulta útil para mantener el vigor y la productividad del árbol. Las hojas son grandes, de color verde opaco, ricas en taninos.

La nuez es un fruto seco, indehiscente y comestible que proviene del árbol del Nogal. La nuez se encuentra lista para ser cosechada una vez que la cubierta comienza a abrirse, ya cosechadas contienen una humedad aproximada entre 25 a 30%, y es necesario que se disminuya hasta cerca del 4% antes de almacenarse para poder ser preservadas adecuadamente.

Chile produce nueces de nogal desde la región de Coquimbo a la de la Araucanía. En 2011 el país producía 40 mil toneladas y exportaba 35.600 toneladas. Tanto sus volúmenes de producción, como los de exportación han tenido un enorme crecimiento en los últimos años. Entre 2001, cuando Chile exportaba 9.700 toneladas, y 2011, los envíos de este producto aumentaron un 312%. Entre 2018 y 2025 Chile duplicaría su producción de nueces. En ese periodo debiera posicionar 100.000 toneladas adicionales en el mercado mundial [30].

Actualmente las nueces chilenas se comercializan en diversos formatos: tanto con su cáscara, como descascaradas. Mientras en el primer caso es más relevante el tamaño de la nuez, el segundo implica un mayor valor agregado y una gran exigencia en términos de

calidad. Este último formato es inmensamente apreciado por los clientes y consumidores, especialmente europeos, que utilizan la nuez principalmente en repostería.

Las figuras 3.1-3.2 muestran las exportaciones en toneladas métricas de nueces con cáscaras y sin cáscaras para el período 2016, 2017 y 2018. Para el período 2017-2018 el 41,6% de las exportaciones chilenas con cáscara son absorbidas por Turquía; 10,2% por Italia, y el 9,7% por India. Un 26,6% de las exportaciones sin cáscaras son absorbidas por Alemania; 12,2% por Brasil y 8,6% por Italia [5].

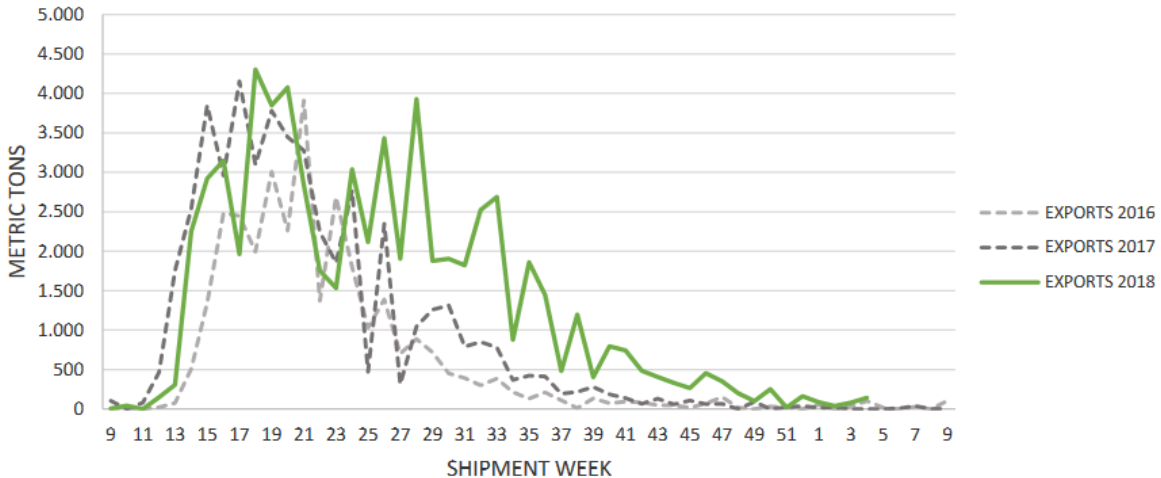


Figura 3.1: Exportaciones de cargamentos de nueces con cáscara [5].

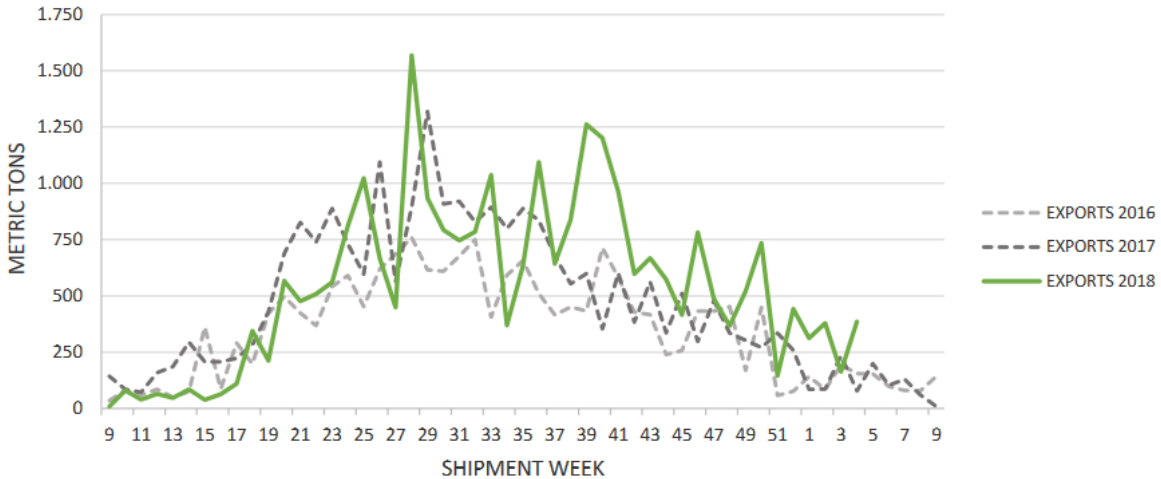


Figura 3.2: Exportaciones de cargamentos de nueces sin cáscara [5].

Una ventaja importante de la nuez chilena está marcada por la época en la que Chile cosecha sus frutos (marzo-abril), periodo que coincide con la mayor demanda de los principales importadores (mayo-noviembre).

La nuez no es solo un exquisito fruto seco que se puede consumir durante todo el año, sino que además posee grandes propiedades beneficiosas para la salud debido a su enorme valor nutricional, aporta ácidos grasos esenciales para el organismo durante la etapa de mayor crecimiento, es uno de los alimentos más completos, rico en fibras, vitamina B y E (responsable de los antioxidantes, que previenen problemas oncológicos), calcio, fósforo, hierro, potasio, magnesio y oligoelementos como el cobre y el cobalto. Este fruto posee 14 a un 26 % de su peso en grasas insaturadas. Su elevado contenido en aceite lo hace atractivo para su recolección y extracción

Se comercializan en Chile una variedad de nueces: Hartley, Howard, Serr, Franquette, Amigo, Tulare, Chandler, Sundland, Vina. Las más comunes y comercializadas en el país son las variedades Serr y Chandler [6]. El cuadro 3.1 muestra las características del árbol y del fruto.

Cuadro 3.1: Características del nogal y nuez [6].

<b>Características del árbol</b>		<b>Características del fruto</b>	
<b>Vigor</b>	Alto	<b>Fecha de cosecha</b>	1 de abril (R.M., Chile) 70 a 80%
<b>Hábito de crecimiento</b>	Semi abierto	<b>Color</b>	Categoría light
<b>Época de floración</b>	5 septiembre (R.M., Chile)	<b>Forma</b>	Ovalada y lisa
<b>Polinizantes</b>	No se recomiendan	<b>Nuez</b>	56 a 59% de pulpa
<b>Producción</b>	Muy buena (4 a 6 Ton/ha en Santiago y V región, 60% laterales)	<b>Calibre</b>	Grande (7,8 g de pulpa)
<b>Portainjertos</b>	J. regia	<b>Vida post cosecha</b>	Buena
<b>Precocidad</b>	Precoz	<b>Usos</b>	Exportación
<b>Observaciones</b>	Buena adaptación de graneros al Norte Chico		

La mayoría de las nueces son ricas en lípidos, los ácidos grasos insaturados representan la mayor parte de la fracción lipídica. Esto las vuelve muy sensibles a la oxidación que se traduce en el enranciamiento del producto durante su almacenaje [21, 23 y 29].

El fruto del Nogal está compuesto de un pelón (pericarpio), cáscara (endocarpio) y kernel, tal como se muestra en la figura 3.3. El pericarpio es una capa blanda, carnosa, de color que varía entre verde y café oscuro. Cuando se alcanza la madurez, el pericarpio se agrieta, lo que permite su apertura para dejar caer la nuez que posteriormente es recolectada. El endocarpio es la estructura leñosa y rugosa que contiene la semilla, su grosor varía según la variedad y representa un 50% (o más) del fruto caído. El kernel es la parte comestible del fruto, posee una superficie irregular y corresponde al otro 50% (o menos) [23].

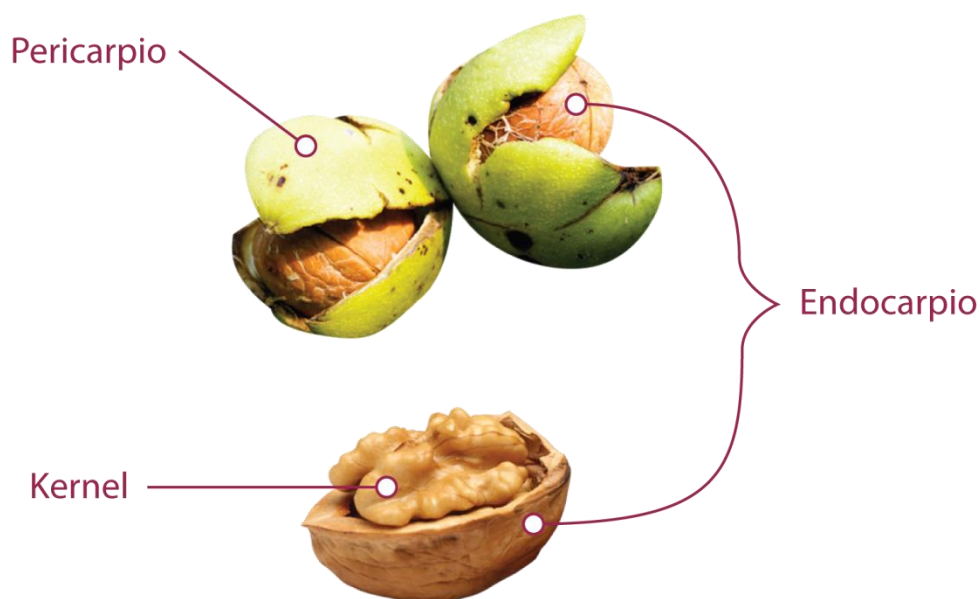


Figura 3.3: Capas de fruto de nogal [Elaboración propia].

La cáscara está compuesta principalmente por celulosa (60%), lignina (19%) y hemicelulosa (13%), lo que comprende un 92% de la totalidad. Lo anterior corresponde a un material lignocelulósico. La función de la lignina, estructuralmente es mantener unidos entre sí la celulosa y hemicelulosa. Estos tres constituyentes poliméricos se asocian unos con otros y otorgan un soporte estructural a la pared celular [23].

## 3.2 Almendras

El almendro pertenece a la familia Rosácea y el género *Prunus* que puede alcanzar hasta 10 metros de altura, es un árbol frutal de hoja caducifolia y típico de zonas templadas o cálidas debido a su poca tolerancia al frío. Posee flores blancas o rosadas las cuales se producen en centros frutales llamados dardos, cuya duración es de alrededor de cinco años, y en ramillas

o brotes de un año. Sus hojas son lanceoladas (hoja con forma de punta de lanza) de color verde claro. El fruto corresponde a una drupa.

El almendro es nativo de Asia y Norte de África, existiendo referencias de él en la Biblia. Una vez llegado a Grecia, los helenos lo llevaron a los romanos y éstos a los españoles, donde estos últimos, a través de sus expediciones, lo trajeron a América, especialmente México y Estados Unidos a comienzos del siglo XIX. Se desconoce la fecha de llegada a Chile.

La almendra es un fruto seco y comestible que proviene del árbol almendro. Llegada su madurez sufre dehiscencia. Contiene un 2,3% de hidratos de carbono, un 5,7% de agua, un 15,2% de celulosa, un 18,7% de proteínas y un 58,1% de grasas. Las dos variedades de almendras, tanto la amarga como la dulce, contienen el glucósido amigdalina, que da muy mal gusto. Ambas contienen fermentos llamados emulsina, que pueden descomponer la amigdalina y sintetizar ácido cianhídrico.

Los rendimientos promedios de los cultivos de almendros son muy bajos, debido al escaso cuidado que se brindaba a esta especie y la creencia muy común de la rusticidad de la misma [3].

En Chile se cultivan 8.759 ha de almendros en 550 huertos para un total de 3,7 millones de árboles, de los que anualmente se cosechan 13.322 ton de almendras sin cáscara, mientras que en California (el mayor productor del mundo), se cultivan 538.232 ha en 6.800 huertos para un total de 155,6 millones de árboles de los que se cosecha 1.030.000 ton.

El 99% de los almendros se encuentran distribuidos en Chile sólo en 4 regiones desde la IV hasta la VI región, incluyendo la región Metropolitana, donde el 42% se concentra en la región Metropolitana. En la figura 3.4 se muestra que en Chile, los almendros representan sólo el 14% de la superficie planta versus el 61% de los nogales, mientras que la situación en USA y Australia es muy diferente, países en que más del 50% de la superficie de los frutales para deshidratado está dedicada al cultivo del almendro [10].



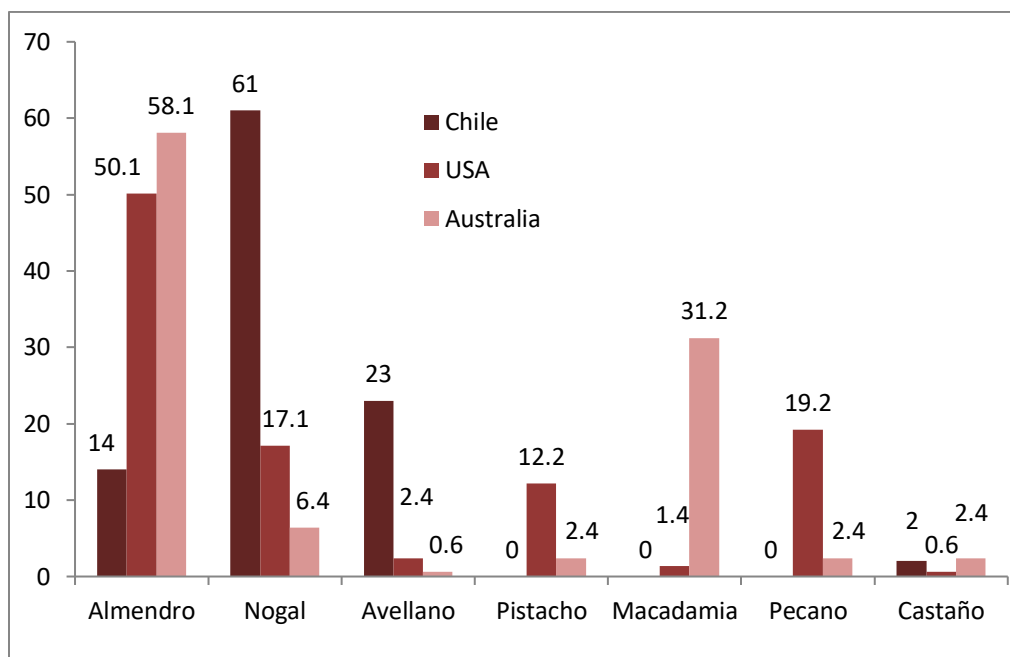


Figura 3.4: Superficie plantada de frutos secos [10].

Las almendras son ricas en proteínas, fibra y calcio. Asimismo, son una fuente importante de Vitamina E ( $\alpha$ -tocoferol): contienen 26 mg por cada 100 gramos. El  $\alpha$ -tocoferol previene o retrasa enfermedades cardíacas y tiene propiedades antioxidantes y oculares. Otro de sus beneficios es su contenido de grasas mono-insaturadas, las mismas que se encuentran en el aceite de oliva, excelentes para combatir las enfermedades del corazón [4].

Se comercializan en Chile una gran variedad de almendras, principalmente de cáscara blanda como lo son Non Pareil, Carmel y Fritz y en menor medida de almendras de variedad sonora. La más común y comercializada en el país es de la variedad Non Pareil, la estudiada en el presente trabajo corresponde a la variedad sonora y principalmente se destaca por presentar un kernel grande, alargado, angosto, de color claro y superficie lisa; el endocarpio es de un color marrón claro y rugoso.

Tal como en el caso de la nuez, la semilla es protegida por el endocarpio (cáscara) lignificado, posee un elevado contenido en grasas insaturadas que los vuelve sensibles a la oxidación. Su estructura está compuesta principalmente de celulosa (50%), lignina (16-33%) y hemicelulosa (12-24%) que conforman la mayor parte de la biomasa lignocelulosa [7].

### 3.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La teoría del microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) ya se asomaba por los años 30, pero no es hasta los 60 cuando comienza a tomar fuerza. Su necesidad surge de la imposibilidad de cortar cada espécimen con una fineza determinada

para su uso en el microscopio electrónico de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés). Surgía la necesidad de ver imágenes con mayor detalle, lo que resultaba imposible con el TEM [8].

La microscopía electrónica de barrido permite obtener imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra, hasta  $100\text{\AA}$ . La imagen se obtiene induciendo un haz de electrones que escanean la superficie de la muestra, la información recolectada, que incluye la morfología, topografía, composición química y estructura cristalina, se visualiza en un monitor, y dependerá de los detectores disponibles del microscopio. La figura 3.5 muestra un modelo de microscopio SEM.

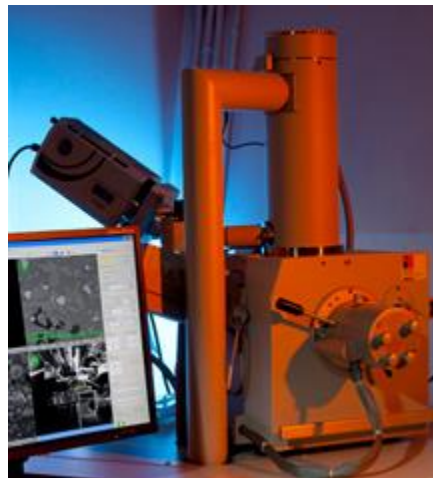


Figura 3.5: Microscopio SEM de la FCFM, modelo FEI Quanta 250 [12].

El esquema de funcionamiento se puede ver en la figura 3.6. Una fuente de electrones (electrogun), como bien podría ser filamento de tungsteno, un emisor  $\text{LaB}_6$  o Schottky, envían un haz de electrones que impacta la muestra en estudio. Este haz trae consigo una cantidad de energía cinética que al momento de impactar la superficie se disipa en un abanico de señales: electrones secundarios (SE), electrones retrodispersados (BSE), electrones retrodispersados difractados (BSED), fotones (EDS y WDS), luz visible y calor [9 y 27].

Existen dos set de lentes en el microscopio: lentes de condensador (condenser lenses) y lente objetivo (objective lens). La función de una lente es direccionar el haz de electrones. Como los electrones son partículas, las lentes están construidas con materiales ferromagnéticos para crear un campo magnético capaz de controlar el haz. El cono de electrones proyectado genera un camino helicoidal al estar sometido bajo un campo magnético. En este sentido, el primer set de lentes mencionado regula el diámetro del haz, mientras que el segundo set también genera este efecto, pero su función principal es dirigir el haz en la superficie de la muestra [20].

La imagen es visualizada gracias a los detectores presentes en el microscopio. Los detectores captan la señal del electrón y por medio de un proceso analógico/digital la imagen es visible en pantalla en un monitor.

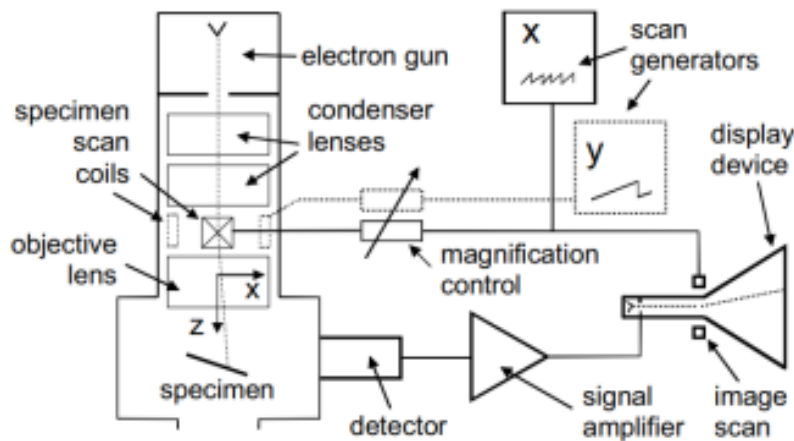


Figura 3.6: Diagrama esquemático SEM [9].

El análisis SEM es una técnica no destructiva lo que permite el uso reiterado de la muestra al no conducir a una pérdida de volumen de la misma.

Un elemento importante en el SEM es el cañón de electrones localizado en una sección superior de una columna, consistente en un filamento y cilindro Wehnelt. El haz de electrones se forma por el calentamiento del filamento de tungsteno, éstos son acelerados por una diferencia de potencial aplicada entre el cátodo y ánodo y concentrados por el cilindro Wehnelt.

Aspectos relevantes que difieren con la columna localizada en el TEM son:

- El haz de electrones se mueve por medio de la generación de un campo magnético creado por bobinas de deflexión.
- Los voltajes de aceleración son menores que en TEM debido a la no necesidad de que los electrones atraviesen la muestra. Los valores van de 200 a 300.000V.
- El haz de electrones es móvil lo que sólo requiere de lentes condensadores y finales.
- El tamaño de la columna es mucho menor.
- El tamaño de la cámara en SEM es mayor que en TEM debido a que las muestras a estudiar son de mayor tamaño, variando de milímetros a varios centímetros.
- La amplificación en SEM depende exclusivamente de los circuitos electrónicos en su interior y no del número o calidad de los lentes electromagnéticos.

El número y tipo de detectores utilizados en SEM dependerá del uso que se le dará al equipo. SEM tendrá siempre al menos un detector, aunque la mayoría posee más de uno. Los detectores aprovechan ciertos fenómenos producidos cuando el haz de electrones impacta con la superficie de la muestra, estos son [8]:

- La muestra emite electrones secundarios por efecto del impacto de los electrones incidentes.
- Algunos electrones, al impactar con la muestra, son reflejados (electrones retrodispersados o back-scattered).
- Algunos electrones son absorbidos por la muestra en función de su espesor y composición.
- Debido al impacto la muestra emite radiaciones en el rango de rayos X cuando se produce transiciones de electrones en las órbitas internas de los átomos.
- La muestra emite fotones cuando se producen transiciones intermoleculares de los electrones debido al impacto.

Estos fenómenos dependen en cierta medida de la topografía, número atómico y estado químico de la muestra en estudio.

A continuación, se enumeran algunos detectores [28]:

- Detector de electrones secundarios (SE): Permite obtener una imagen en blanco y negro de la topografía de la superficie de la muestra. Es la señal que entrega la más alta resolución.
- Detector de electrones retrodispersados (BSE): La imagen obtenida es de menor resolución. La principal ventaja consiste en la sensibilidad a las variaciones en el número atómico de los elementos presentes en la superficie. Así, se observarán diferentes tonos de gris en una superficie lisa con diferentes elementos y varias fases.
- Detector de rayos X (EDS): Recibe los rayos X proveniente de cada punto en la superficie donde fue impactada con el haz de electrones. La energía de cada rayo X es particular de cada elemento, de esta manera se puede obtener información analítica de la superficie en estudio.
- Detector de rayos X (WDS): La diferencia con EDS es que en lugar de procesar información de varios elementos, se procesa la información de un solo elemento. La técnica es mucho más lenta, pero mucho más precisa y sensible que EDS.
- Detector de electrones retrodispersados difractados (BSED): Permite obtener información de la estructura cristalina de la muestra. Se analizan solamente los electrones difractados que cumplan con la Ley de Bragg en el punto que son generados. Si las fases cristalinas son conocidas es posible procesar la señal como líneas de Kikuchi, permitiendo conocer la orientación de los granos, fronteras, tamaño de grano, entre otras cosas.

Otro aspecto relevante es la amplificación, que como ya se dijo depende principalmente por los circuitos electrónicos. La amplificación está dada por:

$$A = \frac{l_b}{l_t}$$

Donde  $A$  es la amplificación del SEM,  $l_b$  es la longitud de una línea barrida por el haz sobre la pantalla y  $l_t$  es la longitud de un trazo del haz sobre la muestra. La amplificación del SEM comprenderá magnitudes de 20.000 hasta 400.000X.

El SEM utiliza un sistema de vacío, el cual se obtiene utilizando una bomba rotatoria que genera un pre-vacío, luego, para lograr una mejora, se puede utilizar una bomba de difusión de aceite. SEM posee normalmente un procesador que monitorea y controla el sistema de vacío, así se logran tomar acciones ante problemas repentinos [8].

### 3.4 Técnica de excitación por impulso (IET)

La técnica de excitación por impulso corresponde a un ensayo no destructivo que permite determinar el Módulo de Young ( $E$ ), Módulo de Cizallamiento ( $G$ ), el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) y el amortiguamiento de materiales ( $\xi$ ) por medio de las frecuencias naturales de vibración.

Una ventaja de esta técnica es que puede ser repetida indefinidamente al ser un ensayo no destructivo y permite a la muestra ser sometida a otros procesos posteriores. La técnica IET es ampliamente utilizada en trabajos de investigación y control de calidad en materiales, por esta razón se encuentra normalizada. La norma ASTM E1876 '*Standard Test Method for Dynamic Young Modulus's, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*' corresponde a la norma general que da los lineamientos a este ensayo [1].

Una condición importante y necesaria es la utilización de muestras con geometría regular conocida como barras rectangulares, cilindros, placas, disco y anillos, tal como se muestra en la figura 3.7. La muestra debe estar apoyada en sus puntos o líneas nodales, para que pueda vibrar libremente.



Figura 3.7: Geometrías regulares [Elaboración propia].

La técnica de excitación por impulso, que se esquematiza en la figura 3.8, consiste en excitar la muestra mediante un impulso mecánico, como un golpe leve con algún proyectil o martillo. Luego del impacto, se obtiene un amplio espectro de frecuencias asociado, la muestra oscilará generando resonancia en torno a las frecuencias naturales. Se registra la respuesta acústica del sonido emitido por la muestra con un micrófono. El registro se puede

visualizar en un gráfico de amplitud versus tiempo. La respuesta acústica dependerá únicamente de la masa, dimensiones, geometría y módulo de elasticidad [16].

El amortiguamiento se calcula mediante la atenuación de la respuesta acústica. Mientras menor sea la duración del sonido, mayor será el amortiguamiento.

Una vez registrada la respuesta acústica se trabaja la señal mediante la Transformada de Fourier para detectar las frecuencias naturales de vibración de la muestra. La cualidad de la Transformada de Fourier es permitir la transformación del dominio tiempo al dominio frecuencia de una señal.

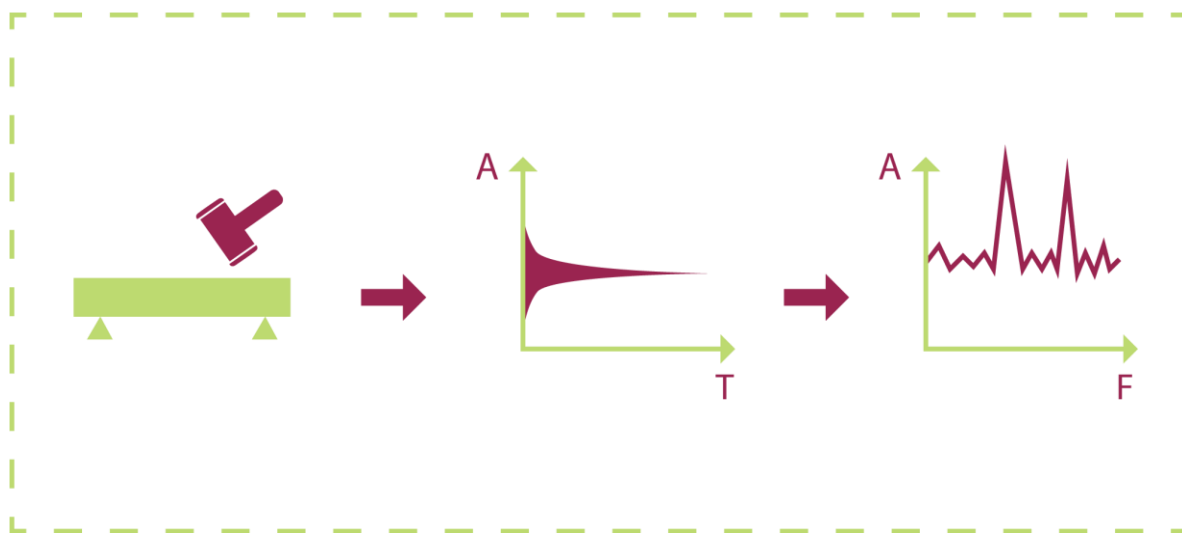


Figura 3.8 Esquema de metodología IET [Elaboración propia].

Para el caso de vigas con vibración transversal la frecuencia natural en materiales isotrópicos se define como:

$$w_n = \beta_n \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

Donde  $E$  es el Módulo de Young,  $w_n$  la frecuencia natural en flexión,  $\rho$  la densidad,  $\beta_n$  una constante que depende de la configuración de la viga y su largo,  $I$  el momento de inercia de la sección transversal y  $A$  el área de la sección transversal.

### 3.5 Ensayo de compresión

El ensayo de compresión es un método que permite determinar el comportamiento de un material al soportar una carga estática. La probeta se comprime y se registra la deformación con distintas cargas. Se obtiene un gráfico carga-deformación que permite obtener el límite elástico, esfuerzo de fluencia, resistencia a la compresión, entre otros. En la figura 3.9 se muestra una representación esquemática de algunos ensayos sometidos a una carga estática  $P$  [15].

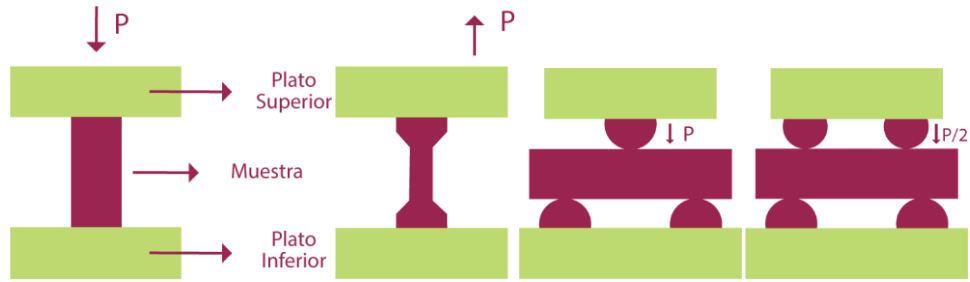


Figura 3.9: Representación esquemática de ensayos sometidos a carga estática  $P$ . Adaptado de [15].

Una máquina universal puede realizar diferentes ensayos como tracción, compresión, torsión, entre otros. Se considera el estándar industrial para la caracterización de materiales. El cabezal móvil se desplaza en dirección vertical aplicando una fuerza controlada como la mostrada en la figura 3.10.

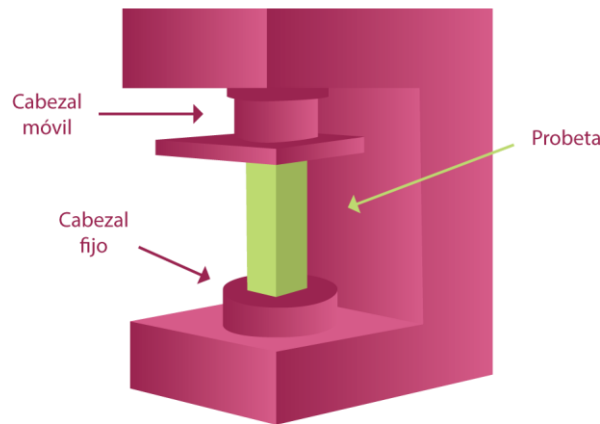


Figura 3.10: Estructura básica de una máquina universal electromecánica. Adaptado de [15].

La lectura de los datos obtenidos frente a una carga estática se registran en una curva esfuerzo vs deformación como se muestra en la figura 3.11. La máquina registra la fuerza aplicada ( $F$ ) y desplazamiento obtenidos del ensayo. Las relaciones que integran fuerza-esfuerzo y desplazamiento-deformación son:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo,  $A$  es el área de la sección transversal de la probeta (o muestra ensayar),  $\varepsilon$  es la deformación unitaria,  $l_0$  es la longitud inicial de la probeta y  $l$  es la longitud de la probeta en un momento determinado. La deformación, entonces, es la variación en las dimensiones de la muestra producto de las cargas aplicadas.

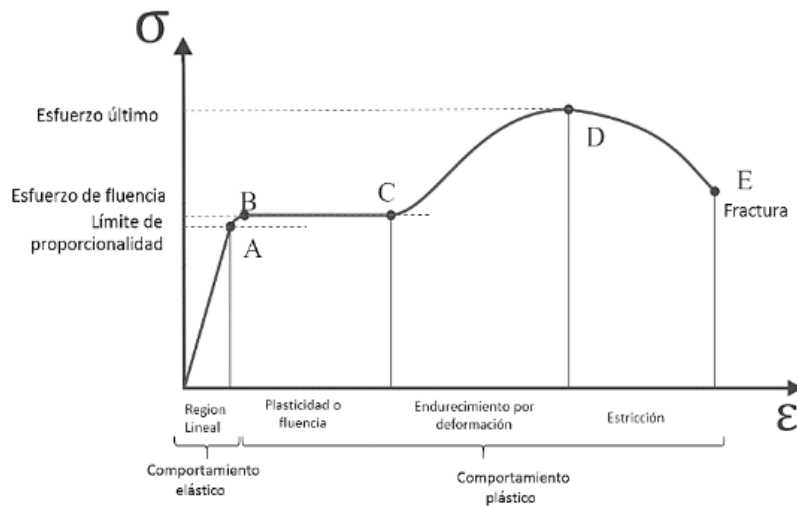


Figura 3.11: Curva típica esfuerzo vs deformación [15].

Las curvas típicas de fuerza vs desplazamiento en nueces que se han reportado [16, 23] son curvas que comienzan en su origen de coordenadas (0,0) y se extienden hasta el punto A o B de la figura 2.14, donde se genera la fractura del material.

Mohsenin [17] reportó relaciones para determinar las propiedades físicas de un elipsoide:

$$D_a = \frac{L + W + T}{3}$$

$$D_g = (LWT)^{\frac{1}{3}}$$

$$\phi = \frac{D_g}{L}$$

$$V = \frac{4}{3}\pi(LWT)/1000$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$



$$S = 2\pi\left(\frac{W}{2}\right)^2 + 2\pi\frac{LW}{4c}\sin^{-1} c$$

$$c = \sqrt{1 - \left(\frac{W}{L}\right)^2}$$

Donde  $D_a$  es el diámetro aritmético,  $L, W, T$  las dimensiones de la semilla,  $D_g$  el diámetro geométrico,  $\phi$  la esfericidad,  $\rho$  la densidad,  $m$  la masa,  $V$  el volumen y  $S$  la superficie de área.

Las relaciones consideradas en este ensayo para determinar propiedades mecánicas en nueces y almendras son:

$$R_{DR} = \frac{R_{DP}}{d}$$

$$H = \frac{F_R}{R_{DP}}$$

$$E_a = \frac{F_R R_{DP}}{2}$$

$$P = \frac{E_a}{V}$$

Donde  $R_{DR}$  es la tasa de deformación al punto de ruptura,  $R_{DP}$  el desplazamiento al punto de ruptura,  $d$  la dimensión  $L, W, T$  de la semilla,  $H$  la rigidez,  $F_R$  la fuerza al punto de ruptura,  $E_a$  la energía absorbida y  $P$  la tenacidad. La  $E_a$  asume un comportamiento lineal de los ensayos realizados.

La fractura de un material puede definir como el término del proceso de deformación plástica, donde ocurre fragmentación de un cuerpo bajo un estado de cargas. En materiales de ingeniería se conocen dos tipos generales de fractura: frágil y dúctil. Ambas difieren en su capacidad para experimentar deformación plástica. En la fractura frágil la grieta se propaga rápidamente por el material generando poca o nula deformación plástica. En la fractura dúctil la grieta se propaga por el material lentamente luego de una deformación plástica considerable.

Una grieta se conforma por dos etapas: formación y propagación. Las grietas suelen ocurrir como defectos iniciales del material sujeto a cargas. Una zona idónea para la iniciación de una fractura es una región cercana a una partícula. Impurezas en el material son grandes concentradores de esfuerzos, donde las grietas crecen sin control alcanzando un tamaño crítico que eventualmente fracturará al material [15].

### 3.6 Prueba de impacto Charpy

El nombre de este ensayo se debe al francés Augustin Georges Albert Charpy (1865-1945). Por medio de este ensayo se puede conocer el comportamiento de los materiales al impacto. La figura 3.12 se muestra una representación esquemática de este ensayo el cual consiste en golpear la probeta mediante una masa  $M$ . La masa se sitúa al extremo del péndulo que tiene una longitud  $L$  a una altura  $H$ , con lo cual se controla la velocidad de impacto a la probeta.

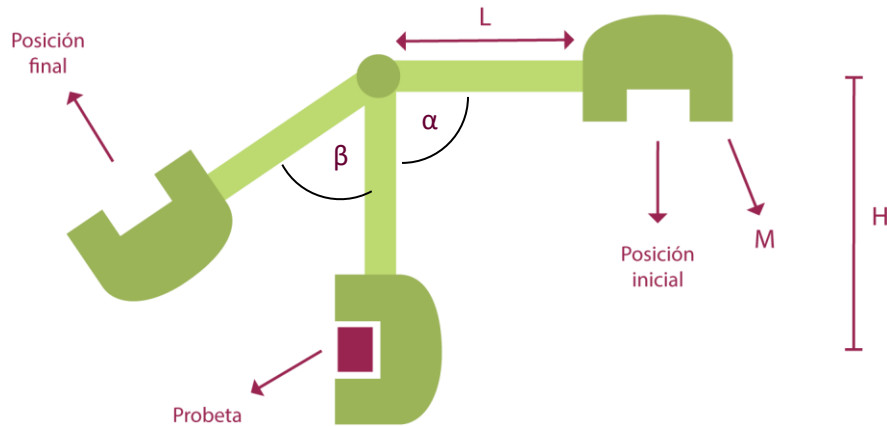


Figura 3.12: Esquema prueba de impacto Charpy [Elaboración propia].

La energía absorbida  $E_a$  por la probeta causando la fractura de la misma, se determina mediante la diferencia en la energía potencial del péndulo antes y después del impacto. Para esto es necesario conocer el ángulo inicial de aplicación de la carga ( $\alpha$ ) y el ángulo final al que se eleva el péndulo después del impacto ( $\beta$ ). La expresión para  $E_a$  es:

$$E_a = MgL(\cos \beta - \cos \alpha)$$

Como ya se ha mencionado los dos modos de fractura que pueden experimentar los materiales es frágil o dúctil, que depende de su capacidad de absorber energía. Si bien no existe cuantitativamente una forma para discernir entre cuándo ocurre uno u otro, hay un consenso en que la fractura dúctil se caracteriza por un comportamiento de energía mayor que la ocurrida por fractura frágil [22].

### 3.7 Materiales Bioinspirados

La bioinspiración busca el desarrollo en la innovación tecnológica inspirada en la naturaleza. Se conoce originalmente como biomimética, su origen se le suele atribuir al ingeniero Richard Buckminster Fuller, pero el desarrollo conceptual está asociado a la científica Janine Benyus que en 1997 publicó un libro de gran impacto titulado "*Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*".

En el libro, la autora muestra a sus lectores, a la naturaleza en un rol de *mejor diseñador* y la manera en que los humanos pueden extraer mucha información de ella si tan sólo nos detenemos un segundo a observar. Este punto es clave porque abre las puertas a una nueva forma de crear para científicos, ingenieros, diseñadores, etc. En este sentido la biomimética es un método para investigar y crear.

Una serie de materiales y productos tecnológicos se han desarrollado gracias a este método, siendo un ejemplo claro el mostrado en la figura 3.13, donde el diseño aerodinámico del tren fue inspirado en la cabeza del pájaro alcedo atthis.

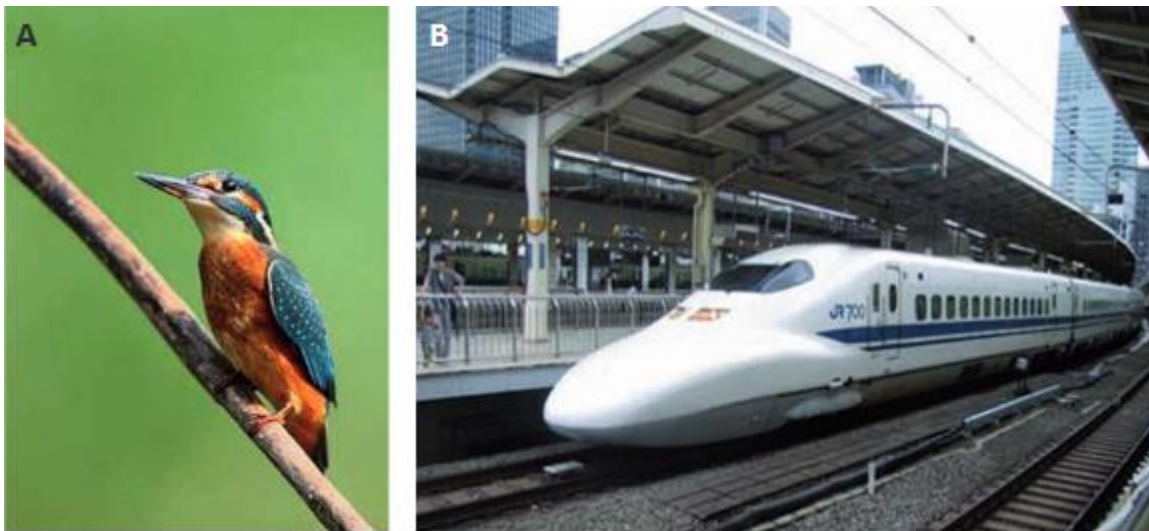


Figura 3.13: (A) Pájaro alcedo atthis y (B) tren bala japonés [2].

Con los años, una gran gama de productos han sido creados y desarrollados, desde pegamentos y medios de transporte hasta sensores, redes neuronales, etc [2].

De acuerdo a una entrevista realizada a Explora Conicyt, José Luis Arias, médico veterinario de la Universidad de Chile, modificó (en conjunto con un equipo de trabajo) el concepto de biomimética por bioinspiración. El concepto se acuñó en 1992 en un artículo de la revista científica *Science*. En palabras de Arias: “(...) nosotros cambiamos el nombre de Biomimética: lo discutimos. De hecho, ya ha ido desapareciendo del mundo. Está en Wikipedia, pero está prescribiendo” [11].

El acercamiento a la naturaleza no es algo moderno. Desde la antigüedad existen creaciones bioinspiradas, de manera consciente o no. Leonardo da Vinci, dentro de su genialidad, tiene un montón de creaciones a su haber, entre ellas máquinas voladoras con un sesgo ligado a lo biológico.

En la figura 3.14 se presenta el diseño de espiral que describe el proceso que permite consultarle a la naturaleza y nutrirnos de su sabiduría. Esta espiral sirve de ayuda para

“*biologizar*” los desafíos y permitir a personas garantizar que su diseño tendrá un foco bioinspirado.

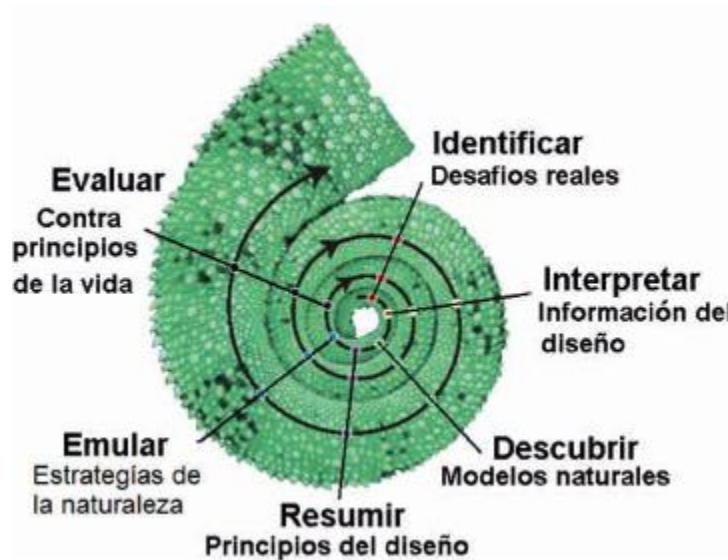


Figura 3.14: Diseño de espiral para imitar a la naturaleza [2].

A continuación se describen las etapas consideradas [2]:

1. Identificar

- Desarrollar y perfeccionar diseños basados en las lecciones aprendidas de la evaluación de los principios de la vida.
- La naturaleza trabaja con pequeños bancos de retroalimentación en constante aprendizaje.

2. Interpretar

- *Biologizar* las preguntas; hacer un diseño desde una perspectiva natural.
- Trasladar las funciones de diseño en funciones que desarrolla la naturaleza. Preguntar ¿Cómo la naturaleza hace esta función?, ¿Cómo la naturaleza no haría esta función?

3. Descubrir

- Encontrar los mejores modelos naturales para responder a nuestras preguntas.
- Encontrar a quienes mejor se adaptan mediante preguntas como; ¿Qué ser vivo depende de esto?

4. Resumir

- Encontrar los procesos y patrones repetitivos con los que la naturaleza logra el éxito.
- Crear taxonomías de estrategias de la vida
- Seleccionar las estrategias más relevantes que cumplan con su diseño particular.

5. Emular

- Desarrollar ideas y soluciones basadas en modelos naturales.
- Desarrollar conceptos e ideas que apliquen las lecciones dadas por los maestros naturales.
- Observar en las aplicaciones de estas lecciones tanto como sea posible (forma de imitar, función imitada, ecosistemas imitados).

6. Evaluar

- Cómo tus ideas se comparan a los principios naturales exitosos de la vida.
- Evalúa tus soluciones de diseño comparándolas contra los principios de la vida.
- Identificar otras formas de mejorar tu diseño

# Capítulo 4

## Metodología

En este capítulo se describirá la metodología implementada en el trabajo de tesis. El desarrollo de este trabajo de título contempla varios hitos para cada ensayo y/o análisis realizado que comprende a grandes rasgos la preparación de muestras, realización de ensayos y análisis de resultados. Los frutos estudiados corresponden a nueces y dos variedades de almendras:

- Nueces juglans Regia, variedad Serr.
- Almendras de cáscara blanda, variedad Sonora.
- Almendras de cáscara dura, variedad Marcona.

A continuación se describe más en detalle cada etapa.

### 4.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se preparan las muestras para ser sometidas al análisis SEM (FEI Quanta 250), y así identificar con imágenes en alta resolución la microestructura de la sección transversal de las cáscaras. Las cáscaras se cortan con un disco diamantado para no alterar su estructura y evitar cierre de poros. Posteriormente las superficies de las cáscaras son sometidas a un revestimiento en oro para poder generar una imagen mediante el haz de electrones incidente. Las imágenes son analizadas en el software ImageJ.

### 4.2 Técnica de excitación por impulso (IET)

Son un total de 180 muestras estudiadas, 30 para cada tipo de semilla y orientación a estudiar. Se preparan las muestras para ser sometidas al ensayo IET. Se cortan las muestras para obtener pequeños rectángulos lo más plano posible. Se masa las muestras y se miden sus dimensiones  $X, Y, Z$ , donde  $X$  es el largo,  $Y$  es el ancho y  $Z$  es el espesor. Los cortes rectangulares se realizan en dos orientaciones, una paralela y otra perpendicular al eje de sutura (horizontal y vertical respectivamente) tal como se muestra en la figura 4.1. Las muestras se colocan sobre algodón para simular una configuración de una viga con sus extremos libres como se ilustra en la figura 4.2. Se utiliza el equipamiento para registrar la respuesta acústica de cada muestra al ser sometida a un leve golpe. Mediante Matlab® se determinan las frecuencias naturales de vibración del material mediante la Transformada de Fourier. Analíticamente se determina el Módulo de Young para cada muestra.

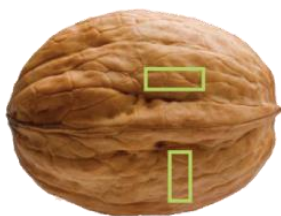


Figura 4.1: Corte rectangular horizontal y vertical en la semilla [Elaboración propia].

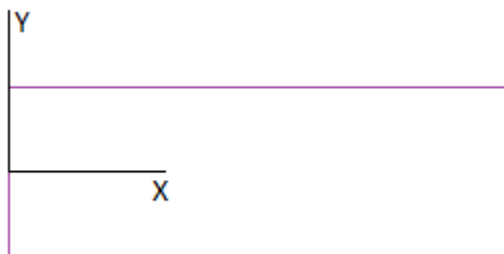


Figura 4.2: Configuración viga libre-libre [Elaboración propia].

Las muestras son cortadas en trozos rectangulares pequeñas para intentar conciliar los supuestos de la teoría que hay detrás para utilizar las relaciones que permiten calcular el módulo de elasticidad mediante frecuencias naturales de vibración.

### 4.3 Ensayo de compresión

Un total de 540 nueces, 360 almendras de cáscara dura y 540 almendras de cáscara blanda fueron ensayadas, 60 para cada rango de masa y dirección. Los rangos de masas estudiadas se clasifican de acuerdo a lo que se indica en el cuadro 4.1, donde se indica también una simbología en colores.

Cuadro 4.1: Rangos de masas designados para nueces, almendras de cáscara dura (ACD) y almendras de cáscara blanda (ACB).

Nueces		ACD		ACB	
m (g)	simb	m (g)	simb	m (g)	simb
6,90 - 7,99	■	5,00 - 5,29	■	0,70 - 1,09	■
8,00 - 9,99	■	5,30 - 5,59	■	1,10 - 1,39	■
10,00 - 11,99	■			1,40 - 1,89	■

Se preparan las muestras para ser sometidas al ensayo de compresión. Se masan las muestras y se miden sus dimensiones. Las muestras serán medidas hasta su ruptura con tasas de velocidad de compresión de 2,5mm/min [13] y 0,2mm/seg [26] para nueces y almendras respectivamente. En este ensayo se medirán tres orientaciones de las semillas en

$x, y, z$  como se muestra en la figura 4.3, donde  $x$  es el eje longitudinal, el eje  $y$  es el ancho y  $z$  es el eje en donde se encuentra el plano que contiene la línea de sutura.

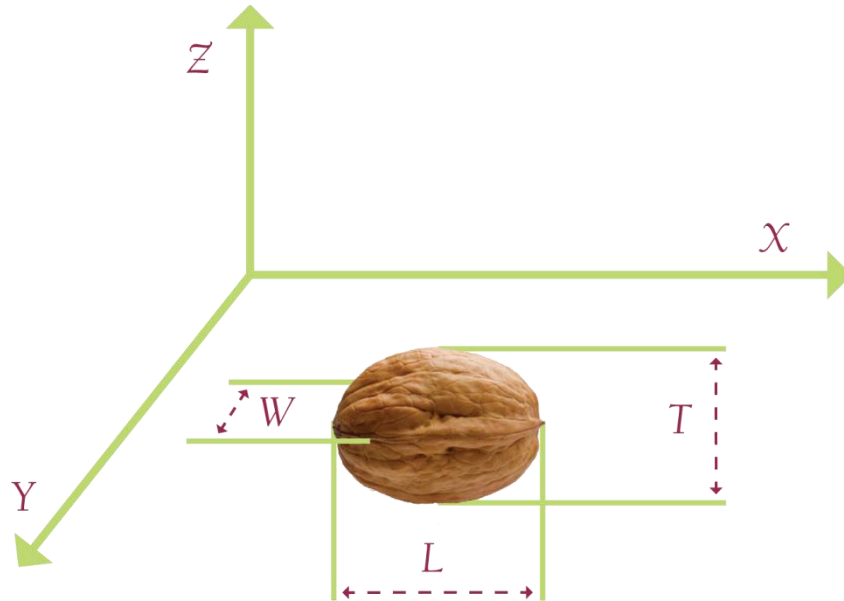


Figura 4.3: Representación esquemática de los ejes  $x, y, z$  [Elaboración propia].

#### 4.4 Prueba de impacto Charpy

Un total de 100 muestras fueron ensayadas para cada tipo de semilla. Se preparan las muestras para ser sometidas a la prueba de impacto Charpy. Se masa las muestras y se miden sus dimensiones. Se registra la energía absorbida debido al impacto del péndulo sobre la muestra. Se realizan tres ensayos del péndulo oscilando libremente obteniendo un promedio de lo aportado por el aire que se restará a los resultados. Los resultados de energía absorbida los arroja el equipo en su pantalla.

#### 4.5 Análisis de resultados

Se realiza un análisis en base a los resultados obtenidos y lo recopilado de la literatura para lograr vincular la geometría de la microestructura con sus propiedades mecánicas.



# Capítulo 5

## Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis microscópico en SEM y ensayos realizados de compresión, IET y Charpy.

### 5.1 Microestructura

Las imágenes obtenidas de la microestructura de cáscaras de nueces y almendras se obtienen de un análisis SEM de la sección transversal de las cáscaras. Las figuras 5.1- 5.3 muestran la estructura presente en las muestras estudiadas para almendras de cáscara blanda, cáscara dura y nueces respectivamente.

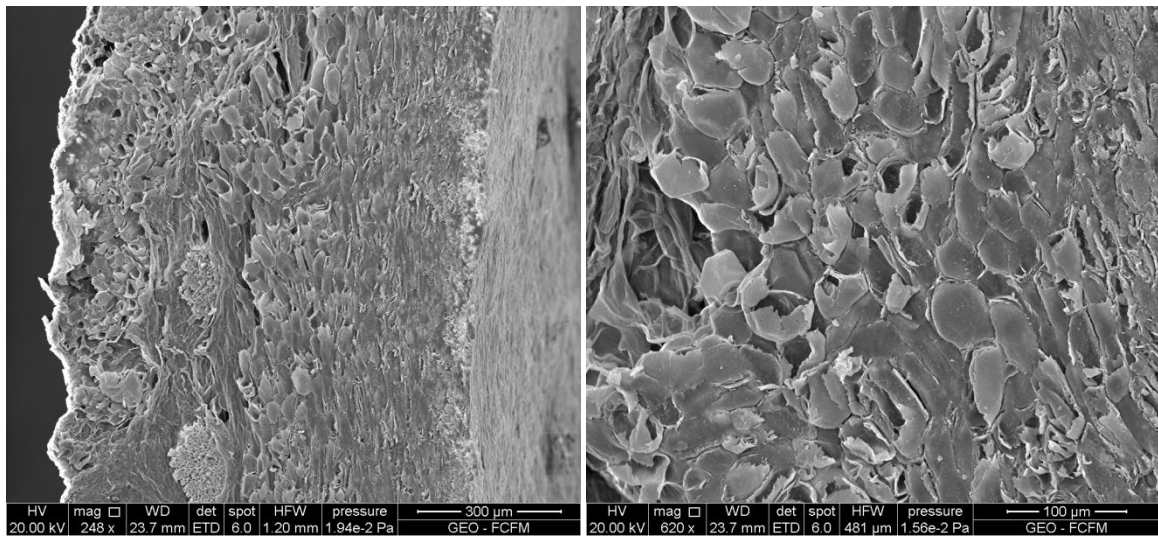


Figura 5.1: Microestructura almendra de cáscara blanda.

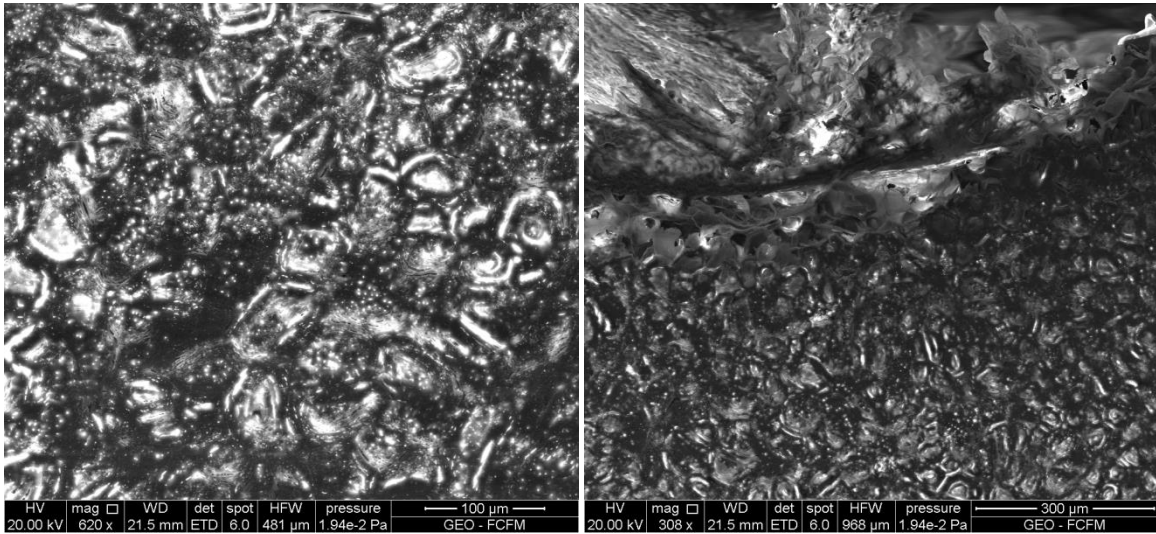


Figura 5.2: Microestructura almendra de cáscara dura.

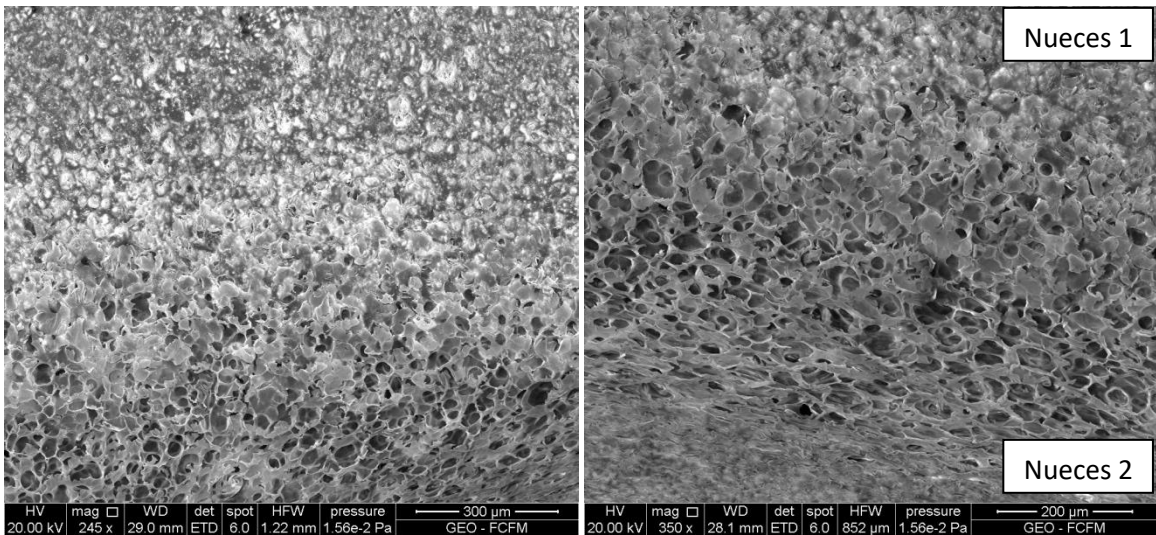


Figura 5.3: Microestructura nuez.

Para generar un análisis más minucioso se midieron los diámetros mayor ( $D_c$ ), menor ( $D_l$ ) y el área ( $A$ ) de las microestructuras, éstos se registran en el cuadro 4.1. Se observan dos estructuras en las cáscaras de nueces por lo que se diferenciarán como *nueces 1* y *nueces 2*.

Cuadro 4.1: Promedio y desviación estándar de las dimensiones en la microestructura (cáscaras).

Semilla (cáscara)	$D_l$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_c$ ( $\mu\text{m}$ )	$A$ ( $\mu\text{m}^2$ )
Nueces 1	28,382±4,025	27,210±3,472	493,936±188,868
Nueces 2	43,729±6,127	31,491±4,557	813,453±247,038
ACD	72,536±6,188	59,343±5,636	2434,912±389,887
ACB	56,016±5,386	32,070±5,722	1310,273±382,924

Para una visión más cabal de los frutos como las nueces o almendras se obtuvieron imágenes en SEM del *kernel* de nuez y el *kernel* de almendra de cáscara dura. En las figuras 5.4 y 5.5 se muestran las microestructuras presentes de las muestras estudiadas respectivamente.

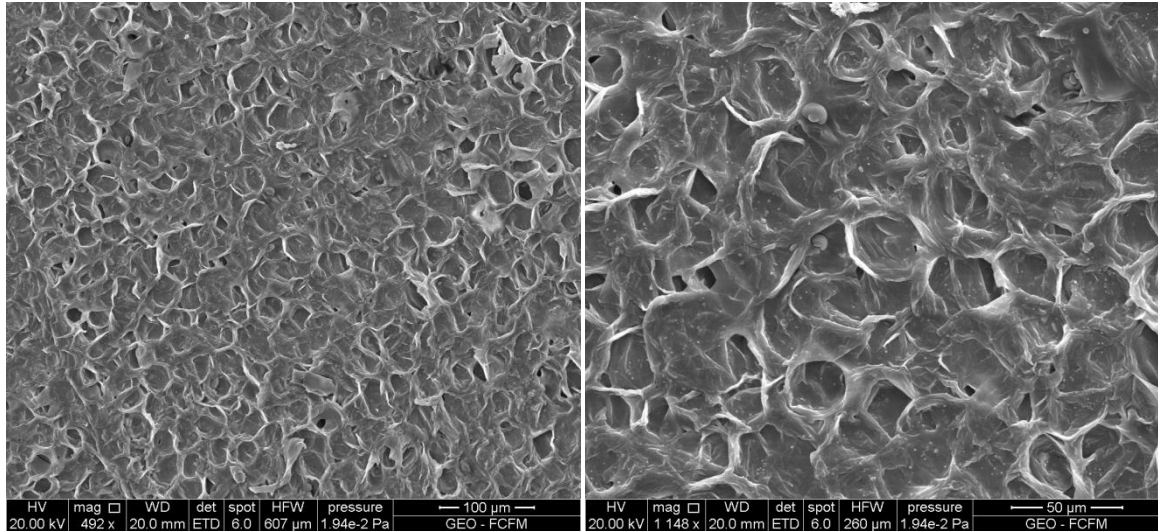


Figura 5.4: Kernel almendra de cáscara dura.

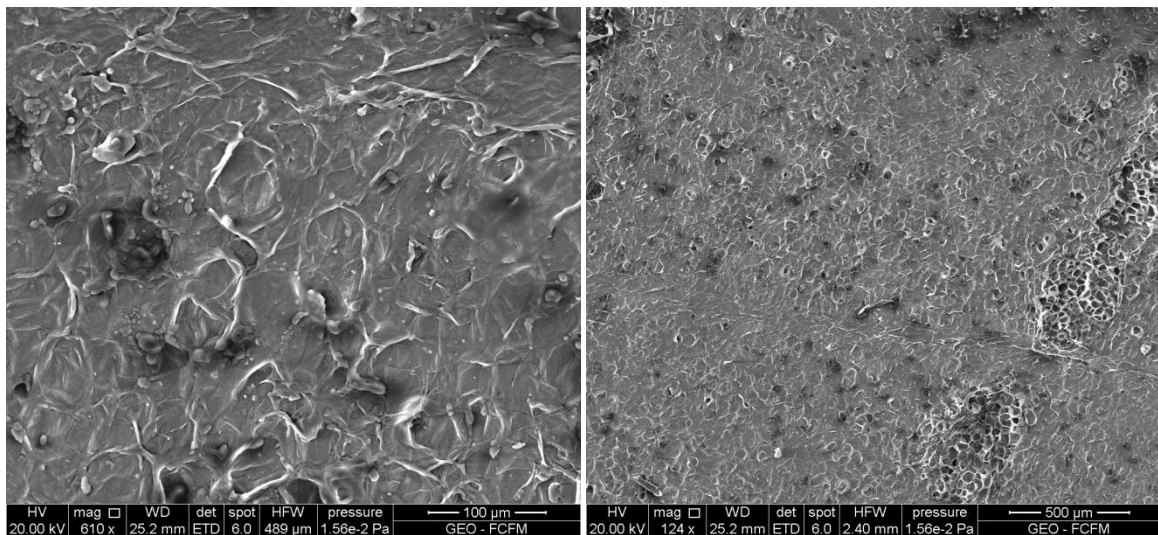


Figura 5.5: Kernel nuez.

De la misma manera, para un análisis más minucioso se midieron algunos parámetros para caracterizar la microestructura de mejor manera, éstos se registran en el cuadro 4.2.

Cuadro 4.2: Promedio y desviación estándar de las dimensiones en la microestructura (kernel).

Semilla (kernel)	Dl ( $\mu\text{m}$ )	Dc ( $\mu\text{m}$ )	A ( $\mu\text{m}^2$ )
Nueces	--	--	--
ACD	30,334 $\pm$ 4,130	21,738 $\pm$ 4,492	500,455 $\pm$ 184,808

## 5.2 Módulo de Elasticidad

Para un análisis sólo de las cáscaras se realizan ensayos IET para las muestras de nueces y almendras de cáscara blanda y cáscara dura. Las muestras son geometrías rectangulares cortadas en dos orientaciones (horizontal y vertical) las cuales fueron masadas y sus dimensiones fueron medidas. Un total de 30 muestras para cada tipo de fruto y cada orientación fue ensayada, dando un total de 180 muestras. Las figuras 5.6-5.8 muestran un extracto de las frecuencias naturales obtenidas para cada tipo de semilla y orientación.

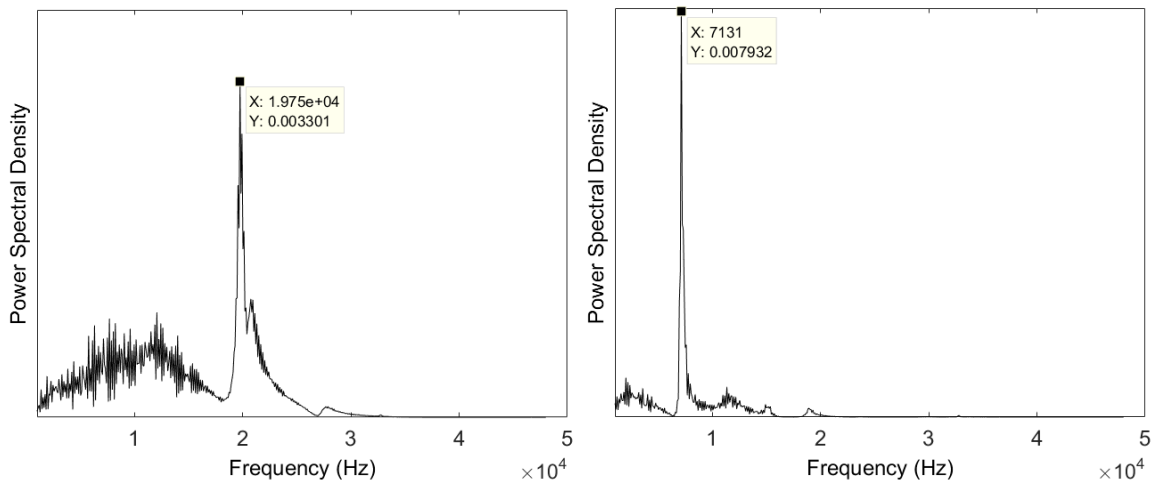


Figura 5.6: Frecuencia natural nuez vertical (izquierda), nuez horizontal (derecha).

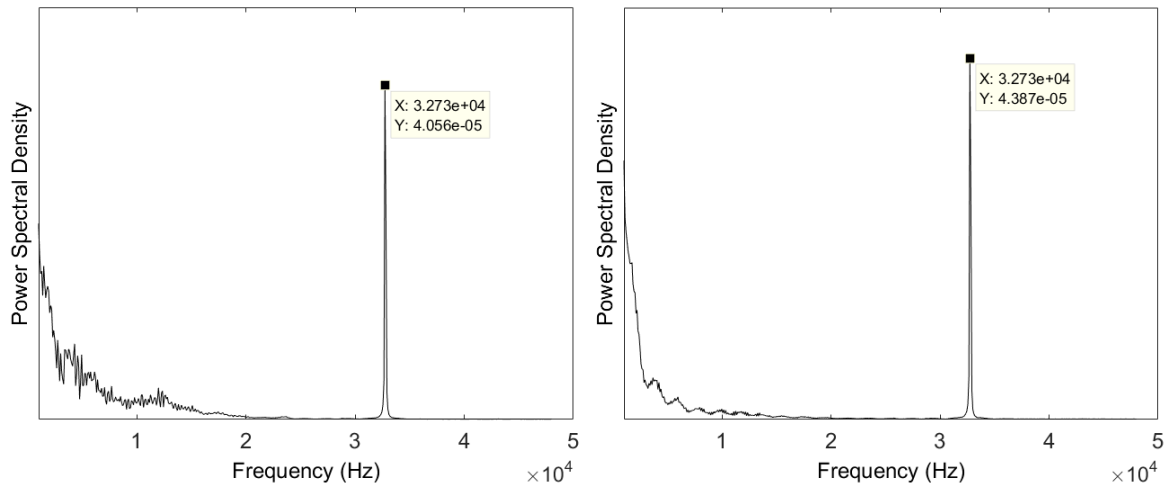


Figura 5.7: Frecuencia natural almendra de cáscara dura vertical (izquierda), almendra de cáscara dura horizontal (derecha).

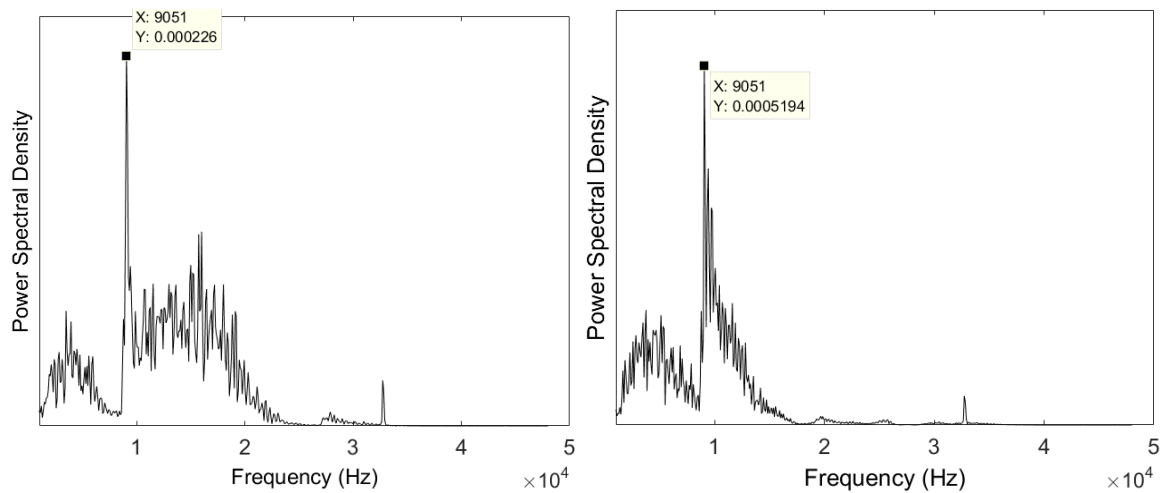


Figura 5.8: Frecuencia natural almendra de cáscara blanda vertical (izquierda), almendra de cáscara blanda horizontal (derecha).

Los cuadros 5.3-5.5 muestran los resultados medidos: masas, dimensiones y frecuencias.

Cuadro 5.3: Masa, dimensiones y frecuencia en nueces, n=30 vertical y 30 horizontal.

<b>Orientación</b>	<b>Med</b>					
	<b>Estadísticas</b>	<b>m (g)</b>	<b>X (mm)</b>	<b>Y (mm)</b>	<b>Z (mm)</b>	<b>f (Hz)</b>
Vertical	Promedio	0,062	10,430	5,937	1,300	17322,567
	Desv Estándar	0,015	1,389	0,711	0,188	4435,973
	Coef Var	24,32%	13,32%	11,97%	14,43%	25,61%
Horizontal	Promedio	0,050	12,707	5,803	1,247	11977,233
	Desv Estándar	0,031	2,153	1,148	0,297	3824,962
	Coef Var	61,61%	16,95%	19,79%	23,81%	31,94%

Cuadro 5.4: Masa, dimensiones y frecuencia en almendras de cáscara dura, n=30 vertical y 30 horizontal.

<b>Orientación</b>	<b>Med</b>					
	<b>Estadísticas</b>	<b>m (g)</b>	<b>X (mm)</b>	<b>Y (mm)</b>	<b>Z (mm)</b>	<b>f (Hz)</b>
Vertical	Promedio	0,246	11,060	6,523	3,220	32730,000
	Desv Estándar	0,052	0,849	0,701	0,235	0,000
	Coef Var	21,21%	7,67%	10,75%	7,31%	0,00%
Horizontal	Promedio	0,250	11,240	6,093	3,287	32733,000
	Desv Estándar	0,078	1,087	1,028	0,258	16,432
	Coef Var	31,35%	9,67%	16,87%	7,86%	0,05%

Cuadro 5.5: Masa, dimensiones y frecuencia en almendras de cáscara blanda, n=30 vertical y 30 horizontal.

<b>Orientación</b>	<b>Med</b>					
	<b>Estadísticas</b>	<b>m (g)</b>	<b>X (mm)</b>	<b>Y (mm)</b>	<b>Z (mm)</b>	<b>f (Hz)</b>
Vertical	Promedio	0,032	9,930	6,620	0,940	10105,367
	Desv Estándar	0,007	0,750	0,488	0,093	1616,524
	Coef Var	23,35%	7,55%	7,37%	9,92%	16,00%
Horizontal	Promedio	0,040	13,377	6,410	1,030	7879,633
	Desv Estándar	0,011	0,987	0,594	0,092	1869,691
	Coef Var	28,77%	7,38%	9,26%	8,89%	23,73%

A partir de los resultados medidos se pueden calcular, gracias al supuesto de configuración viga libre-libre, el módulo de elasticidad. Los cuadros 5.6-5.8 muestran los resultados obtenidos.

Cuadro 5.6: Módulo de elasticidad en nueces, n=30 vertical y 30 horizontal.

Orientación	Med	I (mm <sup>4</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\beta$	A (mm <sup>2</sup> )	E (MPa)
	Estadísticas					
Vertical	Promedio	1,166	0,780	0,461	7,757	36,097
	Desv Estándar	0,525	0,128	0,060	1,618	3,835
	Coef Var	45,05%	16,35%	13,09%	20,86%	10,63%
Horizontal	Promedio	1,125	0,001	0,384	7,321	24,551
	Desv Estándar	0,815	0,000	0,071	2,435	4,909
	Coef Var	72,40%	44,37%	18,43%	33,26%	19,99%

Cuadro 5.7: Módulo de elasticidad en almendras de cáscara dura, n=30 vertical y 30 horizontal.

Orientación	Med	I (mm <sup>4</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\beta$	A (mm <sup>2</sup> )	E (MPa)
	Estadísticas					
Vertical	Promedio	18,463	1,049	0,430	21,026	39,521
	Desv Estándar	4,383	0,084	0,034	2,841	9,192
	Coef Var	23,74%	8,03%	7,86%	13,51%	23,26%
Horizontal	Promedio	18,882	0,001	0,424	20,203	41,537
	Desv Estándar	7,926	0,000	0,038	4,714	9,739
	Coef Var	41,98%	14,82%	9,02%	23,33%	23,45%

Cuadro 5.8: Módulo de elasticidad en almendras de cáscara blanda, n=30 vertical y 30 horizontal.

Orientación	Med	I (mm <sup>4</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\beta$	A (mm <sup>2</sup> )	E (MPa)
	Estadísticas					
Vertical	Promedio	0,473	0,510	0,479	6,230	14,443
	Desv Estándar	0,158	0,089	0,038	0,842	5,994
	Coef Var	33,42%	17,38%	7,96%	13,51%	41,50%
Horizontal	Promedio	0,608	0,000	0,356	6,644	19,688
	Desv Estándar	0,207	0,000	0,030	1,134	6,578
	Coef Var	34,04%	21,50%	8,46%	17,07%	33,41%

La figura 5.9 muestra gráficamente los resultados de los módulos de elasticidad con su respectiva desviación estándar para ambas orientaciones, horizontal y vertical.

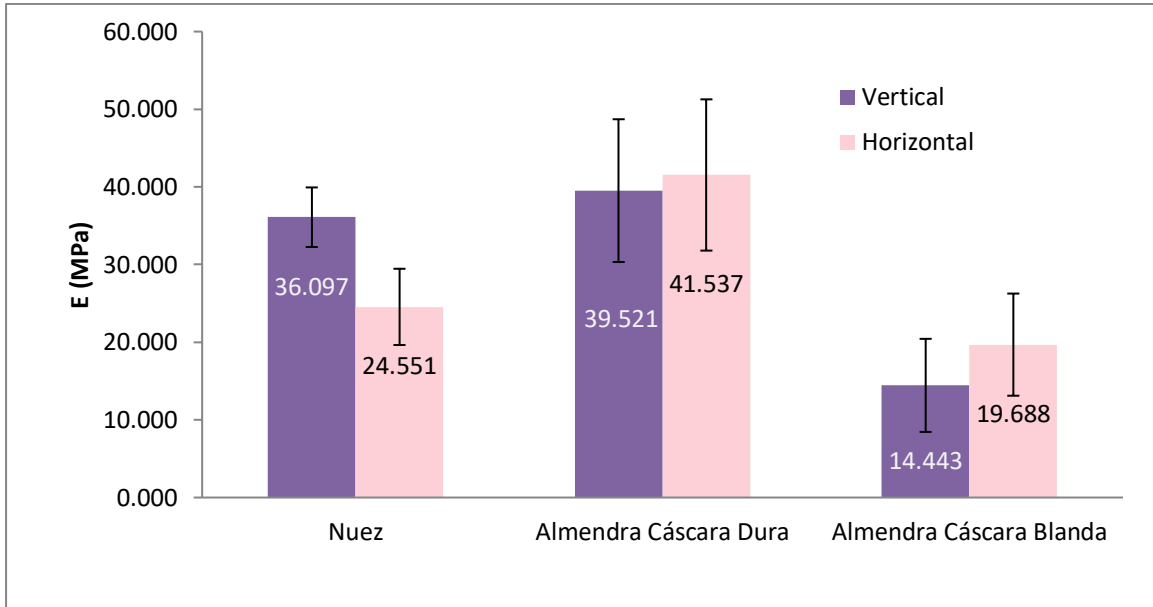


Figura 5.9: Módulo de elasticidad calculadas mediante ensayo IET para las muestras de nueces y almendras.

### 5.3 Fuerza de Rotura, Tenacidad, Energía Absorbida, Rigidez

Con el objetivo de determinar algunas propiedades, nueces y almendras fueron sometidas a ensayos de compresión. Un total de 540 nueces, 540 almendras de cáscara blanda y 360 almendras de cáscara dura fueron ensayadas. Las figuras 5.10-5.12 muestran gráficos típicos obtenidos de los ensayos de compresión realizados hasta su ruptura en nueces, almendras de cáscara dura y almendras de cáscara blanda respectivamente.  $F_R$  y  $R_{DP}$  son parámetros medidos del ensayo que indican fuerza y desplazamiento hasta la ruptura.

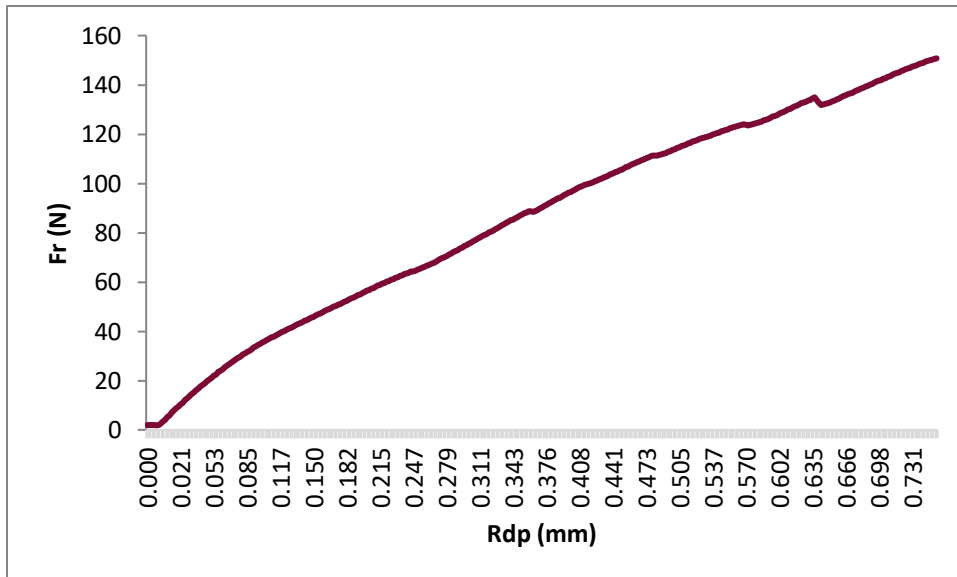


Figura 5.10: Gráfico Fr vs Rdp en nueces.



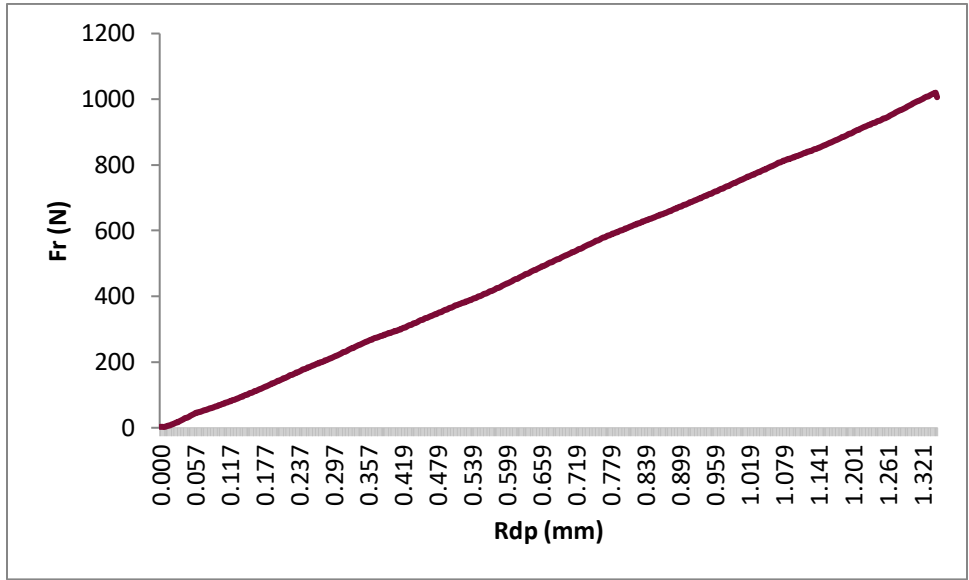


Figura 5.11: Gráfico Fr vs Rdp en almendras de cáscara dura.

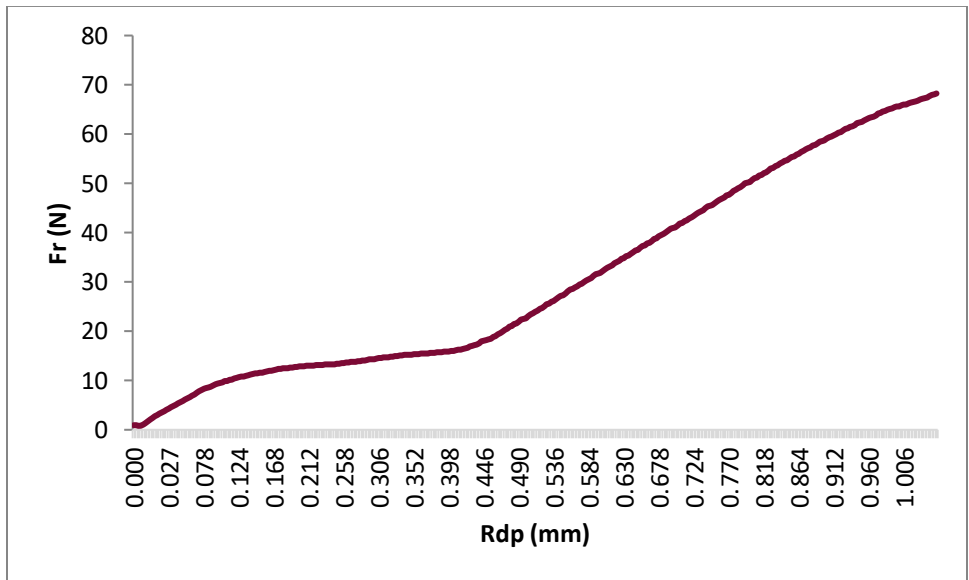


Figura 5.12: Gráfico Fr vs Rdp en almendras de cáscara blanda.

En los cuadros 5.9-5.11 se muestran los resultados promedios obtenidos para masas, dimensiones y diámetros aritméticos  $D_a$  y geométricos  $D_g$ . Los resultados presentaron diferencias bastantes significativas en algunos casos por lo que hubo una división en rangos de masa para aminorar la desviación estándar de los datos.

Cuadro 5.9: Masa, dimensiones y diámetros en nueces, n=540.

Nueces	m (g)	L (mm)	W (mm)	T (mm)	Da (mm)	Dg (mm)
x	7,380	33,102	29,160	27,935	30,066	29,979
	0,276	1,041	0,934	1,287	0,869	0,885
	0,037	0,031	0,032	0,046	0,029	0,030
y	7,404	31,913	28,442	27,853	29,403	29,342
	0,340	0,771	1,236	1,175	0,875	0,899
	0,046	0,024	0,043	0,042	0,030	0,031
z	7,425	32,967	28,823	28,095	29,962	29,884
	0,272	0,616	0,692	0,942	0,651	0,665
	0,037	0,019	0,024	0,034	0,022	0,022
x	8,990	34,797	30,602	29,978	31,792	31,719
	0,497	0,984	0,766	0,734	0,705	0,702
	0,055	0,028	0,025	0,024	0,022	0,022
y	8,982	35,063	31,313	30,593	32,323	32,263
	0,486	0,893	0,919	0,882	0,805	0,810
	0,054	0,025	0,029	0,029	0,025	0,025
z	9,029	35,023	31,190	30,558	32,257	32,197
	0,554	0,568	0,690	0,787	0,608	0,617
	0,061	0,016	0,022	0,026	0,019	0,019
x	10,494	37,047	31,527	30,945	33,173	33,062
	0,336	0,424	0,522	0,574	0,430	0,441
	0,032	0,011	0,017	0,019	0,013	0,013
y	10,587	36,662	32,618	31,955	33,745	33,681
	0,348	0,499	0,647	0,620	0,525	0,532
	0,033	0,014	0,020	0,019	0,016	0,016
z	10,642	36,692	32,337	31,805	33,611	33,540
	0,345	0,437	0,603	0,669	0,502	0,512
	0,032	0,012	0,019	0,021	0,015	0,015

Cuadro 5.10: Masa, dimensiones y diámetros en almendras de cáscara dura, n=360.

<b>ACD</b>	<b>m (g)</b>	<b>L (mm)</b>	<b>W (mm)</b>	<b>T (mm)</b>	<b>Da (mm)</b>	<b>Dg (mm)</b>
<b>x</b>	5,176	29,091	23,048	17,937	23,358	22,906
	0,092	0,567	0,608	0,588	0,383	0,402
	0,018	0,020	0,026	0,033	0,016	0,018
<b>y</b>	5,164	29,013	23,510	18,025	23,516	23,074
	0,096	0,556	0,850	0,557	0,403	0,416
	0,019	0,019	0,036	0,031	0,017	0,018
<b>z</b>	5,191	29,029	23,920	17,995	23,648	23,200
	0,143	0,534	0,579	0,627	0,336	0,368
	0,028	0,018	0,024	0,035	0,014	0,016
<b>x</b>	5,445	28,974	23,981	18,924	23,960	23,597
	0,098	0,606	0,561	0,558	0,303	0,303
	0,018	0,021	0,023	0,029	0,013	0,013
<b>y</b>	5,411	28,948	23,455	19,094	23,832	23,489
	0,284	0,538	0,287	0,516	0,281	0,294
	0,053	0,019	0,012	0,027	0,012	0,013
<b>z</b>	5,508	28,971	23,542	19,055	23,856	23,507
	0,259	0,624	0,361	0,556	0,290	0,300
	0,047	0,022	0,015	0,029	0,012	0,013

Cuadro 5.11: Masa, dimensiones y diámetros en almendras de cáscara blanda, n=540.

ACB	m (g)	L (mm)	W (mm)	T (mm)	Da (mm)	Dg (mm)
x	0,918	25,618	15,068	10,384	17,023	15,880
	0,094	0,894	0,516	0,309	0,374	0,314
	0,102	0,035	0,034	0,030	0,022	0,020
y	0,930	23,537	14,003	10,067	15,869	14,906
	0,096	0,956	0,541	0,556	0,444	0,418
	0,104	0,041	0,039	0,055	0,028	0,028
z	0,908	25,933	14,533	9,805	16,757	15,443
	0,099	1,428	0,858	0,509	0,482	0,416
	0,109	0,055	0,059	0,052	0,029	0,027
x	1,242	25,609	15,117	10,706	17,144	16,044
	0,079	0,959	0,836	0,830	0,483	0,539
	0,064	0,037	0,055	0,078	0,028	0,034
y	1,267	24,121	15,208	10,923	16,751	15,867
	0,085	1,368	0,735	0,645	0,551	0,476
	0,067	0,057	0,048	0,059	0,033	0,030
z	1,252	26,621	14,822	11,060	17,501	16,329
	0,078	0,538	0,783	0,567	0,332	0,368
	0,062	0,020	0,053	0,051	0,019	0,023
x	1,596	27,028	15,507	11,563	18,032	16,902
	0,119	0,657	1,004	0,925	0,508	0,622
	0,074	0,024	0,065	0,080	0,028	0,037
y	1,589	26,963	16,489	11,835	18,429	17,385
	0,118	0,592	0,887	0,524	0,472	0,515
	0,074	0,022	0,054	0,044	0,026	0,030
z	1,581	27,176	16,461	11,840	18,492	17,419
	0,099	0,685	0,873	0,593	0,388	0,423
	0,063	0,025	0,053	0,050	0,021	0,024

En los Cuadros 5.12-5.14 se detallan otros parámetros calculados como la esfericidad  $\phi$ , volumen  $V$ , densidad  $\rho$  y superficie de área  $S$ .

Cuadro 5.12: Esfericidad, volumen, densidad y superficie de área en nueces, n=540.

Nueces	$\phi$	V (cm3)	$\rho$ (g/cm3)	S (mm2)
x	0,906	11,315	0,657	2916,844
	0,024	1,012	0,054	155,023
	0,026	0,089	0,082	0,053
y	0,920	10,611	0,702	2752,617
	0,028	0,976	0,053	168,774
	0,031	0,092	0,076	0,061
z	0,907	11,196	0,665	2864,476
	0,014	0,760	0,031	115,443
	0,015	0,068	0,047	0,040
x	0,912	13,387	0,673	3215,809
	0,016	0,890	0,038	148,466
	0,018	0,066	0,057	0,046
y	0,920	14,093	0,639	3331,107
	0,015	1,054	0,028	169,410
	0,016	0,075	0,044	0,051
z	0,919	13,996	0,646	3310,512
	0,012	0,808	0,028	121,854
	0,013	0,058	0,043	0,037
x	0,892	15,146	0,693	3493,303
	0,010	0,604	0,022	88,685
	0,011	0,040	0,031	0,025
y	0,919	16,017	0,662	3622,800
	0,009	0,757	0,019	116,461
	0,010	0,047	0,029	0,032
z	0,914	15,816	0,674	3584,359
	0,011	0,728	0,023	104,672
	0,012	0,046	0,035	0,029

Cuadro 5.13: Esfericidad, volumen, densidad y superficie de área en almendras de cáscara dura, n=360.

ACD	$\phi$	V (cm3)	$\rho$ (g/cm3)	S (mm2)
x	0,788	5,039	1,030	1967,677
	0,015	0,264	0,059	72,382
	0,019	0,052	0,057	0,037
y	0,795	5,151	1,005	2013,822
	0,017	0,278	0,054	95,207
	0,021	0,054	0,053	0,047
z	0,799	5,234	0,994	2058,714
	0,017	0,249	0,059	64,777
	0,021	0,048	0,059	0,031
x	0,815	5,507	0,990	2062,559
	0,015	0,213	0,042	70,647
	0,018	0,039	0,043	0,034
y	0,812	5,431	0,998	2003,801
	0,014	0,204	0,069	39,787
	0,017	0,038	0,069	0,020
z	0,812	5,444	1,014	2014,469
	0,016	0,208	0,065	47,588
	0,019	0,038	0,064	0,024

Cuadro 5.14: Esfericidad, volumen, densidad y superficie de área en almendras de cáscara blanda, n=540.

ACB	$\phi$	V (cm3)	$\rho$ (g/cm3)	S (mm2)
x	0,620	1,679	0,548	1063,302
	0,017	0,099	0,056	55,381
	0,027	0,059	0,102	0,052
y	0,634	1,390	0,674	909,798
	0,019	0,115	0,093	53,239
	0,031	0,083	0,137	0,059
z	0,597	1,546	0,592	1029,455
	0,031	0,125	0,086	71,696
	0,052	0,081	0,145	0,070
x	0,627	1,736	0,723	1067,313
	0,027	0,175	0,089	74,286
	0,042	0,101	0,123	0,070
y	0,659	1,678	0,760	1024,045
	0,030	0,156	0,074	83,259
	0,046	0,093	0,098	0,081
z	0,614	1,827	0,688	1077,081
	0,015	0,124	0,065	67,000
	0,025	0,068	0,095	0,062
x	0,626	2,031	0,797	1150,369
	0,027	0,222	0,126	93,439
	0,044	0,110	0,158	0,081
y	0,645	2,207	0,724	1233,666
	0,018	0,197	0,071	83,082
	0,029	0,089	0,099	0,067
z	0,641	2,218	0,715	1238,953
	0,020	0,161	0,055	79,734
	0,031	0,073	0,077	0,064

Finalmente se determinan ciertas propiedades mecánicas a partir de los datos medidos en desplazamiento ( $R_{DP}$ ) y fuerza ( $F_r$ ). Rigidez ( $H$ ), energía absorbida ( $E_a$ ) y tenacidad ( $P$ ) son las propiedades determinadas y que se pueden observar en los cuadros 5.15-5.17.

Cuadro 5.15: Propiedades mecánicas en nueces, n=540.

Nueces	Rdp (mm)	Fr (N)	Rdr	H (N/mm)	Ea (Nmm)	P (kPa)
x	0,805	121,083	0,024	151,124	48,628	4,337
	0,040	17,642	0,001	25,020	6,931	0,765
	0,050	0,146	0,056	0,166	0,143	0,176
y	0,213	56,194	0,007	272,297	6,025	0,569
	0,042	5,650	0,001	52,436	1,492	0,139
	0,195	0,101	0,194	0,193	0,248	0,245
z	0,622	109,851	0,019	178,338	34,333	3,096
	0,075	19,770	0,002	34,514	8,614	0,880
	0,120	0,180	0,126	0,194	0,251	0,284
x	0,315	94,399	0,009	307,840	14,926	1,118
	0,055	8,929	0,002	52,763	3,308	0,252
	0,176	0,095	0,178	0,171	0,222	0,225
y	0,345	87,405	0,010	259,626	15,146	1,081
	0,060	11,012	0,002	48,091	3,531	0,266
	0,173	0,126	0,178	0,185	0,233	0,246
z	0,601	113,514	0,017	191,479	34,264	2,455
	0,085	19,140	0,002	35,561	8,031	0,585
	0,142	0,169	0,140	0,186	0,234	0,238
x	0,684	127,733	0,018	188,977	43,695	2,887
	0,075	11,680	0,002	25,938	6,456	0,418
	0,110	0,091	0,110	0,137	0,148	0,145
y	0,356	98,683	0,010	282,819	18,096	1,130
	0,080	20,251	0,002	54,382	8,060	0,498
	0,224	0,205	0,224	0,192	0,445	0,441
z	0,733	198,997	0,020	278,368	73,062	4,629
	0,103	16,586	0,003	64,504	12,846	0,840
	0,140	0,083	0,140	0,232	0,176	0,181



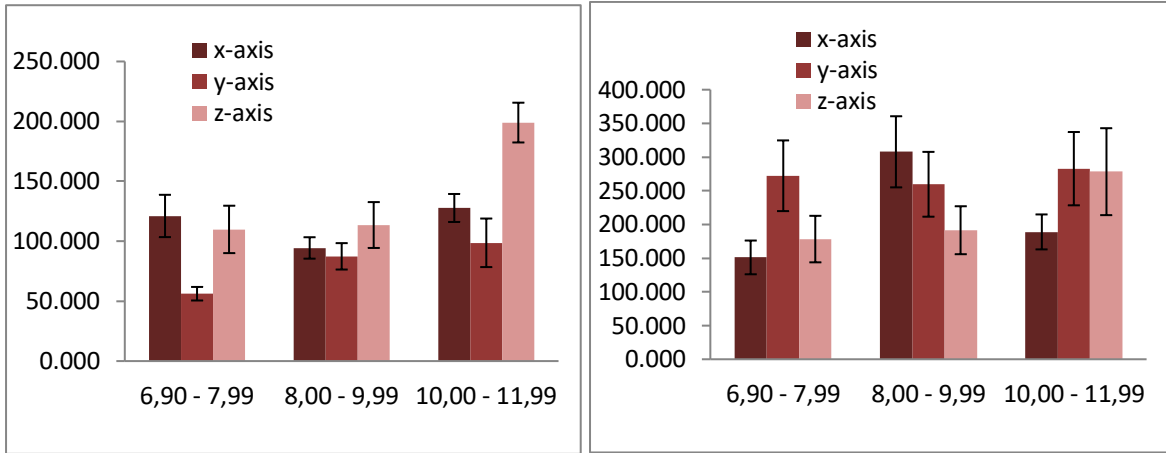
Cuadro 5.16: Propiedades mecánicas en almendras de cáscara dura, n=360.

<b>ACD</b>	<b>Rdp (mm)</b>	<b>Fr (N)</b>	<b>Rdr</b>	<b>H (N/mm)</b>	<b>Ea (Nmm)</b>	<b>P (kPa)</b>
<b>x</b>	1,310	858,906	0,045	672,126	563,319	112,338
	0,216	85,849	0,008	124,515	111,396	24,132
	0,165	0,100	0,166	0,185	0,198	0,215
<b>y</b>	0,239	218,510	0,008	933,219	26,511	5,175
	0,043	35,677	0,002	158,712	7,734	1,569
	0,182	0,163	0,184	0,170	0,292	0,303
<b>z</b>	0,513	597,065	0,018	1200,735	153,549	29,386
	0,096	31,983	0,003	213,023	32,428	6,330
	0,186	0,054	0,187	0,177	0,211	0,215
<b>x</b>	0,716	905,668	0,025	1286,571	324,651	59,137
	0,098	74,293	0,004	195,961	54,882	10,803
	0,137	0,082	0,144	0,152	0,169	0,183
<b>y</b>	0,318	255,199	0,011	830,811	40,771	7,529
	0,067	25,040	0,002	165,226	9,659	1,868
	0,210	0,098	0,216	0,199	0,237	0,248
<b>z</b>	0,588	623,962	0,020	1075,518	184,813	34,054
	0,083	73,213	0,003	160,057	40,262	7,823
	0,142	0,117	0,151	0,149	0,218	0,230

Cuadro 5.17: Propiedades mecánicas en almendras de cáscara blanda, n=540.

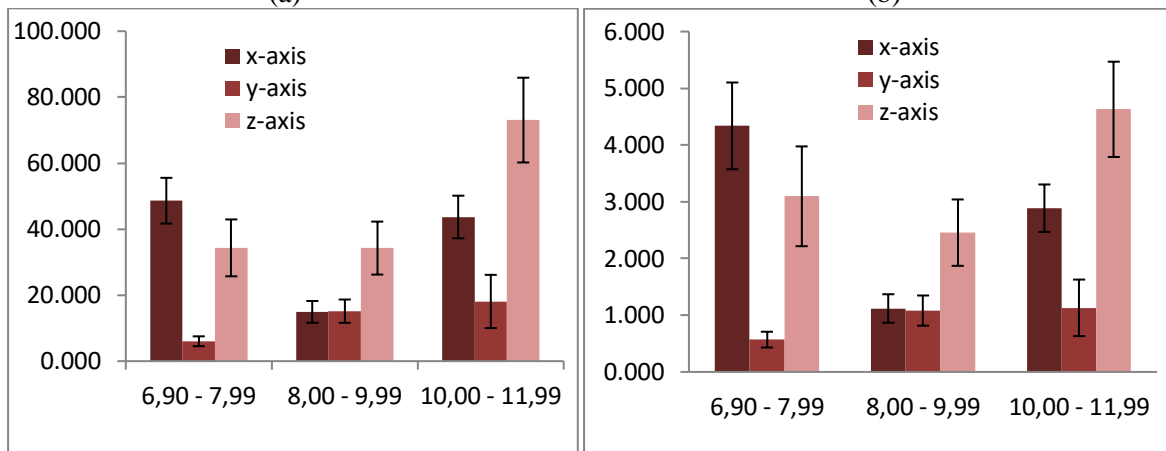
ACB	Rdp (mm)	Fr (N)	Rdr	H (N/mm)	Ea (Nmm)	P (kPa)
x	0,377	55,766	0,015	150,866	10,840	6,430
	0,086	12,087	0,003	27,200	4,038	2,335
	0,229	0,217	0,230	0,180	0,373	0,363
y	0,745	45,619	0,032	62,941	17,276	12,522
	0,148	15,006	0,006	21,565	7,483	5,552
	0,199	0,329	0,200	0,343	0,433	0,443
z	0,853	56,217	0,033	69,736	23,921	15,538
	0,202	8,798	0,008	20,234	6,896	4,564
	0,237	0,157	0,254	0,290	0,288	0,294
x	0,928	72,137	0,036	81,412	33,476	19,441
	0,173	6,075	0,007	23,430	6,902	4,358
	0,186	0,084	0,191	0,288	0,206	0,224
y	0,768	52,422	0,032	70,182	20,126	11,988
	0,125	11,390	0,005	19,222	5,522	3,132
	0,163	0,217	0,164	0,274	0,274	0,261
z	1,434	92,204	0,054	66,670	66,549	36,519
	0,299	13,520	0,011	15,893	18,547	10,122
	0,208	0,147	0,209	0,238	0,279	0,277
x	0,594	65,666	0,022	113,748	19,783	9,953
	0,123	10,861	0,004	23,493	6,265	3,779
	0,207	0,165	0,204	0,207	0,317	0,380
y	0,684	56,105	0,025	84,774	19,449	8,866
	0,143	9,371	0,005	18,836	5,656	2,620
	0,210	0,167	0,214	0,222	0,291	0,296
z	1,452	102,056	0,053	72,764	74,158	33,492
	0,276	8,318	0,010	14,903	15,755	6,900
	0,190	0,082	0,194	0,205	0,212	0,206

En las figuras 5.13-5.15 se grafican los valores anteriores con sus respectivas desviaciones estándar para la fuerza de rotura, rigidez, energía absorbida y tenacidad vs masas para nueces, almendras de cáscara dura y almendras de cáscara blanda respectivamente.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 5.13: (a) Fuerza de rotura (N), (b) rigidez (N/mm), (c) energía absorbida (Nmm) y (d) tenacidad (kPa) versus masa (g) en nueces.

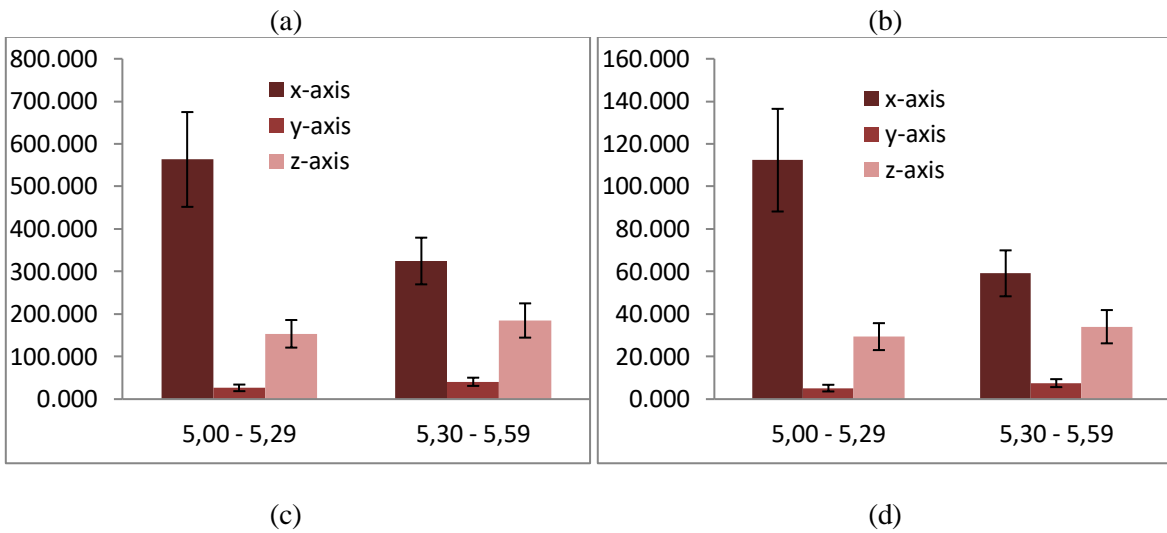
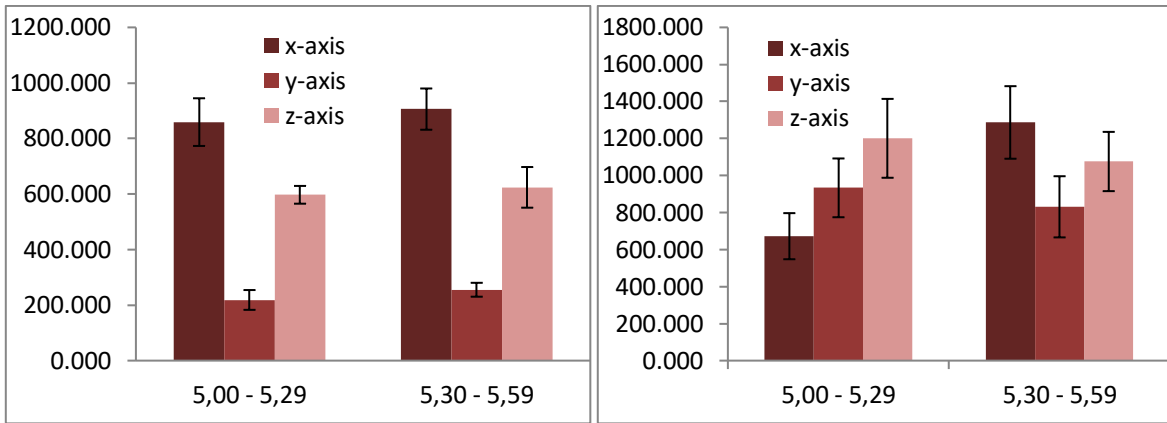


Figura 5.14: (a) Fuerza de rotura (N), (b) rigidez (N/mm), (c) energía absorbida (Nmm) y (d) tenacidad (kPa) versus masa (g) en almendras de cáscara dura.

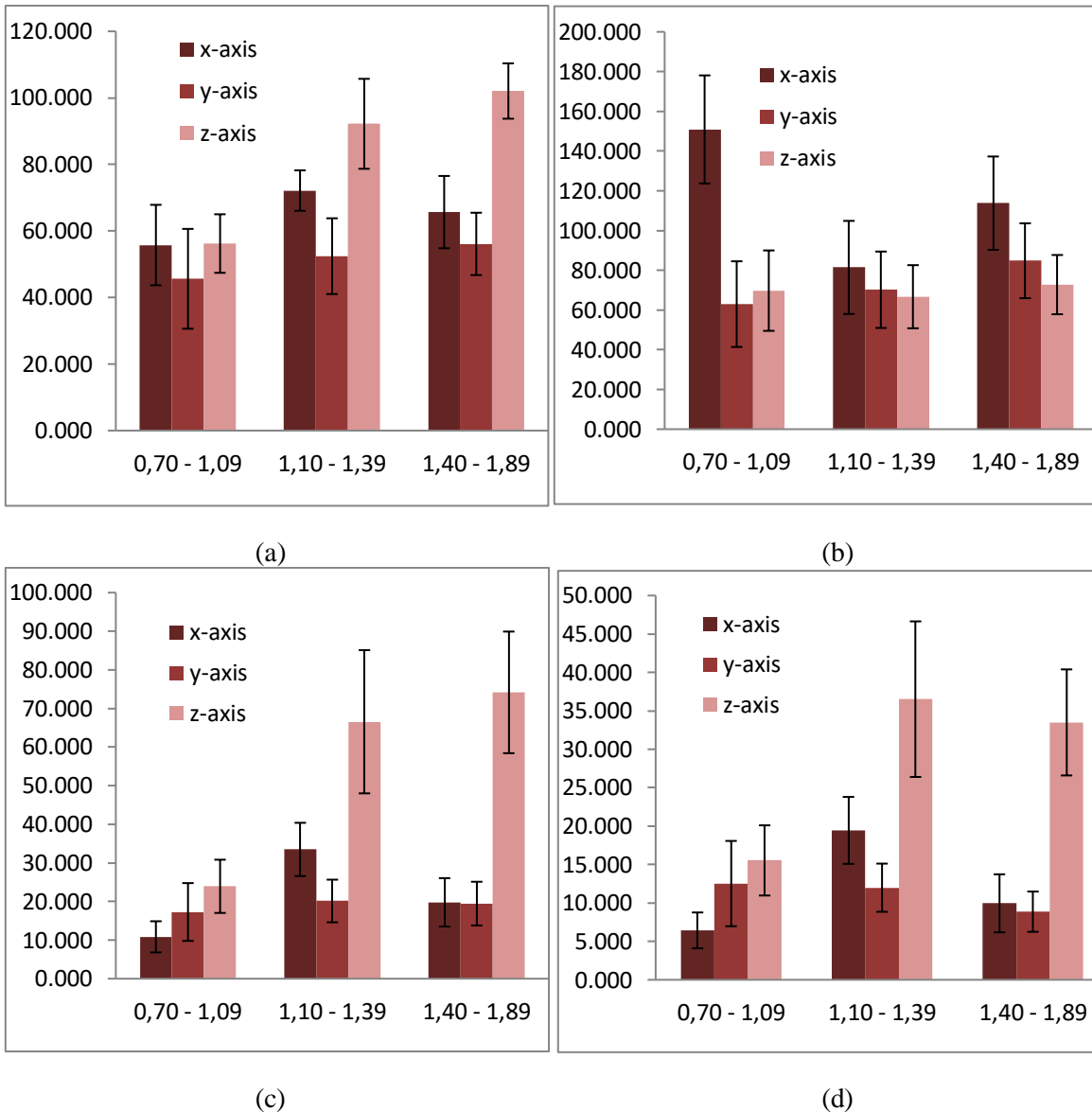
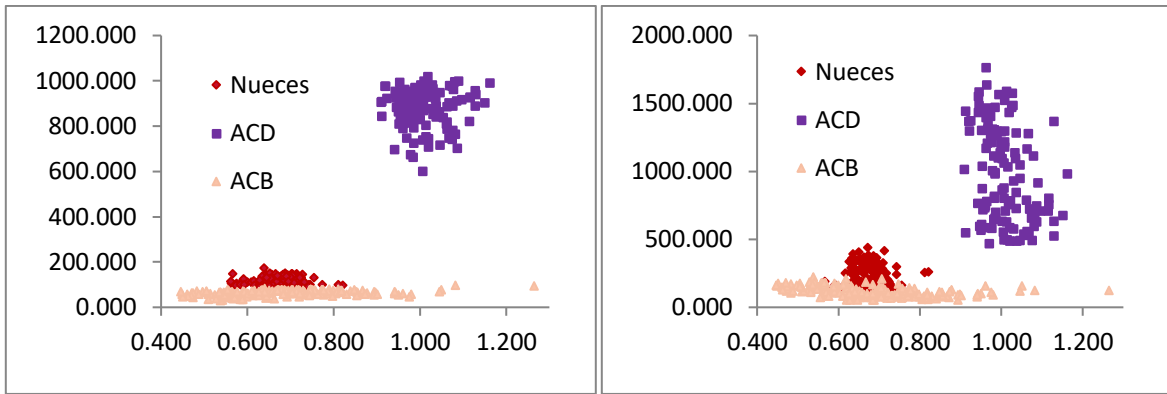


Figura 5.15: (a) Fuerza de rotura (N), (b) rigidez (N/mm), (c) energía absorbida (Nmm) y (d) tenacidad (kPa) versus masa (g) en almendras de cáscara blanda.

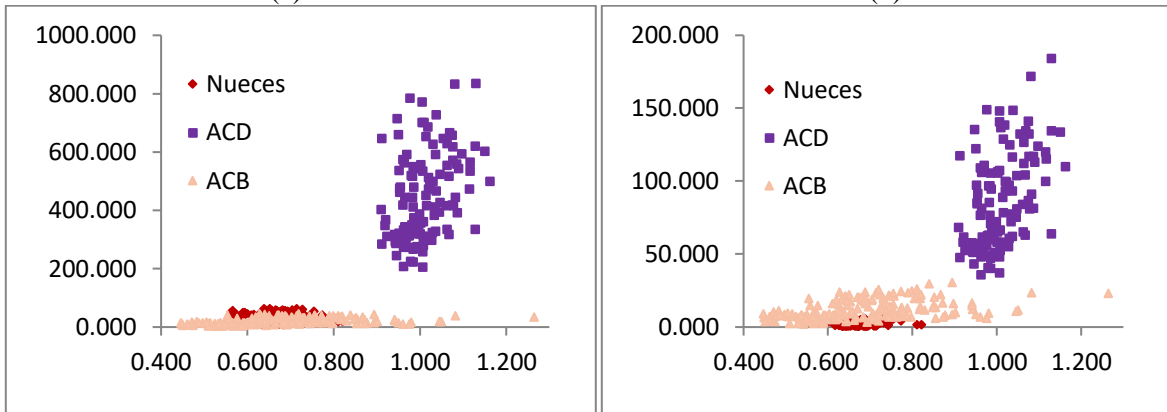
## 5.4 Relación entre Densidades y Propiedades Mecánicas

En esta sección se presentan las relaciones entre las densidades y propiedades mecánicas calculadas para los resultados obtenidos en el ensayo de compresión en gráficos de dispersión. Aquí se omiten las clasificaciones presentadas en el cuadro 4.1, reuniendo todos los resultados obtenidos en una sola categoría y diferenciándolas únicamente por dirección X, Y ó Z y tipo de fruto.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 5.16: (a) Fuerza de rotura (N), (b) rigidez (N/mm), (c) energía absorbida (Nmm) y (d) tenacidad (kPa) versus densidad ( $\text{g/cm}^3$ ) en dirección X.

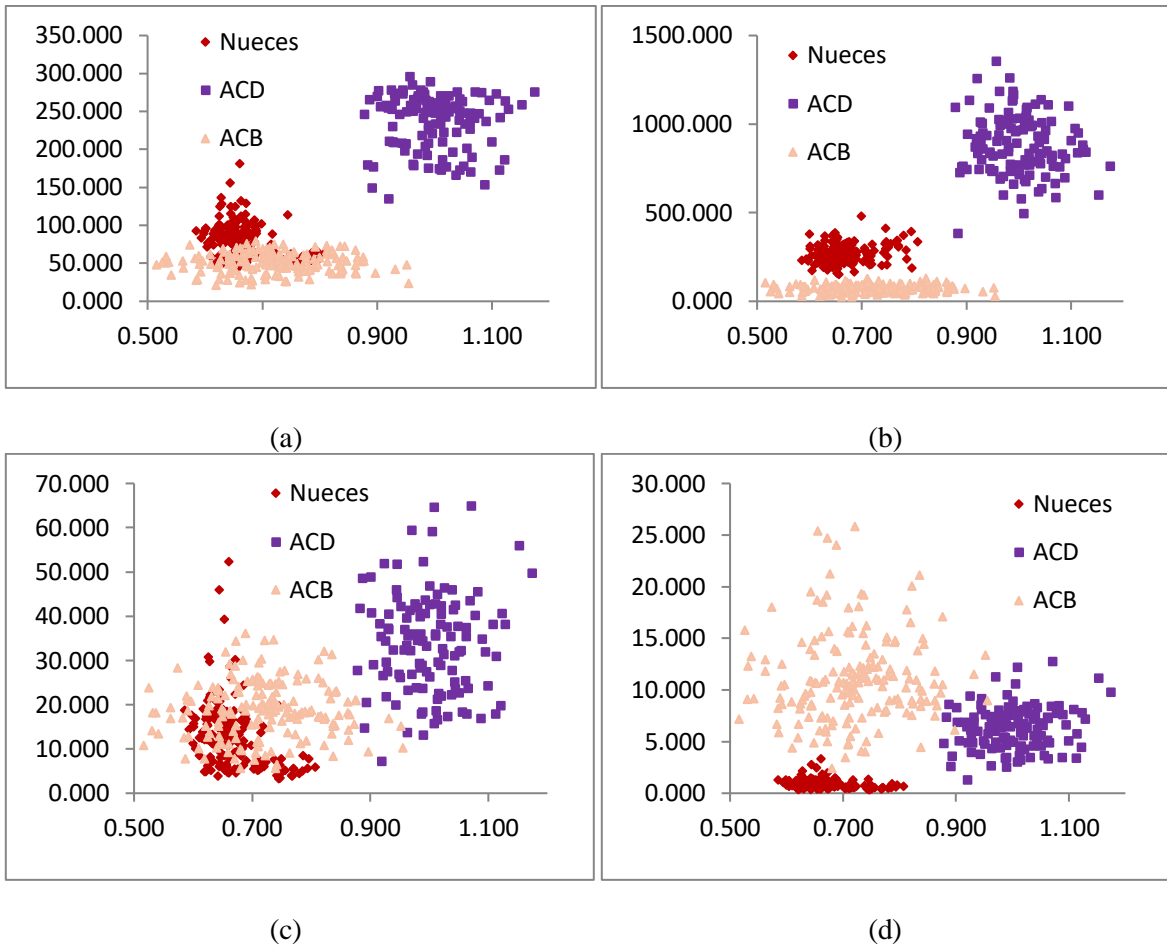


Figura 5.17: (a) Fuerza de rotura (N), (b) rigidez (N/mm), (c) energía absorbida (Nmm) y (d) tenacidad (kPa) versus densidad (g/cm<sup>3</sup>) en dirección Y.

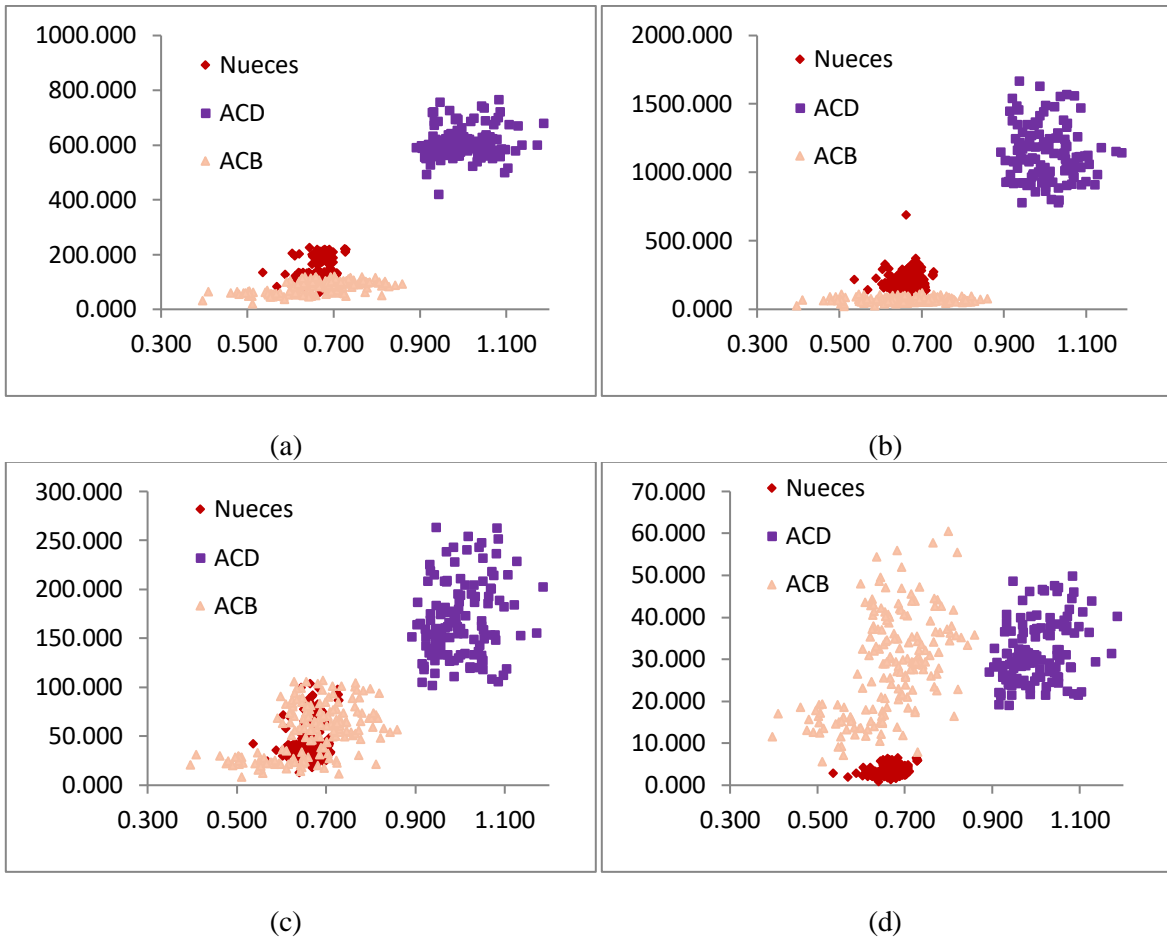


Figura 5.18: (a) Fuerza de rotura (N), (b) rigidez (N/mm), (c) energía absorbida (Nmm) y (d) tenacidad (kPa) versus densidad (g/cm³) en dirección Z.

## 5.5 Energía Absorbida

Para identificar la energía absorbida en el proceso de fractura se realizaron pruebas de impacto Charpy. Un total de 100 nueces, 100 almendras de cáscara dura y 100 almendras de cáscara blanda fueron ensayadas. Los resultados fueron bastantes cercanos unos de otros por lo que en este caso no hubo necesidad de una clasificación en rangos de masa como el ensayo anterior. Los resultados se pueden ver en el cuadro 5.18.



Cuadro 5.18: Energía absorbida en prueba impacto Charpy, n=100 por fruto.

Semilla	Med Est	m (g)	L (mm)	W (mm)	T (mm)	Da (mm)	Dg (mm)	$\phi$	V (cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	S (mm <sup>2</sup> )	Ea(J)
Nueces	Promedio	8,81	34,71	30,55	29,70	31,65	31,57	0,91	13,24	0,67	3206,19	3,22
	Desv Est	1,13	1,54	1,24	1,18	1,17	1,17	0,02	1,47	0,04	247,67	0,88
	Coef Var	12,8%	4,4%	4,0%	3,9%	3,7%	3,7%	2,0%	11,0%	6,2%	7,7%	27,4%
ACD	Promedio	5,29	29,00	23,05	18,68	23,58	23,19	0,80	5,23	1,01	1963,74	2,58
	Desv Est	0,18	0,63	0,77	0,84	0,44	0,48	0,02	0,32	0,06	86,39	0,44
	Coef Var	3,3%	2,1%	3,3%	4,4%	1,8%	2,0%	2,3%	6,1%	5,9%	4,4%	17,0%
ACB	Promedio	1,34	26,04	15,16	11,04	17,41	16,32	0,63	1,84	0,72	1087,69	0,86
	Desv Est	0,34	1,31	1,05	0,75	0,86	0,84	0,02	0,28	0,12	117,42	0,14
	Coef Var	25,1%	5,0%	6,9%	6,8%	4,9%	5,1%	3,2%	15,3%	16,1%	10,8%	16,8%

Es necesario recalcar que mientras las muestras de nueces y almendras de cáscara blanda fueron destruidas al ser impactadas por la masa del péndulo, las almendras de cáscara dura sólo presentaron fracturas en ciertas zonas, gran parte de su estructura se mantuvo íntegra como se muestra en la figura 5.19.



Figura 5.19: Resultado de muestras de almendras de cáscara dura ensayadas mediante prueba de impacto Charpy.

## Capítulo 6

# Análisis de Resultados

Se describió, unos capítulos atrás, un trabajo realizado enfocado en las variaciones de humedad, por lo que ya es sabido que la humedad afecta las propiedades mecánicas de los frutos. Si bien no se midió la humedad en este trabajo, los frutos recolectados estuvieron almacenados previamente. Esta condición es viable, si sólo si, los frutos presentan entre un 4-7% de humedad, de lo contrario no logran preservarse bien. Dicho esto, se presenta a continuación un análisis con respecto a los resultados obtenidos de cada ensayo.

### 6.1 Microestructura

Si bien, tanto las nueces como las almendras son materiales lignocelulósicos con un gran porcentaje de celulosa en su interior, de acuerdo al análisis SEM realizado en las figuras 5.1-5.3 se observan geometrías poligonales en su estructura. Esto difiere bastante de la estructura típica de la madera conformada por fibras tubulares. Esto podría dar indicios de un comportamiento más isotrópico por parte del material ante esfuerzos mecánicos (también reportado en [24]). Además se observa que en la imagen obtenida para almendras de cáscara blanda, los polígonos son planos mientras que en almendras de cáscara dura son cavidades que en su interior contienen *láminas enrolladas* (aunque es difícil su visualización debido al exceso de oro al momento de recubrir de las muestras).

El análisis SEM de los kernels mostradas en las figuras 5.4-5.5 difieren bastante uno de otro, mientras que en las nueces la microestructura se presenta más bien como una superficie rugosa e irregular, en almendras de cáscara dura se reconoce una especie de mallado de polígonos mucho más definido.

Volviendo a las cáscaras, en las nueces, se observan dos zonas, una mucho más densa que pareciera ser similar a las almendras de cáscara dura donde se presentan cavidades poligonales y la segunda donde se ve más bien un exoesqueleto que pareciera asemejarse al mallado de polígonos, como una suerte de hibridación entre cáscara y kernel de almendras de cáscara dura, esto le otorga un nivel de porosidad mayor al material.

Como se mencionó, las cáscaras de nueces presentan dos zonas diferenciadas, la primera corresponde a la semejanza en estructura con las almendras de cáscara dura. De acuerdo a los resultados numéricos presentados en los cuadros 5.1-5.2 el área proyectada es de  $493\mu\text{m}^2$ , mientras que la segunda parte, la que se asemeja al kernel de almendra de cáscara dura, es de  $813\mu\text{m}^2$ , alrededor de 1,6 veces mayor. El área de las almendras de cáscara blanda es de  $1310\mu\text{m}^2$ , 2,6 veces mayor que el área de las almendras de cáscara dura.

Bastante consiste ya que los polígonos de las primeras son angostas, pero muy alargadas, mientras que las segundas son más pequeñas y más circulares.

## **6.2 Módulo de Elasticidad**

La técnica de excitación por impulso, a diferencia del resto de los ensayos, tiene como propósito analizar el comportamiento mecánico de las cáscaras, sin considerar el kernel. Si bien no se estudia la cáscara en su forma natural (esférica), este análisis permitirá tener un indicio del performance del material.

Se observa en el registro amplitud vs tiempo una oscilación que disminuye con el tiempo. Dicho decaimiento se encuentra relacionado con las fricciones internas del material, sin embargo, resulta muy complejo analizar estas fricciones internas debido a otros factores involucrados durante los ensayos como la ubicación de la muestra, tipos de soportes, entre otros.

Según los cuadros 5.6-5.8, las nueces presentaron un módulo de elasticidad mayor en la orientación vertical con un valor de 36 MPa aprox., esto es un 47% mayor que lo obtenido en orientación horizontal. En las almendras de cáscara dura el módulo de elasticidad fue mayor en la orientación horizontal con un valor de 41 MPa aprox., pero con una diferencia pequeña de un 5% con respecto a lo calculado en la orientación vertical. Las almendras de cáscara blanda, por su parte, también presentaron un mayor módulo de elasticidad en la orientación horizontal con un valor de 19 MPa aprox., correspondiente a un 36% mayor que la magnitud obtenida en orientación vertical.

Las muestras ensayadas corresponden a trozos rectangulares. En este sentido, algo importante de destacar es la dificultad de obtener este tipo de muestras en los tres tipos de semillas estudiadas. En las nueces, el corte en sentido vertical u horizontal no dio lo mismo: horizontalmente las muestras tendían a fracturarse con facilidad, no así en la orientación vertical que su performance fue mucho mejor. Este comportamiento pudo haberse afectado debido a su elevada esfericidad (parámetro calculado en el ensayo de compresión), a la estructura leñosa de la cáscara y las diferencias en grosor del fruto, donde en algunos sectores son más anchos que en otros, estas características lo vuelven muy poco homogéneo con respecto a los otros dos. Si bien en las almendras de cáscara dura la diferencia fue muy pequeña entre ambas orientaciones, también hubo dificultades en el corte para las muestras horizontales. Para este tipo de frutos no existe una estructura leñosa y altamente irregular o diferencias significativas de grosor como en las nueces. Lo mismo sucedió con las almendras de cáscara blanda, aunque en este caso, la dificultad se incrementó más para ambas orientaciones, ya que el grosor de las capas que conforman las cáscaras son muy delgadas.

Otro aspecto a destacar es la forma en la adquisición de datos. Las mediciones se generaban con un golpe leve y seco, en este sentido, en las almendras de cáscara blanda el registro de datos fue altamente complejo, ya que el sistema en varias oportunidades no lograba captar el golpe, debido a lo delgada y pequeña de la muestra, esto generó la repetición del ensayo muchas más veces que en nueces y almendras de cáscara dura. De esta manera y como se puede ver en la figura 4.8, en el espectro amplitud vs frecuencia presentó mucho más ruido que en sus homólogos en nueces y almendras de cáscara dura.

La baja diferencia entre los resultados en términos de módulo de elasticidad para las orientaciones vertical y horizontal de las almendras de cáscara dura guarda mucha relación con la ínfima diferencia en las frecuencias naturales obtenidas. Esto podría dar indicios de una respuesta mucho más estable en ambas direcciones lo que sugiere un comportamiento más isotrópico que el resto.

Con respecto a la desviación estándar, en términos de masa se presentó mayor dispersión en las muestras que presentaron mayor dificultad de corte, en las nueces por ejemplo, se da una dispersión mayor en el conjunto de muestras horizontales de un 61% aprox. Para el coeficiente de variación en la masa, mientras que para las almendras de cáscara dura y cáscara blanda estos valores corresponde a un 31% y un 28% respectivamente para muestras verticales.

Poder obtener el módulo de elasticidad mediante la obtención de las frecuencias naturales de la varios supuestos previos que son antesala a la utilización de esta relación, de partida que el material es lineal, isotrópico y uniforme en su largo, manteniendo sus secciones planas. Las muestras ensayadas, aún cuando fueron cortadas muy pequeñas para intentar desprestigiar curvaturas o irregularidades de la semilla completa, no responden a este criterio de manera completa, lo que conlleva a discrepancias con los reales resultados de esta teoría.

### **6.3 Fuerza de Rotura, Tenacidad, Energía Absorbida, Rigidez**

Una propiedad intensiva calculada para la realización de este ensayo es la densidad. Tanto las nueces como las almendras se asumen como un cuerpo geométrico similar a un elipsoide, esto permite utilizar la relación de volumen para un elipsoide. La densidad se obtiene con un cálculo simple que corresponde a la división entre masa y volumen. Este valor de densidad trae consigo dos errores claves, el primero es que ni las nueces ni las almendras corresponden a elipsoides y segundo, se omiten las cavidades huecas que existen en el interior de los frutos. A pesar de lo anterior, resulta una aproximación bastante útil para ser utilizada y/o considerada.

Las fuerzas de rotura promedio ( $F_r$ ) medidas en el ensayo indican mayores valores en dirección Z para nueces y almendras de cáscara blanda y mayores en dirección X para almendras de cáscara dura. En los tres tipos de muestras coinciden en que la dirección Y se

dan los resultados más bajos, presentando un peor comportamiento mecánico en esta dirección. Los valores aproximados obtenidos en dirección Z son 140N para nueces y 83N para almendras de cáscara blanda, mientras que en X el valor es de 882N para almendras de cáscara dura. Este último es un 520% y 950% mayor que para los otros valores respectivamente.

La rigidez promedio (H) se presenta con los mayores valores en las almendras de cáscara dura, en segundo lugar en nueces y finalmente en almendras de cáscara blanda. En este caso entra en juego el parámetro de deformación a la rotura (Rdp), y según los datos experimentales obtenidos, modificó el máximo presente en las nueces para la dirección Y con un valor de 271N/mm, para el resto se mantiene en las direcciones originales siendo en almendras de cáscara dura 1138N/mm (dirección Z) y almendra de cáscara blanda 115N/mm (dirección X), un 320% y 880% mayor que los valores anteriores respectivamente.

La energía absorbida promedio (Ea) corresponde a un área bajo la curva que se determinó de manera aproximada suponiendo la formación, en los gráficos de fuerza vs desplazamiento, la formación de una línea recta que genera un triángulo rectángulo bajo ella. Claramente esto no se presenta exactamente así pero las diferencias con lo real no es tan significativo. Rdp también juega un rol importante modificando los máximos presentes. Para las nueces y almendras de cáscara blanda el máximo se da en Z con un valor de 47 y 54Nmm, mientras que para las almendras de cáscara dura se da en X con un valor de 443Nmm, un 840% y 700% mayor que los valores anteriores respectivamente. Hay que destacar que las diferencias entre nueces y almendras de cáscara dura se acortaron, esto debido a que en las almendras de cáscara blanda se presentaron Rdp bastante grandes para algunos casos de 1,4mm aprox.

Las Rdp grandes en las almendras de cáscara blanda resultan de gran importancia para los resultados obtenidos en tenacidad promedio (P). Mientras que en las almendras de cáscara dura el máximo se da en dirección X con un valor de 85kPa, en nueces y almendras de cáscara blanda se da en Z con valores de 3 y 28kPa respectivamente. Es aquí donde los papeles se dan vuelta y las almendras de cáscara blanda se imponen ante las nueces. Si bien como ya se dijo, las Rdp son cruciales para este suceso, otro factor que también influye en este cambio es el volumen de las semillas: las almendras de cáscara blanda son mucho más pequeñas que las nueces, unas 7,4 veces más pequeñas, lo que las hace más tenaces.

Pareciera existir una suerte de alternancia entre las semillas: mientras las almendras de cáscara dura presentan valores máximos en dirección Z, por ejemplo, las nueces y almendras de cáscara blanda lo presentan en dirección X y viceversa.

Durante la realización de los ensayos de compresión se presentaron complejidades con las almendras de cáscara blanda. Su comportamiento no presentó un quiebre o rotura abrupta

como lo sucedido en nueces y almendras de cáscara dura. De esta manera varias curvas obtenidas resultaron ser muy inestables generando una interpretación bastante confusa, varias de hecho, se tuvieron que descartar. Lo explicado se puede ver en las figuras 5.10-5.12, donde se aprecia que la curva en nueces y almendras de cáscara dura presentan un comportamiento más o menos lineal y termina con la fractura del material (un rompimiento abrupto), mientras que en las almendras de cáscara blanda la tendencia se aleja de la linealidad. Aún así, se observa un nulo comportamiento plástico en los tres tipos frutos y mostrando una alta fragilidad.

Con respecto a las desviaciones estándar, se decidió clasificar cada ensayo en rangos de masas para aminorar el error, ya que los resultados son bastante dispersos unos de otros. Las mayores desviaciones estándar se presentan en almendras de cáscara blanda como resultado de lo explicado en el párrafo anterior, el coeficiente de variación mayor es de un 32% que se da para el rango más bajo de masas y en la dirección Y para la fuerza de rotura.

## **6.4 Energía Absorbida**

Para caracterizar de mejor manera este ensayo se tomaron las mismas consideraciones y mediciones de parámetros que en el ensayo de compresión, así, las propiedades y parámetros como diámetros, densidad, esfericidad, volumen y superficie de área quedarán definidas bajo el supuesto de considerar a las nueces y almendras como un elipsoide. En este sentido, la densidad presenta los mismos dos errores claves que en el ensayo anterior: (1) ni las nueces ni las almendras corresponden a elipsoides y (2) se omiten las cavidades huecas que existen en el interior de los frutos.

De acuerdo a los resultados obtenidos mostrados en el cuadro 5.19, las nueces presentan la mayor energía absorbida de 3,2 J, en segundo lugar las almendras de cáscara dura con un valor de 2,5 J y finalmente las almendras de cáscara blanda con un valor de 0,8 J. Lo primero representa un 24% y un 270% mayor que los otros valores respectivamente.

Cabe destacar que si bien las nueces presentaron mayores magnitudes, las almendras de cáscara dura no lograron fracturarse en su totalidad durante la realización de los ensayos, de manera que los valores obtenidos representan sólo una fracción de la cantidad de energía real absorbida en la práctica, siendo intuitivamente bastante superior a las nueces.

Como los datos obtenidos no resultaron presentar una dispersión tan alta entre ellos se decidió no clasificar en rangos de masas las semillas, como sí se hizo en el ensayo de compresión. En términos de masa se registró una alta dispersión en almendras de cáscara blanda con un coeficiente de variación del 25%, mientras que en términos de energía absorbida el más alto se presentó en nueces con un coeficiente de variación de un 27%.

## 6.5 Relación Microestructura y Propiedades Mecánicas

De acuerdo a los resultados obtenidos, tanto las nueces como las almendras presentan un comportamiento anisotrópico frente a esfuerzos mecánicos. Un caso curioso es que en las almendras de cáscara dura si bien se presentan en los ensayos IET una estabilidad mayor en resultados obtenidos para diferentes orientaciones, en los ensayos de compresión las fuerzas de rotura presentan gran dispersión de datos para las tres direcciones ensayadas. Aunque si bien se mencionó la posibilidad de un comportamiento más isotrópico debido a la existencia de polígonos, en lugar de fibras tubulares, en la microestructura de las semillas, la respuesta mecánica de las muestras dan indicios de lo contrario.

Es muy claro que la respuesta mecánica del fruto como un conjunto (cáscara más kernel) no se asemejará a la respuesta mecánica de un trozo de ella. Esto se representa muy bien en los ensayos IET y compresión, donde los resultados en IET están muy por debajo de lo cuantificado en compresión. En este sentido, el kernel aporta a la resistencia mecánica de la estructura, siendo un material más blando que amortigua los impactos y vibraciones. Como se ve en la figura 5.4, y como ya se dijo, el kernel en las almendras de cáscara dura presentan un mallado poligonal en su microestructura, geometría que pareciese ser mucho más consistente que la microestructura del kernel de las nueces, la cual presenta más que nada una superficie irregular y rugosa.

Las espirales enrolladas presentes en las almendras de cáscara dura otorgan una alta densidad en las zonas de cavidad poligonal, mejorando su comportamiento mecánico ante esfuerzos externos.

De acuerdo a las figuras 5.16-5.18, las almendras de cáscara dura presentan las mayores densidades, si bien esto resulta lógico dado que el grosor de las cáscaras son bastante gruesas, también a nivel microestructural, se registran estas suertes de *láminas enrolladas*, que aportan mayor consistencia. Esto es un buen piso para soportar de mejor manera cargas externas.

El espectro de densidades de las almendras de cáscara blanda es mucho mayor que las otras dos, abarcando desde los  $0,4 \text{ g/cm}^3$  hasta  $1,0 \text{ g/cm}^3$  aprox., aunque el grosor de sus cáscaras es mucho más delgado. La composición de su microestructura lo vuelve mucho más propenso a fracturarse tempranamente, esto es, a bajas cargas, ya que son básicamente configuraciones planas carentes de una alta concentración de materia.

Las densidades de las nueces están comprendidas entre los  $0,6 \text{ g/cm}^3$  hasta los  $0,8 \text{ g/cm}^3$  aprox., se encuentran dentro del rango abarcado por las almendras de cáscara blanda, aunque soportan cargas más altas, pero mucho menores que las almendras de cáscara dura, esto se puede explicar por su *hibricidad*, donde por un lado existe un área que presenta la misma estructura que las de almendras de cáscara dura, de *láminas enrolladas*, que le

otorgan mayor consistencia y mayor capacidad a soportar cargas, pero por otro lado, existe otra estructura que exhibe una alta porosidad, que lo limita a tener un mejor performance.

En términos generales, hay una relación entre geometrías densas/porosas con respecto a la resistencia mecánica: la capacidad para soportar esfuerzos parece incrementar con geometrías densas y disminuir con geometrías porosas.

En términos macroscópicos, las almendras de cáscara dura presentan secciones circulares huecas en su sección transversal como se muestra en la figura 6.1. Esto podría prevenir de fracturas repentinas del material, ya que actuarían como obstáculos para la propagación de grietas. Por otro lado el grosor de las almendras de cáscara dura es mucho mayor que las presentadas en almendras de cáscara blanda y nueces.



Figura 6.1: Sección transversal de almendras de cáscara dura [Elaboración propia].



# Capítulo 7

## Conclusiones

Este trabajo de título ha caracterizado la microestructura y propiedades mecánicas de nueces y almendras de cáscara dura y blanda. Para esto, se ha realizado un análisis en SEM para estudiar la microestructura tanto de cáscaras como de kernels y tres tipos de ensayos para estudiar su comportamiento mecánico: compresión, IET, Charpy. Para el ensayo de compresión se determinaron diferentes propiedades como los son la tenacidad, energía absorbida y rigidez. Para IET se determinó el módulo de elasticidad mediante la obtención de frecuencias naturales de vibración. Para la prueba de impacto Charpy se determinó la energía absorbida tras someter las muestras a un impacto.

Para el ensayo IET se consideró cortar muestras pequeñas rectangulares para simular geometrías planas, sin embargo, las muestras aún presentaban una no homogeneidad en su estructura y una no isotropía, lo que aportaría a los errores en los resultados.

En el ensayo de compresión se decidió agrupar las muestras entre rangos de masas para disminuir la desviación estándar entre los datos. El número de muestras en almendras de cáscara dura fue menor que el resto debido a la escasa o nula posibilidad de poder acceder a más. En Chile, como ya se especificó en el capítulo 2, hay una gran superficie de hectáreas plantadas de nogales, que corresponde a más de la mitad con respecto al total destinado para plantaciones de frutos secos. Sólo un 14% corresponde a almendros, donde en su mayoría los frutos son almendras de cáscara blanda. Cuando no se está en período de cosechas, es bastante complejo abastecerse de almendras de cáscara dura, situación muy diferente para los otros dos frutos que se pueden encontrar, en Chile, en cualquier época del año.

La prueba de impacto Charpy mostró sorprendentemente resultados inesperados en las almendras de cáscara dura, al no lograr romperlas por completo, lo que arrojó resultados que muestran una absorción de energía correspondiente sólo a una fracción fracturada de la almendra completa. Esto revela que su nivel de absorción de energía es mucho mayor.

La explicación entre la relación de la microestructura y sus propiedades mecánicas se enfoca principalmente en responder, a grandes rasgos, con respecto a la geometría observada y los resultados obtenidos en términos de su capacidad a soportar cargas. Este análisis puede ser complementado realizando otro tipo de estudios, como una simulación en Ansys por ejemplo.

Para futuros trabajos se propone el estudio de nueces *Juglans Nigra*, se ha mencionado que su cáscara resultaría ser bastante más dura que las nueces *Juglans Regia*. Además se

propone repetir la prueba de impacto Charpy en otro modelo de equipo. Por otro lado, se propone el diseño de un material bioinspirado que se asemeje a la estructura de las almendras de cáscara dura, las cuales presentaron los mejores resultados.

Finalmente, y en base a lo expuesto anteriormente, se ha dado cumplimiento al objetivo principal del trabajo de título, se han determinado propiedades relevantes para su caracterización y se han propuesto algunas ideas para futuras investigaciones.

# Bibliografía

- [1] ASTM Committee and Subcommittee, «Standard Test Method for Dynamic Young Modulus's, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration», 2005.
- [2] Armendáriz, E., Carbo, P., López, J., Matínez, E., Roncha, E., Rodríguez, J., Hernández, C., “Ingeniería Bioinspirada”. Tamaulipas, México, Omnia Science, 2014.
- [3] Castro, J., “El cultivo del almendro”. IPA La Platina. Volumen N°12, 10-12 pp., 1982.
- [4] Chilenut A.G., “Almendra”. Chilenut. [online] Disponible en: <http://www.chilenut.cl/index.php?seccion=almendra>. [Acceso 14 feb. 2019].
- [5] Chilenut A.G., “Monthly Shipment Report”. Chilenut. [online] Disponible en: [http://www.chilenut.cl/infonut/02\\_2019/assets/monthly-shipment-report\\_2019.01.pdf](http://www.chilenut.cl/infonut/02_2019/assets/monthly-shipment-report_2019.01.pdf). [Acceso 18 feb. 2019], 2019.
- [6] Chilenut A.G., “Nuez de Nogal”. Chilenut. [online] Disponible en: <http://www.chilenut.cl/index.php?seccion=nuez-de-nogal>. [Acceso 13 feb. 2019].
- [7] Durán, M., “Extracción de la lignina a partir de la cáscara de la almendra”. Proyecto de fin de carrera de Ingeniería Química. Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz, España, 2007.
- [8] Egas, D., “Microscopía Electrónica: Fundamentos, Teoría y Aplicaciones”. Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Escuela Politécnica Nacional, 1998.
- [9] Egerton, R. F. Physical principles of electron microscopy: an introduction to TEM, SEM, and AEM. Springer, pp. 202, 2005.
- [10] Estrada, P., “Fortalezas y debilidades del almendro en Chile”. Redagricola. [online] Disponible en: <http://www.redagricola.com/cl/fortalezas-y-debilidades-del-almendro-en-chile/>. [Acceso 13 feb. 2019], 2018.
- [11] Explora, “José Luis Arias y la Bioinspiración: ‘El concepto lo acuñamos nosotros en 1992’”. Explora Conicyt. [online] Disponible en: <https://www.explora.cl/blog/2016/06/02/bioinspiracion-los-seres-vivos-como-musa-de-la-ciencia/>. [Acceso 14 feb. 2019], 2016.
- [12] Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Microscopía Electrónica y Microanálisis. [online] Disponible en: <http://ingenieria.uchile.cl/investigacion/presentacion/laboratorios/departamento-de-geologia / 86623/laboratorio-de-microscopia-electronica-y-microanalisis>. Universidad de Chile. [Acceso 4 de Abr. 2019], 2019.

- [13] Kursat, H., Kunt, G., Rennie, A., Akinci, I., "Non-Linear FEM-Based hattering Simulation of Shelled Edible Agricultural Products: Walnut Shattering By Nut Cracker Hand Tool". International Journal of Technology and Engineering Studies, pp.84-92, 2017.
- [14] Lemus, G., Ibacache, A., Pinilla, B., Riveros, F., Sellés, G., Ferreira, R., Martínez, L., Ruiz, R., Sierra, C., Bianchini, V., Rojas, C., Reginato, G., Albornoz, A., Marin, M., Latorre, B., Gratacos, E., Zaviezo, T., Valdés, G., Vial, J.,. "Producción de nueces de nogal". Dirigido a profesionales y técnicos del área agropecuaria, Santiago, Chile 2010.
- [15] González, M., "Análisis de fractura en ensayos de compresión para materiales compuestos utilizando pruebas ópticas no destructivas". Tesis para la obtención la Maestría en Optomecatrónica. Centro de Investigaciones en Óptica, A. C., 2017.
- [16] Imce. Theory|IMCE-Your partner in the Impulse Excitation Technique. [online] Disponible en: <http://www.imce.eu/theory> [Acceso 23 Jul. 2018], 2018.
- [17] Instron. Ensayo de compresión - Instron. [online] Disponible en: <http://www.instron.com.ar/esar/our-company/library/glosasry/c/compression-test> [Acceso 19 Nov.2018], 2018.
- [18] Karaj, S, Müller, J., "Determination of physical, mechanical and chemical properties of seed and kernels of *Jatropha curcas* L.". Industrial Crops and Products, (pp. 129-138), 2010.
- [19] Mohsenin, N.N. Physical Properties of Plant and Animal Materials, 2nd ed. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1980.
- [20] MyScope. Electromagnetic lenses, apertures and beam size | Universidad de Sydney. [online] Disponible en: <http://www.ammrf.org.au/myscope/sem/practice/principles/lenses.php> [Acceso 23 Jul. 2018], 2018.
- [21] Oro T., P.J. Ogliari, R.D. de M. A. Castanho, D.A. Barrera y J.M. Block. Evaluación de la calidad durante el almacenamiento de nueces Pecán [*Caryailloinensis* (Wangenh.) C. Koch] acondicionadas en diferentes envases. Grasas y Aceites, pp. 40-46, 2008.
- [22] Ortega, Y., "Prueba de impacto: ensayo Charpy". Revista Mexicana de física, edición 52, pp. 51-57, 2010.
- [23] Parodi, D., "Desarrollo de un material compuesto biodegradable a partir de la utilización del residuo cáscara de nuez". Memoria para optar al título de Diseñadora Industrial, Universidad de Chile, 2016.
- [24] Rayón, E., Ferrandiz, S., Rico, M.I., López, J., and Arrieta, M.P., "Microstructure, Mechanical, and Thermogravimetric Characterization of Cellulosic By-Products Obtained from Biomass Seeds". International Journal of Food Properties, 2015.

- [25] Seyed, T., Seyed M., Manouchehr, H., Faramarz, K., "Comparative analysis o new Persian walnut cultivars: nut/kernel geometrical, gravimetical, frictional and mechanical attributes and kernel chemical composition". *Scientia Horticultrae*, pp. 202-209, 2012.
- [26] Shirmohammadi, M., Fielke, J., "Conditioning Reduces Kernel Damage When Impact Shelling Almonds". *International Journal of Food Engineering*, 2017.
- [27] Techniques. Scanning Electron Microscopy (SEM). [online] Disponible en: [https://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/SEM.html](https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html) [Acceso 23 Jul. 2018], 2018.
- [28] Upv. Microscopia electrónica de barrido: Servicio de Microscopía Electrónica: UPV. [online] Disponible en: <http://www.upv.es/entidades/SME/info/753120normalc.html> [Acceso 2 Dic. 2018], 2018.
- [29] Valenzuela, V., "Optimización de la obtención de harina de nuez (*Juglans Regia*) de la variedad semilla California, Chandler y Serr, y estudio de su estabilidad química en el tiempo". Memoria para optar al título de Ingeniero en Alimentos, Universidad de Chile, 2006.
- [30] Velasco, J., "Los nuevos escenarios para la nuez chilena". *Redagricola*. [online] Disponible en: <http://www.redagricola.com/cl/los-nuevos-escenarios-para-la-nuez-chilena/>. [Acceso 13 feb. 2019], 2017.